MARINHA DO BRASIL
INSTITUTO DE ESTUDOS DO MAR ALMIRANTE PAULO MOREIRA
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PROGRAMA ASSOCIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA MARINHA

SIMONE PACHECO DA COSTA CARDOSO DA CUNHA

A INFLUÊNCIA DO FITOPLÂNCTON NA PROPAGAÇÃO ACÚSTICA SUBMARINA

ARRAIAL DO CABO/RJ
2018

SIMONE PACHECO DA COSTA CARDOSO DA CUNHA

A INFLUÊNCIA DO FITOPLÂNCTON NA PROPAGAÇÃO ACÚSTICA SUBMARINA

Dissertação de Mestrado, apresentada ao Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira e a Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Biotecnologia Marinha.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Calado
Coorientador: Prof. Dr. Orlando Camargo Rodrígues

ARRAIAL DO CABO/RJ

2018

SIMONE PACHECO DA COSTA CARDOSO DA CUNHA

A INFLUÊNCIA DO FITOPLÂNCTON NA PROPAGAÇÃO ACÚSTICA SUBMARINA

Dissertação apresentada ao Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira e a Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Biotecnologia Marinha.

COMISSÃO JULGADORA:

Dr. Leonardo Martins Barreira
Instituto de Pesquisa da Marinha (IPqM)

Dra. Eliane Gonzalez Rodriguez
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM)

Dr. Leandro Calado
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM)
Professor Orientador – Presidente da Banca Examinadora

Arraial do Cabo, 26 de julho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente a Deus, por iluminar o meu caminho e me dar forças para seguir em frente, em qualquer situação.

A meus pais Ary e Geci, por terem me tornado o que sou hoje, por todo amor, encorajamento para conquistar meus sonhos e força para sempre seguir em frente, me possibilitando estar aqui hoje.

Ao meu irmão Ronildo Costa, por ter sido minha inspiração.

Ao meu filho João Paulo Pacheco, por tudo que ele representa em minha vida; nosso amor é o meu porto seguro.

Ao meu companheiro Sivaldei Melo, por seu grande apoio, carinho e principalmente paciência.

Ao IEAPM, por ter me concedido a oportunidade de realizar este mestrado.

Agradeço muito ao meu orientador, Leandro Calado, pela dedicação e por nunca desistir. Sua confiança, seu tempo, seus ensinamentos foram para mim um grande presente.

Ao Professor Orlando, por toda a ajuda prestada; sem sua dedicação e orientação não seria possível a execução deste trabalho.

Durante a execução deste trabalho pude contar com a colaboração de diversos grupos e pessoas, dentre elas, destacam-se o Departamento de Acústica, Laboratório de Plâncton, Laboratório da Larvicultura, Laboratório de Cultivo de Microalgas, além do setor Administrativo (Carpintaria, Motoristas, Baleiros e Eletricistas) que sempre se mostraram solícitos e prestativos.

Um agradecimento especial à Divisão de Oceanografia Física: CF Marin, CF(T) Márcia Helena, 1T(RM2) Valquíria, 1T(RM2) Hugo e Rafael por todo apoio para que eu concluísse este trabalho.

Ao Grupo de Sistemas Acústicos Submarinos do IPqM, pela grande cooperação, a todo momento mostrando-se prontos a ajudar; sua participação foi fundamental para a execução deste trabalho.

Aos meus amigos que estiveram sempre me apoiando. Em especial ao Augusto com toda sua gentileza e carinho, muitas vezes lendo e relendo meu trabalho e à Natália, me incentivando a continuar, nunca desistir e sempre pronta a ouvir minhas reclamações.

Agradeço a todos os professores do Programa Associado de Pós-Graduação em Biotecnologia Marinha (IEAPM/UFF).

Em especial, agradeço a Dra. Eliane Gonzalez (IEAPM), ao CF Barreira (IPqM) e Dra. Maria Helena Baeta por aceitarem o convite para compor o comitê de avaliação e contribuir valiosamente no progresso deste trabalho.

E a todos os colegas da primeira turma do Programa Associado de Pós-Graduação em Biotecnologia Marinha (IEAPM/UFF), foi uma grande honra estar com vocês.

Obrigada a todos!

Este trabalho é dedicado ao meu filho João Paulo Pacheco, você é o milagre do meu mundo. Eu te amo!

RESUMO

Os organismos do fitoplâncton que vivem em suspensão nas águas doce, salobra e marinha, possuem um papel importante na alteração do meio físico, como por exemplo, bloqueando a luz solar, provocando variações químicas na água, entre outros. Também há evidências que o comportamento do fitoplâncton pode afetar a viscosidade em pequenas escalas, apesar de sua variação se dar, principalmente, devido às variações de temperatura e a salinidade. Diversos autores apontam que fatores biológicos também podem afetar diretamente a viscosidade, e consequentemente, influenciar a propagação do som no mar. Contudo, o papel do fitoplâncton, como agente contribuinte para a atenuação do som, ainda é um tema que necessita de maior entendimento. Trabalhos recentes têm destacado a capacidade que uma determinada espécie de fitoplâncton tem de alterar as propriedades físicas do oceano, e com isso, alterar as condições de propagação acústica submarina. Assim, esse trabalho ressaltou os efeitos da presença a do fitoplâncton, nessa propagação. Foi selecionada a espécie *Nannochloropsis oculata* para a realização dos experimentos acústicos em tanque, para a avaliação das perdas na propagação em três meios distintos: água doce, água salgada e água salgada com fitoplâncton, simulando uma situação de crescimento muito rápido desses organismos (floração). Após o processamento dos dados adquiridos e da análise dos resultados, foi verificada a influência do fitoplâncton na propagação do som. No entanto, a literatura indica, evidências do impacto da presença do fitoplâncton na propagação do som induzido pelo aumento da viscosidade. A partir dos resultados referentes ao experimento realizado (amplitudes medidas e densidade fitoplantônica), foi possível fazer uma correlação entre os dados de atenuação experimentais e os levantamentos teóricos. Estes foram confrontados com os coeficientes de atenuação para os diferentes meios (água doce e água salgada → $\Delta\alpha$ = 1.83 Np/m; água salgada e água salgada + fitoplâncton → $\Delta\alpha$ = 0.58 Np/m; e água doce e água salgada + fitoplâncton → $\Delta\alpha$ = 2.99 Np/m). Os resultados apresentados neste trabalho revelaram maior atenuação devido à presença do fitoplâncton, caracterizando a influência destes organismos sobre a propagação acústica.

Palavras-chave: fitoplâncton; propagação acústica; atenuação..

ABSTRACT

The organisms of phytoplankton that lives in the fresh, brackish or salt water. They play an important role in the physical environment such as blocking sunlight, chemical variations in the water and so on. Additionally, there are evidences that phytoplankton behavior may affect small scale viscosity, although its variation is mainly due to temperature and salinity. Several authors pointed out that biological factors may also affect directly water viscosity and, consequently, influence sound propagation at sea. However, phytoplankton role in sound attenuation still needs to be better understood. Recent studies highlight the potential of some species of modifying the physical properties of the ocean and, hence, affect underwater acoustic propagation conditions. Thus, this study demonstrates the effects of phytoplankton presence in this propagation. *Nannochloropsis oculata* was selected for the acoustic experiments in the tank in order to evaluate propagation loss in three underwater environments fresh water, salt water and salt water with phytoplankton simulating a fast growing scenario of these organisms (bloom).After data processing and results analysis, the influence of phytoplankton was verified in underwater sound propagation due to many attenuation mechanisms. From these experimental results (sampled amplitudes and phytoplankton density), it was possible to correlate attenuation experimental data and theoretical surveys. The experiments provided specific attenuation coefficients for each environment (fresh water and salt water → $\Delta\alpha$ = 1.83 Np/m; salt water and fresh water + phytoplankton → $\Delta\alpha$ = 0.58 Np/m; an fresh water and salt water + phytoplankton → $\Delta\alpha$ = 2.99 Np/m). The results presented in this study disclose a higher attenuation coefficient due the phytoplankton presence featuring the important role of the phytoplankton in the underwater sound propagation.

Keywords: phytoplankton; acoustic propagation; attenuation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – As divisões do mar segundo critérios políticos e ecológicos, apresentando as zonas eufóticas (Região na qual a incidência luminosa consegue penetrar na coluna de água) e afóticas (Região marinha que não recebe qualquer interferência da incidência luminosa). 14
Figura 1.2 – Imagem de satélite da região oceânica do Estado do Rio de Janeiro apresentando alterações da cor da superfície do mar, devido a concentração de clorofila a, caracterizando à a presença de fitoplâncton. 15
Figura 1.3 – a) Divergência esférica: a onda sonora se propaga uniformemente em todas as direções, b) Divergência cilíndrica: a onda não se propaga uniformemente em todas as direções devido superfície e ao fundo 16
Figura 4.1 – Coeficiente de atenuação em função da frequência. Onde a linha azul representa a atenuação em água pura, as linhas vermelha e verde representam, respectivamente, a atenuação devido ao ácido bórico (H_3BO_3) e por sulfato de magnésio ($MgSO_4$), e a linha preta é a soma de todos esses componentes, segundo o modelo de Francois e Garrison (1982a, 1982b). 24
Figura 4.2 – Coeficientes de atenuação em função da frequência. A linha preta representa a atenuação acústica para água do mar usando a formulação (Ainslie e McColm (1998) e a linha verde representa a atenuação acústica com o excesso de viscosidade influenciado pelo fitoplâncton conforme Rhodes (2008). 28
Figura 5.1 – Tanque do IEAPM de dimensões 120 x 60 x 60 cm, revestido de cerâmica com volume utilizado de aproximadamente 216 litros de água, usado nas transmissões do sinal acústico. 31
Figura 5.2 – Esquema de transmissões acústicas realizado no tanque onde dM representa metade da distância percorrida pelo sinal refletido. 32
Figura 5.3 – Transdutor ultrassônico da marca KARL DEUTSCH, modelo TS 10 WB 2-7 P60 HT-120°C; usado para transmitir os sinais durante o experimento. Cedido pelo Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) 33
Figura 5.4 – Gerador de sinais de excitação para o transdutor da marca RITEC, modelo RPR-4000 Pulser/Receiver.Cedido pelo Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) 34
Figura 5.5 – O osciloscópio é um equipamento eletrônico que permite a visualização e análise de sinais na forma de um gráfico em função do tempo. 35

Figura 5.6 – CTD (Conductivity, Temperature, and Depth) é um instrumento oceanográfico que possuem três sensores distintos para medição de condutividade, temperatura e pressão, além de outros parâmetros; o qual foi utilizado para medir de forma direta a velocidade do som. 36
Figura 5.7 – Imagem ampliada da microalga Nannochloropsis oculata. 37
Figura 5.8 – Caminho percorrido do inoculo original para o cultivo, replicagem em balões, adição de nutrientes (sulfato de amônia, uréia e superfosfato de cálcio) no tanque e introdução do cultivo ao tanque. 38
Figura 5.9 – Captura da imagem do osciloscópio, mostrando o sinal emitido (à esquerda) e o sinal recebido (à direita). 40
Figura 5.10 – Padrões de chegada do sinal emitido (triângulo alto) e do sinal recebido (triângulo baixo). 40
Figura 6.1 – Amplitudes medidas em diferentes meios (água doce, água salgada e água salgada com adição de fitoplâncton) 43
Figura 6.2 – Amplitudes medidas (P(x)) por distância (x) na água doce. 43
Figura 6.3 – Amplitudes medidas (P(x)) por distância (x) na água salgada. 44
Figura 6.4 – Amplitudes medidas (P(x)) por distância (x) na água salgada com fitoplâncton. 44
Figura 6.5 – Contagem celular realizada por dias para determinação da densidade fitoplanctônica 45
Figura 6.6 – Curvas de atenuação calculadas sem pontos atípicos, numa grade comum de distâncias. 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Composição do meio Conway (CON)(WALNE, 1966).....37
Tabela 6.1: Diferenças entre coeficientes de atenuação.....47
Tabela 6.2: Diferenças entre coeficientes de atenuação.....48
Tabela 6.3: Relação entre as distâncias de medição, amplitude média e seus respectivos desvios padrão do **B** (02/11/2017). 49
Tabela 6.4: Relação entre as distâncias de medição, amplitude média e seus respectivos desvios padrão do **B** (03/11/2017). 50
Tabela 6.5: Relação entre as distâncias de medição, amplitude média e seus respectivos desvios padrão do **B** (05/11/2017). 50
Tabela 6.6: Relação entre as distâncias de medição, amplitude média e seus respectivos desvios padrão do **B** (06/11/2017). 50
Tabela 6.7: Diferenças entre os coeficientes de atenuação. 51
Tabela 6.8: Diferenças entre os coeficientes de atenuação. 51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13

2 OBJETIVOS 20

2.1 GERAL 20

2.2 ESPECÍFICOS 20

3 HIPÓTESE 21

4 ATENUAÇÃO ACÚSTICA 22

4.1 ATENUAÇÃO NA ÁGUA SALGADA POR ABSORÇÃO 23

4.2 ATENUAÇÃO INDUZIDA POR VISCOSIDADE 26

5 MATERIAIS E MÉTODOS 30

5.1 O EXPERIMENTO 30

5.2 O TANQUE 30

5.3 FONTE ACÚSTICA 32

5.4 GERADOR DE SINAIS 33

5.5 OSCILOSCÓPIO 34

5.6 CTD 35

5.7 FITOPLÂNCTON 36

5.8 PROCESSAMENTO DE SINAIS 39

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO 41

6.1 DADOS EXPERIMENTAIS DE ATENUAÇÃO 42

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 53

7.1 CONCLUSÃO 53

7.2 PERSPECTIVAS 54

8 REFERÊNCIAS 56

APÊNDICE A – Script em Python 59

1 INTRODUÇÃO

A matéria orgânica pode ser definida, numa primeira aproximação, como a formação de conglomerados químicos complexos, compostos majoritariamente por carbono e hidrogênio, embora a presença destes elementos não seja sempre suficiente para considerar um determinado composto como sendo orgânico.

