

GUSTAVO DOS SANTOS SOUZA

# **INVERSÃO SÍSMICA APLICADA NOS EVAPORITOS DO CAMPO DE BACALHAU, BACIA DE SANTOS**

Projeto Final de Graduação apresentado ao curso de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito para a Obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Universidade Federal Fluminense - UFF

Departamento de Geologia e Geofísica

Graduação em Geofísica

Orientador: Wagner Moreira Lupinacci

Coorientador: Camila Paiva Almeida de França

Niterói

2023

GUSTAVO DOS SANTOS SOUZA

# **INVERSÃO SÍSMICA APLICADA NOS EVAPORITOS DO CAMPO DE BACALHAU, BACIA DE SANTOS**

Projeto Final de Graduação apresentado ao curso de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito para a Obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Comitê composto pelos seguintes avaliadores:

---

**Wagner Moreira Lupinacci**  
Orientador - GIECAR/UFF

---

**Camila Paiva Almeida de França**  
Coorientadora - Equinor Brasil

---

**Leonardo Guimarães Miquelutti**  
GISIS/UFF

Niterói  
2023

*"Em algum lugar, algo incrível está esperando para ser descoberto."*

**Carl Sagan;**

# Agradecimentos

Aos meus queridos pais, Andrea e Luiz, cujo amor e carinho sempre me acompanharam. Obrigado por serem minha maior fonte de incentivo nos estudos e por acreditarem em meu potencial. Amo vocês!

Agradeço aos amigos que estiveram ao meu lado desde o ensino médio e Pré-Vestibular Social, e aqueles que conheci durante a minha trajetória na universidade. Agradeço a cada um de vocês, em especial a Ana, Bernardo, Camila, Carlos, Carol, Eduardo, Estevão, Felipe, Fernanda, Gabriela, Jéssica, Laura, Lucas, Nathália, Paulo, Victor e Wesley, por todo o apoio.

Aos meus colegas da Equinor, em especial a Amanda, Flávio, Ian, Isabella, João Victor, Layla, Leonardo, Lucas, Luan, Niko, Paula, Sara, Stella e Úrsula. Muito obrigado por tornarem o ambiente de trabalho tão agradável.

Àqueles que estiveram diretamente envolvidos neste trabalho, meu orientador Wagner Lupinacci, do GIECAR/UFF, e a coorientadora Camila de França, também colega de trabalho na Equinor, por confiarem em mim para conceber este estudo e acompanharem meu progresso durante o último ano, transmitindo valiosos conhecimentos.

Ao professor Leonardo Miquelutti, por aceitar o convite para compor a banca examinadora deste trabalho. Além disso, sou grato por todo o aprendizado proporcionado durante o período em que fui seu orientando de Iniciação Científica no GISIS.

Expresso minha gratidão às instituições da UFF que tive a honra de fazer parte: Horizonte Soluções Geofísicas e o Capítulo Estudantil EAGE & SEG, conhecido como Geoscientific Student Society.

À Equinor, sou imensamente grato pela oportunidade de realizar este trabalho. Agradeço pelos enriquecedores dois anos de estágio e também aos parceiros do Campo de Bacalhau: Exxon Mobil e Petrogal por autorizarem a publicação deste trabalho.

Meus agradecimentos se estendem a todos os professores e funcionários da UFF, especialmente ao corpo docente do Departamento de Geologia e Geofísica do Instituto de Geociências da UFF, por compartilharem seus conhecimentos e experiências ao longo dessa jornada acadêmica. Em especial, expresso minha gratidão ao Bijani, Cetale, Cleverson, Freire, José Antônio, Miquelutti e Wagner pelas excelentes aulas que proporcionaram. Suas habilidades como professores e sua dedicação ao ensino foram fundamentais para o meu aprendizado e crescimento acadêmico.

# Resumo

A presença de sais exóticos na Bacia de Santos pode acarretar implicações técnicas significativas para a perfuração e a metalurgia dos poços. Portanto, é de extrema importância identificar com precisão esses sais e determinar suas espessuras

Neste trabalho de conclusão de curso foi realizado um processo de inversão sísmica na seção salina no Campo de Bacalhau, Bacia de Santos. A utilização da inversão sísmica permite a transformação da amplitude sísmica para impedância acústica, que é uma propriedade de camada. A impedância acústica pode ser empregada na classificação de sais, na estimativa de espessura e na análise mineralógica de evaporitos, devido às suas respostas acústicas distintas e contrastantes. Além disso, a partir da impedância, é possível calcular novos parâmetros elásticos, como o módulo de Young e a razão de Poisson.

A fim de lidar com a falta de dados de perfis de poços em áreas específicas de interesse, foi implementado um fluxo de pré-condicionamento para prever esses perfis ausentes. A previsão dos perfis de poços faltantes, utilizando técnicas de aprendizado de máquina, apresentou melhores indicadores de desempenho em comparação com os métodos preditivos convencionais. Essa etapa foi fundamental para o fluxo de inversão, pois esses perfis são essenciais para a construção do modelo de baixa resolução e para o controle de qualidade, influenciando diretamente o resultado final.

Adicionalmente, foi conduzido a análise dos perfis de poços e uma classificação automática de fácies usando o algoritmo  $K_{means}$ , a fim de demonstrar a relação entre as fácies salinas e a resposta acústica. Os testes de viabilidade realizados revelaram uma forte correlação entre a impedância acústica e os três grupos de sais estudados: sais de baixa velocidade (taquidrita, carnalita e silvita), halita e anidrita.

Os resultados obtidos por meio da inversão sísmica neste estudo forneceram uma distribuição geoespacial detalhada da impedância acústica, o que torna possível a construção de um modelo 3D dos evaporitos na região do Campo de Bacalhau. Além disso, ao concluir o fluxo de inversão utilizando dados de aquisição sísmica de *full azimuth*, foi realizado inversões adicionais utilizando diferentes produtos azimutais. Essas inversões revelaram estruturas e fácies semelhantes, porém com variações de espessura.

