



Capítulo XII

**CARACTERIZAÇÃO DO FUNDO DA LAGOA
RODRIGO DE FREITAS POR MÉTODOS ACÚSTICOS
– RIO DE JANEIRO / BRASIL**

Tainá Caram
Helio Heringer Villena
Alessandro Filippo



CARACTERIZAÇÃO DO FUNDO DA LAGOA RODRIGO DE FREITAS POR MÉTODOS ACÚSTICOS – RIO DE JANEIRO / BRASIL

Tainá Caram¹ | Helio Heringer Villena² | Alessandro Filippo³

¹ Departamento de Oceanografia Geológica, Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. tainanapoleao@id.uff.br

² Departamento de Oceanografia Geológica, Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. heliovillena@gmail.com

³ Departamento de Oceanografia Geológica, Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. amfilippo@gmail.com

RESUMO: A zona costeira do estado do Rio de Janeiro, Brasil, possui uma série de lagoas e lagunas costeiras em sua extensão. Através de dados obtidos por métodos acústicos foi possível a caracterização do fundo da Lagoa Rodrigo de Freitas, localizada na capital do Rio de Janeiro. Foram utilizados ecobatímetro dupla frequência e sonar de varredura lateral, com o objetivo de estudar a morfologia da superfície do fundo e identificar alvos e texturas. A batimetria de alta frequência (200 kHz) revela uma lagoa com área rasa junto à margem, descendo em talude até profundidades entre 2 e 3 metros, passando a uma área mais suave até as áreas centrais da lagoa e alguns locais mais profundos na porção sul, devido a dragagens. A batimetria de dupla frequência (33 kHz) permitiu a identificação da base da primeira camada de lama, menos consolidada, e a determinação de sua espessura, principal acumuladora de poluentes na lagoa. O imageamento sonar de alta resolução (400 kHz) levou à identificação de feições e alvos, permitindo demarcar a área de dragagem mais recente pelas marcas da boca de sucção da draga, observar pequenas embarcações naufragadas, estruturas e estacas de ação humana, afloramentos, e objetos no fundo.

Palavras-chave: Geofísica Marinha. Métodos Acústicos. Sonar de Varredura Lateral. Eco Sonda.

CHARACTERIZATION OF THE BOTTOM OF LAGOA RODRIGO DE FREITAS BY ACOUSTIC METHODS – RIO DE JANEIRO / BRAZIL

ABSTRACT: The Rio de Janeiro coastal zone has several lagoons throughout its extension. Through data obtained by acoustical methods it was possible to characterize the bottom of Rodrigo de Freitas Lagoon, in Rio de Janeiro's capitol. The present work characterizes the Rodrigo de Freitas Lagoon through data obtained by acoustic methods. A dual frequency echo sounder and a double sweep sonar were used with the goal of studying the morphology of the bottom surface and identifying targets and textures. A high frequency bathymetry (200 kHz) reveals a lagoon with shallow areas surrounding its margins, descending into a slope to depths between 2 and 3 meters, progressing smoothly into the central areas of the lagoon and deeper regions towards the south portion, where there are regular dredgings activities. The low frequency bathymetry (33 kHz) allows for identification of the base of the first drape of mud, less consolidated, and the determination of its thickness, the main accumulator of the lagoon's pollutants. The high resolution sonar imaging (400 kHz) was perfect for recognizing the features and targets, making it possible to delimit the most recent dredging area by the imprints left by the dredger's suction nozzle, observing small sunken vessels, structures and stakes lefts by human action, outcrops and objects at the bottom.

Keywords: Marine Geophysics. Acoustic Methods. Sonar de varredura lateral. Echo Souders.

INTRODUÇÃO

A Lagoa Rodrigo de Freitas (LRF) é, na verdade, uma laguna costeira, localizada na região Sul da capital do Rio de Janeiro, entre as latitudes 22° 57' 02" S – 22° 58' 09" S e longitudes 043°11'09" W – 043°13'03" W (Figura 1). Atualmente seu formato é de um polígono irregular e, segundo ANDREATA (1997), possui perímetro de 7,2 km, a largura máxima

de 3 km e seu espelho de água é de cerca de 2 km². A paisagem litorânea que se conhece da LRF é produto de eventos regressivos e transgressivos mais recentes, apontados como formadores da atual linha de costa brasileira (LAMEGO, 1974; AMADOR, 1997).

AMADOR (1997) afirma que as lagunas costeiras, como a LRF, foram originadas pelo afogamento de antigas bacias fluviais, resultando em enseadas, baías, estuários e braços de mar,



Figura 1 – Localização da Lagoa Rodrigo de Freitas – RJ/Brasil.

que foram posteriormente barrados por cordões litorâneos (restingas), gerados pelos movimentos regressivo-transgressivos do mar, que ocorreram nos últimos 6.000 anos. As lagoas como de Botafogo, Copacabana e Flamengo (essas hoje extintas), e a laguna Rodrigo de Freitas, estão relacionadas ao máximo transgressivo holocênico que tiveram seu fechamento causado pelo desenvolvimento dos cordões arenosos regressivos.

Inserida num contexto urbano a LRF foi alvo de várias intervenções antrópicas e degradação ambiental que alteraram a conformação natural, gerando mudanças de relevo de fundo, de sedimentação, de renovação de suas águas, de poluição de suas águas e sedimentos, etc.

As marcas deixadas por anos de descaso e intervenções, em épocas passadas, quando a preocupação ambiental não fazia parte da realidade da

humanidade em geral, pode ser mapeada hoje. O desenvolvimento tecnológico propiciou equipamentos e softwares de mapeamento capazes mapear o relevo de fundo da lagoa, a espessura das lamias superficiais e de fazer o imageamento do fundo.

Geologia

As lagoas e lagoas costeiras, se originaram a partir da elevação do nível do mar durante o Holoceno/Pleistoceno e da construção das restingas arenosas através dos processos marinhos, isolando parcial ou totalmente os corpos lagunares do oceano, são feições comuns – ocupam aproximadamente 13% dos ambientes costeiros do mundo – e estão presentes ao longo da costa da maioria dos continentes, desde altas a baixas latitudes (FERNANDES, 1996; AMADOR, 1997).

No estado do Rio de Janeiro havia mais de 300 lagoas costeiras, porém algumas foram aterradas como as de Copacabana, Flamengo e Botafogo, zona sul da cidade do Rio de Janeiro, no processo de urbanização e a LRF foi a única que o resistiu (AMADOR, 1997; LOUREIRO, 2010).

De modo geral, possuem baixa taxa de renovação de águas e longo tempo de residência, além disso são ambientes efêmeros na escala de tempo geológico e, para existirem, dependem principalmente das flutuações do nível do mar e da interferência humana. Devido a baixa fonte de energia como marés, ondas e correntes, esses ambientes podem ser caracterizados como uma área de alta taxa de acumulação de sedimentos de granulometria fina, ricas em materiais orgânicos de origem autóctone e alóctone (MARTENS, 1982; MACHADO, 1989; FERNANDEZ, 1994).

A ligação das lagoas com o oceano é feita através de canais ou barras, seu tamanho e quantidade dependem do volume de água – controlado pela variação de marés, número de marés diárias e descarga fluvial – que flui por eles em um certo intervalo de tempo. Outra conexão com mar pode ocorrer através de águas subterrâneas, são mais significativas em lagoas cujo canal encontra-se assoreado durante longos períodos e/ou em casos que a lagoa apresenta alta porosidade (LOUREIRO, 2010).

Segundo KJERFVE & MAGILL (1989) as lagoas costeiras podem ser geomorfologicamente classificadas quanto às características dos canais de conexão com o oceano:

- a) Lagoas sufocadas: caracterizadas por uma única ligação estreita com o mar, portanto possui alto potencial de acumulação de sedimentos, de eutrofização e de poluição. A força da maré é dissipada dentro do canal e sua dinâmica é definida essencialmente pelos ventos.
- b) Lagoas restritas: normalmente possui dois ou mais canais de ligação que permanecem conectados com o mar em tempo integral, logo ficam mais submetidos às variações das marés – em relação as lagoas sufocadas.
- c) Lagoas abertas: caracterizadas pela presença de numerosas enseadas e de um ou mais canais, portanto possuem troca intensa

da água da laguna com o oceano e, consequentemente, menor tempo de residência da água de todos os sistemas e valor de salinidade próximo do oceânico.

O padrão de circulação é pouco afetado pelo aporte de água doce, como a comunicação com o mar é restrita, os principais movimentos de água na laguna ocorrem na forma de correntes de maré ou ondas geradas pelo vento. Portanto são ambientes muito sensíveis que sofrem diretamente com as atividades humanas como a construção de barragens e reservatórios de água na bacia de drenagem – que servem de armadilha para os sedimentos necessários à formação da barreira/restinga –, agricultura e urbanização dos solos – e aumentam o grau de erosão e consequentemente a chegada de sedimentos às lagoas, que sofrem assoreamento e diminuição da qualidade das águas em função do aumento da turbidez das águas – e o lançamento de esgoto doméstico sem tratamento (BOGGS, 1995; PATCHINEELAM, 2000; RANGEL, 2002).

A Bacia de drenagem da LRF pode ser dividida em dois compartimentos geomorfológicos distintos: o Maciço Costeiro – encostas que drenam os rios que descem do Maciço da Tijuca – e Planície Costeira – área que vai do sopé das encostas do maciço até o mar.

A bacia hidrográfica da LRF abrange os bairros de Ipanema, Lagoa, Humaitá, Jardim Botânico e Gávea e drena as águas da vertente sudeste da Serra da Carioca. Os divisores de drenagem que limitam a área da bacia (Figura 2), vão desde o Arpoador, passam pelos morros do Cabrito e Saudade, até os morros do Corcovado, Alto do Sumaré, Pico da Carioca, morro do Queimado, passando pela Mesa do Imperador, Morro Dois Irmãos, o Alto Leblon e voltando até a praia (PEREIRA, 2009). Três rios conhecidos como Rainha, Macacos e Cabeça, desembocam através de um único canal denominado das Tábuas nas proximidades da ilha do Piraquê.

Duas ilhotas artificiais ocorrem nessa lagoa, a do Piraquê, no lado oeste, e dos Caiçaras, ao sul, onde funcionam hoje, clubes recreativos e esportivos denominados Clube Naval ou Piraquê e Clube dos Caiçaras, respectivamente. A comunicação da lagoa com o mar se faz principalmente através do canal do Jardim de Alah (CJA) que delimita os bairros do Leblon e Ipanema (NETO, 2010).