No meio marinho, sendo denominada produção primária, ou seja, a conversão de carbono inorgânico em matéria orgânica através da fotossíntese é dominada pelo fitoplâncton, que contribui com aproximadamente 95% do total de tal produção (LIMA, 2006). O fitoplâncton ocupa a base da cadeia alimentar dos oceanos como geradores de matéria orgânica, desempenhando um papel vital no fluxo de energia e nos ciclos biogeoquímicos de elementos tais como o carbono, o nitrogênio, o fósforo, o oxigênio e o enxofre, e muitos outros (TYRRELL, 2001).

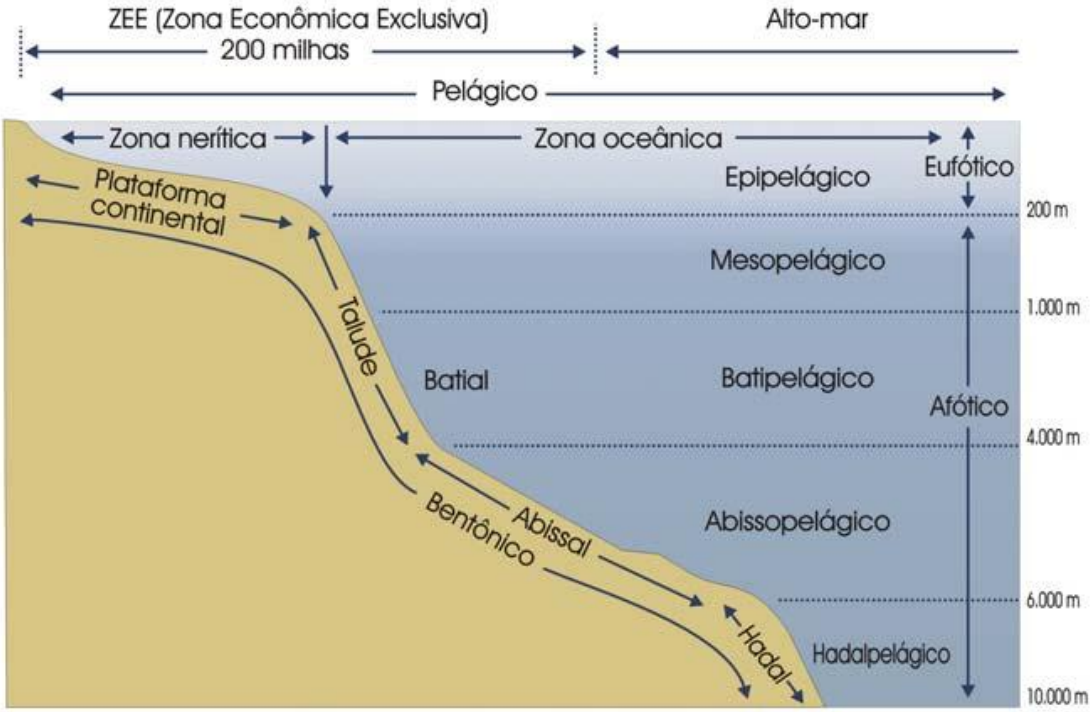
Os organismos do fitoplâncton vivem em suspensão nas águas doces, salobras e marinhas, deslocando-se ao sabor das correntes. São organismos fotossintetizantes e, portanto, autótrofos. A taxa de reprodução de fitoplâncton depende diretamente da taxa de fotossíntese, que é controlada principalmente pela intensidade de luz disponível nas camadas superficiais, ou zona eufótica (Figura 1.1), e pela concentração de nutrientes inorgânicos dissolvidos, tais como nitrato e fosfato (GHOSAL; ROGERS; WRAY, 2000).

A comunidade fitoplanctônica apresenta um caráter muito dinâmico, com elevadas taxas de reprodução e perda, respondendo rapidamente às alterações físicas e químicas do meio aquático. Tal comunidade é constituída por indivíduos de diferentes grupos taxonômicos, que apresentam algumas características comuns entre si: todos apresentam núcleo individualizado e organelas complexas em seu citoplasma, além de pigmentos fotossintetizantes (clorofila a, b, carotenóides) (SOUSA *et al.*, 2009).

A disponibilidade de luz nas camadas superficiais faz com que o fitoplâncton se concentre neste estrato da coluna de água (Figura 1.2). Em conseqüência, as concentrações dos nutrientes nesta camada são baixas, devido ao correspondente consumo por parte do fitoplâncton.

A produtividade de uma determinada região depende substancialmente dos processos físicos responsáveis pelo reabastecimento de nutrientes externos à camada superficial iluminada, através da ascensão de águas profundas ricas

Figura 1.1 – As divisões do mar segundo critérios políticos e ecológicos, apresentando as zonas eufóticas (Região na qual a incidência luminosa consegue penetrar na coluna de água) e afóticas (Região marinha que não recebe qualquer interferência da incidência luminosa).

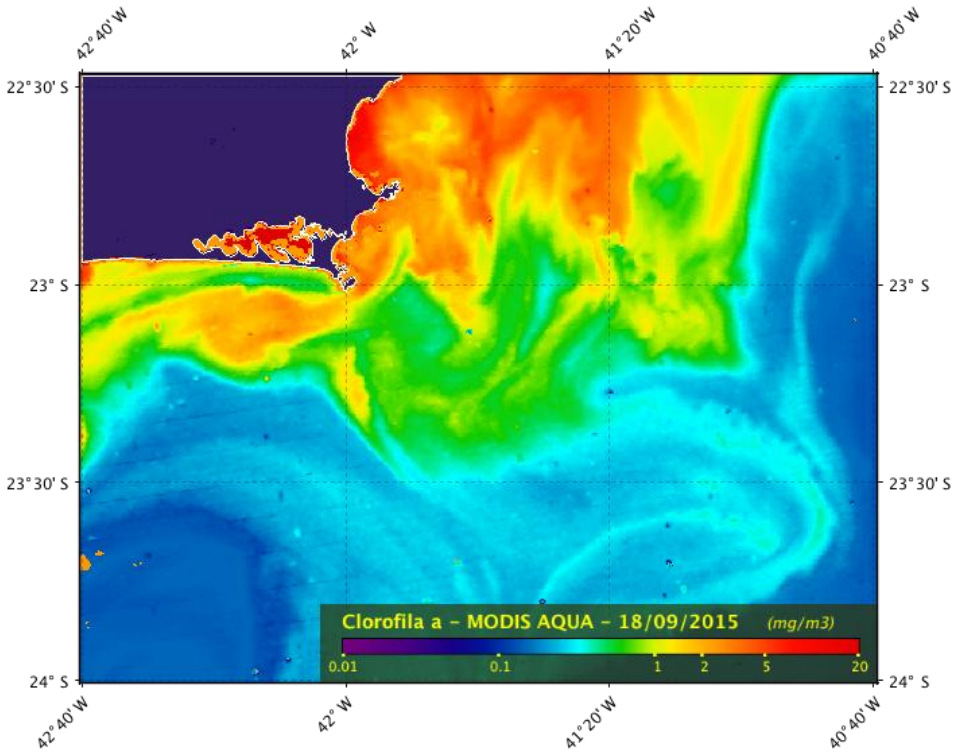


Fonte: (GOMES; HAIMOVICI, 2007)

em nutrientes (processo este conhecido como ressurgência), pelo aporte de águas de origem continental, e em menor escala através da interface água/atmosfera (DUGDALE; GOERING, 1967; PLATT; SUBBA RAO; DENMAN, 1977), ou ainda devido aos processos biológicos responsáveis pela reciclagem de nutrientes na própria camada eufótica, através da rede trófica local. Assim, vários fatores podem afetar o fitoplâncton, como disponibilidade de radiação solar, nutrientes e variações de fatores físicos como temperatura, salinidade e densidade.

O fitoplâncton também exerce um papel importante na alteração no meio físico, pois pode alterar propriedades fundamentais para diversos processos, bloqueando a luz solar, alterando a composição química da água, sua viscosidade, entre outros.

Figura 1.2 – Imagem de satélite da região oceânica do Estado do Rio de Janeiro apresentando alterações da cor da superfície do mar, devido a concentração de clorofila a, caracterizando à a presença de fitoplâncton.



Fonte: Dados do Modis (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), Flávio Gomes (UFF/IEAPM)).

Estudos recentes apontam que fatores biológicos podem afetar diretamente a viscosidade da água do mar (JENKINSON, 1986), e consequentemente, podem afetar a propagação do som no oceano.

O som consiste no movimento vibratório e regular das partículas do meio, gerado por uma fonte sonora, que converte energia mecânica em energia mecânica de vibração. Esta energia é transferida para o meio na forma de energia acústica (KINSLER *et al.*, 2000). Nos oceanos, essa energia pode se propagar por centenas e até milhares de quilômetros (CORREA, 2008).

A transmissão de sinais acústicos submarinos tem sido utilizada em diversas aplicações, tanto militares quanto civis, que visam à exploração dos oceanos (XAVIER, 2005). Os principais campos de aplicação da acústica submarina estão relacionados com a detecção e localização de alvos submarinos, passando pelos levantamentos batimétricos, a pesca e a navegação (CODATO *et al.*, 2012; CODATO, 2015).

Quando um sinal acústico se propaga no oceano, podem ocorrer perdas durante sua transmissão, sendo nomeada por TL (Transmission Loss) esta é expressa como “enfraquecimento" da energia sonora ao longo da sua trajetória devido a divergência geométrica e pelos diversos mecanismos de atenuação (XAVIER, 2005). A TL pode ser definida de acordo com a equação (1), medida a um metro da fonte, sendo expressa em unidades de decibéis (dB), representada por:

$$TL = -10log_{10}\frac{I}{I_{ref}}, \qquad (1)$$

onde I é a intensidade acústica definida como a energia por unidade de tempo que passa por uma unidade de área e I_{ref} intensidade de referência (MEDWIN; CLAY, 1997).

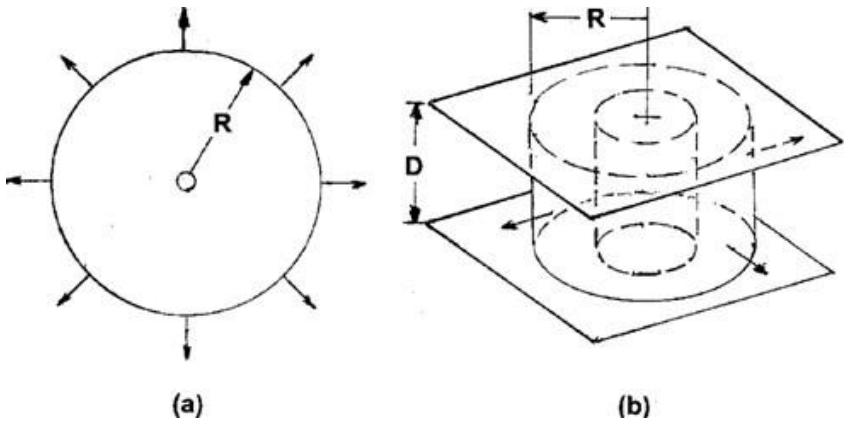
As perdas são compostas por dois tipos diferentes de mecanismos descritos a seguir:

1. Divergências geométricas:

A perda por divergência representa o efeito geométrico, isto é, o enfraquecimento regular do sinal sonoro à medida que se afasta da fonte. È importante considerar dois casos de interesse: Divergências esféricas e cilíndricas.

A perda na transmissão devido à divergência geométrica varia com o inverso da distância para a divergência cilíndrica e com o inverso do quadrado da distância para a divergência esférica (Figura 1.3) (XAVIER, 2005).

Figura 1.3 – a) Divergência esférica: a onda sonora se propaga uniformemente em todas as direções, b) Divergência cilíndrica: a onda não se propaga uniformemente em todas as direções devido superfície e ao fundo



2. Atenuação:

Atenuação é a diminuição da intensidade sonora por unidade de distância percorrida pelo som. As perdas por atenuação ocorrem tanto por espalhamento quanto por absorção. As ondas sonoras podem sofrer espalhamento aleatório ao incidirem em peixes, organismos planctônicos, bolhas de ar, dentre outros, esse espalhamento também é conhecido por reverberação.

A reverberação é o resultado do espalhamento de energia transmitido nas parcelas não homogêneas do oceano e suas fronteiras. Há várias causas que explicam o espalhamento da energia acústica que provoca a reverberação. Nos oceanos ela está, provavelmente, ligada aos peixes, plâncton e outras fontes biológicas. O espalhamento com essa origem é conhecido como reverberação de volume. Quando ela está associada às rugosidades da superfície do mar e do fundo são chamadas de reverberação de superfície. O espalhamento da energia acústica nos oceanos não é igual em todas as partes e, dessa maneira, a reverberação de volume difere com a profundidade.

A absorção é a conversão de energia acústica em calor, é um fator limitante na propagação acústica, pois é fortemente dependente do meio de propagação (LURTON, 2010). A absorção pode ocorrer, principalmente, por:

Relaxação molecular: A relaxação molecular pode ocorrer devido aos componentes químicos, presente na água. Dentre eles os mais significativos para o processo de relaxação molecular estão o Sulfato de Magnésio ($MgSO_4$) e Ácido Bórico (H_3BO_3). Basicamente consiste na dissociação de componentes iônicos numa solução, devido às variações locais de pressão causadas pela onda acústica.

Viscosidade: As perdas por viscosidade podem ocorrer por dois efeitos distintos. Cada um desses efeitos depende não apenas de como as moléculas agem juntas no meio, conforme definido pelos coeficientes de viscosidade de cisalhamento e volume, mas também pela freqüência das ondas sonoras.

A primeira, a viscosidade de cisalhamento, geralmente chamada simplesmente de "viscosidade”, é definida como a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação (MEDWIN; CLAY, 1997).

