

II.10.8 - Projeto de Verificação *in situ* do Decaimento Sonoro de Atividades Sísmicas

II.10.8.1 - Introdução

Este documento descreve o Projeto de Verificação *in situ* do Decaimento Sonoro (PVDS) para o monitoramento acústico passivo do ruído irradiado das atividades de sísmica do Cluster BC.

A proposta atual busca atender aos requisitos do Termo de Referência COEXP nº 10047523 e do Parecer Técnico COEXP nº 86/2022 emitidos pelo IBAMA.

II.10.8.2 - Justificativa

A operação simultânea de fontes sísmicas em áreas adjacentes possui um potencial efeito cumulativo no nível de ruídos submarinos e pode ter influência sobre a vida marinha. Tendo em vista esta característica e, considerando as atividades da PETROBRAS propostas para o ciclo em licenciamento da **Pesquisa Sísmica Marítima 3D/4D Streamer e Nodes na Bacia de Campos - Cluster BC**, é proposto o presente Projeto de Verificação *in situ* do Decaimento Sonoro de Atividades Sísmicas.

II.10.8.3 - Objetivos

O PVDS tem por objetivo a medição de níveis de ruído irradiados das atividades de aquisição sísmica do Cluster BC em diferentes distâncias das fontes, de modo que se possa quantificar o aporte de energia sonora decorrente das atividades à paisagem acústica local. Adicionalmente, o projeto objetiva gerar informações para validação e aferição da acurácia do modelo de propagação acústica apresentado no EAS.

II.10.8.4 - Requisitos

Além dos objetivos gerais propostos para o PVDS, o projeto busca atender aos seguintes requisitos específicos:

- Ser capaz de verificar o espalhamento da energia acústica e o incremento de ruídos aportado pelo conjunto de atividades proposta;
- Obter informações para verificar/validar as curvas de decaimento sonoro estimadas através da modelagem numérica;
- Fornecer detalhes do desenho amostral e do quantitativo de equipamentos a serem utilizados, bem como do tratamento e disponibilização dos dados;
- Ser capaz de obter medições acústicas minimamente a 1000 m das fontes e em distâncias mais próximas e afastadas, considerando pontos notáveis da curva de decaimento estimada pela modelagem de propagação acústica;
- Cobrir o período das atividades previstas, realizando medições na presença e ausência das atividades para aferição da paisagem acústica da BC;
- Fornecer comparações, se possível, entre o decaimento na ocasião de atividades de aquisição sísmica isoladas e simultâneas.

II.10.8.5 - Metas e Indicadores

Metas:

1. Coletar dados acústicos na presença e ausência de fontes associadas às aquisições sísmicas no Cluster BC;
2. Processar os dados coletados e estimar parâmetros acústicos em diferentes métricas, frequências e profundidades para as diferentes condições, incluindo, se possível, a presença de mais de um navio sísmico em diferentes distâncias.

Indicadores:

- Número e duração total de gravações acústicas realizadas;
- Horas de dados acústicos processados.

II.10.8.6 - Público-alvo

O público-alvo do Projeto de Verificação *in situ* do Decaimento Sonoro de Atividades Sísmicas é formado por:

- Empresas de Aquisição de Dados Sísmicos (EADs);
- Empresa responsável pela implementação do Projeto de Verificação *in situ* do Decaimento Sonoro de Atividades Sísmicas;
- Equipes de Meio Ambiente e de Aquisição Geofísica da PETROBRAS;
- Comunidade Científica;
- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA;
- Marinha do Brasil.

II.10.8.7 - Contexto

A elaboração do PVDS considerou a experiência e os resultados ora auferidos pela PETROBRAS no âmbito do Projeto de Monitoramento da Paisagem Acústica Submarina da Bacia de Santos (PMPAS-BS), condicionante ambiental de vários empreendimentos de produção do polo pré-sal da Bacia de Santos. O PMPAS-BS conta com mais de 6 anos de medições acústicas realizadas tanto em plataformas de medição fixa (linhas de fundeio e observatórios submarinos) quanto móveis (*gliders* e perfiladores) com diferentes graus de sucesso, o que vem permitindo a consolidação das melhores práticas e estratégias de medição para fins de caracterização e monitoramento da paisagem acústica.

Neste contexto, um ponto crucial para obtenção de medições acústicas com a qualidade metrológica necessária para adequada caracterização da paisagem acústica e dos níveis de ruído irradiado de fontes antropogênicas específicas é a questão do ruído de fluxo, um pseudo-ruído associado à turbulência gerada pela passagem de água na interface com o hidrofone e que causa elevações de energia em baixas frequências (**Figura II.10.8.7-1**). Esta questão torna-se particularmente relevante quando se objetiva medir ruídos irradiados de fontes sísmicas, onde boa parte da energia sonora se concentra justamente nestas bandas do espectro de frequências, em particular na faixa de 0 a 125 Hz (Caldwell e Dragonset, 2000). O problema do ruído de fluxo aumenta com a velocidade da corrente, de modo que

plataformas de medição de livre deriva ou posicionadas próxima ao fundo marinho tendem a sofrer menor interferência deste tipo de ruído espúrio (Strasberg, 1985).

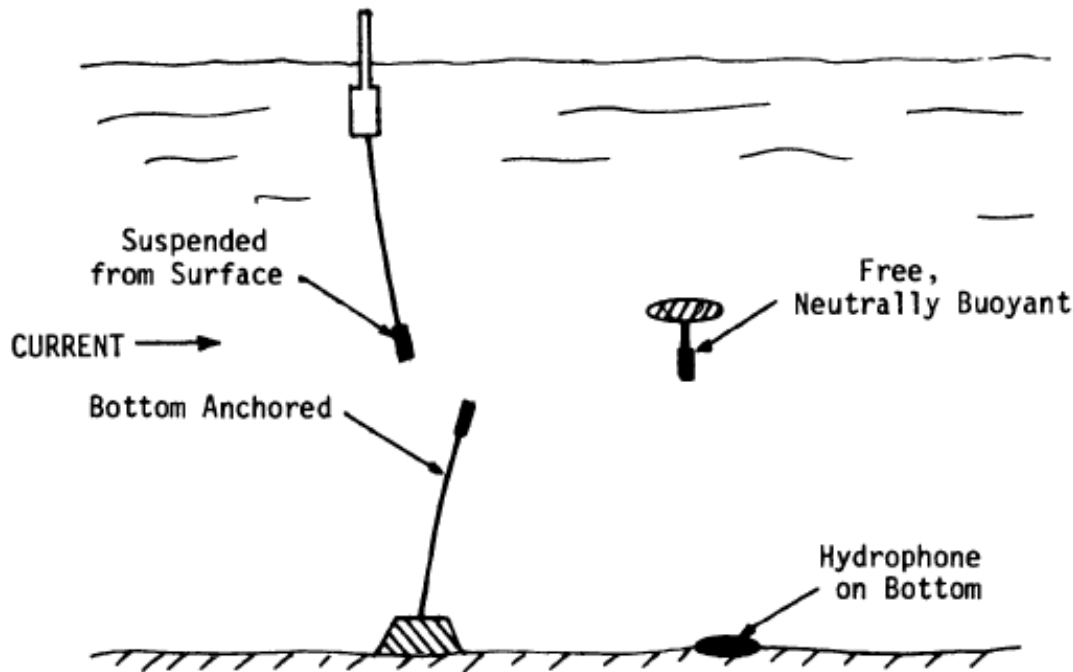


Figura II.10.8.7-1 – Quatro arranjos distintos para medição acústica sujeitas ao ruído de fluxo: suspenso na coluna d'água a partir da superfície ou do fundo (à esquerda), derivando com a corrente ou posicionado próximo ao fundo (à direita). As duas últimas abordagens são as que minimizam o ruído de fluxo.

Fonte: Strasberg (1985).

Dados de literatura corroboram esta tese mostrando que boa parte das medições acústicas são comprometidas pelo ruído de fluxo na banda de 0.005 até 1000 Hz (Erbe et al., 2015) quando as velocidades de corrente são superiores ao limiar de aproximadamente 10-13 cm/s (Dos Santos et al., 2016, Lima et al., 2022). No âmbito do PMPAS-BS, tal aspecto mostrou-se particularmente problemático em linhas de fundeio instrumentadas (LFIs) longas ou posicionadas em regiões com correntes intensas, situação em que o ruído de fluxo é mais proeminente e ruídos espúrios adicionais associados à vibração da linha e de seus componentes também ocorrem, em especial nos níveis mais próximos à superfície (**Figura II.10.8.7-2**). Neste caso, somente cerca de 29% das gravações realizadas entre outubro de

2017 e dezembro de 2020 foram consideradas válidas após o processo de qualificação (Lima et al., 2022).