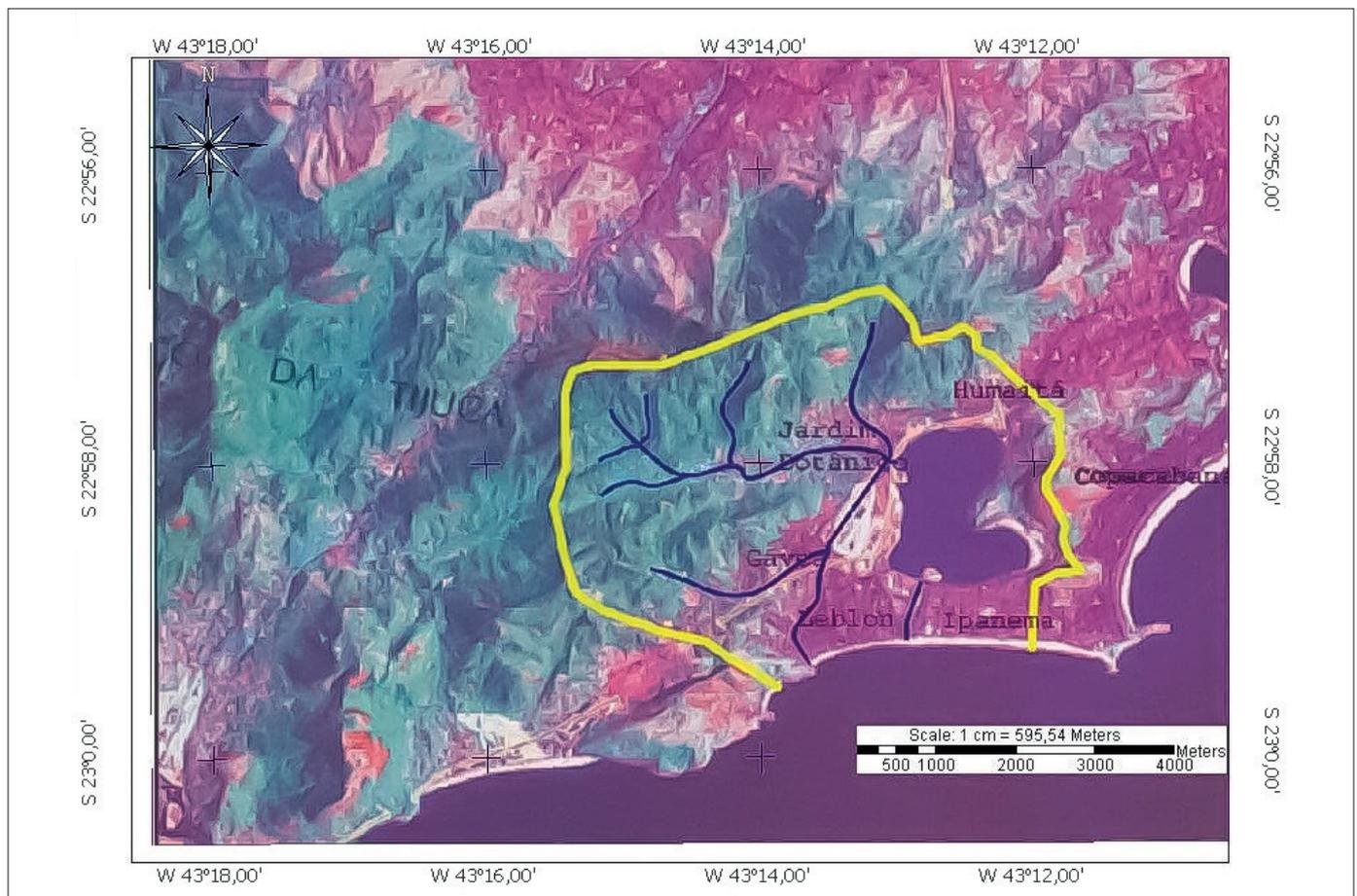


Figura 2 – Delimitação da bacia de drenagem da Lagoa Rodrigo de Freitas (Modificado de PEREIRA, 2009).

A rede de drenagem que chegava à Lagoa também foi modificada, principalmente através da canalização de rios e retificação de canais, alterando, portanto, a área de contribuição da bacia que, num primeiro momento, ocasionou a diminuição da quantidade de sedimentos que chegava à Lagoa. À medida que a densidade urbana foi aumentando, cresceu também o despejo de esgoto e lixo na lagoa, assim como houve um grande declínio na qualidade dos sedimentos despejados na lagoa (NETO, 2010).

Canal Jardim de Alah

A LRF se enquadra na categoria de lagoa sufocada, pois apresenta uma única via de comunicação com o mar, o CJA. Como tem uma baixa taxa de troca de águas com o oceano, suas massas d’água tem grande tempo de residência – podendo chegar a 365 dias em pontos mais afastados do CJA (DE PAULA, 2009).

Em função desta comunicação restrita com o oceano, as principais forças hidrodinâmicas são

o vento, a maré meteorológica, a descarga fluvial e, em menores proporções, a maré astronômica (DE PAULA, 2009).

O CJA é um canal artificial, fez parte de um plano de projeto de saneamento do Estado, com a primeira etapa da obra concluída em 1921. Suas dimensões eram aproximadamente 140 m de comprimento e 10 m de largura, com o formato retangular. Em 1942 houve seu prolongamento, para as atuais; aproximadamente 835 m e largura variando entre 10 e 18 m (DE PAULA, 2009).

É um canal relativamente raso, cerca de 0,7 m, seu fluxo é dado a partir do fluxo da maré – com controle da comporta – e sua soleira foi construída num nível inferior ao da baixa mar, na cota de -0,88m (*Datum* Ibitituba). Todavia é um canal instável hidraulicamente, encontrando-se constantemente assoreado devido à ação do transporte litorâneo de areia (Figura 3), resultante das correntes de contorno na região das praias de Ipanema e Leblon, necessitando de dragagens para ser desobstruído (LOUREIRO, 2010; NETO, 2010).

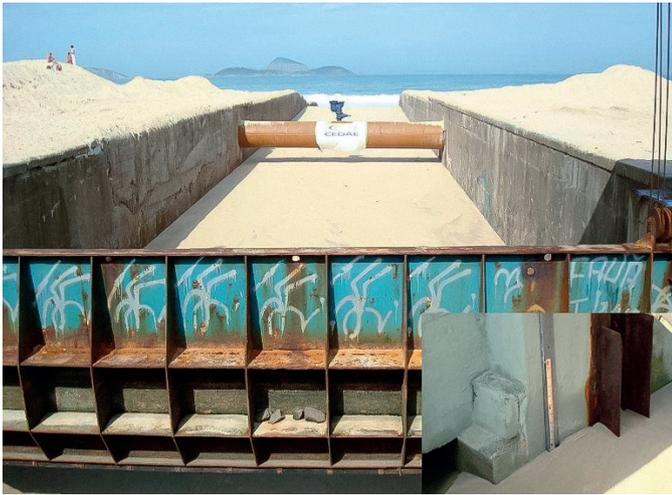


Figura 3 – Foto tirada em maio de 2009 na embocadura do canal Jardim de Alah na praia, completamente assoreado por areia, sendo esse cenário predominante (DE PAULA, 2009).

Em 1997 o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Lisboa, Portugal, encomendado pela prefeitura, apresentou o projeto de instalação de guias-correntes na entrada do canal para evitar o assoreamento causado pela ação das ondas na zona de arrebentação. Durante o processo de licenciamento das obras, em 2000, a própria prefeitura sugeriu a alternativa de fazer a ligação com o mar através de um feixe de dutos afogados – que irá aumentar a seção de comunicação lagoa-mar (Figura 4). Todavia nenhum dos projetos foi adiante (DE PAULA, 2009).

Degradação ambiental

A LRF sofre com aterros desde 1808. No ano de 1920 seu espelho d’água ainda chegava às ruas Humaitá e Marquês de São Vicente, que já integrava

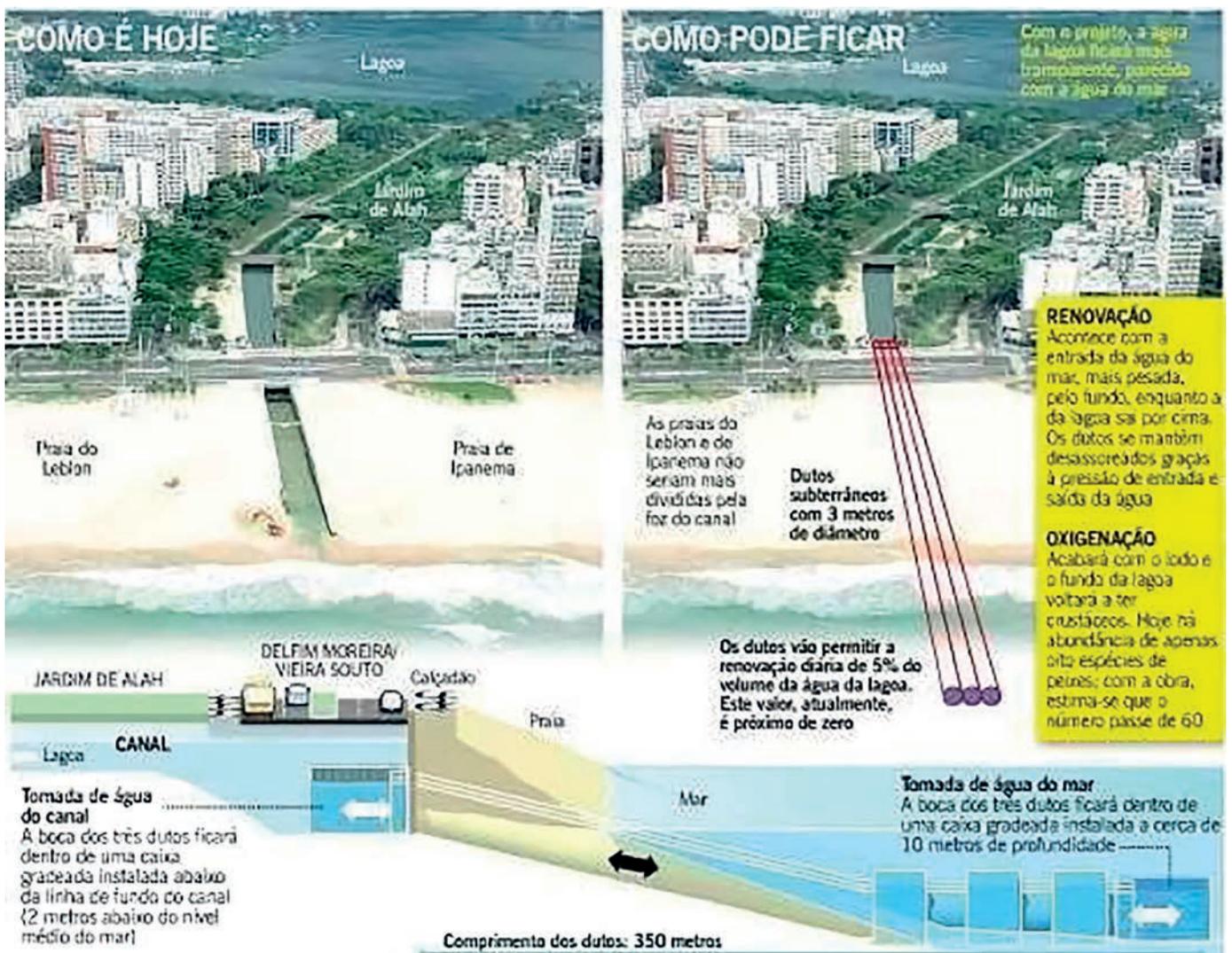


Figura 4 – Esquematização do cenário atual da área em torno do canal Jardim de Alah e o futuro cenário após a instalação dos dutos afogados (DE PAULA, 2009).

uma nova e extensa área nobre da cidade. Em 1970 foi realizado o último aterro para a construção do Parque do Cantagalo, na margem sudeste da lagoa. Esse último aterro foi executado com sedimentos dragados da lagoa, nas proximidades da localização do parque. Esta dragagem, entretanto, foi realizada uma uniformidade de remoção de sedimentos, o que gerou fendas profundas na batimetria da área dragada e quase não existe vida nessas áreas.

Em 1975 a orla da Lagoa Rodrigo de Freitas foi tombada pelo patrimônio histórico e nos anos 80 começaram as preocupações para a despoluição (MACHADO SOARES *et al*, 2012).