Enquanto a segunda, a viscosidade de volume ou viscosidade volumétrica, é um processo viscoso que exige tempo para que o sistema se aproxime do equilíbrio

quando a densidade e a temperatura do fluído são alteradas por uma expansão ou compressão (KINSLER *et al.*, 2000).

As perdas viscosas ocorrem devidas à defasagem de movimentos entre as partículas em suspensão e o fluído, ambos induzidos pela passagem das ondas sonoras. A magnitude destas perdas depende da área superficial da partícula, da freqüência acústica, da viscosidade do fluído e da razão entre densidades. Partículas extremamente pequenas tendem a mover-se juntamente com o fluído, e o atraso é muito pequeno. À medida que o tamanho aumenta, essa defasagem do movimento aumenta, mas, ao mesmo tempo, a superfície total das partículas diminui para uma concentração constante. Estes fatores resultam em uma atenuação máxima para este tipo de perda (XAVIER, 2016).

No momento presente, muitos dados empíricos, afetos à absorção acústica, são explicados pela combinação de levantamentos teóricos e modelagens fenomenológicas (Uma abordagem fenomenológica é, essencialmente, um estudo empírico, em que os dados experimentais são ajustados a um formalismo matemático elaborado, o qual ignora completamente qualquer abordagem física do problema.).

É notório que, em altas freqüências (>100 kHz), a propagação acústica no oceano é influenciada por densas suspensões de sedimento orgânico; contudo, o papel dos organismos biológicos ainda é um tema que necessita um maior entendimento, no que se refere ao seu papel como agente na absorção do som no oceano. Atualmente, métodos acústicos vêm sendo aplicados para a avaliação dos níveis populacionais de zooplâncton e diferentes espécies de peixes; porém, a influência de organismos menores, como o fitoplâncton, na absorção acústica, não tem sido amplamente explorada, como discutido por (RHODES, 2008).

Trabalhos recentes têm destacado a capacidade que uma determinada espécie de fitoplâncton tem de alterar as propriedades físicas do oceano, nomeadamente pela capacidade de aumentar a viscosidade da água do mar. Tal aumento da viscosidade pode ter um impacto direto na absorção da onda acústica.

A ecologia do fitoplâncton e as dinâmicas biológicas e físicas estão conectadas. Há evidências que o comportamento do fitoplâncton pode afetar significativamente a física oceânica (SUTHERLAND; NICHOLS; KALTENBERG, 2012). Embora a variação da viscosidade da água do mar seja principalmente devido a fatores físicos (por exemplo, temperatura e salinidade), fatores biológicos

também podem ser importantes no aumento da viscosidade em pequenas escalas (JENKINSON,1986; JENKINSON; SUN, 2010). A viscosidade biologicamente aumentada depende da dinâmica temporal das comunidades fitoplanctônicas, com efeitos mais expressivos durante o aumento "explosivo" de densidade da espécie (bloom) (SEURONT; VINCENT; MITCHELL, 2006; SEURONT *et al.*, 2007).

Assim, podemos definir, como principais fatores que afetam a propagação do som no mar: a) Propriedades químicas e b) Propriedades físicas do oceano, já bem documentada na literatura; e, c) os componentes biológicos, mais especificamente, a influência do fitoplâncton nas propriedades físicas do oceano.

Autores como Seuront *et al.* (2007); Rhodes (2008); Kesaulya *et al.* (2008); Sutherland, Nichols e Kaltenberg, (2012) descrevem evidências do fitoplâncton modificando significativamente as propriedades reológicas (A reologia é a ciência das deformações e fluxos na matéria, tensões que resultam e das tensões que os produzem. Mecânica, Física, Química e Biologia fornecem as principais bases para este ciência interdisciplinar, que por sua vez é uma parte indispensável da cada um deles conforme Jenkinson e Sun, (2010)) da água do mar devido ao *bloom* destes organismos. Afigura-se assim como de interesse científico abordar a questão da propagação acústica num meio contendo fitoplâncton.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar a influência do fitoplâncton na propagação acústica submarina, com particular ênfase nas perdas de propagação do som induzidas pela presença de fitoplâncton no ambiente de propagação.

2.2 ESPECÍFICOS

- Realizar levantamentos teóricos para apresentar a atenuação acústica induzida pela presença de fitoplâncton na água.
- Realizar um experimento acústico controlado, a fim de obter dados experimentais sobre a atenuação induzida pelo fitoplâncton.
- Comparar os resultados do experimento com as descrições teóricas da literatura.

3 HIPÓTESE

Grandes concentrações de fitoplâncton interferem na absorção da energia sonora em ambientes marinhos.

4 ATENUAÇÃO ACÚSTICA

No contexto da Acústica Submarina a atenuação pode ser definida como a diminuição da amplitude da onda pro pagante, por unidade de distância, à medida que a onda atravessa o meio de propagação. Tal perda acontece devido à transformação da energia da onda em outras formas de energia (como por exemplo, calor). A expressão matemática da atenuação é dada por:

$$P(x) = P_0 e^{-\alpha x} \ , \tag{2}$$

onde P_0 representa a amplitude inicial da onda, P(x) é a amplitude da mesma à distância x e α é o coeficiente de atenuação. A taxa exponencial de decaimento as unidades de α no SI são indicadas como “neper por metro", ou Np/m. Outra grandeza de grande interesse em Acústica Submarina é a intensidade da onda, definida como

$$I(x) = \frac{P(x)^2}{\rho c} \ , \tag{3}$$

onde ρ representa a densidade do meio de propagação e c é a velocidade do som correspondente.Tendo em conta a grande variabilidade de valores exibidos pela intensidade de uma onda acústica no oceano o coeficiente de atenuação é dado pela expressão

$$a = -\frac{1}{10} \log_{10} \left[\frac{I(x)}{I_0} \right] \ , \tag{4}$$

onde as unidades de α correspondem a “decibel por metro", ou dB/m. A partir das equações (2) e (3) é possível concluir que

$$\frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{m}} = \frac{20}{\ln 10} \frac{\mathrm{Np}}{\mathrm{m}} \ . \tag{5}$$

Devido às escalas típicas do oceano muitas das fórmulas são apresentadas com um coeficiente de atenuação a_0 em dB/km. Não é difícil concluir que

$$\frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{km}} = 10^{-3}\,\frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{m}}\ . \tag{6}$$

4.1 ATENUAÇÃO NA ÁGUA SALGADA POR ABSORÇÃO

Na água salgada o mecanismo de atenuação é induzido pela relaxação molecular devido à interação da onda com o Sulfato de Magnésio ($MgSO_4$) e o Ácido Bórico (H_3BO_3) presentes na água do mar. Como descrito anteriormente, essa relaxação molecular consiste na dissociação dos componentes iônicos da solução, devido às variações locais de pressão causadas pela onda acústica. Este processo de relaxamento é dominante na absorção do som na água do mar. Se o período da variação da pressão local é superior ao tempo necessário para a molécula se recompor, o processo é reproduzido em todos os ciclos, dissipando a energia permanentemente (LURTON, 2010).

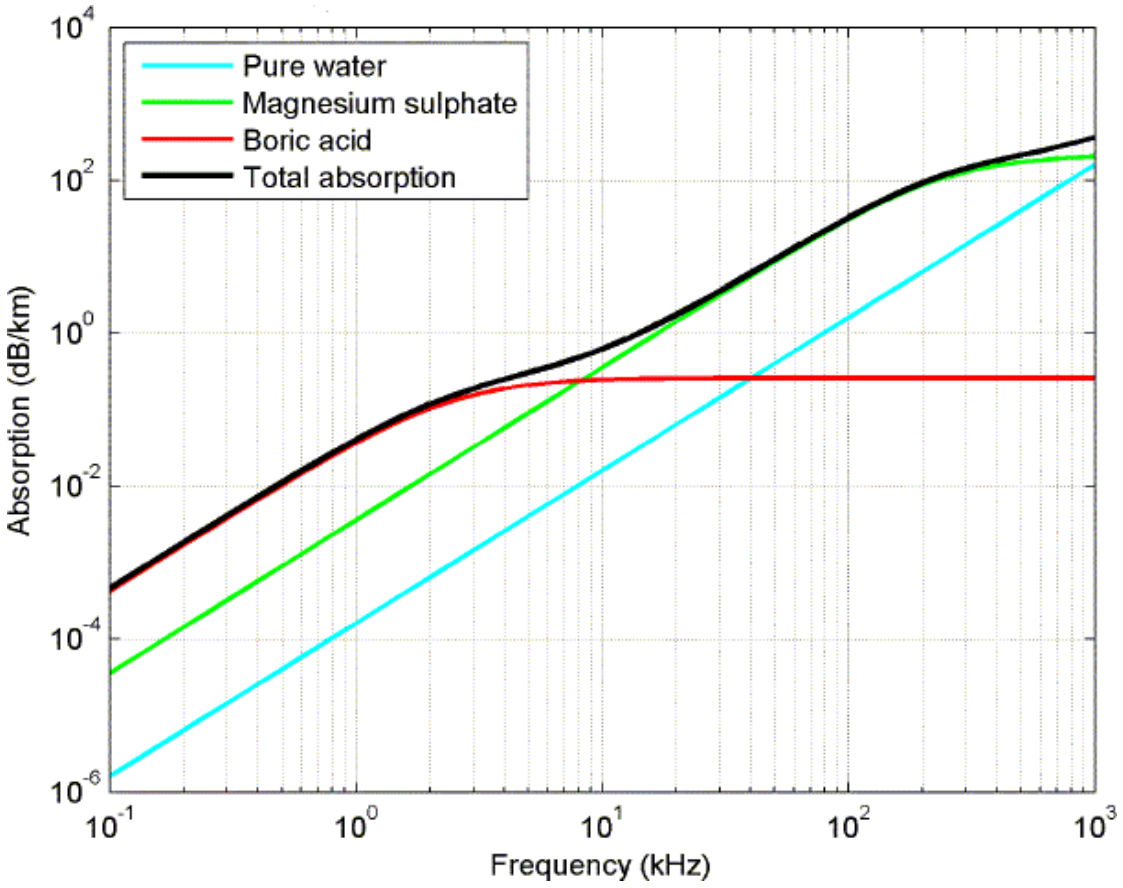
O modelo fenomenológico apresentado em Francois e Garrison (1982a) considera os processos de relaxação acima referidos, apresentando o coeficiente de atenuação dado pela expressão

$$a' = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{{f_1}^2 + f^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{{f_2}^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2\ . \tag{7}$$

Nesta expressão os dois primeiros termos representam os processos de relaxamento químico, sendo o primeiro (A_1) por ácido bórico (H_3BO_3) e o segundo (A_2) por sulfato de magnésio ($MgSO_4$); o terceiro (A_3) termo representa a atenuação em água pura.

A figura 4.1 ilustra as contribuições dos diferentes componentes do sal marinho ao longo da frequência.

Figura 4.1 – Coeficiente de atenuação em função da frequência. Onde a linha azul representa a atenuação em água pura, as linhas vermelha e verde representam, respectivamente, a atenuação devido ao ácido bórico (H_3BO_3) e por sulfato de magnésio ($MgSO_4$), e a linha preta é a soma de todos esses componentes, segundo o modelo de Francois e Garrison (1982a, 1982b).



Na equação (7) os valores das diferentes constantes são dados por:

• (ácido bórico, H_3BO_3):

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{8.86}{c} \times 10^{(0.78pH-5)} \text{ dB/(km} \cdot \text{kHz)}, \\ P_1 &= 1, \\ f_1 &= 2.8(S/35)^{0.5} 10^{(4-1245/\theta)} \text{ kHz}, \end{aligned} \tag{8}$$

onde c é a velocidade do som (m/s), dada por

$$c = 1412 + 3.21T + 1.19S + 0.0167D \; ; \tag{9}$$

em que T representa a temperatura em graus Celsius, e S é a salinidade e D é a profundidade em metros.

• (sulfato de magnésio, $MgSO_4$):

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{21.44S}{c}(1+0.025T)\ \mathrm{dB/(km \cdot kHz)}, \\ P_2 &= 1-1.37\times10^{-4}D+6.2\times10^{-9}D^2, \\ f_2 &= \frac{8.17\times10^{(8-1990/\theta)}}{1+0.0018(S-35)}\ \mathrm{kHz}, \end{aligned} \tag{10}$$

• água pura: Para T ≤ 20 ◦C,

$$\begin{aligned} A_3 = 4.937\times10^{-4} - 2.59\times10^{-5}T + 9.11\times \\ 10^{-7}T^2 - 1.50\times10^{-8}T^3\ \mathrm{dB/(km \cdot kHz^2)}. \end{aligned} \tag{11}$$

Para T > 20 ◦C,

$$\begin{aligned} A_3 = 3.964\times10^{-4} - 1.146\times10^{-5}T + 1.45\times \\ 10^{-7}T^2 - 6.50\times10^{-10}T^3\ \mathrm{dB/(km \cdot kHz^2)}. \end{aligned} \tag{12}$$

Recorrendo a um conjunto extenso de dados experimentais (FRANCOIS; GARRISON, 1982a, 1982b) foi possível concluir que entre 10 e 1000 kHz a atenuação do som na água do mar pode ser atribuída ao sulfato de magnésio ($MgSO_4$), enquanto que abaixo dos 10 kHz a absorção é induzida essencialmente pelo ácido bórico (H_3BO_3).