**PALAVRAS CHAVE:** BACIA DE SANTOS, EVAPORITOS, INVERSÃO SÍSMICA DETERMINÍSTICA BAYSSIANA, APRENDIZAGEM DE MÁQUINAS, CLASSIFICAÇÃO DE FÁCIES.

# Abstract

The presence of exotic salts in the Santos Basin can lead to significant technical implications for drilling and well metallurgy. Therefore, the prediction of such salts and their corresponding thicknesses is of utmost importance.

In this work, a seismic inversion process was conducted in the saline section of the Bacalhau Field, Santos Basin. The use of seismic inversion allows for the transformation of seismic amplitudes into acoustic impedance, which is a layer property. Acoustic impedance can be employed in salt classification, thickness estimation, and mineralogical analysis of evaporites, due to their distinct and contrasting acoustic responses. Furthermore, from impedance, it is possible to calculate elastic parameters such as Young's modulus and Poisson's ratio.

To address the lack of well log data in specific areas of interest, a pre-conditioning workflow was implemented to predict these missing well profiles. Predicting the missing well profiles using machine learning techniques yielded better performance indicators compared to conventional predictive methods. This step was crucial for the inversion workflow, as these profiles are essential for constructing the low-resolution model and ensuring quality control, directly influencing the final result.

Additionally, an analysis of well profiles and automatic facies classification using the K-means algorithm was conducted to demonstrate the relationship between saline facies and acoustic response. Feasibility tests revealed a strong correlation between acoustic impedance and the three studied salt groups: low-velocity salts (such as tachyhydrite, carnallite and silvite), halite, and anhydrite.

The results obtained from seismic inversion in this study provided a detailed geospatial distribution of acoustic impedance, enabling the construction of a 3D model of evaporites in the Bacalhau Field. Furthermore, upon concluding the inversion workflow using full azimuth seismic acquisition data, additional inversions were performed using different azimuthal products. These inversions revealed similar structures and facies with thickness variations.

**KEYWORDS:** SANTOS BASIN, EVAPORITES, BAYESIAN DETERMINISTIC SEISMIC INVERSION, MACHINE LEARNING, FACIES CLASSIFICATION.

# Sumário

	<b>Lista de ilustrações</b>	<b>9</b>
	<b>Lista de tabelas</b>	<b>10</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>BACIA DE SANTOS</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Geologia regional</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Geologia local</b>	<b>14</b>
<b>2.3</b>	<b>Evaporitos</b>	<b>16</b>
2.3.1	Formação Ariri	17
2.3.2	Propriedades acústicas dos sais	17
<b>3</b>	<b>TEORIA</b>	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Conceitos de inversão sísmica</b>	<b>19</b>
3.1.1	Modelagem Direta	19
3.1.1.1	Discretização	21
3.1.2	Problema Inverso	21
3.1.3	Regularização	24
<b>3.2</b>	<b>Inversão Determinística Bayesiana</b>	<b>25</b>
3.2.1	Teorema de Bayes	25
3.2.2	Solução Geral	26
3.2.2.1	Modelo a posteriori	27
3.2.3	<i>Maximum a Posteriori Estimation</i> - MAP	27
<b>3.3</b>	<b>Aplicações da Inversão Sísmica</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>DADOS E MATERIAIS</b>	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>Sísmica OBN de Bacalhau</b>	<b>31</b>
4.1.1	Vantagens dos OBN sobre streamer	32
4.1.2	Least-Squares Reverse Time Migration (LSRTM)	33
<b>4.2</b>	<b>Poços em Bacalhau</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>35</b>
<b>5.1</b>	<b>Pré-condicionamento dos dados</b>	<b>35</b>
5.1.1	Predição de perfis de poços com aprendizagem de máquina	35
<b>5.2</b>	<b>Teste de viabilidade</b>	<b>38</b>
5.2.1	Classificação de fácies nos poços com K-means	39

5.2.2	Estudo da relação acústica com as fácies . . . . .	40
<b>5.3</b>	<b>Amarração poço-sísmica . . . . .</b>	<b>40</b>
<b>5.4</b>	<b>Inversão Sísmica . . . . .</b>	<b>42</b>
5.4.1	Construção do Modelo de Baixa Frequência . . . . .	42
5.4.2	Cubo de Impedância Acústica . . . . .	43
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>45</b>
<b>6.1</b>	<b>Avaliação da inversão . . . . .</b>	<b>45</b>
6.1.1	Coefficientes de correlação dos poços . . . . .	45
6.1.2	Análise nos poços de controle . . . . .	46
6.1.3	Análise no poço cego . . . . .	46
6.1.4	Interpretação qualitativa . . . . .	47
<b>6.2</b>	<b>Impedâncias acústicas dos produtos azimutais . . . . .</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS . . . . .</b>	<b>53</b>