A Figura 5 ilustra a perda da área da LRF por aterros.

OBJETIVO

O presente trabalho tem como finalidade abordar características da LRF utilizando métodos geofísicos acústicos de ecobatimetria monofeixe e sonar de varredura lateral como ferramentas para caracterização e interpretação de morfologias da superfície do fundo da região.

Como objetivos específicos deste estudo temos:

- determinar a batimetria da lagoa a partir dos dados monofeixe de 200 kHz;
- mapear a profundidade da base da camada de lama superficial, mais fluida, a partir dos dados monofeixe de 33 kHz;
- estabelecer a espessura da lama superficial baseada na diferença entre a batimetria (200 kHz) e a base da camada de lama superficial (33 kHz);
- mapear feições no fundo da lagoa e identificar alvos, quer sejam naturais ou antrópicos.



Figura 5 – Perda de área da Lagoa Rodrigo de Freitas devido a aterros (Adaptado pela autora de MACHADO, 2009).

MATERIAL E MÉTODOS

Planejamento do levantamento

O planejamento inicial foi feito através do software Hypack com linhas paralelas N-S com espaçamento de 20 metros entre elas e linhas de controle E-W com espaçamento de 200 m (Figura 6). Para realizar a aquisição foram levados os equipamentos listados na Tabela 1.

O levantamento ocorreu nos dias 02 e 03 de março de 2021 a bordo da embarcação “Lagoa IV” (Figura 7), na qual foi montada toda a estrutura para o funcionamento dos equipamentos – nos dias da

Tabela 1 – Equipamentos a serem levados para os dias de aquisição de dados.

Equipamento	Quantidade
Bateria	06
Cabos	–
DGPS	01
Ecobatímetro	01
Ferramentas	–
Marégrafo	01
Notebook	03
Placa de Aferição	01
Régua de Maré	01
Sonar de Varredura Lateral	01

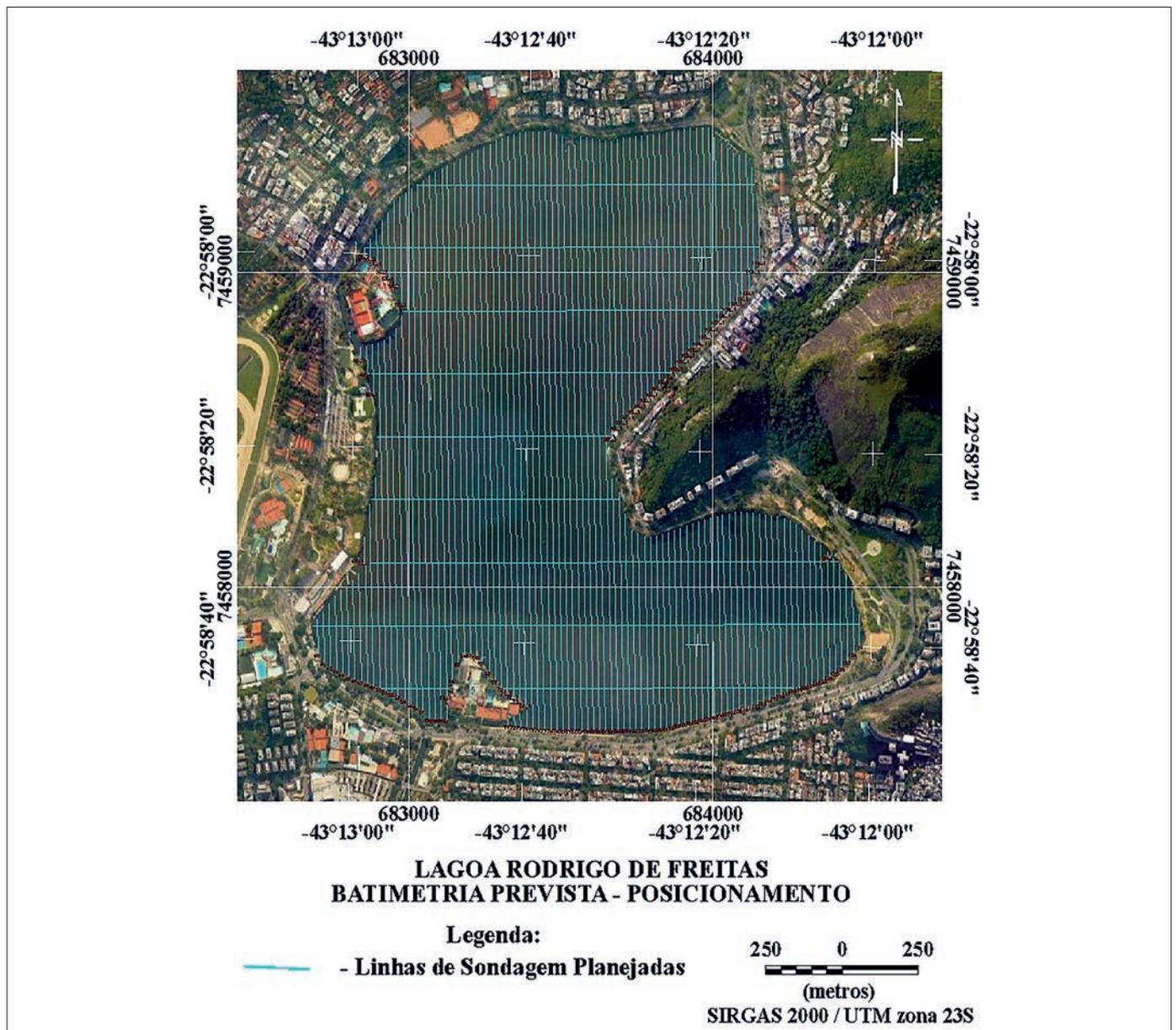


Figura 6 – Mapa de planejamento das linhas de navegação do levantamento geofísico.



Figura 7 – (A) Embarcação Lagoa IV. (B) Embarcação com os equipamentos utilizados na aquisição de dados.

aquisição de dados estava ocorrendo os treinos dos atletas da Competição Sul-americana de Remo, além de haver as raias, houveram restrições no horário para navegar.

Foram feitas as linhas transversais paralelas ímpares do mapa de planejamento, as linhas de controle do planejamento e a linha de contorno para complementar os dados batimétricos e permitir o imageamento sonar da margem da lagoa. A velocidade de navegação ficou entre 2,5 e 3 nós.

Navegação e posicionamento

O posicionamento foi feito através do DGPS Hemisphere R130 – possui precisão submétrica e correção diferencial por satélite (banda L) – junto a um notebook com o software de navegação e aquisição dos dados, Hypack 2019 (Figura 8). A antena, a priori, estava configurada para o SVL, portanto a mesma foi fixada na haste do SVL e realizou-se os offsets para a haste do transdutor do ecobatímetro no software Hypack.



Figura 8 – Antena DGPS Hemisphere R130 utilizada na aquisição de dados para os dados de ecobatímetro monofeixe e sonar de varredura lateral. (B) Antena DGPS montada fazendo a aquisição de dados.



Figura 9 – Sensor de Movimento SMC S-108 que foi utilizado nos dias do levantamento.

Para maior precisão instalou-se o compensador de ondas SMC S-108 (Figura 9) para corrigir os efeitos de ondas (*heave*) e através de uma porta serial o sensor foi configurado no Hypack chamando a DLL e optando por TSS1. A correção de *heave* é a correção do eixo z, ou seja, a subida e descida da embarcação dada em cm, como utilizou-se de um ecobatímetro monofeixe as correções de *pitch* e *roll* não são necessárias.

Maré

A estação de maré oficial para redução do efeito de variação de nível da lagoa localiza-se no Clube Naval Piraguê. Foi feito contato com a Comodoria do clube para solicitar autorização de instalação de marégrafo na estação. A solicitação, entretanto, foi negada. Assim sendo, optou-se pela instalação do marégrafo no cais da colônia de pescadores.

Esta alteração da estação maregráfica não permitiu o referenciamento dos dados batimétricos em relação ao Nível de Redução (NR) da lagoa, sendo feita apenas a medição da variação de nível ao longo dos dias de sondagem. Este procedimento forçado inviabilizou a tentativa de comparação batimétrica com dados pré-existentes que era prevista, visto que essas batimetrias são referenciadas ao NR da estação maregráfica oficial.



Figura 10 – Marégrafo de pressão RBR Virtuoso.



Figura 11 – Marégrafo e régua de maré instalados no cais da Colônia de Pescadores da Lagoa Rodrigo de Freitas.

Para a aquisição dos dados de maré foi utilizado o marégrafo de pressão RBR Virtuoso (Figura 10), uma régua de maré graduada e um suporte de madeira.

O marégrafo foi fixado na vertical com o sensor virado para baixo na estrutura de um cais que não foi utilizado durante os dias de coleta na colônia de pescadores – não possui acesso ao público – junto a uma régua de maré graduada e uma madeira para dar suporte, como mostra a Figura 11.

Ecobatimetria

A aquisição dos dados foi feita a partir de dupla frequência (33 e 200 kHz) com o ecobatímetro monofeixe Midas Surveyor- Valeport (Figura 12) com acurácia de $\pm 1\text{cm}$ ou $\pm 0.02\%$ e resolução de 1cm (200 kHz)/ 4cm (33 kHz), sendo o eco conectado a um notebook com o software Hypack 2019 – que integrou os dados de profundidade com os de posicionamento da antena DGPS.

Calibrou-se a velocidade do através de uma placa de aferição no início e fim de cada dia de levantamento. Foi escolhido um ponto representativo da área da LRF e desceu-se a placa de aferição abaixo do transdutor até o fundo para ser feita a calibração (Figura 13). Após a aquisição os valores foram inseridos no ecobatímetro.

Sonar de varredura lateral

Para aquisição dos dados sonográficos na LRF utilizou-se o SVL Starfish 452F do fabricante Trittech – opera na frequência de 450 kHz e resolução