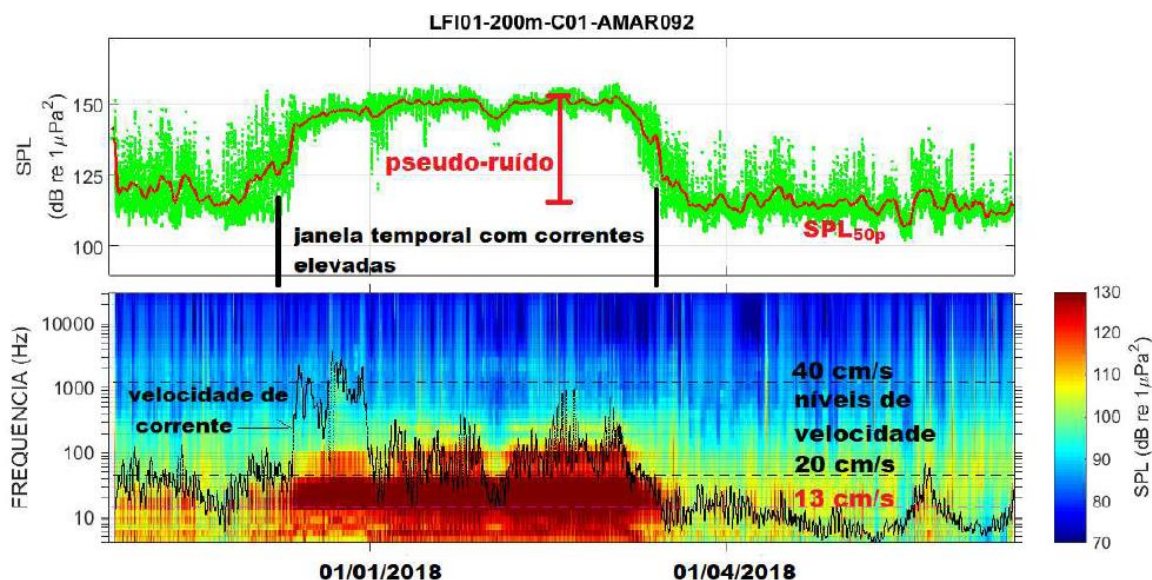


Figura II.10.8.7-2 – Ilustração do efeito do ruído de fluxo nos níveis de ruídos medidos em uma linha de fundeio instrumentada do PMPAS-BS: (painel superior) série temporal do nível de pressão sonora (SPL); (painel inferior) espectrograma do sinal acústico (escala de cores) e velocidade da corrente (linha preta contínua). Os níveis de ruído aumentam consideravelmente nos períodos de aumento das correntes acima do limiar de aproximadamente 13 cm/s (Lima et al., 2022).

O regime hidrodinâmico na região do talude continental da Bacia de Campos é dominado pelo escoamento de dois grandes sistemas de correntes oceânicas que fluem em sentidos opostos: nos primeiros 400-500 m a Corrente do Brasil (CB) flui para sudoeste e, abaixo dela, com núcleo em aproximadamente 800 m, flui para nordeste a Contra-Corrente Intermediária (CCI) (Da Silveira et al., 2004). O sistema de correntes CB-CCI ocupa uma extensa faixa da coluna d'água entre as isóbatas de 200 e 2000 m, região em que vários dos projetos de aquisição sísmica do cluster BC estão localizados. Em toda esta área, as velocidades de correntes frequentemente atingem valores superiores a 13 cm/s, o que é ilustrado na **Figura II.10.8.7-3**. Nela são apresentados campos médios da magnitude da corrente para as profundidades de 200, 500 e 950 m e justapostos aos polígonos das sísmicas do Cluster BC.

Tendo em vista a necessidade de o PVDS contemplar medições a curtas distâncias das fontes sísmicas e a existência de fortes correntes oceânicas em boa parte da coluna d'água na região do Cluster BC, é recomendável que as gravações acústicas realizadas a partir de plataformas fixas sejam feitas o mais próximo possível ao leito marinho de modo a minimizar problemas com ruído de fluxo e vibração da linha.

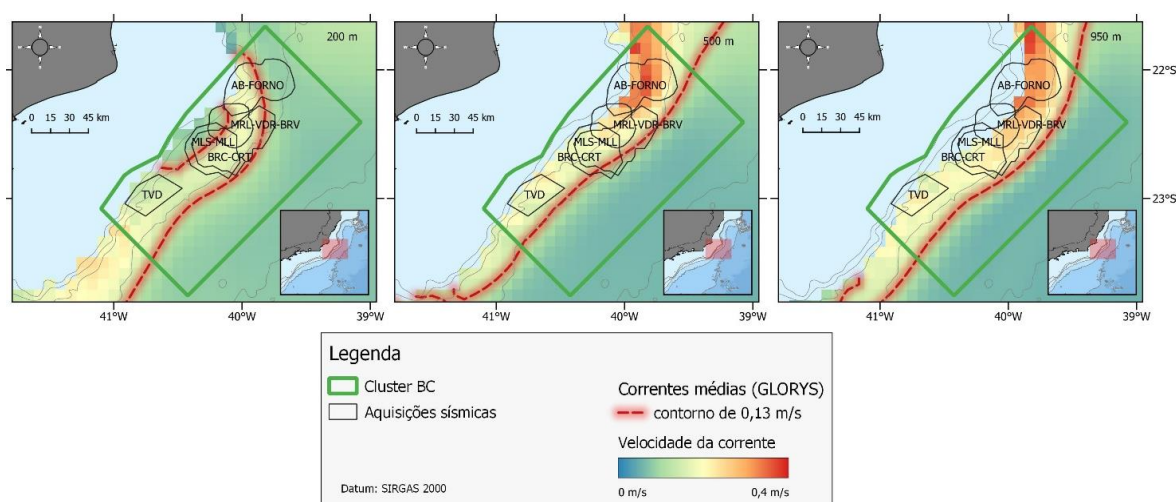


Figura II.10.8.7-3 – Velocidades médias de correntes oceânicas derivadas de 25 anos do modelo global CMEMS Global Reanalysis (GLORYS) (Lellouche et al., 2018) para os níveis de 200, 500 e 950 m. A linha vermelha tracejada delimita o limiar de 13 cm/s acima do qual o ruído de fluxo tende a ser mais pronunciado. Os polígonos pretos delimitam os polígonos de aquisição sísmica do Cluster BC localizados na região do talude continental.

Considerando o ineditismo e a inexperiência da PETROBRAS com esta forma particular de monitoramento, foi feita uma busca na literatura sobre este assunto. Há na literatura diversas iniciativas de monitoramento do ruído de sísmica, algumas das quais em linha com o escopo e os objetivos do PVDS. Em geral, estes estudos contemplam um esforço amostral orientado a uma única campanha de aquisição sísmica e são focados na estimativa dos níveis de ruído ambiente e na geração de informações úteis à validação de modelos de propagação acústica, ferramenta utilizada para a avaliação em definitivo da extensão dos impactos relacionados ao ruído da sísmica. Estas características norteiam a escolha dos pontos de medição e configuração dos equipamentos utilizados nas gravações acústicas.

Em Matthews e MacGillivray (2013), os níveis de ruído medidos durante atividades de levantamento sísmico na porção canadense da região do Mar de Beaufort foram comparados com estimativas realizadas por um modelo de propagação. As gravações acústicas foram realizadas em cinco locações fixas de forma simultânea cobrindo distâncias entre 50 m e 50 km do arranjo de canhões de ar e nas direções perpendicular (*broadside*) e longitudinal (*endfire*) às linhas de tiro. O período total de coleta de dados foi de 2 dias para uma linha de aquisição em águas intermediárias (500-1000 m) e de 5 dias para uma linha em água profunda (> 1000 m), tendo sido feitas gravações contínuas em ambas as situações.

Já em Martin et al. (2017) foi feito um estudo de caracterização da paisagem acústica e dos pulsos de canhões de ar de uma campanha sísmica envolvendo quatro embarcações na região das Baías de Baffin e Melville, oeste da Groelândia. Uma modelagem de propagação foi realizada previamente às atividades de aquisição e o decaimento sonoro estimado pôde ser comparado e calibrado a partir de um conjunto de quatro medições *in situ* simultâneas realizadas em períodos com e sem a atividade de sísmica. As medições contemplaram um intervalo de distâncias do sensor ao navio fonte de menos de 1 km até 158 km, embora somente as medições até cerca de 100 km tenham sido apresentadas na validação do modelo. Foram executados dois ciclos de medição no período com atividade de sísmica, o primeiro com 3 meses e o segundo com 1 mês de duração, e um ciclo de aproximadamente 12 meses na ausência da atividade. O ponto de medição mais afastado do navio fonte próximo à região costeira foi instrumentado com um hidrofone instalado próximo ao fundo ao passo que os outros três fundeios contavam com uma linha instrumentada com sensores em 100, 200 e 400 m de profundidade gravando continuamente a 64 kHz no primeiro e a 8 kHz nos dois últimos. Os autores não identificaram variações significativas do ruído com a profundidade para aquelas condições específicas.