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Mapa de localização dos principais campos de óleo e gás na bacia de Santos, incluindo campo de Bacalhau. Fonte: <a href="#">Coelho et al. (2022)</a> , adaptado de <a href="#">Gamboa et al. (2021)</a> . . . . .	13
Figura 2 – Diagrama estratigráfico da Bacia de Santos. Fonte: <a href="#">Moreira et al. (2007)</a> . . . . .	14
Figura 3 – A) Diagrama conceitual da BVE100 baseado no BR-3-EQNR-1-SPS. B) Uma linha sísmica N-S mostrando a assimetria da plataforma de N para S, com uma margem norte íngreme e uma margem sul suave. O diagrama no centro mostra as direções do vento inferidas, as setas mostram a força relativa e a orientação das direções do vento interpretadas. Fonte: <a href="#">Hunt (2021)</a> . . . . .	15
Figura 4 – Densidade, velocidade cisalhante (velocidade S), velocidade compressional (velocidade P) e registros litológicos do poço BR-3-BRSA-821-RJS. Fonte: <a href="#">Teixeira e Lupinacci (2019)</a> . . . . .	18
Figura 5 – Coeficientes de reflexão estimados por <a href="#">ZOEPPRITZ e AKI; RICHARDS</a> . Fonte: <a href="#">Lu et al. (2018)</a> . . . . .	20
Figura 6 – Exemplo de problema bem posto e mal posto utilizando funções analíticas. . . . .	23
Figura 7 – Inversão acústica colorida aplicada na sísmica R0303-0047 aplicada com informações do dado de impedância acústica do poço 4-OGX-49-MA. Fonte: <a href="#">Leaubon et al. (2023)</a> . . . . .	28
Figura 8 – Crossplot de A) Vs vs Vp, B) Densidade vs Vp, C) Módulo de Young vs Vp e D) Vp vs Ip; com curvas de regressão. Fonte: <a href="#">Teixeira e Lupinacci (2019)</a> . . . . .	29
Figura 9 – Caracterização dos bancos de coquinas. (a) P50 da Impedância Acústica (b) Fácies classificadas a partir do P50. As linhas verde, azul e magenta representam as discordâncias Pré-Jiquitá, Pré-Alagoas e Base do Sal respectivamente. Fonte: <a href="#">Fernandes e Lupinacci (2022)</a> . . . . .	30
Figura 10 – Fluxo de processamento do Full Track. Fonte: <a href="#">Santos et al. (2022)</a> . . . . .	31
Figura 11 – Modelo de Velocidade do OBN de Bacalhau gerado por FWI. Fonte: <a href="#">Santos et al. (2022)</a> . . . . .	32
Figura 12 – Seção geológica ao longo do Campo de Bacalhau. Fonte: <a href="#">Santos et al. (2022)</a> . . . . .	34
Figura 13 – Fluxo de trabalho para inversão sísmica. . . . .	35
Figura 14 – Distribuições dos perfis de poços. . . . .	36
Figura 15 – Tabela com métricas dos modelos preditores. . . . .	37
Figura 16 – Resultados dos perfis preditos utilizando os métodos regressão linear e XGBoost no Poço D. . . . .	38

Figura 17 – Resultado do agrupamento de fácies por $K_{means}$ . A) Crossplot de Vp vs densidade, colorido por <i>cluster</i> . Centroides em vermelho. B) Crossplot de impedância S vs impedância P colorido por fácies. C) Histograma de impedância acústica das fácies salinas. . . . .	40
Figura 18 – Janela de amarração no <i>software RokDoc</i> . . . . .	42
Figura 19 – Modelo de baixa frequência de Vp e Densidade gerado por Krigagem. . . . .	43
Figura 20 – Diferentes opções para distribuição de propriedades para a etapa de construção do modelo de baixa frequência. Fonte: Manual do <i>PsPro</i> . . . . .	43
Figura 21 – Seção arbitrária de Impedância Acústica ( $I_p$ ) cruzando os poços de controle e o poço cego. . . . .	47
Figura 22 – I) Seção com a soma acumulada das diferenças absoluta de cada volume de impedância acústica das quatro seções azimutais em relação ao volume de impedância acústica gerado pelo <i>full azimuth</i> . Os retângulos A/E, B/F, C/G e D/H são as diferenças relativas entre as seções 01, 02, 03 e 04, respectivamente, e o <i>full azimuth</i> . . . . .	48
Figura 23 – Seção arbitrária com a diferença de impedância acústica entre a seção azimutal 01 e o full azimuth cruzandos os poços A, C, e B respectivamente. . . . .	48
Figura 24 – Janela de amarração do poço A . . . . .	53
Figura 25 – Janela de amarração do poço B, RokDoc . . . . .	54
Figura 26 – <i>Wavelets</i> geradas no projeto. . . . .	54
Figura 27 – Elipsoides de covariância calculados pelo CRAVA do PsPro. . . . .	55

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades dos cubos sísmicos . . . . .	32
Tabela 2 – Coeficientes de correlação . . . . .	45

# 1 Introdução

O Campo de Bacalhau, na Bacia de Santos, possui reservatórios carbonáticos na Formação Barra Velha e está localizado a 185 quilômetros da costa e com 2050 metros de lâmina d'água e é operado pela Equinor em parceria com a ExxonMobil e Petrogal.

A presença de sais exóticos na seção evaporítica acima dos reservatórios do pré-sal trazem implicações técnicas para a perfuração de poços de desenvolvimento do campo. Sais como taquidrita, carnalita, silvita e anidrita possuem durezas e mobilidades bem características que destoam da halita e podem causar problemas de perfuração tais como desgaste prematuro de brocas, fechamento da parede do poço, aprisionamento da coluna de perfuração ou deformação do revestimento. Prever a existência e espessura desses sais é de extrema importância para evitar perdas e atrasos em projetos.

Um levantamento de sísmica com nodes submarinos foi adquirido no campo pela CGG em 2020. Para esse tipo de levantamento são instalados geofones no fundo do oceano, enquanto um navio carregando apenas as fontes sísmicas gera o sinal a partir da superfície. Esta metodologia possibilita uma cobertura para todos os ângulos azimutais e para longos *offsets* (de 8 quilômetros a 37 quilômetros). Além do volume sísmico com todos os azimutes (*full azimuth*), também foram fornecidos uma série de volumes por conjunto de azimute (*narrow-azimuth*).

Esse trabalho teve como objetivo realizar uma inversão sísmica na seção salina e utilizar o cubo de impedância acústica resultante para classificar os diferentes tipos de sais, estimar as suas espessuras e mineralogia. O uso da impedância acústica é comum para classificação de sais (TEIXEIRA; LUPINACCI, 2019), visto que os sais possuem respostas acústicas bem características e contrastantes. Em complemento, foram realizadas inversões acústicas nos diferentes produtos *narrow-azimuth* com o propósito de verificar como estes volumes, processados a partir de diferentes pares de fonte sísmica e receptor, afetam a inversão e sua interpretação, quando comparados com a inversão realizada com todos os azimutes.