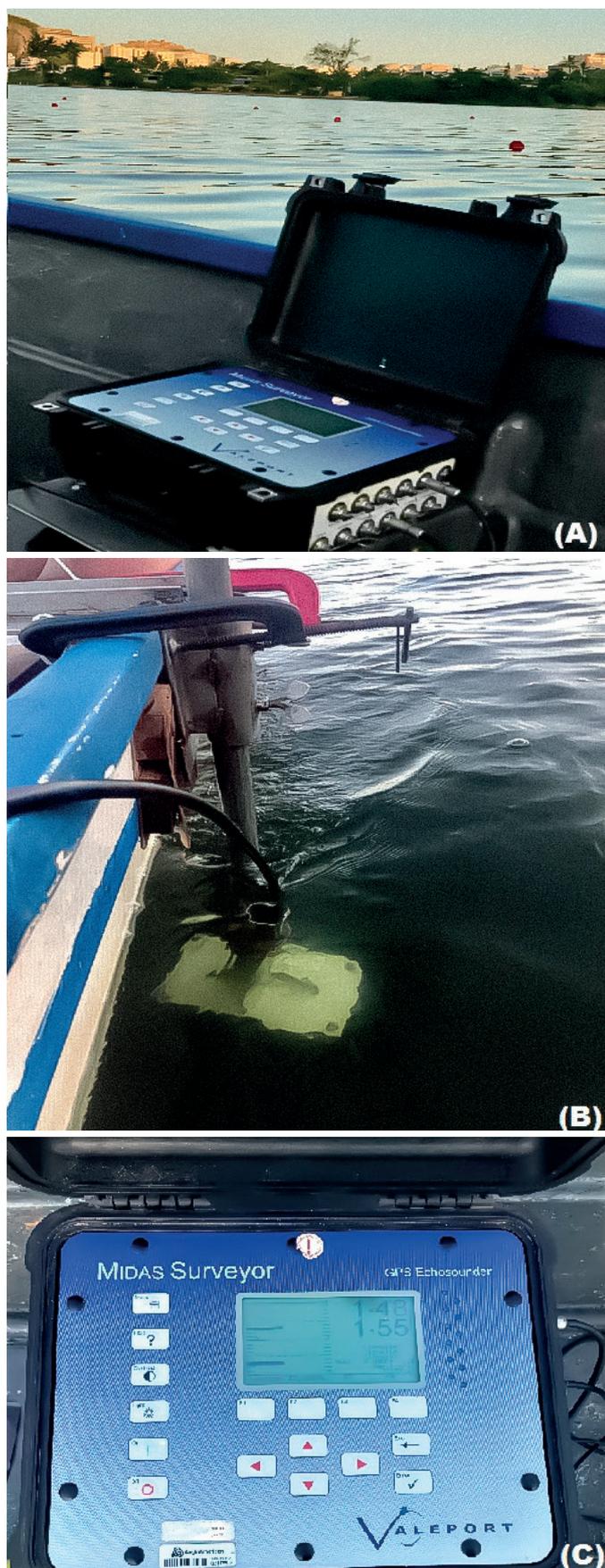


Figura 12 – (A) Ecobatímetro monofeixe de dupla frequência Midas Surveyor - Valeport. (B) Transdutor do ecobatímetro Midas Surveyor - Valeport. (C) Painel do ecobatímetro Midas Surveyor Valeport.

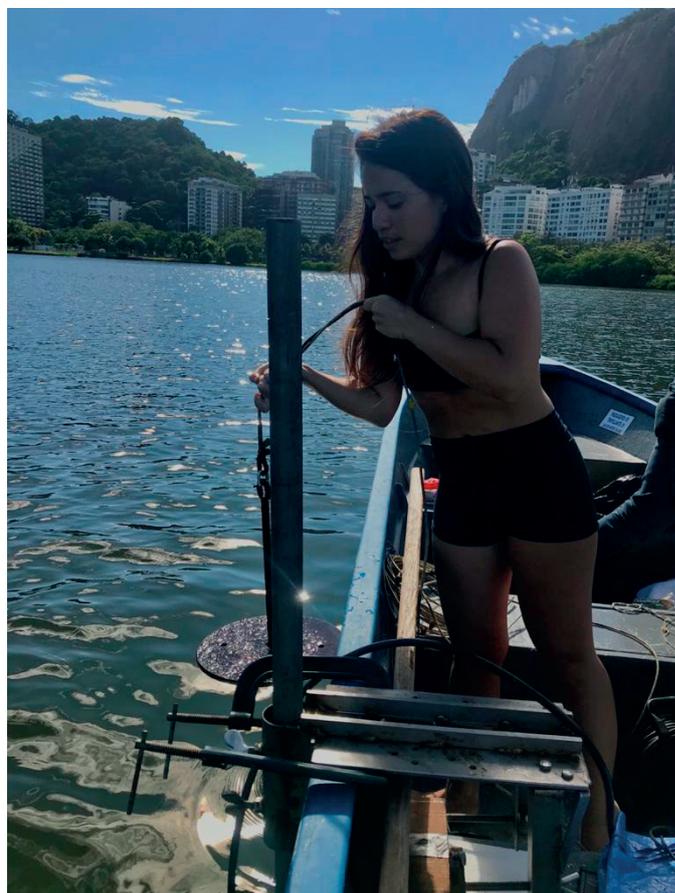


Figura 13 – Lançamento da placa de aferição.

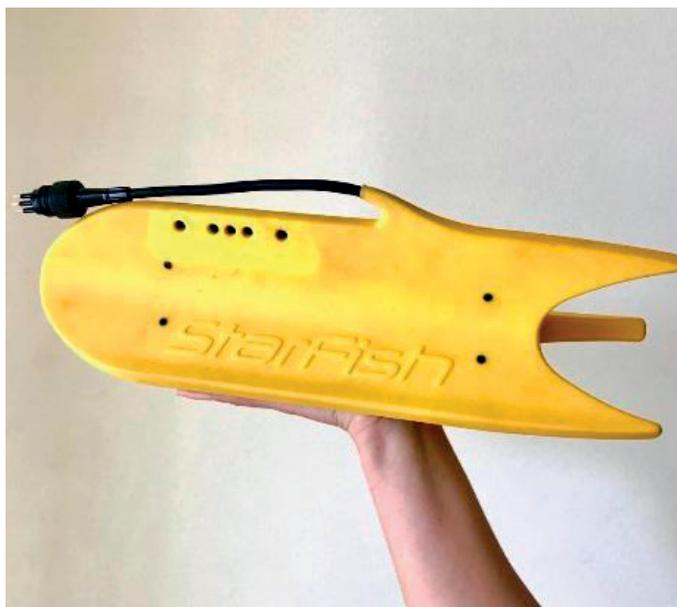


Figura 14 – Sonar de varredura lateral da fabricante Tritech.

de 0,8° (Figura 14) e 01 notebook com software Starfish Scanline.

O SVL foi fixado a boreste da embarcação, com abertura angular (escala de varredura) de 50 m para cada lado. Enquanto ocorria a navegação, os

dados do SVL foram integrados com o posicionamento e hora do DGPS (Figura 15).

RESULTADOS

Marégrafo

O marégrafo utilizado faz a medição da *profundidade (m)*, *pressão atmosférica (dbar)*, *pressão do mar (dbar)* e *o declive da maré (m/s)*. A cada minuto é feita uma medição e a cada 5 minutos uma média é feita a partir dessas 5 medições anteriores. Ou seja, o equipamento fornece no arquivo final 1 medição a cada 5 minutos. Para a realização desse trabalho o download dos dados do marégrafo foi realizado através do software Ruskin e depois processados e analisados no Excel.

Dentre as medidas fornecidas pelo equipamento, só foi utilizada a profundidade (m) – profundidade que está acima do sensor. A essas profundidades medidas, foi adicionado 0,31m e 0,305m – para os valores do primeiro e segundo dia de coleta, respectivamente, referente a profundidade medida abaixo do sensor. Posteriormente foi feita uma média dessas profundidades e, em seguida, foi feito o cálculo para

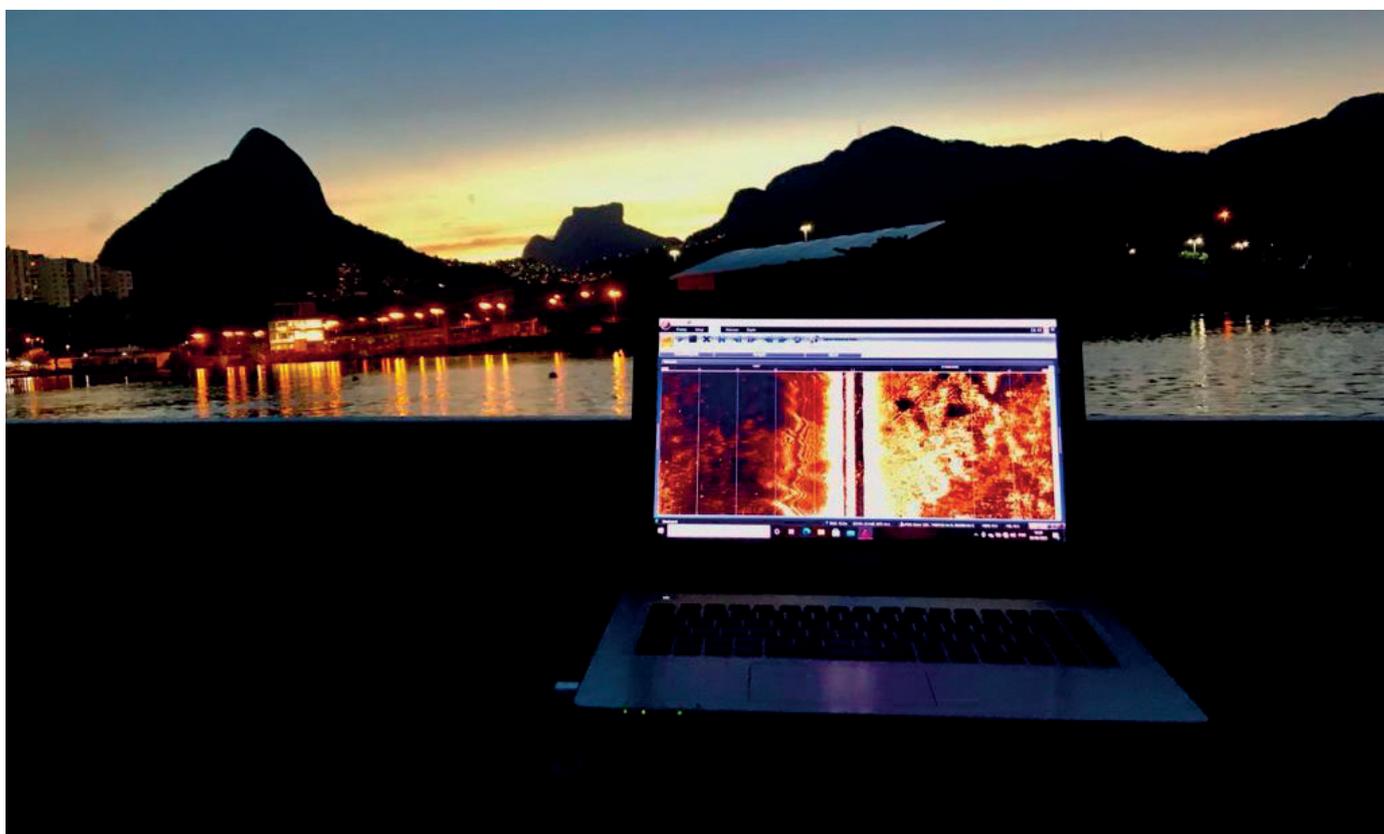


Figura 15 – Aquisição dos dados de Sonar de varredura lateral na Lagoa Rodrigo de Freitas.

Tabela 2 – Média das profundidades de maré obtidas dos dois dias de levantamento e a maior variação em torno da média.

	Média (cm)	Maior Variação (cm)
Dia 1	64,5	1,7
Dia 2	66,7	1,0

ver o quanto a maré variou em torno da média, ou seja, a profundidade subtraída da média, conforme mostra a Tabela 2.

Os valores encontrados no primeiro dia são muito pequenos, não ultrapassaram 2 cm da média e no segundo dia essa variação foi ainda menor, não ultrapassou 1 cm, como mostram os gráficos da Figura 16. A correção de maré no processamento dos

dados batimétricos no Hypack foi desprezada, visto que normas batimétricas/hidrográficas determinam as profundidades usando uma casa decimal após o metro, ou seja, 10 cm. Assim sendo, a linha de arredondamento dos valores é 5 cm, bem superior aos valores medidos na lagoa nos dias de coleta.