Na abordagem apresentada em Ainslie e McColm (1998) o conjunto de constantes é reduzido, sem comprometer a precisão original, com:

• (ácido bórico, H_3BO_3):

$$\underbrace{\begin{array}{rcl} A_1 & = & \frac{8.86}{c} \times 10^{(0.78pH-5)}, \mathrm{dBkm^{-1} \cdot kHz^{-1}} \\ P_1 & = & 1 \\ f_1 & = & 2.8(S/35)^{0.5} 10^{(4-1245/\theta)} \mathrm{kHz}, \end{array}}_{f_1 = 0.78(S/35)^{1/2} e^{T/26}} \tag{13}$$

• (sulfato de magnésio, $MgSO_4$):

$$\underbrace{\begin{array}{rcl} A_2 & = & 21.44 \frac{S}{c}(1 + 0.025\mathrm{T})\mathrm{dBkm^{-1} \cdot kHz^{-1}} \\ P_2 & = & 1 - 1.37 \times 10^{-4}\mathrm{D} + 6.2 \times 10^{-9}\mathrm{D}^2 \\ f_2 & = & \frac{8.17 \times 10^{(8-1990/\theta)}}{1+0.0018(S-35)} \mathrm{kHz} \end{array}}_{f_2 = 42 e^{T/17}} \tag{14}$$

O que permite obter a seguinte equação de atenuação:

$$\begin{array}{c} \alpha = 0.106 \frac{f_1 f^2}{f_2 + f_1^2} e^{(pH-8)/0{,}56} \quad + \\ 0.52(1 + \frac{T}{43})(\frac{S}{35}) \frac{f_2 f^2}{f^2 + f_2^2} e^{-2/6} \quad + \\ 0.00049 f^2 e^{-(T/27 + z/17)} \end{array} \tag{15}$$

que é válida nas condições seguintes:

$$\begin{array}{cc} -6 < \mathrm{T} < 35°\mathrm{C} & (\mathrm{S} = 35 \text{ ppt}, \mathrm{pH} = 8, \mathrm{z} = 0) \\ 7.7 < \mathrm{pH} < 8.3 & (\mathrm{T} = 10°\mathrm{C}, \mathrm{S} = 35 \text{ ppt}, \mathrm{z} = 0) \\ 5 < \mathrm{S} < 50 \text{ ppt} & (\mathrm{T} = 10°\mathrm{C}, \mathrm{pH} = 8, \mathrm{z} = 0) \\ 0 < \mathrm{z} < 7 \text{ km} & (\mathrm{T} = 10°\mathrm{C}, \mathrm{S} = 35 \text{ ppt}, \mathrm{pH} = 8) \end{array} \tag{16}$$

4.2 ATENUAÇÃO INDUZIDA POR VISCOSIDADE

No caso da propagação acústica num meio viscoso a atenuação é induzida devido a uma interação complexa entre a onda acústica e as moléculas do meio viscoso, sendo igualmente dependente da frequência das ondas sonoras. Nesta interação manifestam-se dois tipos diferentes de viscosidade.

A primeira é a viscosidade de cisalhamento, a qual é definida como a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação (MEDWIN; CLAY, 1997). A segunda é a viscosidade volumétrica e representa uma medida da difusão por

colisões moleculares entre regiões do fluído com velocidades diferentes; a viscosidade volumétrica condiciona o tempo requerido para que o sistema se aproxime do equilíbrio quando a densidade e a temperatura do fluído são alteradas pela expansão ou compressão da onda propagante (KINSLER *et al.*, 2000).

Na atenuação dada pelas equações (7) e (15) a viscosidade da água é influenciada apenas pelos campos de temperatura e salinidade. No entanto, tal como discutido em Jenkinson (1986); Seuront, Vincent e Mitchell, (2006); Seuront *et al.*, (2007), os elementos de natureza biológica presentes na água do mar podem contribuir igualmente para mudar a sua viscosidade. Esta contribuição pode ser incluída escrevendo a viscosidade total η_m da água na forma (SEURONT *et al.*, 2007).

$$\eta_m = \eta_{T,S} + \eta_{BIO} \ , \tag{17}$$

onde $\eta_{T;S}$ é a viscosidade devido aos componentes físicos da água e η_{BIO} é a viscosidade da componente biológica. É possível então corrigir o coeficiente de atenuação com base na expressão (RHODES, 2008).

$$\begin{aligned} a' = 0.106 \tfrac{f_1 f^2}{f^2+f_1^2} e^{(pH-8)/0.56} \quad + \\ 0.52(1+\tfrac{T}{43})(\tfrac{S}{35})\tfrac{f_2 f^2}{f^2+f_2^2} e^{-z/6} \quad + \\ C f^2 e^{(-T/27-z/17)} \end{aligned} \tag{18}$$

Nesta equação C corresponde ao componente biológico (fitoplâncton) (KINSLER *et al.*, 2000), dado por

$$C = \frac{8\pi^2}{3p_0^{c^3}}(\eta + \frac{3}{4}\eta_B) f^2 \quad \mathrm{m}^{-1}; \tag{19}$$

nesta expressão

$$\begin{aligned} p_0 &\Rightarrow \text{densidade} \\ \eta &\Rightarrow \text{viscosidade atribuída ao fitoplâncton} \\ \eta_B &\Rightarrow \text{viscosidade total} \\ c &\Rightarrow \text{velocidade do som} \end{aligned} \tag{20}$$

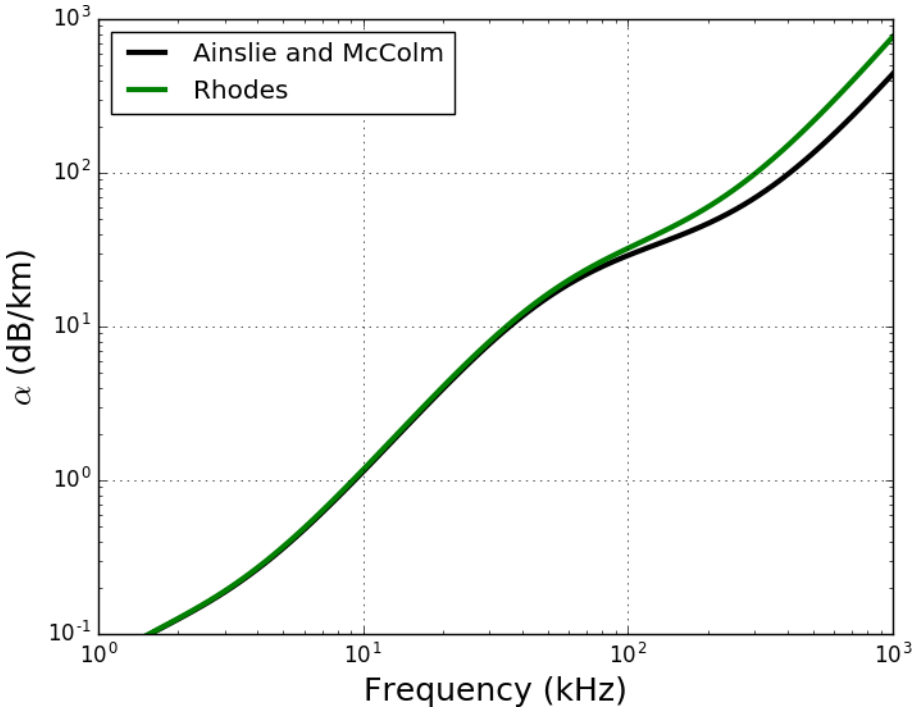
onde Rhodes (2008)

$$\eta = \eta_{T,S}(1+\varepsilon) \ ; \tag{21}$$

tendo sido ε definido como o excesso de viscosidade influenciado pelo fitoplâncton (SEURONT *et al.*, 2007), dado por

$$\varepsilon = \frac{\eta_{BIO}}{\eta_{T,S}} \ . \tag{22}$$

Figura 4.2 – Coeficientes de atenuação em função da frequência. A linha preta representa a atenuação acústica para água do mar usando a formulação (Ainslie e McColm (1998) e a linha verde representa a atenuação acústica com o excesso de viscosidade influenciado pelo fitoplâncton conforme Rhodes (2008).



O coeficiente de atenuação, calculado com e sem a viscosidade, é mostrado na figura 4.2.

Os resultados dos cálculos são extremamente reveladores no sentido de indicar que os efeitos da viscosidade só se tornam relevantes a partir dos 100 kHz, o

que é de fato uma frequência que raramente é usada em transmissões acústicas no oceano devido ao elevado grau de perda de sinal.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 O EXPERIMENTO

Os experimentos são um complemento fundamental da modelagem acústica submarina uma vez que permitem desenvolver referências, que devem ser reproduzidas pelos modelos acústicos para um conjunto apropriado de parâmetros ambientais (RODRÍGUEZ *et al.*, 2012). Uma tendência que vai ganhando cada vez mais popularidade corresponde à realização de experimentos em tanques, com os quais se podem evitar os grandes custos das campanhas típicas no mar, para além de permitir a obtenção de dados acústicos de grande qualidade. Tendo em conta a especificidade do problema aqui discutido foi decidido desenvolver um experimento nas instalações do IEAPM, com transmissões de sinais acústicos num tanque (Figura 5.1) com três ambientes diferentes, nomeadamente:

- Com água doce (água encanada sem tratamento);
- Com água salgada (água do mar autoclavada);
- Com água salgada contendo fitoplâncton (água do mar autoclavada com adição de fitoplâncton).

O experimento ocorreu, entre os dias 01/11/2017 e 06/11/2017. O tanque, o equipamento e o material biológico, no caso o fitoplâncton são descritos nas seções que se seguem.

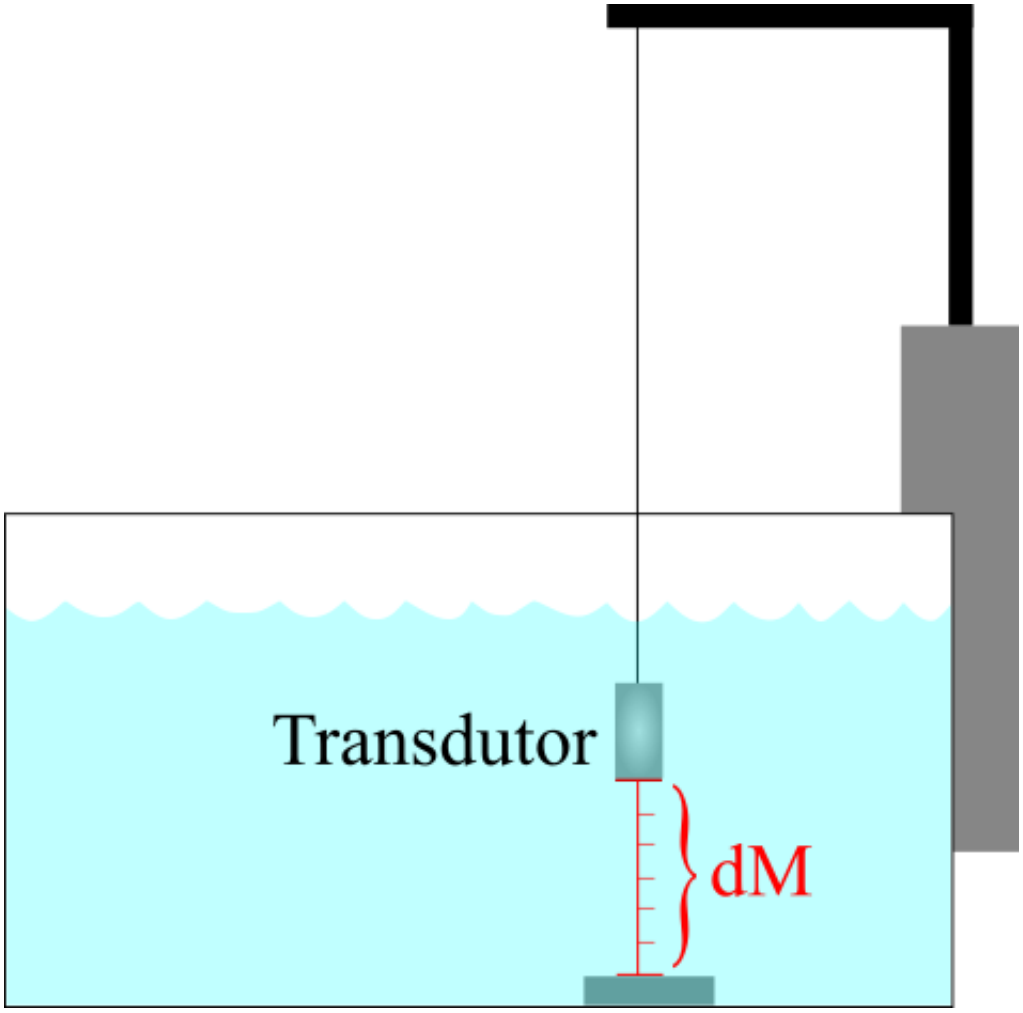
5.2 O TANQUE

Foi utilizado o tanque do Laboratório de Larvicultura do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) utilizado nas diferentes transmissões. O tanque, de dimensões 120 x 60 x 60 cm, é revestido de cerâmica e permite conter um volume aproximado de 216 litros de água. A realização de transmissões foi grandemente favorecida pela utilização de um transdutor de alta frequência, que tal como indicado, na Figura 5.2 ficou posicionado na vertical graças a uma extensão de madeira (que foi instalada no decorrer das primeiras transmissões).

Adicionalmente foi decidido posicionar uma placa de cerâmica no fundo do tanque para evitar eventuais perdas de energia induzidas pelo massa branda que separa as lajes do fundo; no início das transmissões partiu-se do princípio de que seria possível determinar a impedância da placa a partir dos dados experimentais, ou a partir das tabelas que constam na literatura disponível, contudo, nesta suposição revelou-se ineficaz, pelo que a estimativa de valores experimentais é desenvolvida sem recorrer à impedância da placa.

Figura 5.1 – Tanque do IEAPM de dimensões 120 x 60 x 60 cm, revestido de cerâmica com volume utilizado de aproximadamente 216 litros de água, usado nas transmissões do sinal acústico.

Figura 5.2 – Esquema de transmissões acústicas realizado no tanque onde dM representa metade da distância percorrida pelo sinal refletido.