É importante ressaltar que grande parte das iniciativas de monitoramento acústico reportadas em literatura não contempla medições em regiões sujeitas a dinâmica de intensas correntes de contorno oeste e de grande concentração de unidades e instalações fixas da indústria de óleo e gás, como é o caso da Bacia de Campos. Tal aspecto representa um desafio adicional a este projeto e precisou ser considerado na definição do arranjo dos equipamentos.

II.10.8.8 - Premissas

Tendo em vista o contexto ora apresentado, o PVDS adotará a utilização de instrumentação fixa próxima ao fundo, o que objetiva minimizar a ocorrência do ruído de fluxo nas gravações e garantir gravações nas distâncias mínimas requeridas entre o navio fonte e o sensor.

As posições planejadas para instalação dos sensores devem cobrir afastamentos variáveis na faixa de 1 a cerca de 100 km e devem monitorar as direções paralela (*endfire*), perpendicular (*broadside*) e próximo a vertical às linhas de tiro. Desta forma, será possível avaliar eventuais características de diretividade da fonte e os efeitos da propagação nas direções paralela e ortogonal às isóbatas, tendo em vista que as linhas de tiro são orientadas neste sentido.

A escolha das coordenadas dos pontos de medição considerou a perspectiva de que uma mesma locação pudesse ser utilizada no monitoramento de diferentes projetos, facilitando o planejamento das missões e oferecendo a possibilidade de que gravações acústicas em diferentes períodos e épocas do ano pudessem ser feitos no mesmo ponto.

Estas premissas e a proposta de medição documentada adiante buscam alinhar-se a iniciativas reportadas em literatura e que tratam do monitoramento de ruído irradiado da sísmica e validação de modelos de propagação.

II.10.8.9 - Estratégia de Medição

As gravações acústicas serão realizadas por um conjunto de 3 (três) fundeios acústicos simultâneos instrumentados com um hidrofone próximo ao fundo. O arranjo proposto para o fundeio segue o preconizado pelos *guidelines* de boas práticas em medição acústica submarina e é ilustrado de forma esquemática na **Figura II.10.8.9-1**.

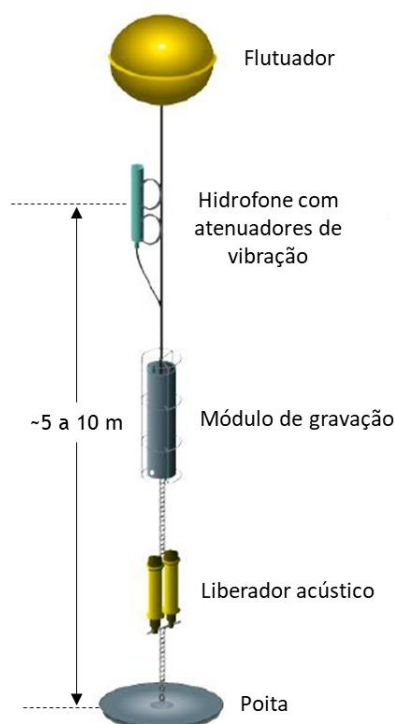


Figura II.10.8.9-1 – Arranjo esquemático proposto para os fundeios acústicos do PVDS. Adaptado de Robinson et al. (2014).

O fundeio acústico será composto de uma poita, uma linha instrumentada curta equipada com um hidrofone, um módulo de gravação, um liberador acústico e um flutuador em sua extremidade para manter a linha na vertical e permitir seu recolhimento após acionamento do liberador acústico. A distância prática mínima de instalação dos sensores ao fundo marinho é de cerca de 5 m, considerando-se limitações operacionais, de garantia de integridade e de condições adequadas ao funcionamento dos equipamentos. Para minimizar ao máximo a ocorrência de ruído próprio da linha associado à vibração de seus diversos componentes, será evitado o uso de elos e conexões metálicas sempre que possível privilegiando-se o uso de materiais sintéticos e emborrachados. Outros arranjos de fundeio viáveis que minimizem o ruído da linha poderão ser propostos pela empresa executora do serviço e considerados no projeto.

Os 3 (três) pontos de medição serão distribuídos de forma que se tenha:

- 1 (um) ponto inserido no polígono de aquisição sísmica;
- 1 (um) ponto na direção *cross-shore* (ortogonal às isóbatas) e paralelo às linhas de tiro (*endfire*);

- 1 (um) ponto na direção *along-shore* (paralelo às isóbatas) e ortogonal às linhas de tiro (*broadside*).

A **Figura II.10.8.9-2** mostra as posições sugeridas para os três fundeios acústicos que irão atender aos projetos de Tartaruga-Verde (TVD), Albacora-Forno (ALB-FORNO), Marlim-Voador-Brava (MRL-VDR-BRV) e Marlim-Sul/Marlim-Leste (MLS-MLL). Os fundeios serão instalados em profundidades entre 1000 e 2600 m. O foco dado a esta faixa de profundidades objetiva primariamente o atendimento aos requisitos de distância entre a fonte e o sensor e evitar restringir as opções de equipamentos (hidrofones e gravadores acústicos) capazes de operar nestas profundidades.

Considerando a dinâmica das operações de aquisição sísmica em que o navio fonte percorre toda a área do polígono, esta configuração permite cobrir o intervalo requerido de distâncias entre a fonte e receptor e toda extensão da curva de SEL modelada e apresentada no EAS, conforme pode ser observado na **Tabela II.10.8.9-1**. A distribuição dos pontos de monitoramento privilegia a direção do oceano profundo porque é aquela em que tipicamente a onda acústica é menos atenuada propagando-se por longas distâncias, diferentemente do que ocorre na direção do talude e plataforma continental onde há forte interação do ruído irradiado com a superfície e a topografia de fundo e consequente atenuação da energia sonora (Erbe et al., 2019). Não obstante, os níveis de ruído na região rasa de plataforma e nas demais regiões do Cluster BC não monitoradas poderão ser estimados a partir da modelagem de propagação.

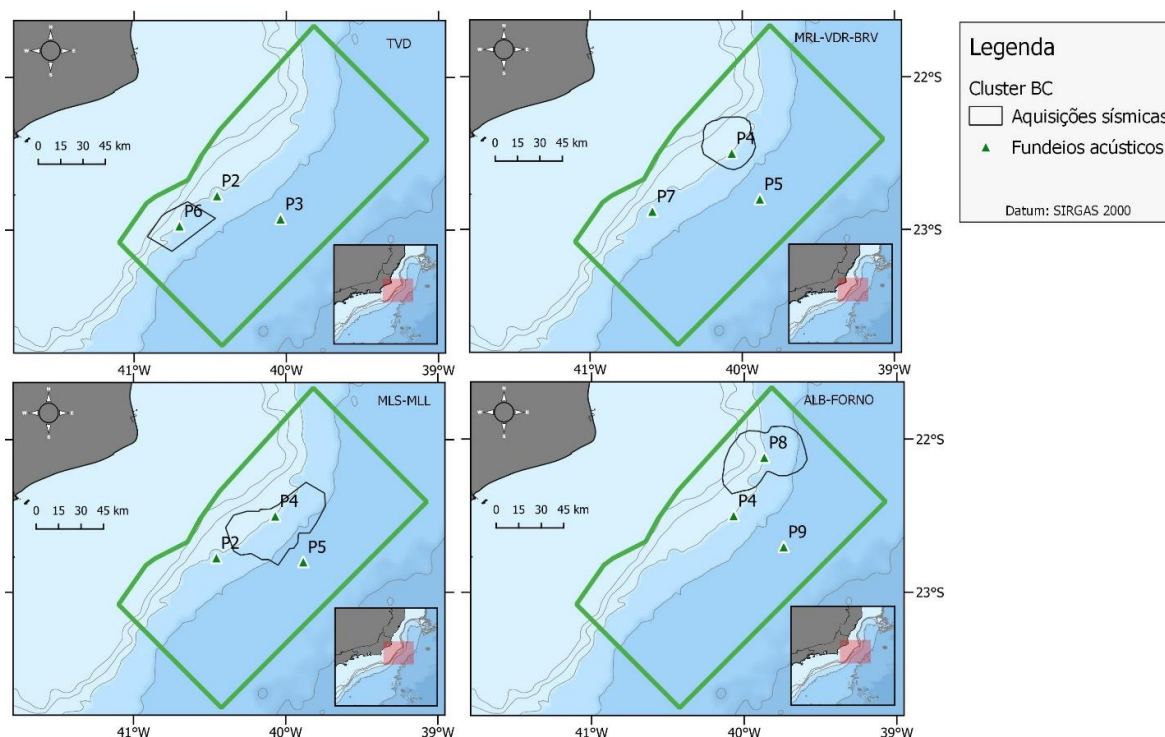


Figura II.10.8.9-2 – Fundeios acústicos propostos para o PVDS. As linhas cinzas indicam as isóbatas de 200, 500, 1000, 2000 e 3000 m.