Na Figura 16, o gráfico A indica que a coleta de dados começou em um momento de maré vazante

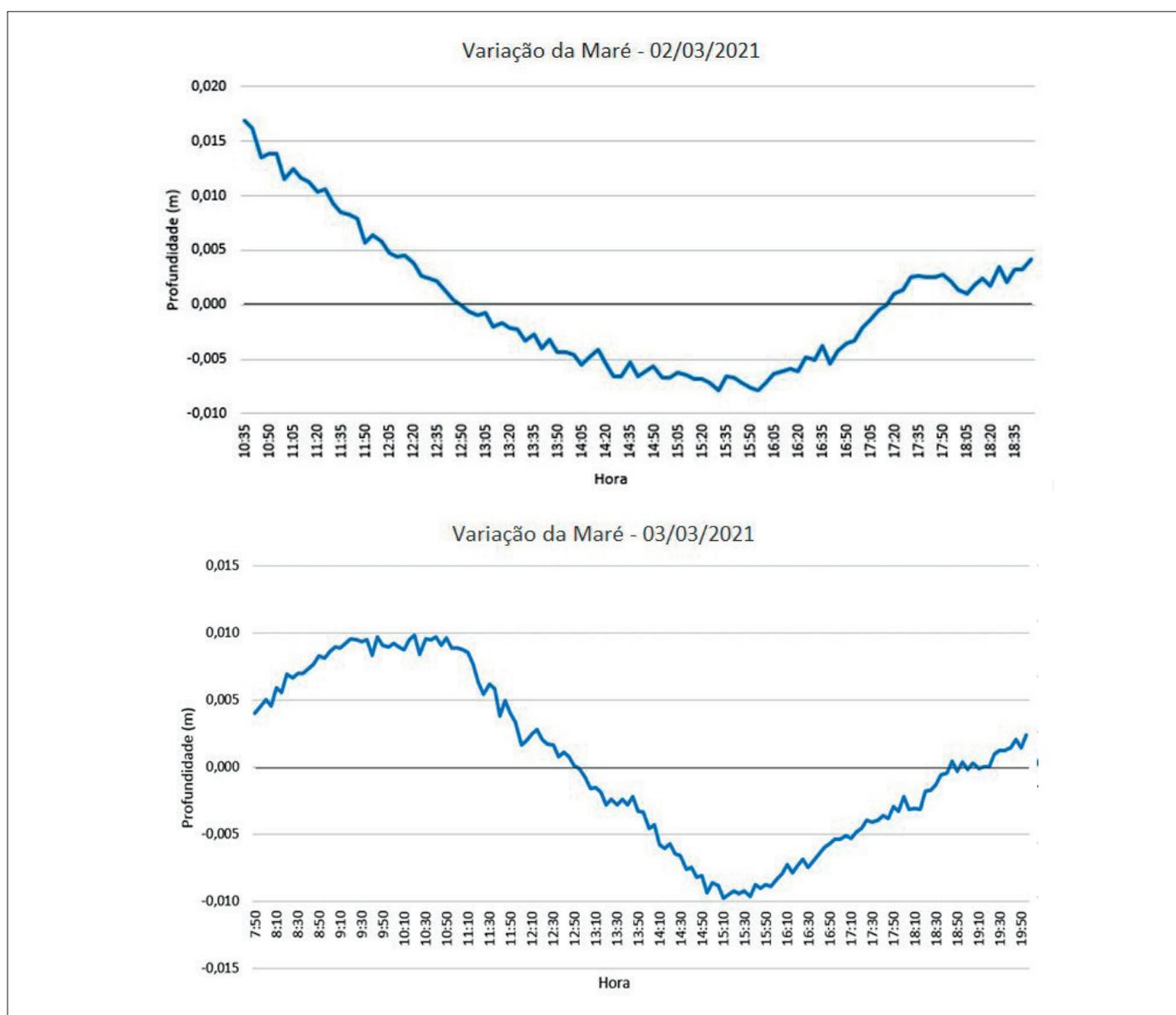


Figura 16 – Gráficos da variação da maré em torno da média das profundidades obtidas através do marégrafo de pressão nos dias da campanha amostral.

e por volta das 16 horas começou um período de maré enchente e o gráfico B temos início da coleta em maré enchente, por volta de 11:30 horas começou a vazante e em torno de 15:30 horas começou uma enchente.

Ecobatímetro

O processamento dos dados do ecobatímetro foi iniciado através do software Hypack 2019.

Após analisar e eliminar os spikes de cada linha de sondagem, o arquivo foi salvo no formato .xyz e a partir do mesmo foi feito um “sort” com células de raio de 2m, ou seja, a cada 2 m há um valor de profundidade.

Os dados processados e exportados do Hypack 2019, tanto de 200 kHz, quanto de 33 kHz foram importados no software Oasis Montaj.

Os dados batimétricos de 200kHz, que nos fornece o perfil de fundo na linha navegada, gerou um database com total de 24.100 pontos batimétricos georreferenciados.

Em seguida, foi feita a gridagem para a geração do Modelo Digital do Terreno, no caso do Geosoft, um arquivo “.grd”. Para a interpolação dos dados, dentre os métodos existentes no Oasis Montaj, selecionou-se o de Mínima Curvatura, com tamanho de célula de 2 metros.

Para efeito de controle de qualidade da gridagem, calculou-se o erro percentual, que é o módulo da diferença entre a profundidade calculada no grid, obtida pela função “Sample a Grid” do Oasis Montaj, para os mesmos pontos de coordenadas em que houve medição da profundidade com o transdutor de 200kHz, sendo esse valor dividido pela profundidade medida e multiplicado por 100. Para termos uma coluna de percentual.

Procedeu-se à ordenação dos dados, pela função “Sort by One Channel” do Oasis Montaj, selecionando-se o canal de Erro Percentual de forma crescente. Assim os maiores valores aloca-se no final do database. Estipulou-se 5% como o valor aceitável de erro para mais de 95% dos dados, buscando-se uma aproximação com

as diretrizes hidrográficas. Observa-se o fiducial anterior ao valor de erro 5% e divide-se este número fiducial pelo fiducial total dos dados e multiplica-se por 100, tendo-se o percentual de dados que atendem a condição. Dos 24.100 dados obtidos 23.847 tiveram erro percentual menor que 5%, totalizando 98.95% de dados aceitáveis. Considerou-se o grid aprovado.

Batimetria

O Mapa Batimétrico resultante (Figura 17) exibe o relevo batimétrico da LRF e as profundidades médias da LRF variam entre 3-3,5 m, com pequenas depressões nas suas porções SE e SO próximas à margem, com profundidades de até 7,58 m. Essas depressões são consequências de dragagens realizadas na década de 70 para o aterro e construção do Parque dos Patins e do Cantagalo (DE PAULA, 2009; NETO, 2011)

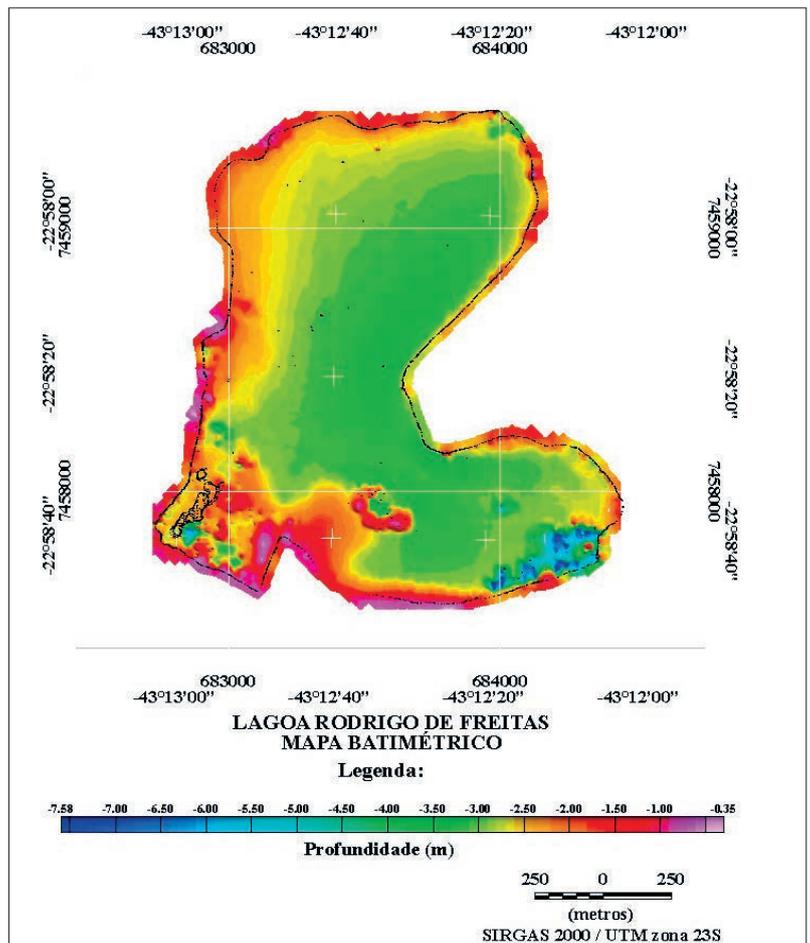


Figura 17 – Mapa de batimetria da Lagoa Rodrigo de Freitas utilizando ecobatímetro monofeixe – 200 kHz.

Gradiente

A Figura 18 mostra o mapa de gradiente e a partir dela é possível observar que os locais indicados pelo tom verde possuem menor gradiente e quando aumentam, passam pelos tons amarelo, laranja, vermelho até o rosa claro, onde há o maior gradiente.

Base da Camada de Lama Superficial

O passo seguinte foi a elaboração do grid da base da camada superficial de lama a partir dos dados batimétricos de 33 kHz, que penetra na lama mais fluida da superfície do fundo da lagoa.

Para elaborar o grid da camada superficial de lama é feita a importação dos dados 33kHz, exportados do Hypack com o mesmo raio de 2m e avaliada a estatística geral.

Seguiu-se a gridagem dos dados 33kHz pelo método mínima curvatura, utilizando-se o mesmo cell size dos dados

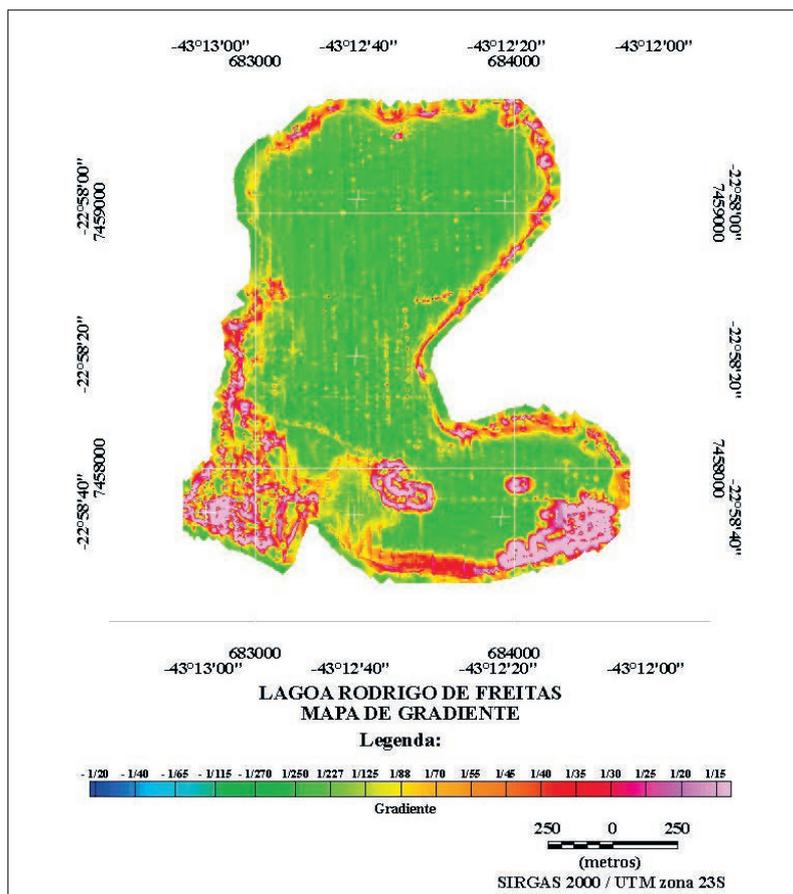


Figura 18 – Mapa de Gradiente da Lagoa Rodrigo de Freitas.