5.3 FONTE ACÚSTICA

Para a realização das transmissões acústicas foi utilizado o transdutor ultrassônico mostrado na Figura 5.3, da marca KARL DEUTSCH, modelo TS 10 WB 2-7 P60 HT-120◦C; trata-se de uma sonda de imersão com invólucro cilíndrico, cristal de diâmetro 10 mm, largura de banda 2-7 MHz e ponto focal a 60 mm; o transdutor é capaz de funcionar até os 120◦C e suportar pressões até 120 bar. O campo acústico gerado por este dispositivo pode ser dividido em campo próximo e campo distante; no campo próximo o vértice do cone sônico se encontra a 60 mm da face do transdutor, e dentro dessa zona é difícil prever a amplitude do sinal advindo de um

possível refletor. Os sinais emitidos pelo transdutor foram gerados por um gerador de sinal.

Figura 5.3 – Transdutor ultrassônico da marca KARL DEUTSCH, modelo TS 10 WB 2-7 P60 HT-120°C; usado para transmitir os sinais durante o experimento. Cedido pelo Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM)

5.4 GERADOR DE SINAIS

Para geração de sinais de excitação do transdutor foi utilizado o gerador/receptor de pulsos ultrassônicos mostrado na Figura 5.4, da marca RITEC, modelo RPR-4000 Pulser/Receiver. Este dispositivo pode gerar pulsos de radiofreqüência e alta potência com duas combinações de parâmetros, nomeadamente:

• uma potência de 8kW (para freqüências de 50 kHz a 2 MHz, ou 250 kHz a 5 MHz);

• uma potência 400W (para freqüências de 100 kHz a 10 MHz).

O pulso utilizado para esse experimento possui uma freqüência de 1 MGh (1.000.000 Hz), com um comprimento de onda (λ) de 0,01 cm com um período de 1 milionésimo de segundo (0.0000001 s), o que torna possível evitar reflexões espúrias. No seu conjunto o processo de geração e transmissão do sinal acústico pode ser resumido da seguinte forma:

• O pulso Rádio frequência (RF) é enviado pelo gerador ao transdutor piezoelétrico;

• O transdutor converte o pulso RF em um pulso ultrassônico de mesma frequência, o qual é transmitido através do meio aquoso;

• O pulso atinge o refletor (a placa no fundo do tanque) e retorna ao transdutor, sendo que a amplitude do pulso acústico recebido é proporcional às propriedades acústicas do meio aquoso;

• No transdutor o sinal recebido é convertido em um pulso de RF pelo efeito piezoelétrico inverso;

• O pulso RF é convertido em um sinal elétrico que pode ser "visualizado" por meio de um osciloscópio.

A digitalização dos sinais emitida e recebida foi conseguida ligando o gerador de sinais a um osciloscópio, que se descreve na seção seguinte.

Figura 5.4 – Gerador de sinais de excitação para o transdutor da marca RITEC, modelo RPR-4000 Pulser/Receiver.Cedido pelo Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM)

5.5 OSCILOSCÓPIO

O osciloscópio é, basicamente, um equipamento eletrônico que permite a visualização e análise de sinais na forma de um gráfico em função do tempo, possibilitando, por exemplo, a determinação de amplitudes e freqüências de sinais, bem como a comparação de sinais diferentes. No experimento foi usado um

osciloscópio de domínio misto mostrado na Figura 5.5, o qual integra um osciloscópio de sinal misto (ou seja, que permite incluir recursos de análise lógica e protocolo), e que realiza medições de sinais analógicos, digitais e de RF. O osciloscópio em questão possui dois sistemas de aquisição, sendo um para os canais analógicos e digitais, e o outro para o analisador de espectro; ambos os canais estão correlacionados com o tempo e os dados do osciloscópio podem ser gravados em arquivos ASCII, com a extensão *.dat.

Figura 5.5 – O osciloscópio é um equipamento eletrônico que permite a visualização e análise de sinais na forma de um gráfico em função do tempo.

5.6 CTD

Antes da realização das transmissões a velocidade do som na água foi medida com ajuda de um equipamento de CTD, (sigla derivada do inglês Conductivity, Temperature, and Depth). Comumente utilizado em Oceanografia, o CTD (Figura 5.6) é um instrumento eletrônico dotado de três sensores distintos para medição de condutividade, temperatura e pressão. Além desses três sensores básicos, podem ser instalados, em um sistema CTD, sensores para medição de outros tipos de parâmetros como, o miniSVS, sensor de velocidade do som, onde o seu princípio básico é o sistema "time of flight", isto é, a velocidade do som é calculada a partir do tempo que um único pulso de som leva para percorrer uma distância conhecida; a qual permitiu obter o valor c = 1493 m/s.

Figura 5.6 – CTD (Conductivity, Temperature, and Depth) é um instrumento oceanográfico que possuem três sensores distintos para medição de condutividade, temperatura e pressão, além de outros parâmetros; o qual foi utilizado para medir de forma direta a velocidade do som.

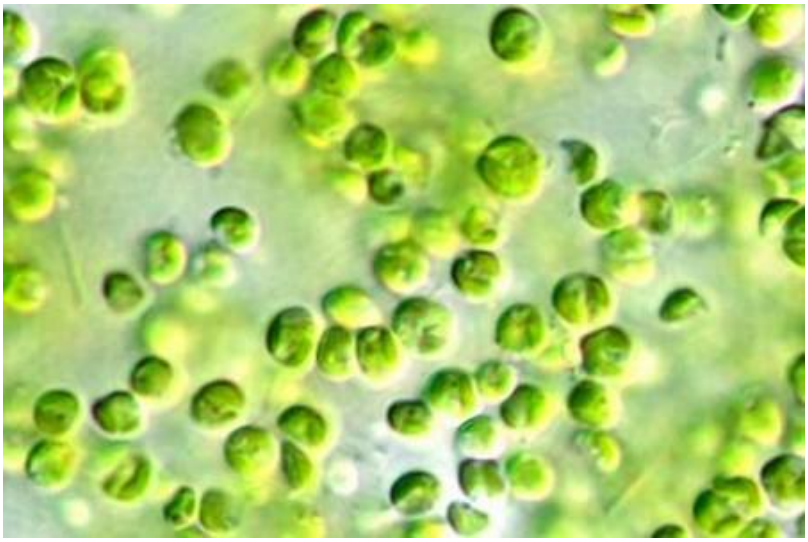
5.7 FITOPLÂNCTON

Para realização do experimento foi feita uma avaliação questão de qual espécie de fitoplâncton que seria escolhida, tendo essa escolha recaída na *Nannochloropsis oculata* (Figura 5.7). Pertencente ao Filo Heterokontophyta, Classe Eustigmatophyceae, esta classe compreende oito gêneros e quinze espécies, todas unicelulares cocóides ou coloniais, com distribuição na água doce, no solo úmido e no mar, predominantemente planctônicas. A espécie *Nannochloropsis oculata* tem diâmetro médio de 2 a 4 µm, com células esféricas ou ligeiramente ovóides, não flageladas, altamente resistente (AL-HOQANI; YOUNG; PURTON, 2016; MA, *et al.*, 2016). Vale ressaltar algumas características importantes como:

- Exibe alta eficiência fotossintética;
- Tem um crescimento rápido;
- Exibe uma morfologia simples;

• Facilmente adaptável.

Figura 5.7 – Imagem ampliada da microalga Nannochloropsis oculata.



Fonte: (GRIS, 2011)

Foi utilizado um inoculo de *Nannochloropsis oculata* do banco de cepas do Laboratório de Cultivo de Microalgas do IEAPM. Antes do experimento o inoculo foi aclimatado por duas semanas nas condições de temperatura, salinidade e luz iniciais do experimento.

O inoculo de *Nannochloropsis oculata* do cepário do laboratório foi cultivado em meio Conway (Tabela 5.1) até atingir aproximadamente 35 litros, os quais foram usados para dar início ao experimento. O cultivo foi realizado em uma sala com temperatura controlada de 25±2 °C, com luz constante de aproximadamente 120 µmol fótons.m^{-2}.s^{-1}, salinidade inicial de 30 e aeração moderada e constante.

Tabela 5.1: Composição do meio Conway (CON)(WALNE, 1966)

Nutrientes	Concentração final (mg.L^{-1} água do mar)
$FeCl_3.66H_2O$	1,3
$MnCl_2.4H_2O$	0,36
EDTA	45
H_3BO_3	33,6
$NaH_2PO_4.{}_2H_2O$	20
$NaNO_3$	100
B12	0,000005
B1	0,0001
$CoCl_2.6H_2O$	0,020
$(NH_4)6Mo_7O_{24}.4H_2O$	0,009
$CuSO_4.5H_2O$	0,02

Após atingir a quantidade estimada para inicialização do experimento, o inóculo foi adicionado ao tanque, com a água salgada e autoclavada, com adição de nutrientes (Sulfato de amônia - 32.4g; Superfosfato de cálcio 5.4g; Uréia 1.62g), tal como mostrado na Figura 5.8.

Figura 5.8 – Caminho percorrido do inoculo original para o cultivo, replicagem em balões, adição de nutrientes (sulfato de amônia, uréia e superfosfato de cálcio) no tanque e introdução do cultivo ao tanque.

Após cada transmissão, foram coletados, do tanque, 6 amostras de 5,0 mL, para contagem de células. O mesmo procedimento foi adotado em todos os dias. As amostras foram conservadas na solução de 250 µL de formol puro.

A contagem dos organismos fitoplanctônicos foi feita no Laboratório de Plâncton do IEAPM, em um microscópio invertido, utilizando uma câmara de Neubauer, em aumento de 400x.

A partir da contagem celular, foi realizado o cálculo da densidade celular utilizando a metodologia adaptada de (BARSANTI; GUALTIERI, 2014).

Densidade celular (células/mL^{-1}) = (número contados * diluição / 0,025) * 1000

5.8 PROCESSAMENTO DE SINAIS

A figura 5.9 mostra uma captura da imagem do osciloscópio, mostrando os dados acústicos que foram sendo adquiridos ao longo do experimento. Para além da representação gráfica o osciloscópio permitiu gravar os sinais num arquivo de texto; os sinais foram então processados com técnicas de processamento clássicas (PROAKIS; SALEHI, 2000) para obter informação sobre P_0 (a amplitude inicial) e P(x) (a amplitude do sinal atenuado).

Esse processamento consistiu em automatizar a separação entre o sinal emitido e o sinal recebido nos dados do arquivo, realizar cálculos para análise destes sinais (Transformada de Fourier e Hilbert) e a partir destas informações calcularem o valor absoluto, apresentado como padrão de chegada. O resultado deste processamento é mostrado na figura 5.10, com os padrões exibindo invariavelmente uma forma triangular, mas com alturas diferentes, esta forma triangular foi obtida por meio da detecção por filtro casado que consiste na função de correlação cruzada entre o sinal recebido e a réplica do sinal transmitido, desta forma. Tais alturas podem ser calculadas facilmente, e são proporcionais às intensidades do sinal emitido e recebido; para obter os valores de P_0 e P(x) basta calcular a raiz quadrada destas alturas. A forma triangular dos padrões permite igualmente determinar a separação temporal entre as alturas, Δt, a qual permite obter o valor de x multiplicando Δt pela velocidade de propagação (que fora previamente medida com um dispositivo de CTD).

Figura 5.9 – Captura da imagem do osciloscópio, mostrando o sinal emitido (à esquerda) e o sinal recebido (à direita).

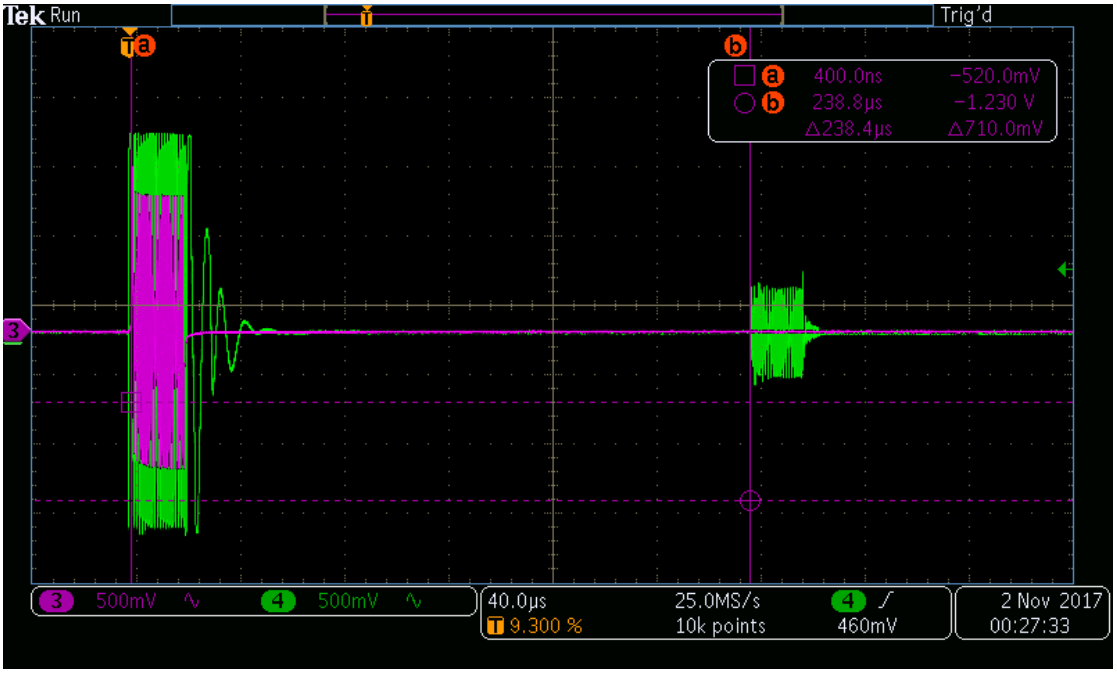
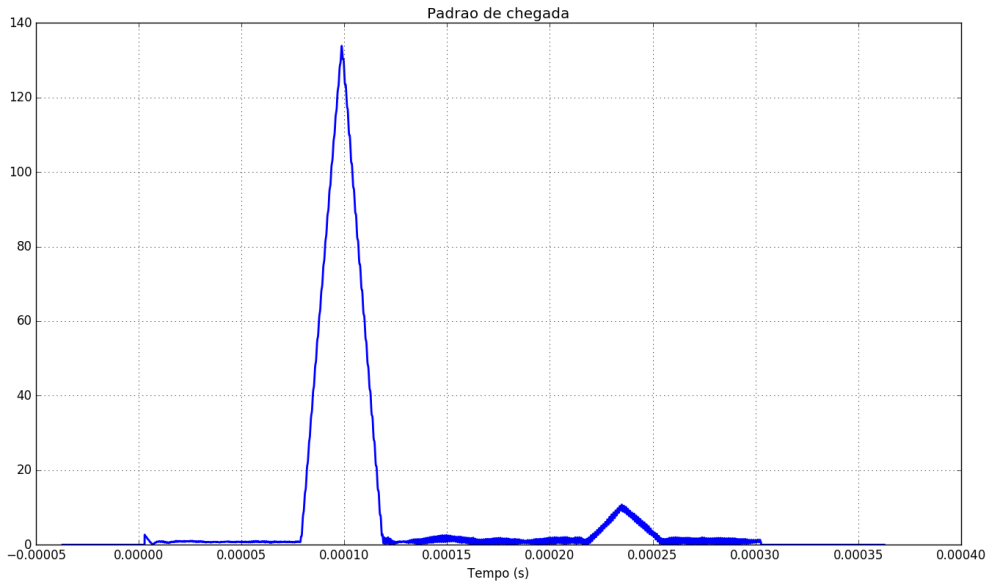


Figura 5.10 – Padrões de chegada do sinal emitido (triângulo alto) e do sinal recebido (triângulo baixo).