A **Figura II.10.8.9-3** ilustra os pontos a serem monitorados para aferição da paisagem acústica submarina e dos níveis de ruído na ausência das atividades de sísmica. Uma estimativa do ruído ambiente (SPL) na banda 1/3 de oitava de 63 Hz, obtida através da modelagem de propagação acústica desenvolvida no PMPAS-BS tendo os navios e plataformas cobertas pelo sistema AIS como fontes sonoras, também é apresentada. A distribuição das curvas de SPL modelado indicam um ambiente mais ruidoso na região entre a quebra de plataforma e a porção superior do talude continental, entre as isóbatas de 200 m 1000 m, onde se concentra a maior parte das rotas de embarcações e plataforma da indústria de E&P, e as regiões em lâmina d'água superior a 2000 m apresentam um ambiente acústico menos energético, com uma faixa de transição entre 1000 e 2000 m. Os pontos de monitoramento propostos cobrem estas três regiões com níveis distintos de ruído e que representam a magnitude do ruído que ocorre em boa parte do Cluster BC.

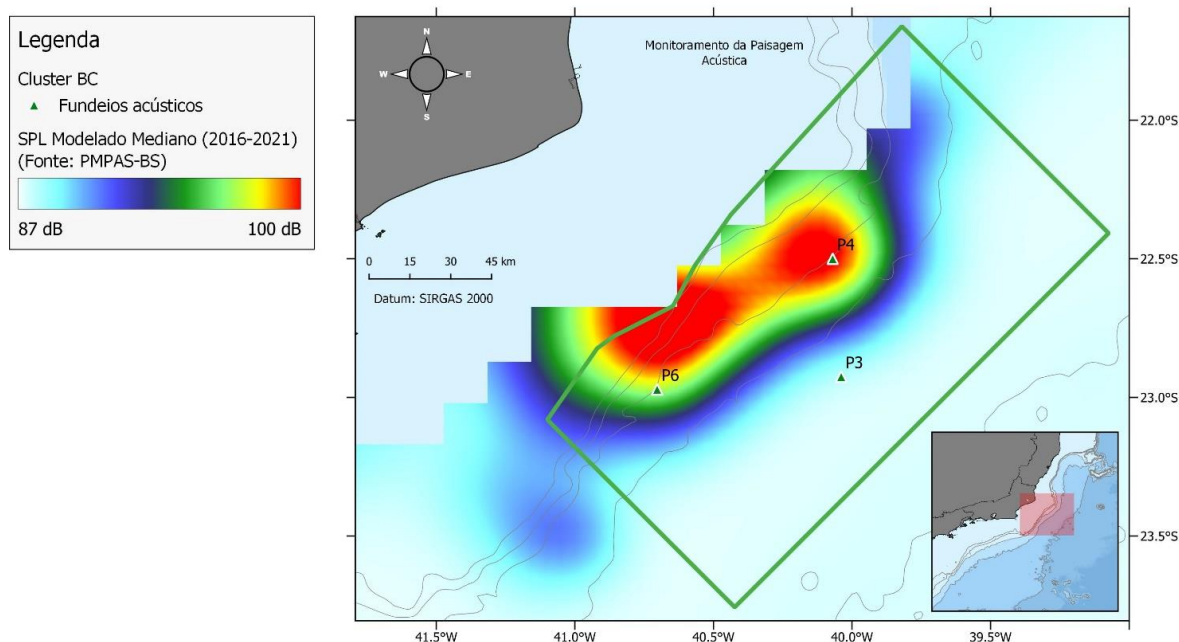


Figura II.10.8.9-3 – Fundeios acústicos propostos para monitoramento exclusivo da paisagem acústica na ausência de atividades de sísmica. As cores representam uma estimativa de densidade de Kernel Gaussiano do ruído ambiente em 50 m na banda de 63 Hz para o período de 2016 a 2021 extraída do Sistema de Modelagem Acústica Submarina (SIMAS) desenvolvido no âmbito do PMPAS-BS (De Lima et al., 2020).

Para estimar a cobertura em distância possível de cada projeto de aquisição sísmica, foram simuladas as distâncias entre o navio fonte e os hidrofones. As coordenadas dos disparos foram estimadas considerando a geometria dos polígonos e os seguintes parâmetros típicos para as aquisições sísmicas do Cluster BC:

- Orientação das linhas de tiro (azimute): 123°N;
- Espaçamento entre linhas de tiro: 660 m;
- Intervalo entre tiros: 11 s;
- Velocidade do navio fonte: 2 m/s.

A partir das coordenadas dos disparos e dos fundeios acústicos foram computadas as distribuições de distâncias associadas a cada ponto de monitoramento e a cada projeto. Os resultados são ilustrados na **Figura II.10.8.9-4** e na **Figura II.10.8.9-7** apresentadas a seguir.

Na parte superior de cada figura são apresentados um mapa em coordenadas geográficas (canto esquerdo) e um mapa em coordenadas métricas locais

associada ao centroide dos polígonos de aquisição (canto direito), o que fornece uma visão mais clara das posições relativas. As linhas de aquisição adequadamente orientadas com os respectivos azimutes são plotadas em vermelho. Na parte inferior das figuras é apresentado um histograma com a distribuição total de distâncias entre a fonte e sensor (canto esquerdo) e um histograma das mesmas distâncias discriminadas por fundeio (canto direito). Uma reprodução da curva de SEL modelada também é apresentada sobreposta ao intervalo de distâncias de medição de ruídos que cada ponto poderá fornecer.

Na sequência, a **Tabela II.10.8.9-1** apresenta as coordenadas dos pontos propostos e a estimativa das estatísticas básicas de distâncias entre a fonte e os hidrofones. Verifica-se que o arranjo proposto oferece a possibilidade de medições no intervalo de poucas dezenas de metros até cerca de 90 km da fonte.

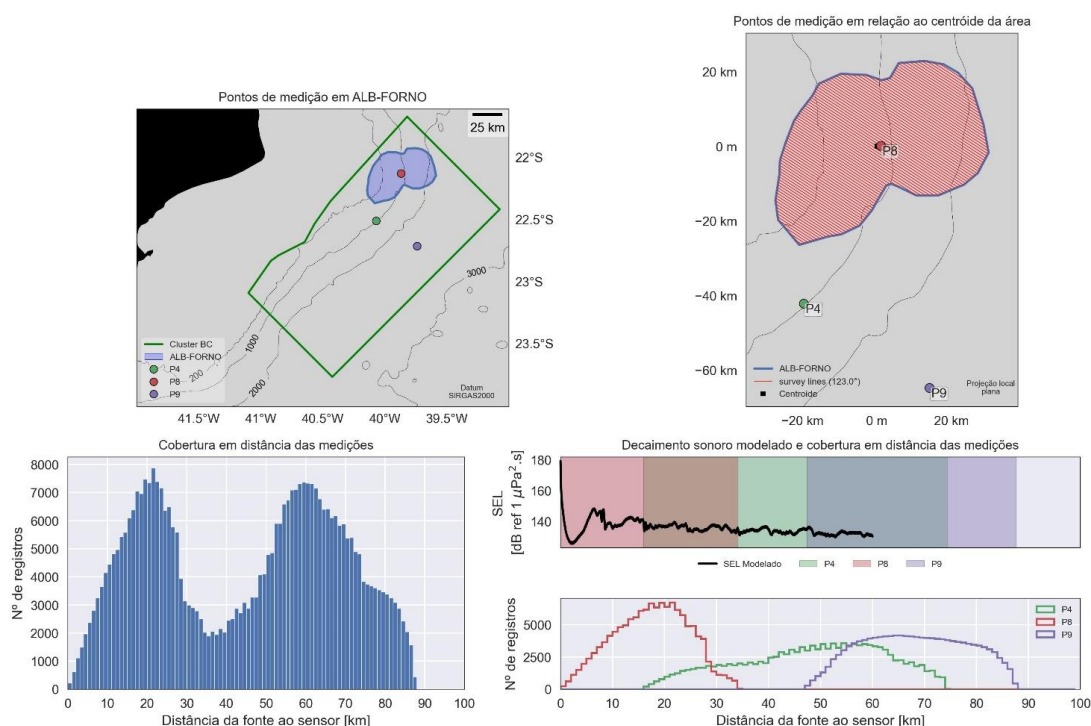


Figura II.10.8.9-4 – Panorama da distribuição dos pontos de medição acústica e distâncias entre o navio fonte e o hidrofone para o projeto de Albacora-Forno.