Neste trabalho, como haviam dados de poços com ausência de perfilagem em trechos da área de interesse, foi utilizado um fluxo de pré-condicionamento com aprendizagem de máquinas para prever os perfis ausentes. Além disso, uma análise dos perfis de poços foi realizada para demonstrar a relação das fácies salinas com a resposta acústica.

Esse trabalho foi desenvolvido em parceria com a Equinor Brasil, a empresa disponibilizou os volumes sísmicos, *softwares* de geofísica. O Grupo de Interpretação Exploratória e Caracterização de Reservatórios (GIECAR) da Universidade Federal Fluminense proveu os algoritmos de aprendizagem de máquina para predição de perfis de poços e compartilhou

o riquíssimo conhecimento técnico sobre inversão sísmica.

## 2 Bacia de Santos

A Bacia de Santos, Figura 1 está localizada no litoral sudeste brasileiro e possui 350.000 km<sup>2</sup> de extensão territorial. A bacia tem limite ao sul com a Bacia de Pelotas através do Alto de Florianópolis, ao norte com a Bacia de Campos através do Alto de Cabo Frio e a oeste pela Serra do Mar.

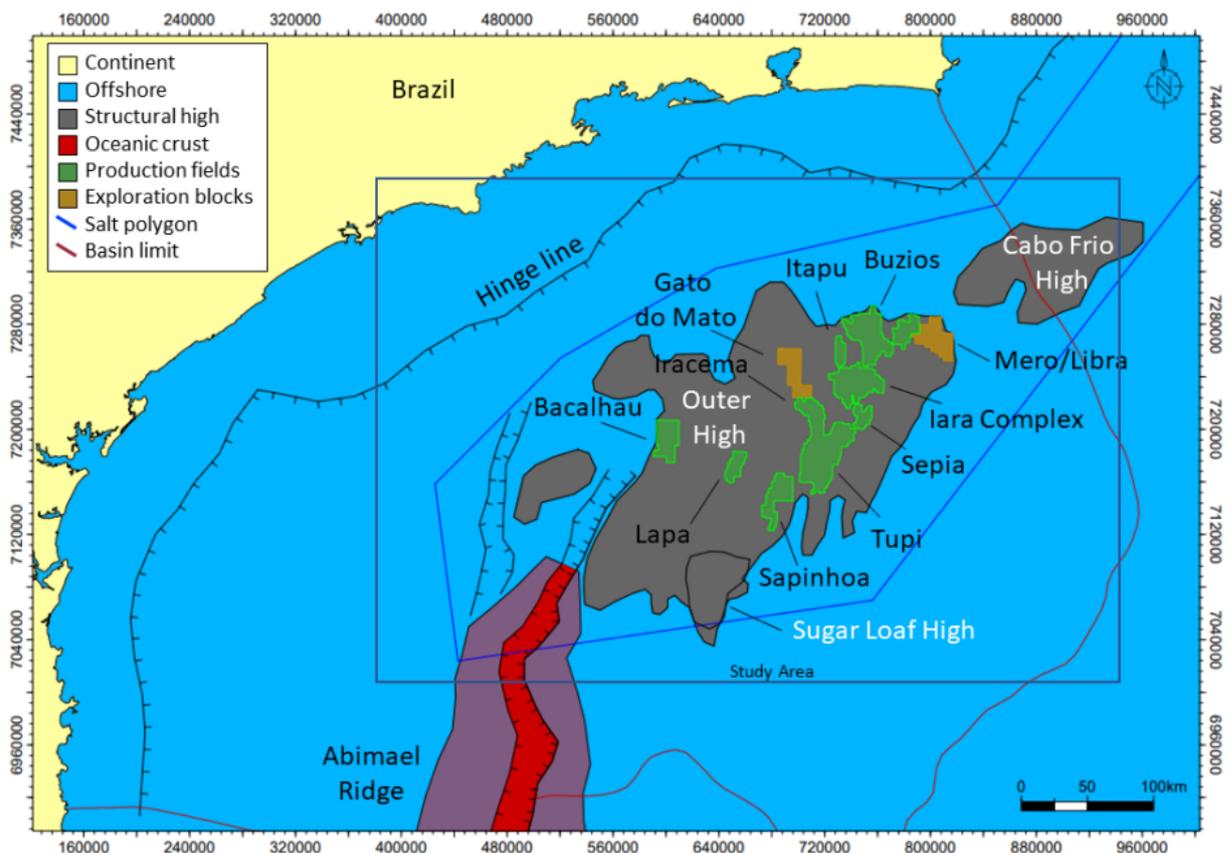


Figura 1 – Mapa de localização dos principais campos de óleo e gás na bacia de Santos, incluindo campo de Bacalhau. Fonte: [Coelho et al. \(2022\)](#), adaptado de [Gamboa et al. \(2021\)](#)

### 2.1 Geologia regional

A formação da Bacia de Santos, assim como as bacias vizinhas, está associada ao processo de rifteamento do antigo supercontinente Gondwana no Eocretácio (220 Ma), que resultou nas atuais placas continentais Americana e Africana ([MASCLE, 1976](#)). Esta separação entre África e América do Sul ocorreu com movimentação divergente leste-oeste ([FRANÇOLIN; SZATMARI, 1987](#)). A Figura 2 apresenta a carta estratigráfica da Bacia de Santos ([MOREIRA et al., 2007](#)), no qual a sua evolução tectônico-estratigráfica é caracterizada pelas fases de rifte, pós-rifte e drifte.



subdividida em duas zonas. Os carbonatos têm origem lacustre e são atribuídos a diversos ambientes de deposição. Bacalhau possui a paleotopografia complexa, resultado de falhas nos basaltos Paraty e da presença de elevações vulcânicas. Hunt (2021) mapeou as direções preferenciais dos *mounds* em N-S e NE-SW e atribuiu isto à influência de ventos dominantes nestas direções, Figura ??B.