6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processamento progressivo dos dados experimentais obtidos ao longo das diferentes etapas do experimento permitiu obter os dados que se mostram a seguir (x é dado em metros, às unidades de P_0 e P(x)):

• Água doce:

P_0	20.30	20.31	20.34	20.31	20.32
P(x)	8.64	9.40	9.91	10.43	11.57
X	0.30	0.25	0.22	0.19	0.15

• Água salgada:

P_0	19.87	20.07	20.05	20.06	19.94
P(x)	6.06	6.40	6.68	6.77	8.65
X	0.26	0.23	0.20	0.18	0.15

• Água salgada com fitoplâncton:

P_0	19.55	19.86	19.87	19.83	19.74
P(x)	3.95	5.01	5.18	5.35	5.61
X	0.31	0.22	0.20	0.18	0.15

Estes dados formam a base de entrada, onde o ponto de partida para o processamento é dado pela lei de decaimento.

$$P(x) = P_0 e^{-\alpha x} \ , \tag{23}$$

em que x é a distância percorrida pelo sinal, P_0 é a amplitude do sinal emitido e P(x) amplitude do sinal atenuado. Para ter em conta a reflexão do sinal na placa de cerâmica é preciso reescrever a equação anterior na forma

$$P(x) = R P_0 e^{-\alpha x} \ , \tag{24}$$

onde R é o coeficiente de reflexão da placa, que é de fato desconhecido. Sejam α_1 e α_2 os coeficientes de atenuação da água doce e da água salgada. Pela lei de decaimento podemos escrever então que

$$P(x) = P_0 R e^{-\alpha_1 x} \quad \text{e} \quad P'(x) = P_0 R e^{-\alpha_2 x} \ , \tag{25}$$

onde P(x) representa a amplitude do sinal atenuado na água doce e $P_0(x)$ amplitude do sinal atenuado na água salgada. Podemos ver que

$$\frac{P'(x)}{P(x)} = e^{(\alpha_1 - \alpha_2)x} \ , \tag{26}$$

o que nos permite estimar a diferença entre atenuações como

$$\Delta\alpha(x) = \frac{1}{x} \ln \left[\frac{P'(x)}{P(x)} \right] \ , \tag{27}$$

onde $\Delta\alpha(x) = \alpha_1 - \alpha_2$; em outras palavras, a razão entre duas curvas de atenuação pode ser aproveitada para eliminar o coeficiente de reflexão desconhecido e para obter a diferença entre atenuações. Numa situação ideal $\Delta\alpha(x)$ seria uma constante; em condições reais deverá verificar-se alguma variabilidade ao longo de x, logo se considera justificado apresentar a estimativa final como o valor médio de $\Delta\alpha(x)$.

6.1 DADOS EXPERIMENTAIS DE ATENUAÇÃO

O conjunto original de pontos para os três conjuntos de medidas se encontra ilustrado na Figura 6.1, a qual mostra de maneira clara o aumento da atenuação do sinal quando se refere da água doce para a água salgada, e quando se transita da água salgada para a água salgada com fitoplâncton.

A diferença das amplitudes medidas, entre água doce e água salgada (Figuras 6.2 e 6.3) pode ser evidenciada pela presença de sais, na qual a água doce é classificada com salinidade igual ou inferior a 0.5, enquanto água salgada é igual ou superior a 30. Além da contribuição do mecanismo de atenuação induzido pela relaxação molecular. A relaxação molecular consiste na dissociação dos

componentes iônicos da solução (principalmente pelo Sulfato de Magnésio ($MgSO_4$) e Ácido Bórico (H_3BO_3)), devido às variações de pressão acústica. Este processo de relaxamento é dominante na absorção do som na água do mar, portanto corroborando com os autores (LURTON, 2010; FRANCOIS; GARRISON 1982a, 1982b).

Figura 6.1 – Amplitudes medidas em diferentes meios (água doce, água salgada e água salgada com adição de fitoplâncton)

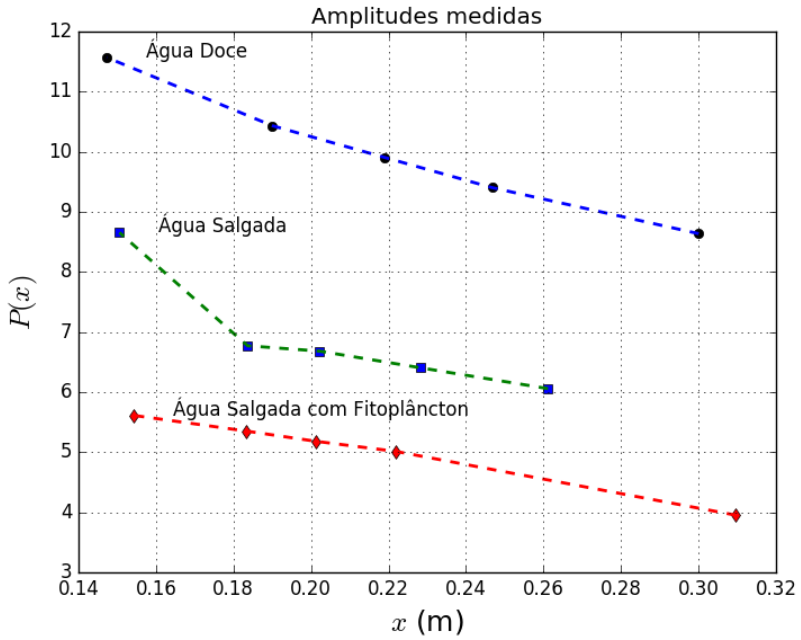


Figura 6.2 – Amplitudes medidas (P(x)) por distância (x) na água doce.

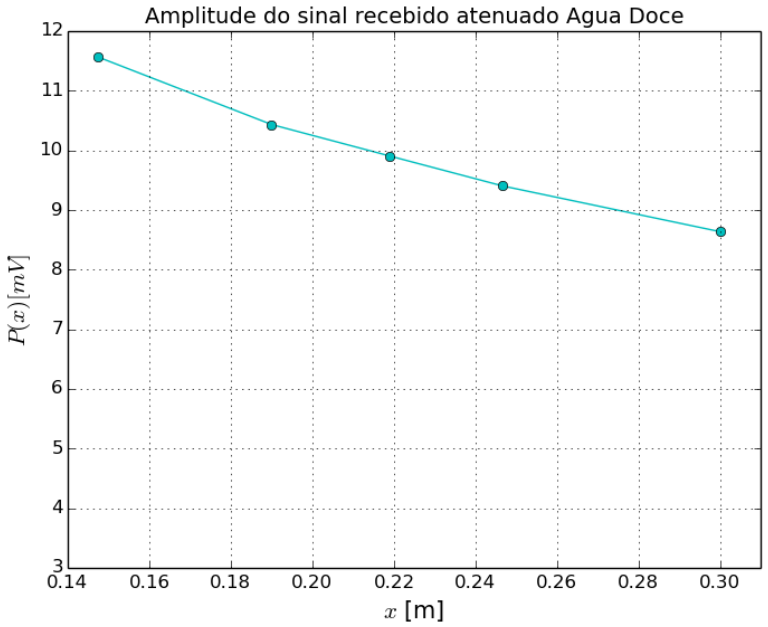
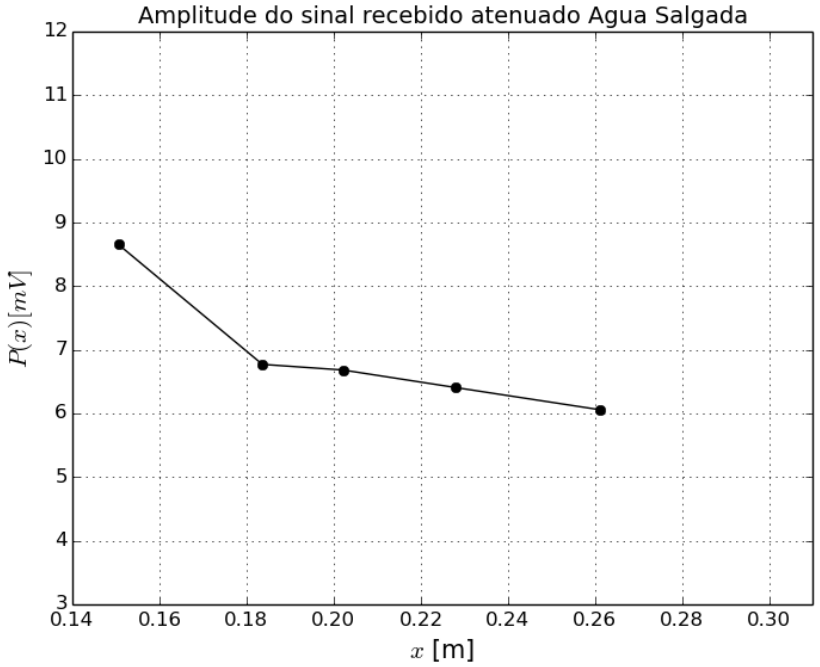
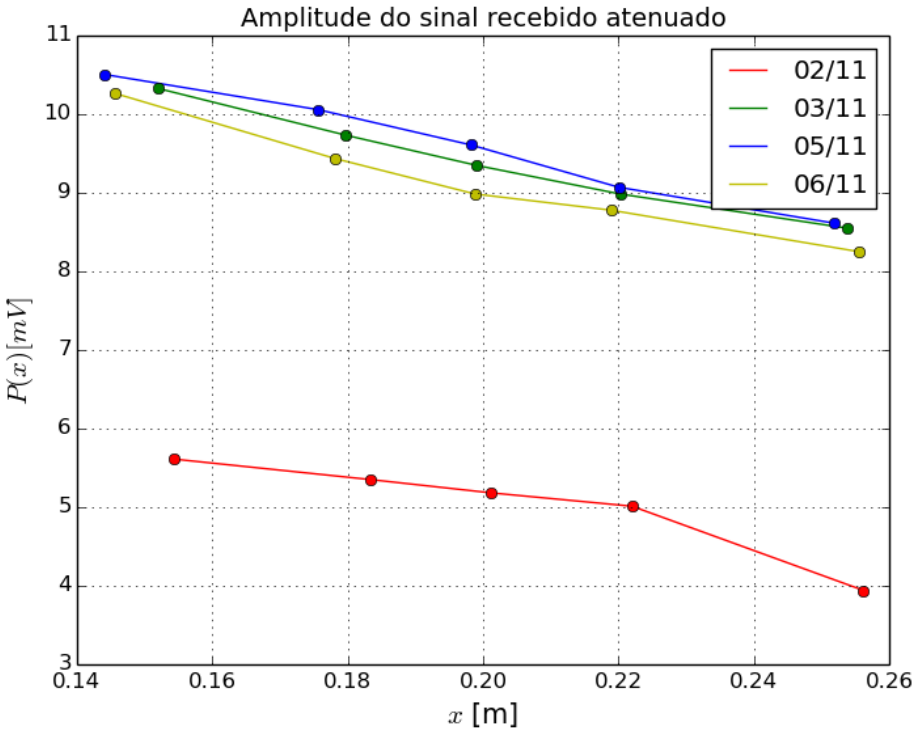


Figura 6.3 – Amplitudes medidas (P(x)) por distância (x) na água salgada.