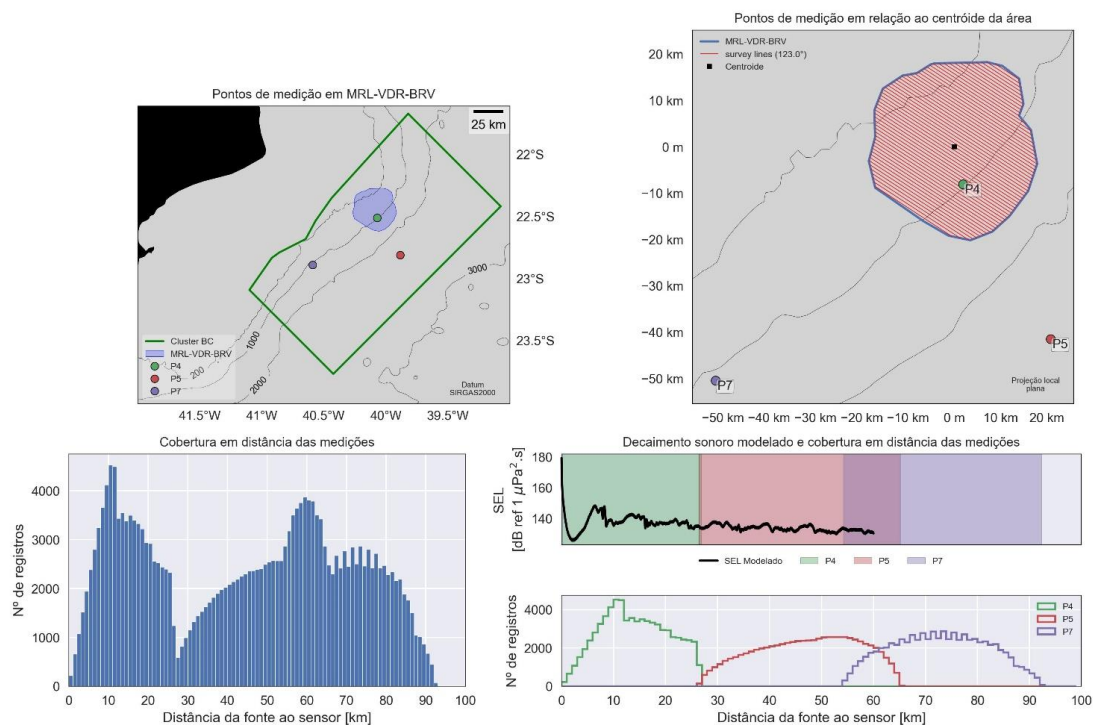


Figura II.10.8.9-5 – Panorama da distribuição dos pontos de medição acústica e distâncias entre o navio fonte e o hidrofone para o projeto de Marlim-Voador-Brava.

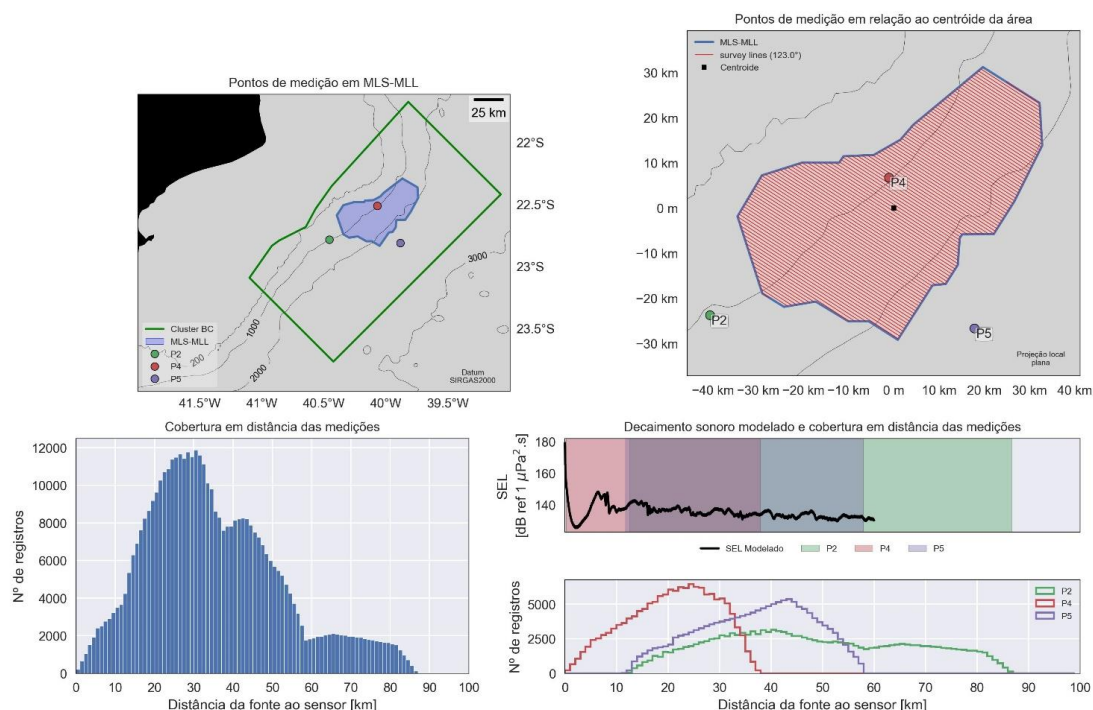


Figura II.10.8.9-6 – Panorama da distribuição dos pontos de medição acústica e distâncias entre o navio fonte e o hidrofone para o projeto de Marlim Sul-Marlim Leste.

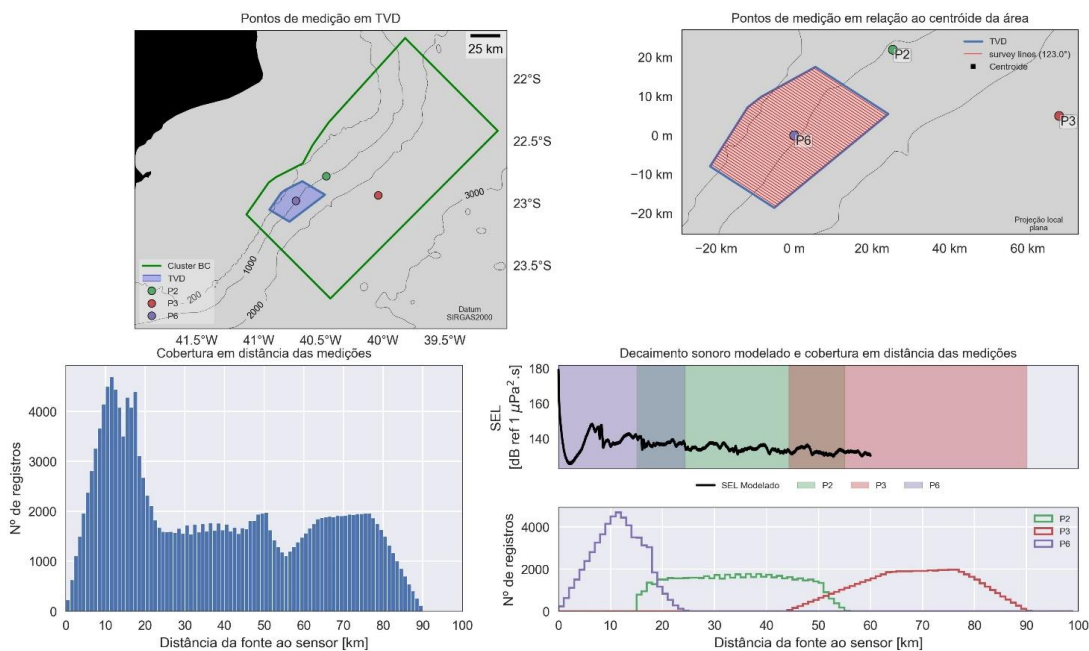


Figura II.10.8.9-7 – Panorama da distribuição dos pontos de medição acústica e distâncias entre o navio fonte e o hidrofone para o projeto de Tartaruga-Verde.

Tabela II.10.8.9-1 – Coordenadas preliminares dos pontos de monitoramento propostos para o PVDS.