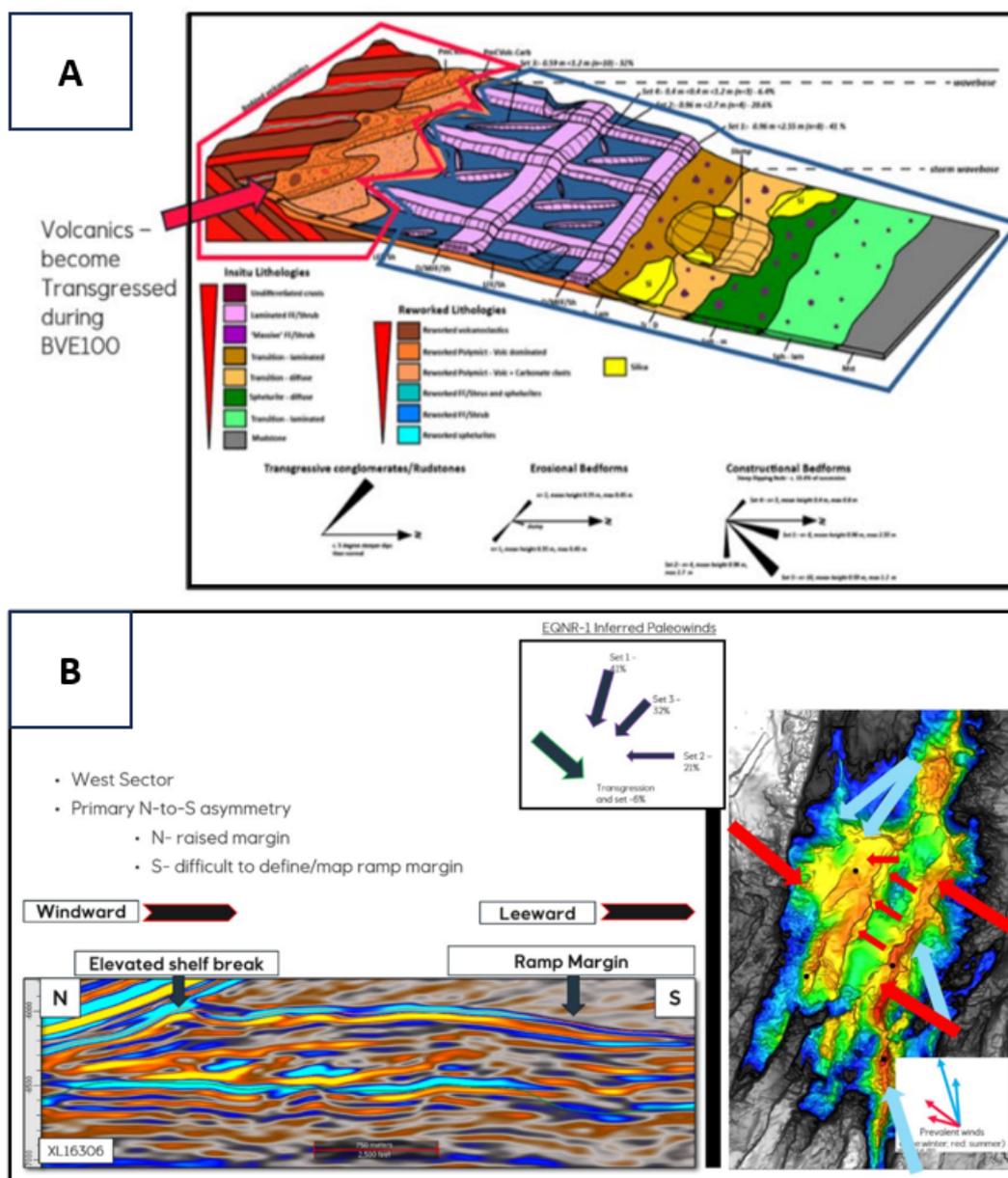


Figura 3 – A) Diagrama conceitual da BVE100 baseado no BR-3-EQNR-1-SPS. B) Uma linha sísmica N-S mostrando a assimetria da plataforma de N para S, com uma margem norte íngreme e uma margem sul suave. O diagrama no centro mostra as direções do vento inferidas, as setas mostram a força relativa e a orientação das direções do vento interpretadas. Fonte: Hunt (2021)

A Figura 3.A demonstra a complexidade do Campo de Bacalhau. Em um dos poços foram identificados uma sucessão de sedimentos que indicam processos de transporte e

acumulação gravitacional em declives submarinos (HUNT, 2021). Em outra localização foram identificados sedimentos vulcanoclásticos de alta energia misturados, resultado de processos de retrabalhamento (HUNT, 2021). Acima desses sedimentos, foi observada uma sucessão de carbonatos cíclicos de baixa energia, caracterizados por uma deposição mais calma. Essas diferenças entre sedimentos *insitu* e retrabalhados são uma característica da complexidade do campo.

## 2.3 Evaporitos

O termo evaporito é utilizado para descrever os precipitados químicos a partir de soluções, numa sequência que abrange carbonatos, sulfatos e cloretos.

A intensa evaporação de água do mar, em bacias de circulação restrita, resulta na concentração de sais formando as salmouras, que passam a precipitar os sais nelas dissolvidos, gerando, assim, os depósitos evaporíticos que são encontrados nas bacias sedimentares. Para que isso ocorra, é necessário que a taxa de evaporação seja maior que a taxa de precipitação pluviométrica mais o influxo de água doce e salgada. A existência de um ambiente desértico ou essencialmente árido é uma condição necessária para a formação de eavaporitos, mas, além disso, é importante ocorrer o isolamento da bacia, de modo a permitir uma progressiva concentração e deposição sequencial dos evaporitos (MOHRIAK *et al.*, 2008).