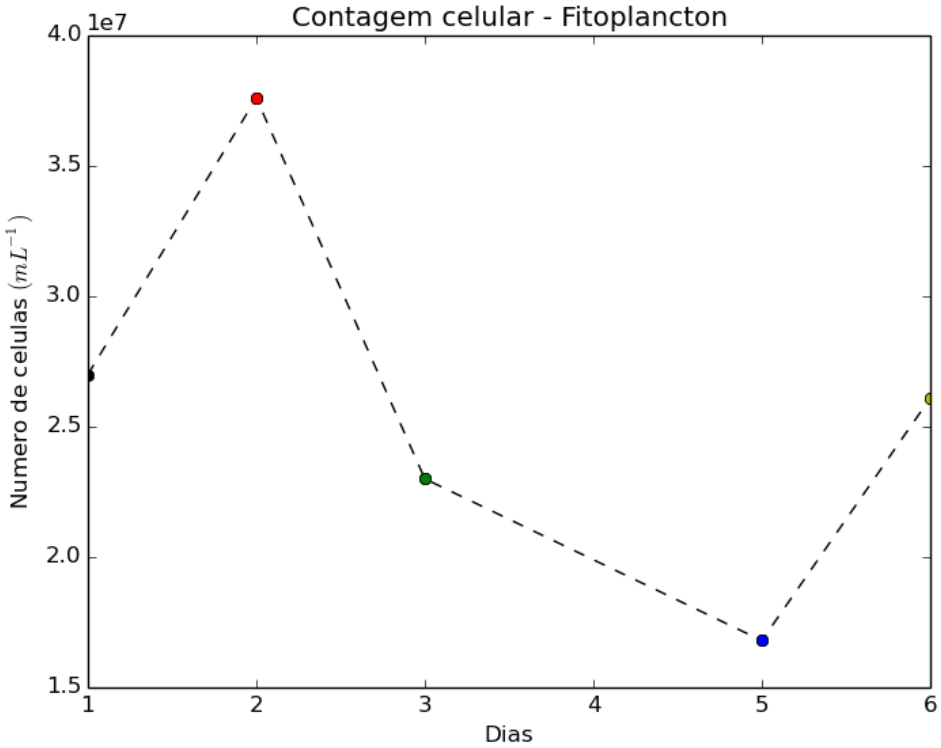
Entretanto, no que diz respeito à água salgada com fitoplâncton há vários fatores pertinentes quando falamos nas diferenças entre as amplitudes medidas.

Figura 6.4 – Amplitudes medidas (P(x)) por distância (x) na água salgada com fitoplâncton.



Na figura 6.4 é possível perceber a variação do sinal acústico por meio da determinação das amplitudes. Na figura 6.4, nota-se uma significativa diminuição da amplitude, comparado com as medições dos dias 03, 05 e 06/11/2017 e primordialmente comparado com o outro meio (água doce e água salgada, respectivamente, 6.2 e 6.3). A fim de elucidar esse episódio, foi aferida concomitantemente a densidade fitoplanctônica (Figura 6.5).

Figura 6.5 – Contagem celular realizada por dias para determinação da densidade fitoplanctônica

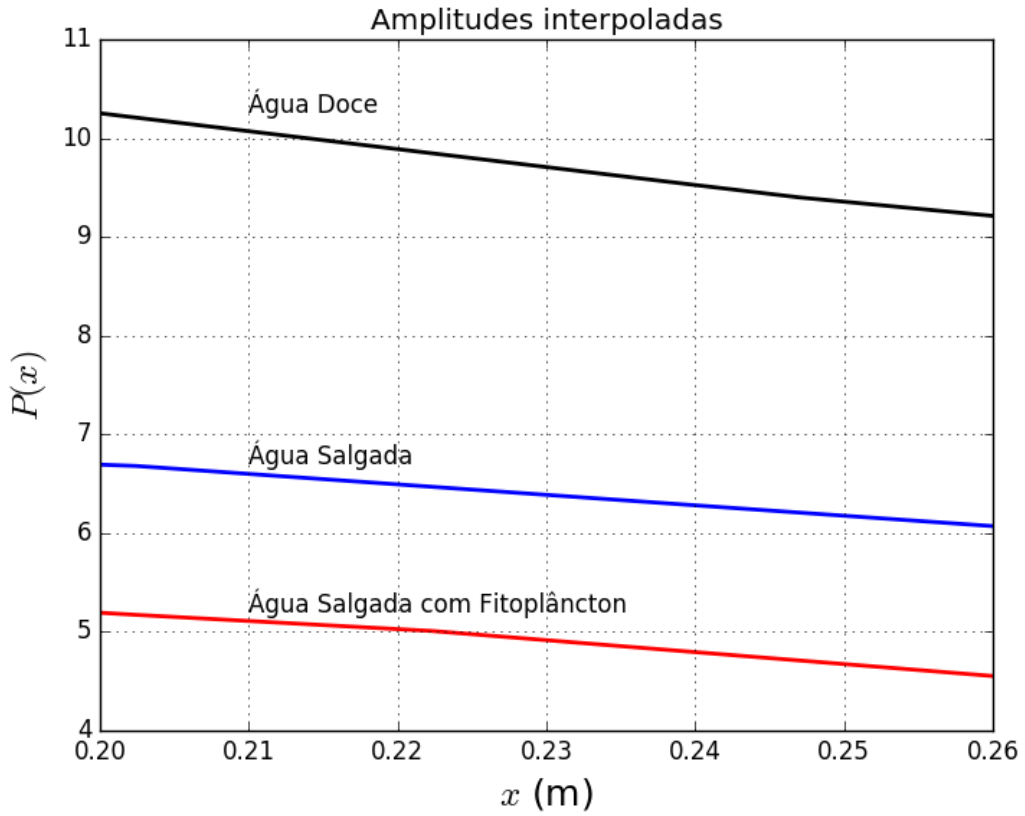


De fato, para correlacionar as diferenças das amplitudes medidas com a presença do fitoplâncton, foram aferidas à densidade fito planctônica. Para isto, foi aplicado para determinação da densidade celular fitoplanctônica (mL^{-1}) a contagem celular. Esta contagem foi realizada como descrito no capítulo 5 (Materiais e Métodos). A densidade estimada possibilitou verificar o comportamento do fitoplâncton no que diz respeito ao crescimento. Estes dados foram amostrados diariamente, durante todo o experimento, com o objetivo de comparar o crescimento dos organismos com os dados acústicos, a figura 5.8 apresenta de forma clara e sucinta este comportamento.

Através das figuras apresentadas até aqui, se torna viável criar uma conexão entre as amplitudes medidas e a presença do fitoplâncton. Observa-se na figura 6.5 um pico na densidade do fitoplâncton no dia 02/11/2017, este pico pode estar associado à significativa diminuição da amplitude também medida no dia 02/11/2017, conforme apresentado na figura 6.4. Tal fato contribui positivamente para a comprovação da influência da presença do fitoplâncton na propagação do som .

Além dos dados medidos da amplitude e a determinação da densidade celular do fitoplâncton, os dados experimentais subsidiaram para a geração de um conjunto de dados interpolados, onde foi possível realizar a distribuição dos pontos experimentais permitindo eliminar os pontos atípicos e interpolar as curvas numa grade comum de distâncias, tal como ilustrado na Figura 5.9.

Figura 6.6 – Curvas de atenuação calculadas sem pontos atípicos, numa grade comum de distâncias.



As curvas interpoladas da Figura 6.6 permitem a aplicação da Eq.(27). Os valores de $\Delta\alpha$ calculados encontram-se indicados na Tabela 6.1; o script em *Python* usado para obter os resultados é mostrado no apêndice.

Novamente, para confirmar a possível influência do fitoplâncton foi verificada a diferença entre os coeficientes de atenuação.

Tabela 6.1: Diferenças entre coeficientes de atenuação.

	$\Delta\alpha$ (Np/m)
Água Salgada Água Doce	-1.83
Água salgada Água Salgada com Fitoplâncton	- 0.58
Água Salgada com Fitoplâncton Água doce	- 2.99

A diferença do coeficiente de atenuação entre água doce e água salgada, foi evidenciada por diversos autores, como descrito acima, é notório que a velocidade do som, como o parâmetro mais importante na propagação do som, tenha seu comportamento influenciado, conforme apresentados em revisões anteriores, logo, é possível correlacionar os levantamentos teóricos com os resultados obtidos de acordo com dados medidos a partir do experimento conforme a tabela 5.1, na qual apresenta um coeficiente de atenuação de $\Delta\alpha$ = -1.83 Np/m, entre água doce e água salgada.

Todavia, quando a atenção é voltada para as comparações com água salgada com a inclusão do componente biológico, o fitoplâncton, é necessários maiores detalhamentos. Com o propósito de facilitar o entendimento dos meios distintos, juntamente com as diferenças do coeficiente de atenuação entre eles, a partir deste ponto do trabalho, os meios passarão a ser denominados como:

- Água doce - Água salgada → **A**
- Água salgada com fitoplâncton - Água salgada → **B**
- Água salgada com fitoplâncton - Água doce → **C**

Para efeito de comparação, será atribuído ao **A**, um valor de referência de 100 %, que servirá como base para a determinação da relação das diferenças entre os coeficientes ($\Delta\alpha$) e os meios. A vista disso é apresentada na tabela 6.2, o

coeficiente de atenuação do **B** ($\Delta\alpha$ = -0.58 Np/m). De fato, podem-se observar quando comparado com o **A** uma relação proporcional de **31.5%**.

Tabela 6.2: Diferenças entre coeficientes de atenuação.

	$\Delta\alpha$ (Np/m)	Valor de referência (%)
A	-1.83	100
B	-0.58	31.5

Esse resultado é revelador, pois se afigura que a presença do fitoplâncton impacta em 31:5% sobre o coeficiente de atenuação. Isto devido ao fato do **A**, aqui comparado, já considerar a presença de sais e outros componentes químicos, como mecanismos de atenuação, como citados anteriormente. Na qual, podemos apontar diversos autores que chamam a atenção para evidências, que sugerem que o comportamento do fitoplâncton pode afetar significativamente a propagação sonora, como (JENKINSON, 1986; RHODES, 2008; SURTHERLAND; NICHOLS; KALTENBERG, 2012) entre outros, ressaltam o papel destes organismos afetando as propriedades físicas do oceano.

Este fato pode estar associado à questão do crescimento robusto que o fitoplâncton possui, e desta forma, aumenta a viscosidade da água do mar em que habitam (RHODES, 2008).

Durante o bloom de fitoplâncton, a água do mar com a viscosidade aumentada, torna-se um fluído não-newtoniano, com tensão de cisalhamento não linear relacionada à taxa de deformação, por exemplo, a viscosidade da água do mar aumentada pode modificar o espectro da taxa de cisalhamento que por sua vez, afeta a escala de comprimento de Kolmogorov[1] (JENKINSON,1986), portanto, o aumento da viscosidade pode sim interferir na absorção acústica, com potencial de muitas medidas acústicas "*in situ*" (RHODES, 2008).

Além da viscosidade aumentada devido ao bloom, diversos autores relatam que a espécie de fitoplâncton (*Phaeocystis globosa*) modifica as propriedades reológicas da água do mar (RHODES, 2008). Tal aumento da viscosidade pode ser atribuído ao surgimento de mucoexopolímeros, que são secretados do fitoplâncton alterando as propriedades reológicas da água do mar. (JENKINSON, 1986;1993;

SEURONT; VINCENT; MITCHELL, 2006; SEURONT *et al.*, 2007). Portanto, tem sido observada uma relação positiva entre a viscosidade elevada da água do mar e a abundância de fitoplâncton (ou concentração de clorofila-a) (JENKINSON, 1993). A conseqüência disso é que a viscosidade da água do mar aumenta durante certo estágio do ciclo de vida do organismo. Usando dados de medições de excesso de viscosidade, uma estimativa pode ser feita do potencial de absorção biológica adicional (RHODES, 2008).

Para assegurar a credibilidade dos dados foi repetida 10 vezes, para cada distância, a medição no B com o propósito de comparar os resultados. Isto permitiu observar que o desvio padrão da amplitude medida é irrelevante tanto em relação à média estimada, quanto em relação à diferença do coeficiente de atenuação do sinal em relação à distância. O maior desvio padrão encontrado foi de 0.047 duas ordem de grandeza menor do que as médias de amplitude medidas encontradas. Tais informações inferem que as medições possuem acuracia satisfatória para a proposta do experimento e que as variações de atenuações dos sinais podem ser atribuídas às alterações do meio físico.

Tabela 6.3: Relação entre as distâncias de medição, amplitude média e seus respectivos desvios padrão do **B** (02/11/2017).

x (m)	P (médio)	Desvio padrão
0.25	3.94	0.0165
0.22	5.01	0.0241
0.20	5.18	0.0088
0.18	5.35	0.0099
0.15	5.61	0.0102

Tabela 6.4: Relação entre as distâncias de medição, amplitude média e seus respectivos desvios padrão do **B** (03/11/2017).

x (m)	P (médio)	Desvio padrão
0.25	8.54	0.0165
0.22	8.98	0.0421
0.19	9.34	0.0445
0.17	9.73	0.0393
0.15	10.32	0.0471

Tabela 6.5: Relação entre as distâncias de medição, amplitude média e seus respectivos desvios padrão do **B** (05/11/2017).

x (m)	P (médio)	Desvio padrão
0.25	8.61	0.0119
0.22	9.07	0.0192
0.19	9.60	0.0194
0.17	10.05	0.0122
0.14	10.50	0.0142

Tabela 6.6: Relação entre as distâncias de medição, amplitude média e seus respectivos desvios padrão do **B** (06/11/2017).

x (m)	P (médio)	Desvio padrão
0.25	8.25	0.0124
0.22	8.77	0.0057
0.19	8.98	0.0136
0.17	9.43	0.0086
0.14	10.26	0.0117

Dando seguimento as comparações e análises dos resultados, pode ser observado na tabela 6.7, o coeficiente de atenuação entre **A** e **C** (Δα= -2.99 Np/m). É notavelmente percebido, um acréscimo de aproximadamente **62%** na atenuação quando comparado com as diferenças dos coeficientes com os meios conforme apresentado na tabela 6.2.

Tabela 6.7: Diferenças entre os coeficientes de atenuação.

	Δα (Np/m)	Valor de referência (%)
A	-1.83	100
C	-2.99	62

Essa informação corrobora com a literatura, onde, o acréscimo aqui apresentado, representa a soma dos mecanismos de atenuação da água salgada mais o componente biológico (fitoplâncton).

A tabela 6.8, apresenta de forma sucinta A, B e C, os coeficientes de atenuação, os valores de referência e a natureza dos meios.

Tabela 6.8: Diferenças entre os coeficientes de atenuação.