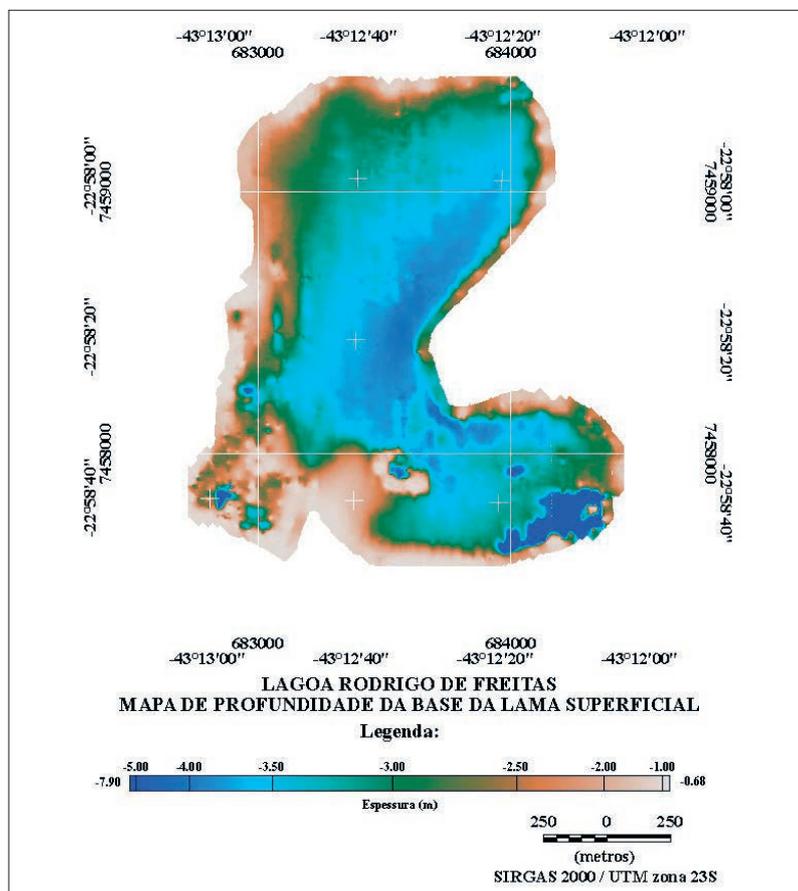


Figura 19 – Mapa de Profundidade da Base Superficial de Lama.

batimétricos 200kHz. O controle de qualidade da gridagem teve o mesmo procedimento descrito para a batimetria. Dos 24.100 dados obtidos 23.847 tiveram erro percentual menor que 5%, totalizando 98.83% de dados aceitáveis. Considera-se o grid aprovado. O Mapa de Profundidade da base da Lama resultante (Figura 19) exibe o relevo da base da lama na forma de grid colorido sombreado.

Como o mapa exibe, as menores profundidades da camada de lama possuem coloração branca, passando pelos tons marrom, verde e azul claro até chegar em um tom mais escuro de azul que representa as maiores profundidades.

Espessura da Camada de Lama

A manutenção dos critérios de gridagem para os dados de 200 kHz e 33 kHz permite a comparação entre os grids para determinação da espessura da camada de lama superficial. Esse cálculo é feito com a

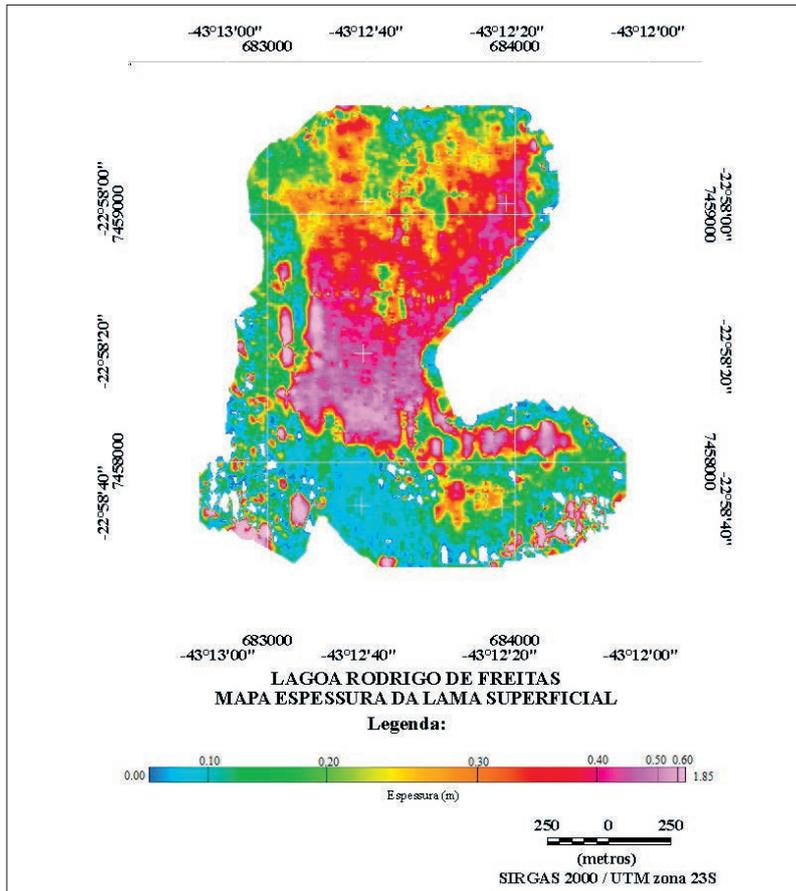


Figura 20 – Mapa da espessura de Lama Superficial.

ferramenta “Grid Math” do Oasis Montaj, com a qual pode-se realizar operações matemáticas entre grids da mesma localização e com mesmo tamanho de célula (cell size). Procedeu-se a subtração entre do grid batimétrico do grid da base da camada de lama superficial, gerando-se o grid de espessura sedimentar, mantendo-se valores negativos, visto que este volume está abaixo da superfície do fundo da lagoa. Foi gerado o Mapa de Espessura Sedimentar da Camada Superficial de Lama (Figura 20).

A maior espessura de lama está representada pelo tom mais rosado claro e as menores espessuras são representadas pelos tons azuis escuros. Como pode-se observar, a região central da LRF possui as maiores espessuras e a porção sul possui menores espessuras de lama, com aumentos de espessura localizados em depressões batimétricas.

Por fim, foi feito o cálculo do volume total da lama superficial mapeada na lagoa, utilizando a ferramenta “Grid Volume”. Entrou-se com o grid de espessura da

camada de lama e o nível base, ou seja, 0 metros, que é o topo do grid de espessura. O software calcula volumes acima e abaixo do nível de referência e, no caso, só tivemos o nível abaixo, total de 530.121,76 m³.

Sonar de Varredura Lateral

O processamento dos dados do SVL foi feito pelo software SonarWiz 7®, desenvolvido pela empresa Chesapeake Technology e cedido pela empresa A2 Marine Solutions.

Para iniciar o processamento foi criado um projeto e inserido o sistema de coordenadas a partir do próprio arquivo. Posteriormente as linhas de sondagem foram importadas.

Posteriormente, para uma imagem mais nítida e detalhada fez-se as correções nos dados, preservando a geologia local. A primeira correção foi a correção de ganhos e a remoção da coluna d’água (*bottom track*) e, em seguida, aplicação dos filtros EGN e Nadir – respectivamente.

A Figura 21 exibe o mapa do mosaico sonográfico gerado a partir do processamento dos dados.

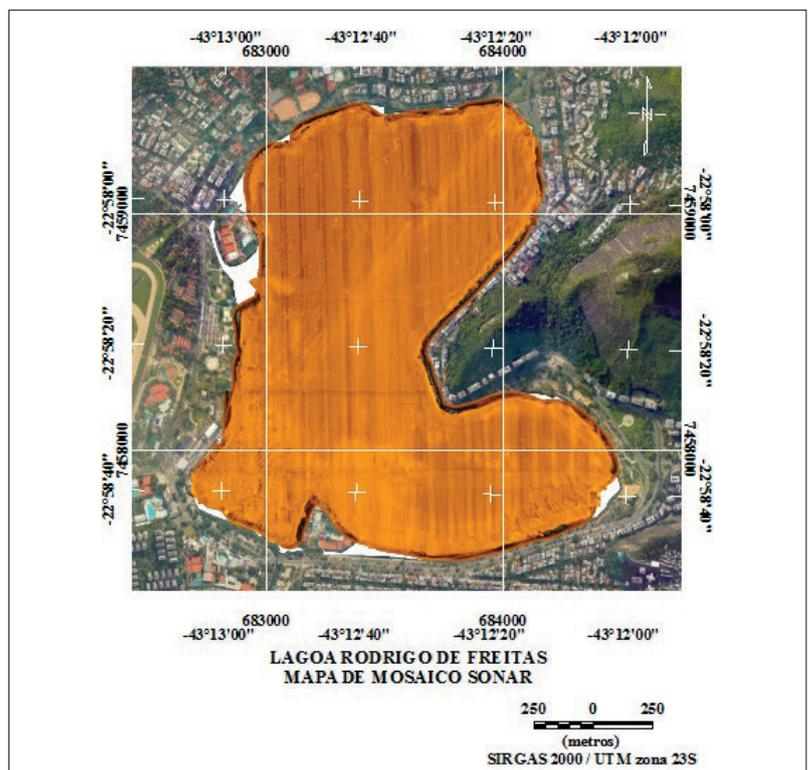


Figura 21 – Mapa do Sonográfico da Lagoa Rodrigo de Freitas.

Após o processamento das imagens, as assinaturas acústicas foram observadas, interpretadas, classificadas de acordo com o substrato e a partir das análises de cada linha sonográfica foram identificadas diversas feições na área de estudos e algumas delas podem ser visualizadas de maneira resumida na Tabela 3.

DISCUSSÃO

A Lagoa Rodrigo de Freitas, tomando por base o mapa batimétrico, mostra na maioria de sua área um relevo suave em profundidades entre 2,7 e 4,0 metros, o que é denotado pela coloração em tons de verde. As margens apresentam uma área mais rasa junto à costa, com coloração em tons rosados a avermelhados mais escuros e profundidades entre 0 e 1,5 metros, sendo esta área mais ampla nos setores S/SW e E/NE. As maiores profundidades, assinaladas nos tons de azul, encontram-se à SW e SE, coincidindo com as áreas mais irregulares do relevo submarino da lagoa.

Em termos de gradiente, temos a área de batimetria mais suave, destacada em tons de verde, denotando inclinações entre 1/100 e 1/270. Nas áreas mais próximas à costa, podemos ver nitidamente o aumento de inclinação adjacente ao banco mais raso, ao redor de toda a lagoa, sendo este talude denotado em tons de rosa forte a vermelho-alaranjado, com inclinações maiores que 1/15 até 1/45.