Fundeio	Latitude*	Longitude*	Projeto	Distância mínima (km)	Distância máxima (km)	Distância mediana (km)
P2	22°46'24"S	40°27'20"W	TVD	15.03	55.06	34.24
P3	22°55'30"S	40°02'18"W	TVD	44.28	90.10	69.00
P6	22°58'15"S	40°42'09"W	TVD	0.01	24.28	11.52
P2	22°46'24"S	40°27'20"W	MLS-MLL	12.58	86.72	46.31
P4	22°29'59"S	40°04'09"W	MLS-MLL	0.23	37.95	21.54
P5	22°47'59"S	39°53'05"W	MLS-MLL	11.75	57.93	38.05
P4	22°29'59"S	40°04'09"W	MRL-VDR-BRV	0.19	26.86	13.77
P5	22°47'59"S	39°53'05"W	MRL-VDR-BRV	26.42	65.16	47.87
P7	22°52'48"S	40°35'27"W	MRL-VDR-BRV	54.24	92.32	72.80
P4	22°29'59"S	40°04'09"W	ALB-FORNO	15.98	74.47	49.62
P8	22°07'09"S	39°52'05"W	ALB-FORNO	0.01	34.12	17.83
P9	22°42'10"S	39°44'26"W	ALB-FORNO	47.38	87.63	68.06

Em relação a configuração dos sensores, prevê-se a utilização de duas configurações distintas com as seguintes características:

- Configuração A:

- Taxa de amostragem: 16 kHz;
- Resolução em frequência: 10 Hz a 8 kHz;
- Sensibilidade nominal: -200 dBV/μPa;
- Faixa dinâmica (SPL mínimo e máximo medido): 61 a 200 dB ref 1 μPa;
- Resolução do conversor A/D: 24 bits.
- Configuração B:
 - Taxa de amostragem: 64 kHz;
 - Resolução em frequência: 10 Hz a 32 kHz;
 - Sensibilidade nominal: -164 dBV/μPa;
 - Faixa dinâmica (SPL mínimo e máximo medido): 25.5 a 164 dB ref 1 μPa;
 - Resolução do conversor A/D: 24 bits.

Para os hidrofones instalados no interior dos polígonos de aquisição e que experimentarão menores distâncias das fontes será adotada a configuração A, permitindo a gravação de níveis sonoros mais elevados sem que ocorra a saturação dos sinais. A menor taxa de amostragem nesta configuração é plenamente satisfatória para a adequada resolução dos sinais de baixa frequência dos pulsos de *air gun* e permitirá maior autonomia do fundeio e a possibilidade de realização de gravações contínuas. A resolução em frequência desta resolução também é adequada para gravação de alguns tipos de sinais de sinais biológicos, como de cetáceos de baixa frequência.

Já a configuração B será utilizada nos outros dois pontos de monitoramento e nas campanhas de monitoramento exclusivo da paisagem acústica, ampliando a faixa dinâmica e o espectro de frequências cobertas pela medição. O ciclo de trabalho a ser adotado dependerá do consumo interno do sistema de gravação de modo que será especificada a princípio uma duração das campanhas de monitoramento de no mínimo 2 e no máximo 4 meses. Estas são compatíveis com a duração dos projetos de aquisição sísmica e permitem ao menos uma visita de relançamento durante as campanhas para que se possa detectar quaisquer problemas nas gravações, realizar ajustes e evitar perdas de grandes volumes de dados.

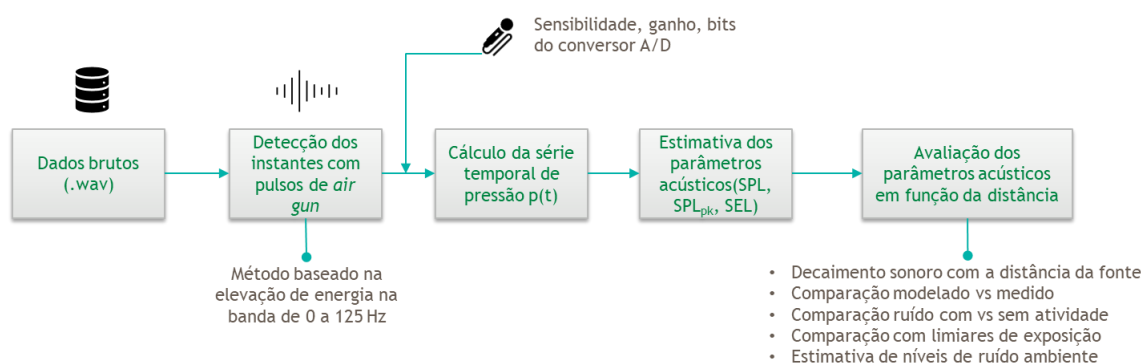


Figura II.10.8.10-1 – Fluxograma de tratamento e análise dos dados acústicos a serem coletados no âmbito do PVDS.

Os dados acústicos brutos consistem em arquivos de áudio não comprimidos, como por exemplo os de extensão *.wav* ou *.flac*, nomeados pelo próprio sistema de aquisição com uma data e hora correspondente ao instante em que o arquivo é finalizado e armazenado. Estes arquivos serão lidos e as séries temporais brutas serão utilizadas para detecção dos pulsos de *air gun* e cálculo dos parâmetros acústicos.

A detecção dos pulsos pode ser feita de diversas formas. Uma abordagem é a metodologia desenvolvido pelo IPqM no âmbito do PMPAS-BS. Este algoritmo consiste em computar a densidade espectral de potência do sinal para uma faixa de frequências específica compatível com as características espectrais da fonte (p. ex.: 0 a 125 Hz) e identificar se os picos do espectro superam em certa quantidade de dB (p.ex.: 10 dB) o nível de energia da base do pico. Além disso, deve-se garantir que a frequência do pulso esteja dentro da faixa esperada para a repetição dos disparos (p. ex.: 0.05 para pulsos a cada 20 segundos ou 0.14 Hz para disparos a cada 7 segundos). Outras metodologias semelhantes, como aquela utilizada em Martin et al. (2017), também podem ser testadas e utilizadas, caso necessário. A partir da identificação dos instantes associados aos pulsos, é possível associar os níveis dos parâmetros acústicos calculados na presença ou ausência dos disparos.

Na etapa seguinte, as séries temporais de pressão $p(t)$ são obtidas considerando informações de configuração do sistema de aquisição, como a faixa dinâmica, a resolução em bits e o ganho do conversor AD, e das curvas de sensibilidade do hidrofone, que relacionam as respostas em dB associadas a variações de pressão sonora (μPa) percebidas pelo sensor e a Voltagem correspondente, para cada faixa de frequência. A partir dos valores de data e hora

dos arquivos e dos registros do sistema AIS do navio fonte, cada série temporal de pressão e as métricas acústicas derivadas podem ser associadas a uma distância entre o arranjo de canhões de ar e o hidrofone.

A partir das séries temporais de pressão $p(t)$ são calculados os parâmetros acústicos de interesse e comumente utilizados para a quantificação do ruído hidroacústico, como a raiz quadrada média do nível de pressão sonora (*Root Mean Square Sound Pressure Level* – SPL_{RMS}):

$$SPL_{RMS} [dB \text{ ref } 1\mu Pa] = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{p_0} \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p(t)^2 dt} \right)$$

onde $T = t_2 - t_1$ é a extensão temporal total da série de pressão considerada e p_0 é a pressão de referência cujo valor praticado na área de acústica submarina é de 1 μPa . O SPL_{RMS} é mais adequado para ruídos que não mudam de forma significativa ao longo do tempo e que podem ser considerados contínuos como, por exemplo, o ruído de fundo que compõe a paisagem acústica.

Outras métricas úteis à caracterização de ruídos, particularmente os de natureza impulsiva, são o SPL de pico (SPL_{pico}) e o SPL pico a pico ($SPL_{pico-pico}$) que indicam a máxima variação de pressão experimentada por um receptor exposto à fonte sonora:

$$SPL_{pico} [dB \text{ ref } 1\mu Pa] = 20 \log(\max|p(t)|)$$

$$SPL_{pico-pico} [dB \text{ ref } 1\mu Pa] = 20 \log(\max(p(t)) - \min(p(t)))$$

Para obtenção de parâmetros acústicos estatisticamente consistentes, os trechos de áudio podem ser processados em blocos de 1 minuto de sinal, e estes subdivididos em 120 blocos de 1 segundo e 50% de sobreposição, procedimento adotado atualmente no PMPAS-BS. Desta forma é possível trabalhar com a média, a mediana e demais percentis dos parâmetros acústicos calculados em cada bloco de 1 segundo (p. ex.: SPL_{RMS_50p}), reduzindo assim a variância das estimativas e facilitando a intercomparação entre os resultados de diferentes projetos.

Para fins de avaliação da exposição da fauna marinha ao ruído também é adotado o nível de exposição sonora (*Sound Exposure Level* – SEL), que consiste numa integração da energia sonora em um determinado intervalo de tempo T :

$$SEL [dB \text{ ref } 1\mu Pa^2.s] = 10 \log \left(\int_0^T p(t)^2 dt \right)$$

O SEL acumulado em 24 horas (SEL_{24hs}) ou referente ao período de duração dos pulsos são períodos de integração comumente adotados. Nos casos em que a energia do ruído ambiente é elevada, como por exemplo na proximidade de embarcações ou outras fontes sonoras, o SEL deve ser subtraído da exposição sonora computada em períodos anteriores ou posteriores ao pulso (Erbe et al., 2022).

Como o SEL é uma medida de energia acumulada e depende fortemente da janela de tempo considerada, ele é mais adequado para caracterização dos sons impulsivos como os de disparo de canhões de ar da sísmica.