	Δα (Np/m)	Valor de referência (%)
A	-1.83	100
B	-0.58	31.5
C	-2.99	62

Um dos problemas com os dados experimentais reside no fato de que diversos contratempos relacionados com a disponibilidade do equipamento e da sala experimental não permitiram fazer uma calibração preliminar dos dados adquiridos no osciloscópio. Por outras palavras, não foi possível desenvolver um conjunto controlado de transmissões, com condições de atenuação previamente conhecidas, em que o coeficiente de atenuação fosse calculado com a devida precisão experimental a partir das transmissões do sinal. Um complicador adicional foi o fato

de não existirem certezas sobre o coeficiente de reflexão da placa depositada no fundo do tanque. Não foi possível, também adquirir conjuntos de dados com valores comuns de distâncias, ou com a riqueza estatística desejada. Portanto a análise deste trabalho não é absoluta, é relativa entre a diferença das condições do meio de propagação.

Logo só se podem afirmar, sobre os resultados, seus efeitos relativos. Na qual, não tira o valor deste resultado, pelo contrário, indica/incentiva a direção de trabalhos futuros.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÃO

Mediante o exposto, a partir dos resultados e análises abordados pelo presente estudo, foi possível verificar a influência da presença do fitoplâncton na propagação acústica. Para avalizar os resultados obtidos foi realizado um levantamento teórico, na qual diversos autores, como já apontado, descrevem a capacidade do fitoplâncton em determinadas fases, como bloom ou durante um determinado momento do ciclo de vida, alterar a viscosidade do meio em que habitam. Esta capacidade está associada ao fato do crescimento robusto destes organismos, afetar em pequenas escalas a viscosidade; ao passo que, determinadas espécies são capazes de secretar mucoexopolímeros, que afetam as propriedades reológicas da água do mar e consequentemente a viscosidade.

Tendo em vista as informações apontadas, foi realizado um experimento, além de comparar os resultados com as previsões teóricas abordadas. Para isto, foi realizado um experimento em um tanque, onde se observou o comportamento do sinal acústico em três ambientes diferentes: a) água doce, b) água salgada e c) água salgada + fitoplâncton, dando ênfase, à propagação em meio contendo fitoplâncton.

A partir dos resultados referentes ao experimento realizado (amplitudes medidas e densidade fitoplanctônica), foi possível fazer uma correlação entre os dados e os levantamentos teóricos. Estes foram confrontados com as diferenças entre os coeficientes de atenuação para os diferentes meios (água doce e água salgada → $\Delta\alpha$ = -1.83 Np/m; água salgada e água salgada + fitoplâncton → $\Delta\alpha$ = -0.58 Np/m; e água doce e água salgada + fitoplâncton → $\Delta\alpha$ = -2.99 Np/m). Na qual, foi concebível evidenciar a influência do fitoplâncton na propagação do som.

Os resultados apresentados neste trabalho foram positivos na questão da maior atenuação devido à presença do fitoplâncton, caracterizando uma forte influência destes organismos sobre a propagação acústica. Desta forma, baseado nas informações aqui abordadas, é possível especular que a viscosidade aumentada induzida pela presença do fitoplâncton, pode indicar um fator relevante na propagação do som no oceano.

Os resultados obtidos neste trabalho revelam que um elemento pouco estudado, como o fitoplâncton, afeta a propagação do som. As constatações

observadas conferem ao presente estudo, desdobramentos que podem ser aplicados tanto no contexto militar quanto no contexto civil, aprimorando modelos e sistemas acústicos, permitindo uma melhora previsão do ambiente acústico.

Apesar das dimensões consideradas, no presente estudo, corresponderem a uma parcela muita pequena do oceano real, as informações obtidas podem fomentar estudos futuros. Além de subsidiar nos avanços em modelos numéricos e teóricos, contribuindo para o conhecimento do meio e das interações destes organismos, principalmente no que se refere no seu papel na atenuação do som na água.

Embora seja explícita a diferença entre o comportamento da propagação acústica na água doce e na água salgada, a discussão acerca da atenuação em água salgada, quando se considera a presença do fitoplâncton, ainda é restrita a poucos autores. Este experimento apesar de sua simplicidade é um experimento que abre um leque de possibilidades.

7.2 PERSPECTIVAS

Elucidando um dos grandes desafios atuais em realizar experimentos (acústicos e biológicos) em um campo físico real, consiste nas dificuldades tanto a nível econômico, quanto a nível logístico. Investigar fenômenos da natureza é um trabalho custoso, demorado, que envolve recursos humanos e materiais que nem sempre estão disponíveis.

Tendo em conta o conhecimento ainda incipiente acerca da influência do fitoplâncton na propagação acústica submarina, o presente trabalho ressalta a necessidade de realização de maiores estudos, contemplando não apenas testes em laboratório, mas, também, experimentos de campo. Apesar do esforço para consecução do objetivo proposto, ficou evidente a carência de inúmeros procedimentos de pesquisa, para um maior entendimento dos resultados alcançados.

Em laboratório, diversas ações precisam ser conduzidas, tais como: levantamentos de propriedades químicas da água do mar, medição de viscosidade, aumento do tempo de amostragem do experimento, fluorescência, dentre outras. Em experimentos de campo, é necessário, dentre diversas ações: investigar, tanto em períodos de presença ou ausência de ressurgência, espécies de fitoplâncton; e, realizar transmissões acústicas nos locais onde estejam presentes tais espécies, a

fim de validar, tanto em laboratório quanto em campo, o papel do fitoplâncton na propagação acústica submarina, assim, caminha para o aprimoramento do conhecimento nesta área.

8 REFERÊNCIAS

AINSLIE, M. A.; MCCOLM, J. G. **A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water**. Journal of the Acoustical Society of America, n. 103, p. 1671-1672, 1998.

AL-HOQANI, U.; YOUNG, R.; PURTON, S. **The biotechnological potential of *Nannochloropsis***. Perspectives in Phycology, 2016.

BARSANTI, L.; GUALTIERI, **P. Algae**: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology. Boca Raton: Ed. Taylor & Francis. 318p, 2014.

CODATO, G. et al. **O efeito da ressurgência costeria de Cabo Frio na Propagação Acústica Submarina**. A Ressurgência (Niterói), v. 6, p. 28-32, 2012.

CODATO, G. A. S. **Previsão numérica da perda do sinal acústico submarino na região da ressurgência costeira de Cabo Frio - RJ**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal Fluminense (UFF), 2015.

CORREA, C. J. **Estudo da propagação acústica no mar na camada de mistura**. Dissertação de mestrado, Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), 2008.

DUGDALE, R. C.; GOERING, J. J. **Uptake of new regenerated forms of nitrogen in primary productivity**. American Society of Limnology and Oceanography, v. 12, p. 196-206, 1967.

FRANCOIS, R. E.; GARRISON, R. **Sound absorption based on ocean measurements. Part I:** Pure water and magnesium sulfate contributions. Journal of the Acoustical Society of America, n. 72, p. 896-907, 1982a.

_____. **Sound absorption based on ocean measurements. Part II:** Boric acid contribution and equation for total absorption. Journal of the Acoustical Society of America, n. 72, p. 1879-1890, 1982b.

GHOSAL, S.; ROGERS, M.; WRAY, A. **The turbulent life of phytoplankton**. Proceedings of the Summer Program. Center for Turbulence Research, p. 31-45, 2000.

GOMES, F. L.; HAIMOVICI, M. **Anexo II. Ilustrações das Divisões do Mar e de Petrechos Utilizados nas Prospeções Pesqueiras**. MMA/SMCQA, p. 323-329, 2007.

GRIS, L. R. S. **Produção da Microalga *Nannochloropsis oculata* em Fotobiorreator Airlift.** Dissertação de mestrado, Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2011.

JENKINSON, I. R. **Oceanographic implications of non-newtonian properties found in phytoplankton cultures**. Nature , n. 323, p. 435-437, 1986.

_____. **Bulk-phase viscoelastic properties of seawater**. Oceanologica Acta , p. 317-334, 1993.

JENKINSON, I. R. and SUN, J. **Rheological properties of natural waters with regard to plankton thin layers.** A short review. Journal of Marine systems, p. 287-297, 2010.

KESAULYA, I. et al. T**he impact of turbulence and phytoplankton dynamics on foam formation, seawater viscosity and chlorophyll concentration in the eastern English Channel**. Oceanologia, p. 167-182, 2008.

KINSLER, L. E. et al. **Fundamentals of Acoustics**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2000.

LIMA, E. C. R. **Qualidade da água da Baía de Guanabara Saneamento:** Uma abordagem sistêmica. Tese de Doutorado, Ciências de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), 2006.

LURTON, X. **An Introduction to Underwater Acoustic:** Principles and Appiclations. London: Springer, 2010.

Ma, X.-N. et al. **Lipid Production from *Nannochloropsis***. Marine Drugs, 2016.

MEDWIN, H.; CLAY, C. S. **Fundamentals of Acoustical Oceanography**. London: Academic Press Limited, 1997.

PLATT, T.; SUBBA RAO, D. V; DENMAN, K. L. **Quantitative simulation of phytoplankton productivity by deep-water admixture in coastal inlet**. Estuarine and Coastal Marine Science, p. 567-573, 1977.

PROAKIS, J. G.; SALEHI, M. **Contemporary Communication Systems with Matlab**. Monterey: Brooks/Cole, 2000.

RHODES, C. J. **Excess acoustic absorption attributable to the biological modification os seawater viscosity**. Journal of Marine Science, n. 65, p. 1747-1750, 2008.

RODRÍGUEZ, O. C. et al. **Seismo-acoustic ray model benchmarking against experimental tank data**. Journal Acoustical Society of America, n. 2, v. 132, p. 709–717, 2012.

SEURONT, L.; VINCENT, D.; MITCHELL, J. G. **Biologically induced modification of seawater viscosity in the eastern English Channel during a *Phaeocystis globosa* spring bloom**. Journal of Marine systems, n. 61, p. 118-133, 2006.

SEURONT, L. et al. **The influence of *Phaeocystis globosa* on microscale spatial patterns of chlorophyll a and bulk-phase seawater viscosity**. Biogeochemistry, n. 83, p. 173-188, 2007.

SOUSA, E. B. et al. **Variação temporal do fitoplâncton e dos parâmetros hidrológicos da zona de arrebentação da Ilha Canela (Bragança, Pará, Brasil)**. Acta Botanica Brasilica, n. 4, v. 23, p. 1084-1095, 2009.

SUTHERLAND, K. R.; NICHOLS, K. J.; KALTENBERG, A. M. **Biophysical interations in the plankton:** A cross-scale review. Limnology and Oceanography: Fluids and Environments, p. 121-145, 2012.

XAVIER, B. C. **Modelos de Propagação Acústica em Águas Rasas**. Dissertação de mestrado, Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), 2005.

_____. **O método de BEER para determinação de concentração de partículas a partir do sinal acústico**. Tese de Doutorado, Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), 2016.

TYRRELL, T. **Redfield Ratio**. Academic Press, 2. ed, p. 677-686, 2001.

APÊNDICE A – Script em Python

```
# coding=utf–8
from numpy import *
from pylab import *
from scipy import interpolate

xmin = 0.20
xmax = 0.26

# Água Doce:
p0 = array([20.30, 20.32, 20.34, 20.31, 20.32])\\
p = array([ 8.63, 9.40, 9.91, 10.43, 11.57])\\
x = array([ 0.30 , 0.25, 0.22, 0.19, 0.15])\\

#Água Salgada:
p0as = array([19.88, 20.07, 20.05, 20.06, 19.94])
pas = array([ 6.06 , 6.41, 6.68, 6.77, 8.65])
xas = array([ 0.26, 0.23 , 0.20, 0.18, 0.15])

# Água Salgada + Fitplâncton:
p0f = array([19.55, 19.86, 19.87, 19.83, 19.75])
pf = array([ 3.95, 5.01, 5.188, 5.35, 5.61])
xf = array([ 0.31 , 0.22 , 0.20, 0.18, 0.15])

print("Interpolando os dados...")

xi = linspace(xmin,xmax,501)

i1 = interpolate.interp1d(x ,p )
i2 = interpolate.interp1d(xas,pas)
i3 = interpolate.interp1d(xf ,pf )

pi = i1(xi)
```

```
pasi = i2(xi)
pfi = i3(xi)

y1 = pasi/pi
y2 = pfi /pi

dalpha1 = mean( log(y1)/xi )
dalpha2 = mean( log(y2)/xi )

t1 = u"Diferença de atenuações água salgada – água pura ="+str(dalpha1)
t2 = u"Diferença de atenuações fitoplâncton – água pura ="+str(dalpha2)

print(t1)
print(t2)

print("Visualizando...")
figure(1)
plot(x,p,'ko',x,p,'– –',linewidth=2)
plot(xas,pas,'bs',xas,pas,'– –',linewidth=2)
plot(xf,pf,'rd',xf,pf,'– –',linewidth=2)
text(x[–1]+0.01,p[–1],u'Água Doce')
text(xas[–1]+0.01,pas[–1],u'Água Salgada')
text(xf[–1]+0.01,pf[–1],u'Água Salgada com Fitoplâncton')
xlabel(r'$x$ (m)',fontsize=18)
ylabel(r'$P(x)$',fontsize=18)
title('Amplitudes medidas')
grid(True)

figure(2)
plot(xi,pi,'k',linewidth=2)
plot(xi,pasi,'b',linewidth=2)
plot(xi,pfi ,'r',linewidth=2)
text(xi[0]+0.01,pi[ 0],u'Água Doce')
text(xi[0]+0.01,pasi[0],u’Água Salgada')
```

```
text(xi[0]+0.01,pfi[ 0],u'Água Salgada com Fitoplâncton')
xlabel(r'$x$ (m)',fontsize=18)
ylabel(r'$P(x)$',fontsize=18)
title('Amplitudes interpoladas')
xlim(xmin,xmax)
grid(True)

show()

print(u"Cálculos concluídos.")
```