As áreas irregulares à SE e SW, observadas na batimetria (Figura 17), que segundo AMBIENTAL (2002), são relacionadas a dragagens da década de 70 para a construção dos Aterros do parque do Cantagalo e Parque dos Patins, também são identificadas no mapa de gradiente (Figura 18), onde temos o relevo da batimetria colorido pelo grid de gradiente. As áreas de dragagem aparecem muito irregulares e coloridas em tons de vermelho forte a rosa brilhante.

Numa posição mais central da porção norte da lagoa também há uma irregularidade batimétrica, muito destacada pelo gradiente (Figura 18) em tons de vermelho e rosa em meio a tons de verde a amarelo, entretanto não se encontrou nenhuma referência a dragagem nesta posição, embora

pareça ter alguma relação a serviços de dragagem executados na lagoa.

No que tange aos dados batimétricos de 33 kHz, a visualização do relevo da lagoa colorido pelo grid de espessura da camada superficial de lama (Figura 20), mostra a maior espessura de lama superficial na porção centro-norte da lagoa. As maiores espessuras (Figura 20), denotadas pelos tons de rosa, estão acima de - 0,45 m e localizam-se nas porções centro-sul e centro-noroeste da lagoa, corroborando o mapa de profundidade da base da lama superficial (Figura 19), onde as maiores profundidades são destacadas em tons, sendo mais profunda quanto mais escuro o azul. Cabe ressaltar que os tons mais escuros de azul, que podem chegar a -7,9 m, estão relacionados às áreas de dragagens já descritas e, portanto, demarcam a profundidade, se não em sua totalidade, pelo menos na maior parte de seu valor, visto que essa medida é a soma da profundidade de lâmina d'água somada a espessura da camada de lama superficial.

Com relação ao imageamento sonar, foi gerado o Mapa de Feições da Lagoa Rodrigo de Freitas (Figura 22). Neste mapa podemos ver a localização das feições e alvos detectados nas imagens sonar.

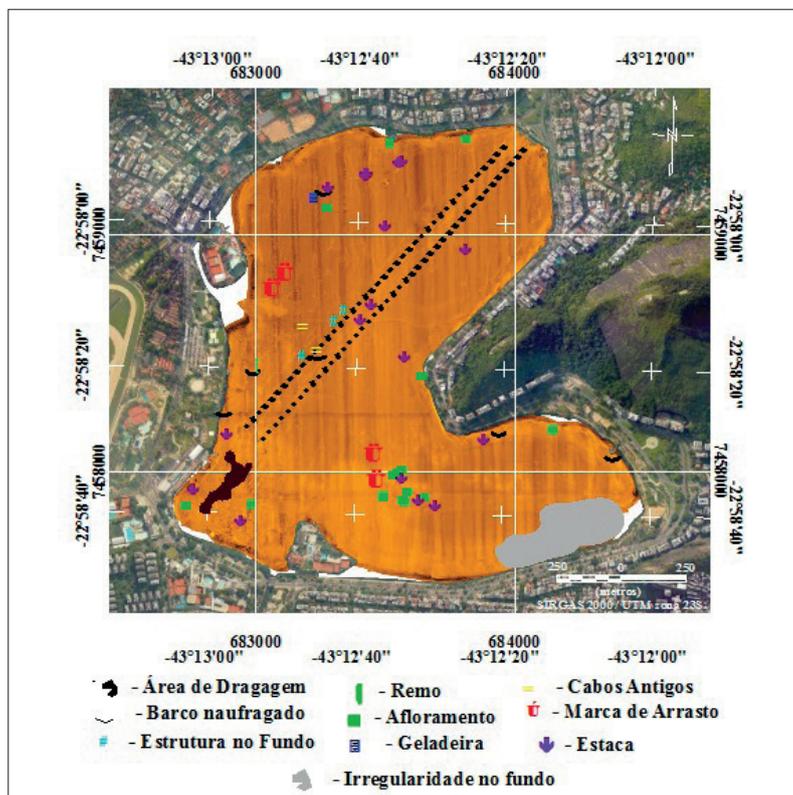
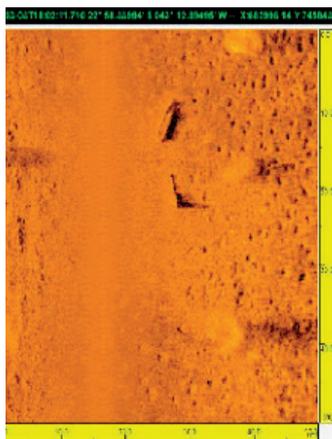


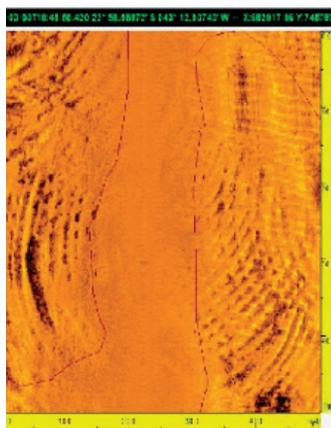
Figura 22 – Mapa de feições obtido através das imagens de Sonar de varredura lateral.

Tabela 3 – Interpretação de diferentes tipos de feições marcadas como alvos por dados obtidos através do Sonar de Varredura Lateral.

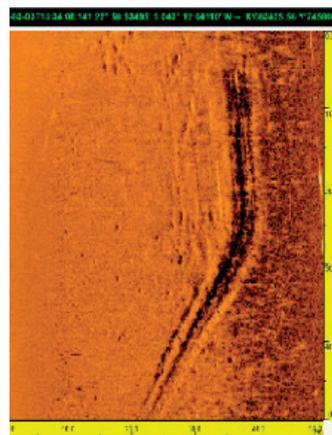
A) Embarcação e remo



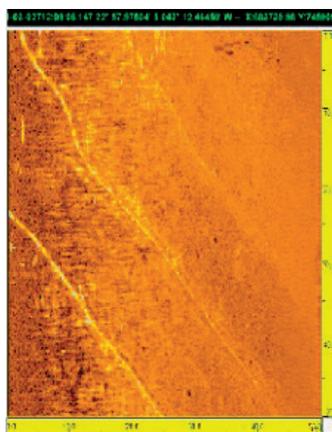
B) Marcas de dragagem



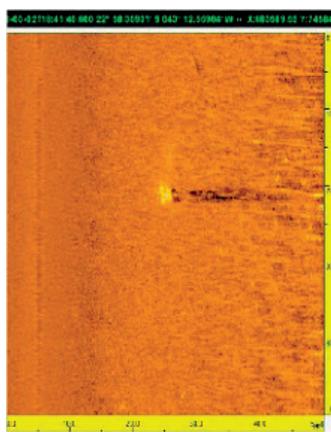
C) Marca de arrasto



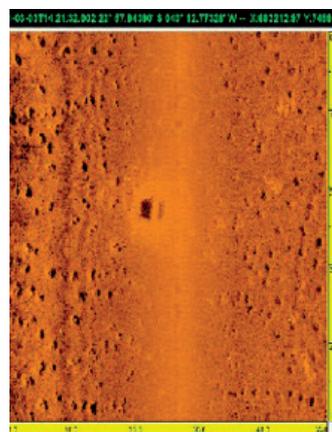
D) Raias de remo



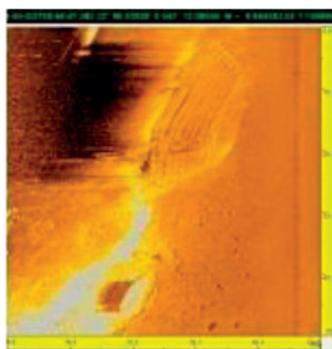
E) Estacas



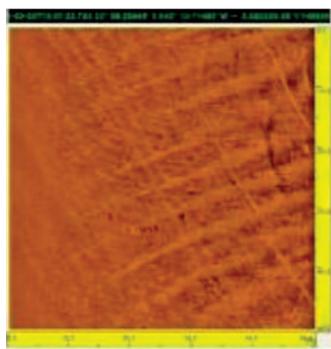
F) Geladeira



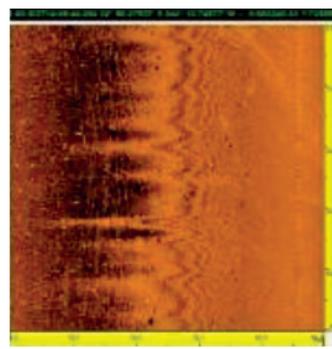
G) Estrutura e embarcação



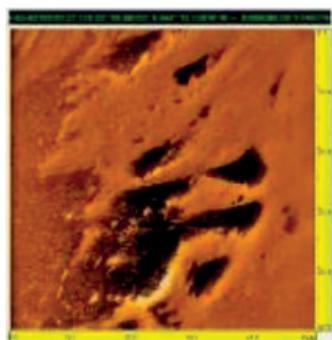
H) Ondulações no fundo e raias de remo



I) Cabos ou demarcadores antigos de raias



J) Marcas de irregularidade no fundo



L) Afloramento

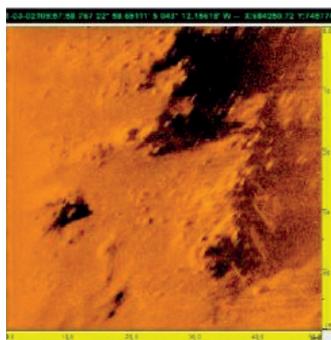




Figura 23 – Imagem esquemática de uma draga de sucção.

As áreas de dragagem descritas no relatório da AMBIENTAL (2002) são muito bem delimitadas. A mais antiga, localizada a SE, demarcada no mapa por um polígono cinza, permanece visível nas imagens pelas irregularidades do fundo, com alternância de cristas e cavas. A mais recente, a SE, delimitada em polígono preto, tem formato alongado, alinhado com as raias de remo, corroborando o descrito pela AMBIENTAL (2002) de que esta dragagem relaciona-se a eventos esportivos. Nesta dragagem mais recente pode-se observar nas imagens sonar as marcas de dragagem deixadas pela boca de sucção da draga, sendo o padrão das imagens em arco, podendo-se inferir uma operação por draga de sucção e recalque (Figura 23), que opera por boca fixa na frente da embarcação que se movimenta em setor de círculo enquanto opera.

As raias de remo da lagoa, delimitadas por linhas de bóias, foram perfeitamente identificadas, sendo delimitadas no mapa por duas linhas paralelas tracejadas em preto.

Além das estruturas identificadas na Tabela 5, cabe destacar o número de estruturas (4) e estacas (15) no fundo da lagoa. As estruturas, identificadas pelo símbolo #, estão alinhadas com as raias de remo, levando à suposição de que elas estejam associadas de alguma forma. As estacas, identificadas pelo símbolo □, por sua vez, tem algumas nas proximidades das raias de remo, mas a maioria está dispersa, não permitindo nenhuma suposição de correspondência.

Chama a atenção o número de alvos relacionados à atividades náuticas, identificados como barcos (6) e remo (1). Em sua maioria são pequenas

embarcações que, pela forma alongada e não muito larga parecem canoas ou caiaques.

Outro dado que salta aos olhos é a presença de dois tipos de alvos relacionados à poluição por macro detritos. O primeiro deles, identificado como uma geladeira, localizado à NE na lagoa. O outro, em número de 2 e identificado por =, localiza-se próximo às raias de remo e se parece com um emaranhado de cabos. É possível observar o que seriam pequenas bóias de flutuação, semelhantes às observadas nas linhas de demarcação das raias ou em redes, identificadas como “cabos antigos”.