Todas estas métricas podem ser calculadas tanto para toda a banda espectral resolvida em função da taxa amostral adotada (*broad band*) quanto para filtros em faixas específicas do espectro de frequência (p. ex.: filtro de 1/3 de oitava) de modo a melhor descreverem as características do ruído com potencial de impactar as diferentes espécies da fauna marinha.

Em relação ao impacto do ruído antropogênico sobre a fauna marinha, é comumente aceito que existe uma gradação dos impactos em função da distância do organismo marinho em relação a fonte sonora (Guan e Brookens, 2021). Neste sentido, há uma faixa de valores crescentes de exposição sonora que ocasionam desde a simples percepção do ruído, passando pela ocorrência de distúrbios comportamentais, danos temporários e permanentes, até danos físicos severos. Atualmente existem métricas e limiares comumente aceitos para ocorrência de danos temporários e permanentes, como os critérios apresentados por Finneran (2016). Contudo, ainda não há um consenso acerca dos limiares em que efeitos comportamentais ocorrem em função da carência de estudos específicos, de modo que os limiares praticados por algumas agências são considerados incertos e demasiadamente simplificados (Guan e Brookens, 2021).

A **Tabela II.10.8.10-1** a seguir ilustra uma compilação de limiares de perda temporária (TTS) e permanente (PTS) propostos por Finneran (2016) e comumente aceitos pela comunidade científica como critérios de exposição de mamíferos marinhos ao ruído antropogênico em função do tipo de ruído e do grupo auditivo característico. O autor também apresenta uma função de ponderação para cada grupo, a qual deve ser utilizada no cálculo de alguns dos limiares. Os pesos associados àqueles táxons esperados de ocorrer na região poderão ser utilizados para cálculo de níveis de exposição sonora ponderados de forma a estimar os limiares de distância em que estes critérios são superados.

Tabela II.10.8.10-1 – Valores sugeridos de limiares de exposição para mamíferos marinhos, conforme adaptação de Finneran (2016). Os limiares do SEL_{cum} estão em dB re $1\mu Pa^2.s$ e para SPL_{pico} em dB re $1\mu Pa^2$. A indicação (pond.) significa que para o cálculo do SEL o espectro deve ser ponderado por pesos que variam com a frequência obtidos com uma equação de ponderação apresentada pelo autor. No cálculo do SPL_{pico} não é feita a ponderação.

Parâmetros da equação de cálculo dos pesos ¹						Não impulsivo		Impulsivo			
						Limiar TTS	Limiar PTS	Limiar TTS	Limiar PTS	Limiar TTS	Limiar PTS
Grupo ²	a	b	f1 (kHz)	f2 (kHz)	C (dB)	SEL_{cum} (pond.)	SEL_{cum} (pond.)	SEL_{cum} (pond.)	SPL_{pico} (não pond.)	SEL_{cum} (pond.)	SPL_{pico} (não pond.)
LF	1	2	0.20	19	0.13	179	199	168	213	183	219
MF	1.6	2	8.8	110	1.20	178	198	170	224	185	230
HF	1.8	2	12	140	1.36	153	173	140	196	155	202
SI	1.8	2	4.3	25	2.62	186	206	175	220	190	226
OW	2	2	0.94	25	0.64	199	219	188	226	203	232
PW	1	2	1.9	30	0.75	181	201	170	212	185	218

Os valores estimados para os parâmetros acústicos poderão ser comparados na presença e ausência das operações de sísmica, de forma a estimar os incrementos introduzidos pela atividade, e a variação dos parâmetros acústicos com a distância poderão ser confrontados com as estimativas apresentadas pela

$$^1 W(f) = C + 10 \log_{10} \left\{ \frac{(f/f_1)^{2a}}{[1+(f/f_1)]^a [1+(f/f_2)^2]^b} \right\}$$

² LF: cetáceos de baixa frequência; MF: cetáceos de média frequência; HF: cetáceos de alta frequência; SI: sirênios; OW: otariídeos; PW: focídeos.

modelagem de decaimento sonoro realizada para o cluster BC. As distâncias associadas aos valores nos quais o TTS e o PTS são excedidos também poderão ser estimadas, indicando as regiões de maior ou menor risco à fauna marinha.

A **Figura II.10.8.10-2** mostrada a seguir ilustra o tipo de resultado que poderá ser obtido com o processamento dos dados acústicos obtidos através de metodologia semelhante àquela proposta neste projeto. Nela são apresentados valores do ruído recebido a diferentes distâncias, na forma do SPL_{pico} , associadas a disparos de canhões de ar de sísmica em campanhas realizadas nos campos de Lula e Libra realizadas no ano de 2019, evidenciando o decaimento da energia sonora em função da distância da fonte. Os dados foram obtidos por um *glider* acústico no âmbito do PMPAS-BS (IPqM e PETROBRAS, 2020).

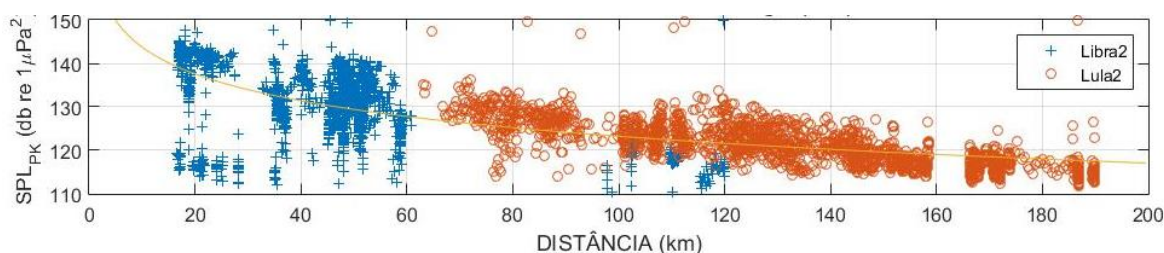


Figura II.10.8.10-2 – SPL_{pico} calculado para cada pulso detectado pelo glider em função da distância do navio fonte em campanhas de prospecção sísmica em Libra e Lula. A curva amarela mostra o ajuste de uma curva de um modelo simplificado de propagação esférica: $20 \log R$, onde R é a distância da fonte (IPqM e PETROBRAS, 2020).

De forma análoga, os valores de SEL estimados pela modelagem acústica e a partir das medições *in situ* poderão ser confrontados para verificar a acurácia do modelo e subsidiar a calibração de alguns parâmetros do modelo que possibilitem a melhoria do seu desempenho. Na **Figura II.10.8.10-3** é ilustrado um exemplo extraído do trabalho de Mathews e MacGillivray (2013). Os valores de SEL estimados pelo modelo são comparados àqueles obtidos a partir das medições realizadas durante a atividade de aquisição sísmica, permitindo verificar, por exemplo, os intervalos de distância em que o modelo acerta ou erra mais, a magnitude do erro em dB e se o modelo tende a subestimar ou superestimar os valores observados.

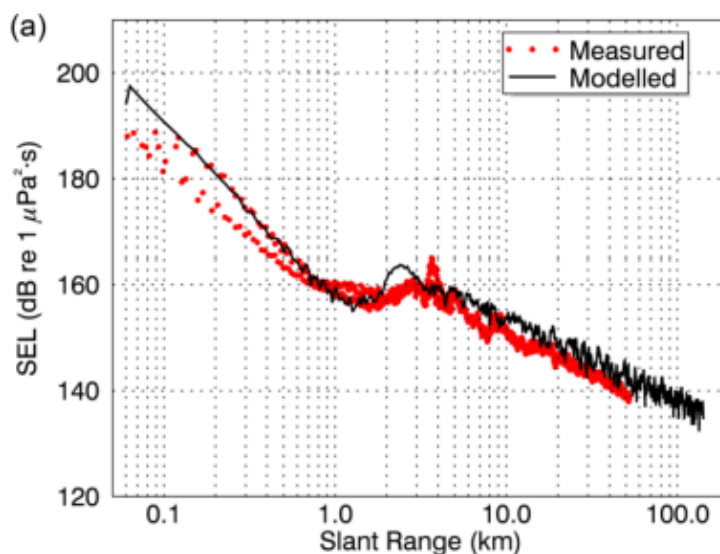


Figura II.10.8.10-3 – Comparações entre SEL modelado e medido durante monitoramento de campanha sísmica no Mar de Beaufort no Canadá (Mathews e MacGillivray, 2013).

Outro resultado interessante que poderá ser obtido é a estimativa do valor relativo dos níveis de SEL diários em relação aos limiares de exposição em função da distância da fonte e dos grupos de cetáceos (LF, MF, HF), como exemplificado na **Figura II.10.8.10-4**.