A precipitação dos evaporitos segue uma sequência bem definida, de acordo com as leis químicas, com diferentes minerais se formando em função das diferentes solubilidades. A ordem da deposição dos sais depende de dois fatores: a solubilidade e a quantidade de cada composto disponível na água do mar (MOHRIAK *et al.*, 2008).

**Sulfatos de cálcio:** são geralmente depositados como gipsita e, mais tarde, transforma-se em **anidrita** na medida em que se perde água cristalina. Quando a gipsita se transforma em anidrita aumenta o volume em 60%. Logo, a gipsita é geralmente o primeiro mineral a precipitar e o último a permanecer depois que a bacia evaporítica é afetada por incursões marinhas e dissolução de sais mais solúveis.

**Halita:** é o mineral evaporítico mais abundante, tanto em depósitos salinos como dissolvido na água do mar. Ela começa a se depositar quando a sua concentração na salmoura chega a 27%. Por causa de sua estrutura cristalina iônica cúbica, a pequena valência de seus íons e o grande raio iônico, a halita se deforma com facilidade, permitindo a halocinese a tectônica do sal.

**Carnalita:** precipita-se apenas em salmouras altamente concentradas, depositada singeneticamente. Com a dissolução do cloreto de magnésio pode transformar-se em **silvita**.

**Taquidrita:** é o mineral cujo nome reflete sua rápida hidratação.

### 2.3.1 Formação Ariri

A Formação Ariri pertence ao grupo Guaratiba, Figura 2, e contém os evaporitos da Bacia de Santos, depositados durante o Alptiano, cerca de 115 Ma atrás. Pereira (1986) estimou que esses depósitos salinos foram as primeiras incursões marinhas ao longo do rifte costeiro. Além disso, Leyden (1976) sugeriu a ideia de que fontes de águas alcalinas, provenientes de emanções vulcânicas, contribuíram significativamente para a concentração dos elementos químicos presentes na bacia. Devido a tectônica do sal, a Formação Ariri é caracterizada por diapiros, muralhas de sal e estruturas resultantes da halocinese. O sal é selante em áreas com grandes espessuras, tornando-se um dos componentes mandatórios em um play exploratório convencional. Segundo [Gambôa et al. \(2008\)](#) [Amaral et al. \(2015\)](#) [Yamamoto et al. \(2019\)](#), o sal da Bacia de Santos é formado de 80% a 90% de halita, enquanto os outros minerais são a taquidrita, carnalita, silvita, gipsita e anidrita.

Uma forte característica da Formação Ariri é a presença de uma Anidrita basal, que marca o início dessa formação, e uma Anidrita no topo, que marca o fim da deposição dos sais. Diferentes autores definiram sequências estratigráficas baseadas em fáceis sísmicas e informações de poços, essas sequências descrevem as intercalações de anidrita e os demais sais. [Gambôa et al. \(2008\)](#), [Rodriguez et al. \(2018\)](#) e [Fiduk e Rowan \(2012\)](#) definiram 3 sequências caracterizadas por: um pacote superior composto por anidrita e halita; um pacote delgado de halita e um pacote estratificado formado por camadas de sais diversos, respectivamente. Em complemento, [Gambôa et al. \(2008\)](#) e [Rodriguez et al. \(2018\)](#), também definiram uma quarta sequência caracterizada como um pacote espesso de Halita enquanto que [Fiduk e Rowan \(2012\)](#) propuseram mais 3 subdivisões desta mesma sequência. As sequências de [FIDUK; ROWAN](#) distinguem regiões com reflexões sísmicas contínuas e regiões sem reflexões ou com reflexões pouco contínuas.

### 2.3.2 Propriedades acústicas dos sais

Os evaporitos são rochas com propriedades físicas incomuns, pois um mesmo tipo de Sal mantém sua densidade e velocidade mesmo com uma grande variação de temperatura e pressão. Por exemplo, a velocidade sísmica da onda compressional primária ( $V_p$ ) na anidrita atinge cerca de 6.500 m/s com densidade de  $2,98g/cm^3$ , enquanto a taquidrita atinge 3.313m/s com densidade de  $1,66g/cm^3$  ([MOHRIAK et al., 2008](#)). Embora exista efeitos de compactação, essas propriedades são aproximadamente constantes, até mesmo em pacotes de centenas de metros de espessura, como os observados na Bacia de Santos ([TEIXEIRA; LUPINACCI, 2019](#)). O intervalo da Formação Ariri ilustrado na Figura possui 1km e densidade e velocidades (P e S) aproximadamente a mesma para as fácies Halita.

Não é possível estabelecer uma relação direta entre as amplitudes sísmicas e uma rocha evaporítica específica, mas, como foi demonstrado em estudos de física de rocha com perfis de poços por [TEIXEIRA; LUPINACCI](#), o uso da técnica de inversão acústica permite