Por fim, a última estrutura identificada e demarcada foram marcas de arrasto, em número de 4, sendo duas delas a E-NE e duas a S. Sua presença em pares sugere a ação de duplas de âncoras, provavelmente associadas às dragas que operaram na lagoa.

CONCLUSÕES

Tendo em conta os dados coletados e os resultados obtidos do processamento e interpretação deste, assertivamente podemos dizer que a metodologia aplicada mostrou ser eficaz no presente trabalho, pois possibilitou um conhecimento mais detalhado do fundo da LRF.

A batimetria monofeixe de dupla frequência resultou, pela frequência mais alta, no conhecimento da morfologia detalhada do fundo da lagoa, exibindo morfologia diversificada, com áreas mais suaves e profundidades médias na porção central da lagoa, área mais rasa junto à costa e área de talude mais íngreme unindo estas duas primeiras. Em locais mais específicos na porção SW e SW destacam-se duas áreas de alternância de cavas e elevações, onde estão os registros de maiores profundidades da lagoa.

A frequência batimétrica mais baixa, com sua penetração na camada superficial de sedimentos lamosos, possibilitou a demarcação da base da camada de lama superficial, de característica mais fluida. Fica clara a porção mais central da lagoa como de maior espessura desta lama recente.

Apesar de algumas distorções nas imagens do SVL devido à navegação, o leito pôde ser visto

detalhadamente, o que permitiu localizar e caracterizar feições e estruturas no leito da lagoa e na superfície da água também, como o caso das linhas delimitadoras da raia de remo. O reconhecimento de feições possibilitou o georreferenciamento e localização tanto de feições naturais quanto antrópicas.

A interpretação conjunta dos dados batimétricos entre si e entre estes dados e os do Sonar de Varredura Lateral trazem à luz dois resultados até então sem registros georreferenciados ou cálculos, a saber:

Posicionamento de áreas que foram dragadas – embora várias referências e trabalhos pretéritos mencionassem a dragagem, não havia coordenadas de delimitação dessas áreas. Essa delimitação acontece com conjugação de dados batimétricos, que denotam as irregularidades de fundo nessas áreas, o cálculo de gradiente batimétrico, destacando as inclinações do fundo nessas áreas, e o imageamento sonar deixa claro as irregularidades e alternâncias de cavas e bancos na área SE e marcas de dragagem na forma sulcos em semi-círculos a SE, típicos de dragas de sucção e recalque.

O cálculo do volume da camada superficial de lama – esse volume, total superior a 530.000 m³, torna-se de suma importância, tendo em conta que a Lagoa Rodrigo de Freitas é um ambiente poluído e eutrofizado. Através de estudos geoquímicos dos sedimentos, já existentes ou planejados com esta finalidade, será possível dimensionar a concentração de poluentes nessa lama que, por ser menos compactada torna-se a camada de rápida remobilização em situações de tempestade, disponibilizando estes poluentes na coluna d'água, o que impacta o ambiente lagunar.

A realização do presente trabalho mostrou-se importante para o melhor conhecimento do leito da LRF e recomenda-se a conjugação deste estudo, quer seja por novos levantamentos, quer seja pela utilização de dados já existentes, com dados de perfisados de subfundo (SBP) e amostras sedimentos superficiais e/ou testemunhos, de forma a localizar o embasamento da lagoa, determinar a estratigrafia total e confirmar/detalhar a distribuição textural dos sedimentos superficiais e, através da geoquímica, determinar o potencial de poluição desses sedimentos. Assim feito, os dados para uma modelagem ambiental sobre possíveis impactos da remobilização dos sedimentos superficiais da Lagoa Rodrigo de Freitas estarão completos.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Hélio Villena, Josefa Guerra, Arthur Ayres e Alessandro Filippo e ao Dr Luiz Antônio Pereira de Souza pelos ensinamentos e apoio.

As empresas A2 Marine Solution e Geocar-tografia.

A equipe que esteve comigo: Yury Siemen, Antônio Cláudio, Julyana Marapodi e Nikolas Machado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁGUAS DOS RIO. 2013. Atualização do plano de gestão ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas (PGALRF). Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro. Secretaria municipal de obras.
- AMADOR, E. S. 1997. Baía de Guanabara e ecossistemas periféricos: Homem e natureza. Rio de Janeiro, 539 p.
- AMBIENTAL. 2002. *Solução integrada de reabilitação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas, Canal do Jardim de Alah e praias do Arpoador, Ipanema e Leblon*. Rio de Janeiro: Ambiental Engenharia e Consultoria Ltda., 1248 p.
- ANDREATA, J.V., M.A. 1997. Distribuição mensal dos peixes mais representativos da Lagoa Rodrigo de Freitas, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*, 14: 121-134.
- AZEVEDO, L. 2016. *Processos sedimentares da Bacia Central de Bransfield, Antártica, a partir de evidências morfológicas, backscatter e sísmica de alta resolução Niterói – RJ*. (Dissertação de Mestrado) – Departamento de Geologia – Universidade Federal Fluminense, Niterói. 96p.
- NETO, J.A.B. 2003. Caracterização ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas – Rio de Janeiro – RJ. *IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*. http://www.abequa.org.br/trabalhos/gerenciamento_115.pdf
- NETO J.A.B.; GUIZAN, S. C.; DIAS, G.T.M. & FONSECA, E.M. 2010. Distribuição sedimentar da Lagoa Rodrigo de Freitas através de sísmica de alta resolução. *Revista Brasileira de Geofísica*. 187-195. <http://www.scielo.br/pdf/rbg/v29n1/13.pdf>
- CALAZANS, D.C. 2012. *Estudos Oceanográficos: do instrumental ao prático*. 1 Ed., Chapter: Oceanografia Química. Editora Textos. pp.101-123.

- CASTRO, V.B.A. 2016. *Uso de sonar de varredura lateral em ambientes costeiros ultrarastos*. Rio de Janeiro. Monografia de Graduação. Departamento de Oceanografia Geológica. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 92 p.
- DE MOUSTIER, C. 1988. State of the Art in Swath Bathymetry Survey Systems. *International Hydrographic Review*, 65(2): 30.
- DE PAULA, T.P. 2009. Análise hidrodinâmica e de renovação de massas d’água na Lagoa Rodrigo de Freitas através do uso de modelagem computacional. Rio de Janeiro. Monografia de Graduação. Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 88 p.
- FERNANDEZ, M.A.D.S. 1994. *Geoquímica de metais pesados na Região dos Lagos, RJ: Uma proposta de estudo integrado*. Niterói. (Dissertação de Mestrado) – Departamento de Geoquímica – Universidade Federal Fluminense, Niterói., 163p.
- FERNANDES, H.M. 1996. Management of uranium mill tailing: Geochemical processes and radiological risk assessment. *Fuel and Energy Abstracts*, 37(3): 224.
- KAGESTEN, G. 2008. *Geological seafloor mapping with backscatter data from a multibeam echosounder*. Gothenburg, Sweden: Gothenburg University.
- KJERVE, B & MAGILL, K.E. 1989. Geographic and hydrographic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology*. 88(3-4): 187-199.
- KNIGHT, D.C. 1960. *The First Book of Sound: A Basic Guide to the Science of Acoustics*. Franklin Watts, Inc. New York, 80 p.
- LAMEGO, A.R. 1974. *O Homem e a Restinga*. 2.ed. Rio de Janeiro: Editora Lidor, 306 p.
- LOUREIRO, D.D.; FERNANDEZ, M.A.; HERMS, F.W. & LACERDA, L.D. 2009. Heavy metal inputs evolution to an urban hypertrophic coastal lagoon, Rodrigo de Freitas Lagoon, Rio De Janeiro, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 59:577–588, DOI: 10.1007/s10661-008-0652-4.
- LOUREIRO, D.D. 2010. *Comportamento do mercúrio em lagoas costeiras urbanas: das mudanças paleoambientais ao balanço de massa (estudo de caso: Lagoa Rodrigo de Freitas)*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Química. Universidade Federal Fluminense. 124 p.
- LURTON, X. 2010. *An Introduction to Underwater Acoustics. Principles and Applications*. 2. ed. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- NETO, A.A. 2000. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. *Brazilian Journal of Geophysics*. 18(3): 241–255. <https://www.scielo.br/pdf/rbg/v18n3/a04v18n3.pdf>
- MACHADO, E. C. 1989. *Desoxigenação e regeneração de nutrientes pelo sedimento da Lagoa de Guarapina*. Dissertação Mestrado – Departamento de Geoquímica, Universidade Federal Fluminense, Niterói , 104p.
- MACHADO, L.B. 2009. *Evolução da degradação ambiental da bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas – RJ*. Dissertação Mestrado – Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 178p.
- PATCHINEELAM, S. 2019. Lagoas costeiras, 2000. Disponível em: <http://www.usu.br/icba/oceano2/zonacosteira.htm>. Acesso em: 29 dez.
- RANGEL, C.M.A. 2002. *Sedimentologia e Geomorfologia da Lagoa Rodrigo de Freitas – RJ*. (Monografia de Graduação) – Departamento de Geografia – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, São Gonçalo, 44 p.
- RIO PREFEITURA. 2013. Atualização do plano de gestão ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas (PGALRF). Versão 2. 51 p. <http://www.rio.rj.gov.br/documents/91265/2972533/10+-+RIOAGUAS+-+Plano+de+Gestão+Ambiental+da+Lagoa+Rodrigo+de+Freitas+-2013>.
- SANTOS, J.P. 2011. Dossiê Lagoa Rodrigo de Freitas: um documentário sobre aspectos sócio-ambientais de uma lagoa urbana da cidade do Rio de Janeiro. *X Congresso de Ecologia do Brasil*.
- SILVA, J.G.S. 2010. *A utilização do Sonar de Varredura Lateral e do ecobatímetro multifeixe na interpretação e análise da morfologia da Baía de Vitória – ES*. Monografia em Geofísica. Departamento de Geologia/LAGEMAR. Universidade Federal do Espírito Santo.
- SOARES, M. F.; DOMINGOS, P.; SOARES, F. F. & TELLES, L. F. 2012. 10 Anos de monitoramento da qualidade ambiental das águas da Lagoa Rodrigo de Freitas. *Oecologia Australis*. Brasil. p. 34
- SOUZA, L.A.P. 2006. *Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas*. Tese de Doutorado, Programa de Doutorado em Oceanografia Química e Geológica, USP, São Paulo, 311 p.
- TURCQ, B.; MARTIN, L.; FLEXOR. M. ; SUGUIO, K. ; PIERRE, C. & ORTEGA, L. T. 1999. Origin and Evolution of the Quaternary Coastal Plain between Guaratiba and Cabo Frio, State of Rio de Janeiro, Brazil. In: KNOPPERS, B.; BIDONE, E.D. & ABRÃO, J.J. (Eds.). *Environmental Geochemistry of Coastal*

- Lagoon Systems*, Rio de Janeiro, Brazil. (Série Geoquímica Ambiental, 6) p.25 – 46.
- VILELA, S.M. & MATTOS, A. 1975. *Hidrologia Aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill.
- VILLENA, H.H. 2006. *Variação do nível do mar no Quaternário. Rio de Janeiro – RJ*. (Tese de Doutorado) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 80p.
- WEBER, T.C. & LURTON, X. 2015. *Background and fundamentals. Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars. Guidelines and Recommendations*. 1. ed. GeoHab Backscatter Working Group. 200 p.