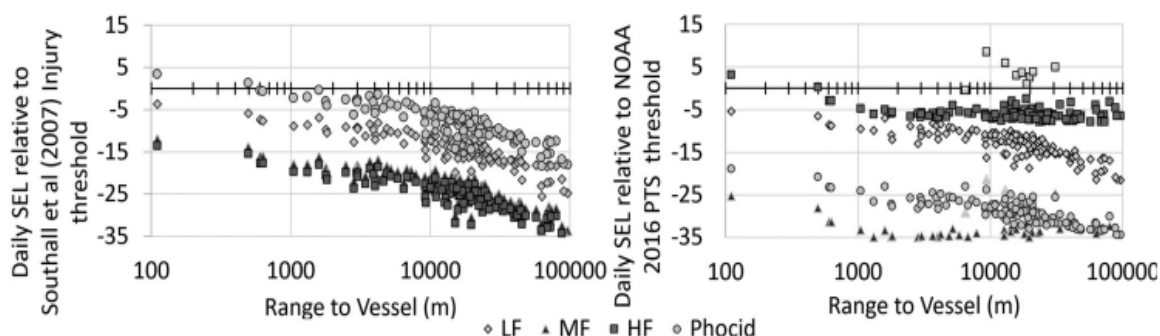


Figura II.10.8.10-4 – Níveis em dB de SEL excedido em relação a diferentes métricas de exposição em função da distância à fonte, obtidas do monitoramento da atividade de sísmica na Baía de Baffin e Melville, na Groelândia, obtida do estudo de Martin et al. (2017). De acordo com os autores, os pontos acima do limiar 0 dB no gráfico da direita e que fogem à tendência de decaimento teriam sido causados pela passagem de embarcações próximo ao sensor.

Além dos profissionais envolvidos no estudo de modelagem, os dados coletados poderão ser disponibilizados às equipes envolvidas com a execução de

atividades de monitoramento de cetáceos e que possuam ferramentas e expertise para realizar a identificação e a classificação de sinais biológicos a partir de grandes volumes de dados acústicos.

II.10.8.11 - Inter-relação com outros Planos e Projetos

O Projeto de Verificação *in situ* do Decaimento Sonoro de Atividades Sísmicas relaciona-se com os seguintes Projetos de Controle e Monitoramento Ambiental:

- Projeto de Educação Ambiental do Trabalhador: O **PEAT** informa à tripulação sísmica quanto à importância da prevenção de impactos sobre o meio ambiente marinho durante as atividades de levantamento sísmico;
- Projeto de Comunicação Social: O **PCS** informa o público-alvo da atividade sobre todos os projetos implementados, estando o Projeto de Verificação *in situ* do Decaimento Sonoro de Atividades Sísmicas incluso em suas comunicações;
- Projeto de Monitoramento de Cetáceos de Águas Profundas por meio de Telemetria Satelital: O **PMTC** tem por objetivo avaliar os potenciais impactos sonoros das atividades de pesquisa sísmica marítima sobre os cetáceos, monitorando, por meio de telemetria satelital, as espécies de águas profundas, preferencialmente marcadas e acompanhadas em cenários com e sem atividade de pesquisa sísmica marítima.

II.10.8.12 - Atendimento a Requisitos Legais e/ou Outros Requisitos

O Projeto de Verificação *in situ* do Decaimento Sonoro de Atividades Sísmicas resulta dos requisitos e exigências das seguintes normas regulatórias nacionais:

- Resolução CONAMA Nº 237/97;
- Resolução CONAMA Nº 350/04;
- Portaria MMA Nº 422/11.

II.10.8.13 - Acompanhamento e Avaliação

Os resultados de análise e processamento dos dados coletados serão apresentados no relatório de atendimento às condicionante relativo à Licença Prévia da Atividade de **Pesquisa Sísmica Marítima 3D/4D Streamer e Nodes na Bacia de Campos - Cluster BC**.

Neste relatório será feita a avaliação confirmando que a atividade seguiu os procedimentos, metas e indicadores estabelecidos neste Projeto de Verificação *in situ* do Decaimento Sonoro de Atividades Sísmicas, assim como se seus objetivos foram alcançados.


II.10.8.14 - Responsáveis pela Implementação do Projeto


A PETROBRAS será a responsável pela implementação do Projeto de Verificação *in situ* do Decaimento Sonoro de Atividades Sísmicas no âmbito do desenvolvimento das atividades de **Pesquisa Sísmica Marítima 3D/4D Streamer e Nodes na Bacia de Campos - Cluster BC**.


II.10.8.15 - Equipe Responsável pela Elaboração do Programa

É apresentado no **Quadro II.10.8.15-1** abaixo os responsáveis técnicos pela elaboração do presente projeto. Os Cadastros Técnicos Federais de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental (CTF/AIDA) são apresentados no **Anexo II.12-1** deste EAS.

Quadro II.10.8.15-1 – Equipe técnica responsável pela elaboração do Projeto de Verificação *in situ* do Decaimento Sonoro de Atividades Sísmicas.

Responsável Técnico	Adriano Fernandes de Moraes
Registro no Conselho de Classe	CREA-MG 105760D
CTF	5420201
Função no estudo	Revisão
Assinatura	

Profissional	Juliana Peroba Ferreira
Registro no Conselho de Classe	CREA RJ 200962188-3
CTF	5984728
Função no Estudo	Elaboração
Assinatura	

Profissional	Thiago Pires de Paula
Registro no Conselho de Classe	CREA 2011101081
CTF	6964874
Função no Estudo	Elaboração
Assinatura	

Referências Bibliográficas

- Caldwell, J., Dragoset, W. (2000). "A brief overview of seismic air-gun arrays," *Leading Edge* 19, 898–902.
- Da Silveira, I. C. A., L. Calado, B. M. Castro, M. Cirano, J. A. M. Lima, & A. S. Mascarenhas (2004). On the baroclinic structure of the Brazil Current-Intermediate Western Boundary Current System. *Geophys. Res. Lett.*, 31(14), L14.308.
- De Lima, F. M., Junior, C. C., Filho, W. S., Galottas, C., Lima, J. A. M., & de Paula, T. P. (2020). An underwater acoustic modelling framework for Santos Basin, Brazil. In *Proceedings of Meetings on Acoustics ICUA* (Vol. 40, No. 1, p. 070020). Acoustical Society of America.
- Dos Santos, F. A., São Thiago, P. M., de Oliveira, A. L. S., Barmak, R., Lima, J. A. M., de Almeida, F. G., & Paula, T. P. (2016). Investigating flow noise on underwater gliders acoustic data. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(4), 3409-3409.
- Erbe C., Verma A., McCauley R., Gavrilov A., Parnum I. (2015). The marine soundscape of the Perth Canyon. *Progress in Oceanography* 137:38–51.
- Erbe, C., & Thomas, J. A. (2022). *Exploring Animal Behavior Through Sound: Volume 1*. Springer.
- Finneran, J.J. (2016). Auditory Weighting Functions and TTS/PTS Exposure Functions for Marine Mammals Exposed to Underwater Noise.
- Guan S, Brookens T. (2021). The Use of Psychoacoustics in Marine Mammal Conservation in the United States: From Science to Management and Policy. ***Journal of Marine Science and Engineering***. 2021; 9(5):507.
- IPqM, PETROBRAS (2020). Projeto de Monitoramento da Paisagem Acústica Submarina da Bacia de Santos (PMPAS-BS). 4º Relatório Técnico – Novembro/2015 a Dezembro/2019.
- Lellouche, J.M., Greiner, E., Le Galloudec, O., Garric, G., Regnier, C., Drevillon, M., Benkiran, M., Testut, C.E., Bourdalle-Badie, R., Gasparin, F., Hernandez, O., Levier, B., Drillet, Y., Remy, E., Le Traon, P.Y., 2018. Recent updates to the copernicus marine service global ocean monitoring and forecasting real-time 1/12 high-resolution system. *Ocean Sci.* 1
- Lima, J. A. M., de Paula, T. P., Soares Filho, W., Spengler, A., de Almeida, F. G., Pereira, D. P. C., ... & Stein, M. (2022). Monitoramento da Paisagem Acústica Submarina da Bacia de Santos (PMPAS-BS): uma iniciativa brasileira em monitoramento acústico oceânico. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 10(2).

Martin, S. B., Matthews, M. N. R., MacDonnell, J. T., & Bröker, K. (2017). Characteristics of seismic survey pulses and the ambient soundscape in Baffin Bay and Melville Bay, West Greenland. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(6), 3331-3346.

Matthews, M. N. R., & MacGillivray, A. O. (2013, June). Comparing modeled and measured sound levels from a seismic survey in the Canadian Beaufort Sea. In *Proceedings of Meetings on Acoustics ICA2013* (Vol. 19, No. 1, p. 070046). Acoustical Society of America.

Robinson, S. P., Lepper, P. A., & Hazelwood, R. A. (2014). Good practice guide for underwater noise measurement.

Strasberg, M. (1985). Hydrodynamic flow noise in hydrophones. In *Adaptive Methods in Underwater Acoustics* (pp. 125-143). Springer, Dordrecht.