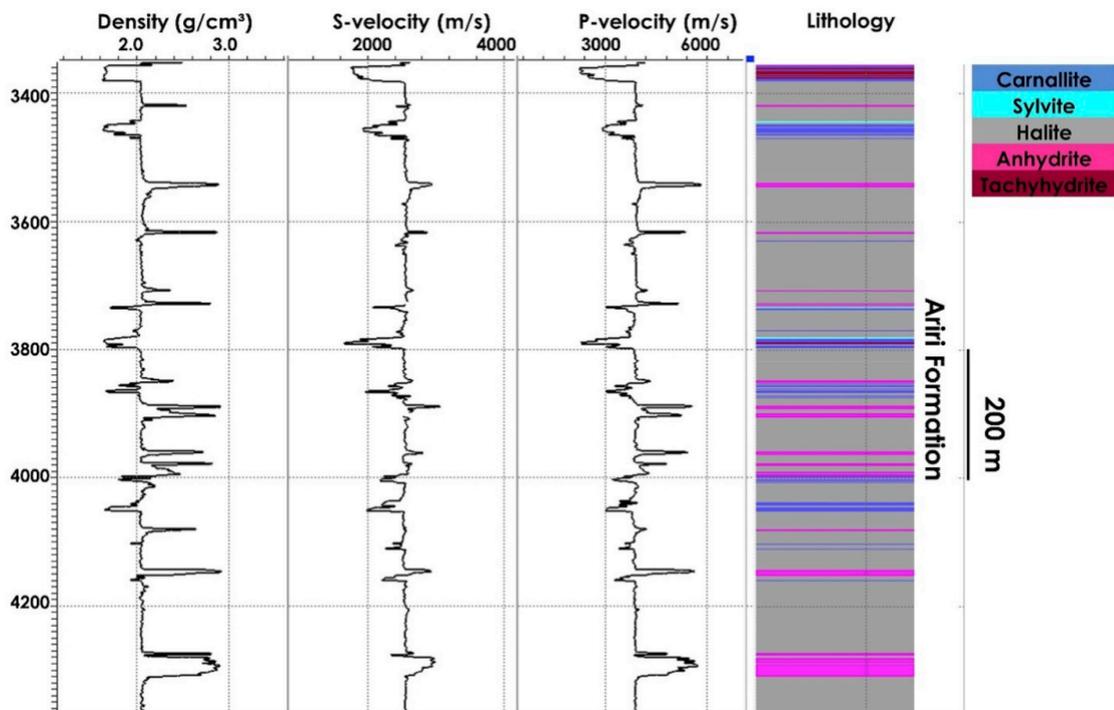


Figura 4 – Densidade, velocidade cisalhante (velocidade S), velocidade compressional (velocidade P) e registros litológicos do poço BR-3-BRSA-821-RJS. Fonte: [Teixeira e Lupinacci \(2019\)](#)

agrupar as rochas salinas da Formação Ariri em 3 fácies: sais de baixa impedância acústica, tais como taquidrita, carnalita e silvita; Anidrita, por possuir uma alta impedância acústica; e halita, por possuir um valor impedância acústica intermediário quando comparada com os demais sais presentes nessa formação. Sendo assim, é possível definir um nível de referência, valores acima deste valor indicam uma rocha com maior composição de anidrita, enquanto que valores menores indicam uma maior composição dos sais de baixa velocidade.

## 3 Teoria

### 3.1 Conceitos de inversão sísmica

A modelagem geofísica é uma técnica amplamente utilizada na exploração e estudo de subsuperfície, na qual consiste em representar fenômenos físicos complexos por meio de modelos matemáticos, com o objetivo de compreender características tanto geofísicas quanto geológicas. Esses modelos são construídos com base em dados adquiridos por métodos geofísicos, como sísmica, gravimetria, magnetometria e entre outros.

A modelagem direta consiste em, a partir de parâmetros ( $m$ ) assumidos, calcular dados ( $D_{calc}$ ) considerando um modelo físico ( $G$ ):

$$D_{calc} = G.m \quad (3.1)$$

Enquanto que a modelagem inversa consiste em, a partir de dados adquiridos ( $D_{obs}$ ) e considerando o modelo físico da modelagem ( $G$ ), encontrar quais são os parâmetros ( $m$ ) que solucionam o sistema de igualdade:

$$m = G^+ D_{obs} \quad (3.2)$$

#### 3.1.1 Modelagem Direta

A modelagem direta para o método sísmico de reflexão consiste em obter o sismograma sintético. Para isso, é possível utilizar um modelo convolucional expresso por:

$$d_{calc}(t) = S(\theta) * Rf(t, \theta), \quad (3.3)$$

no qual  $s(t)$  é o traço sísmico,  $w(t)$  é um vetor *wavelet* e  $Rf(t)$  é a refletividade, que representa a posição temporal eventos reflexivos. Sendo assim, o modelo convolucional visa reproduzir a incidência de uma frente de onda plana em um meio elástico e isotrópico em meio reflexivo.

#### **Aki & Richards**

A equação de [Aki e Richards \(1980\)](#) é uma aproximação da Equação de [Zoeppritz \(1919\)](#) para ângulos de incidência até 30 graus.

Como representado na Figura 5, [AKI; RICHARDS](#) descreve o comportamento das reflexões em função dos contrastes das velocidades compressional e cisalhante e da densidade:

$$Rf_{pp}(\theta) = a_\alpha(\theta) \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + a_\beta(\theta) \frac{\Delta\beta}{\beta} + a_\rho(\theta) \frac{\Delta\rho}{\rho}, \quad (3.4)$$

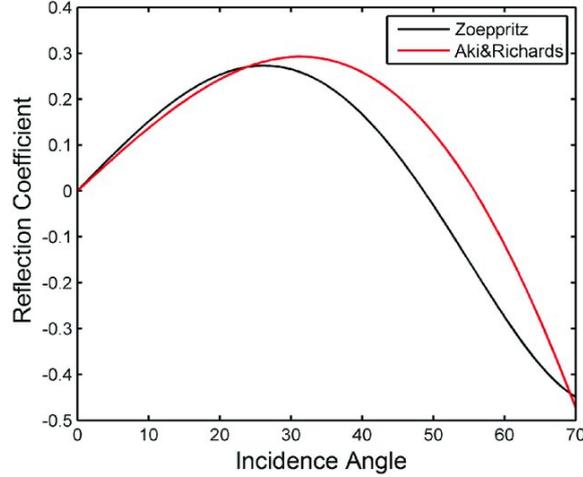


Figura 5 – Coeficientes de reflexão estimados por ZOEPPRITZ e AKI; RICHARDS. Fonte: Lu *et al.* (2018)

onde:

$$a_{\alpha}(\theta) = \frac{1}{2}(1 + \tan^2(\theta)), \quad (3.5)$$

$$a_{\beta}(\theta) = -4\frac{\beta^2}{\alpha^2}\sin^2(\theta), \quad (3.6)$$

$$a_{\rho}(\theta) = \frac{1}{2}\left(1 - 4\frac{\beta^2}{\alpha^2}\sin^2(\theta)\right), \quad (3.7)$$

Sendo  $\bar{\alpha}$ ,  $\bar{\beta}$  e  $\bar{\rho}$  as médias sobre as interfaces reflexoras;  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\theta$  os respectivos contrastes e  $\theta$  o ângulo de reflexão. No entanto, a equação foi estendida por Stolt & Weglein, 1985, em função dos logaritmos das propriedades:

$$Rf_{pp}(t, \theta) = a_{\alpha}(t, \theta) \frac{\partial}{\partial t} \ln_{\alpha}(t) + a_{\beta}(t, \theta) \frac{\partial}{\partial t} \ln_{\beta}(t) + a_{\rho}(t, \theta) \frac{\partial}{\partial t} \ln_{\rho}(t), \quad (3.8)$$

onde  $a_{\alpha}(t, \theta)$ ,  $a_{\beta}(t, \theta)$  e  $a_{\rho}(t, \theta)$  são generalizações dos coeficientes da expressão 3.5, 3.6 e 3.7 no qual as propriedades dependem do tempo de trânsito e ângulo de incidência.

### Incidência normal - Cenário acústico

Para o cenário com ângulos de incidência iguais a zero, que é o caso deste trabalho, a refletividade é controlada pelo contraste de impedância acústica, representado por:

$$Rf(i)_{pp} = \frac{Ip(i+1) - Ip(i)}{Ip(i+1) + Ip(i)}, \quad (3.9)$$

no qual a impedância acústica, propriedade que representa a resistência do meio a onda, é o produto da velocidade compressional com a densidade  $Ip = V_p \rho$ . A equação 3.9 pode ser aproximada por Aki e Richards (1980):

$$Rf_{pp}(t, 0^\circ) = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \ln(Ip) \quad (3.10)$$

Logo, neste cenário, o problema direto pode ser reescrito em função somente da impedância acústica e do pulso sísmico, tornando a modelagem direta mais simples.

### 3.1.1.1 Discretização

Discretização é o processo que transforma funções, equações e variáveis contínuas em contrapartes discretas. O objetivo é dividir o problema contínuo em partes menores e mais simples, convertendo-o em um problema mais simples de ser resolvido numericamente. Os problemas geofísicos, quando transcritos computacionalmente, tomam a forma discreta. Os modelos diretos e indiretos são discretos, representados na forma matricial.

Para obter a reflexão do cenário acústico, a derivada da Equação 3.9 pode ser obtida através de um operador diferencial  $D$  responsável por calcular a derivada de um vetor através do produto matricial  $D.\vec{v}$ .

$$Ref(t) = \frac{1}{2} [D.ln(Ip)]_{1 \times M}^T, \quad (3.11)$$

sendo  $M$  a quantidade de parâmetros. A convolução discreta por ser realizada a partir da multiplicação de uma matriz  $S$  (operador) por um vetor:

$$S(\theta) = \begin{bmatrix} S_0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ S_2 & S_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ s_3 & s_2 & S_1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & S_{n-1} \end{bmatrix}_{M \times M} .Ref(t) \quad (3.12)$$

Sendo assim, o modelo direto discreto é obtido por:

$$d_{calc} = G.m = \frac{1}{2} .S.D.ln(Ip), \quad (3.13)$$

### 3.1.2 Problema Inverso

Como o problema direto envolve modelar traço sísmico a partir da impedância acústica, o problema inverso visa, como o nome sugere, obter a impedância a partir do traço sísmico. Este processo é feito utilizando a inversa do operador de modelagem da Equação 3.2, representado por  $G^+$ . Sendo que o significado geofísico do inverso do operador de modelagem é a deconvolução que resulta no perfil de refletividade. Dentro da modelagem inversa já está contido a lógica que integra a refletividade para obter a impedância.

Porém, existem desafios na inversão de  $G$ , pois a matriz deve cumprir alguns requisitos para ser invertíveis (ASTER R. C; BORCHERS, 2004), como:

- A matriz deve ser quadrada: A inversão de matrizes só é possível em matrizes quadradas, ou seja, aquelas em que o número de linhas é igual ao número de colunas. Se a matriz não for quadrada, não é possível encontrar sua inversa.

- A matriz deve ser não-singular: Uma matriz é não-singular quando seu determinante é diferente de zero. Se o determinante da matriz for zero, isso indica que ela é singular e não possui inversa.

Como muitos problemas geofísicos são sobredeterminados ou subdeterminados, existem manobras algébricas para tornar  $G$  inversível, mesmo quando  $G$  não é quadrada, como nos cenários abaixo:

$$G^+ = \begin{cases} (G^T G)^{-1} G^T, & \text{se } N > M(\text{sobredeterminado}) \\ G^{-1}, & \text{se } N = M(\text{determinado}) \\ G^T (G G^T)^{-1}, & \text{se } N < M(\text{subdeterminado}) \end{cases} \quad (3.14)$$

Sendo  $N$  a quantidade de amostras e  $M$  a quantidade de parâmetros.

### Problema linear *versus* não linear

A inversão geofísica linear é utilizada ao assumir uma relação linear entre os dados observados e os parâmetros de interesse, ou seja, a equação 3.1. Ela é frequentemente aplicada quando as perturbações das propriedades subsuperficiais são pequenas e os dados são relativamente bem comportados. Nesse caso, a inversão linear pode fornecer soluções rápidas e eficientes. No entanto, a abordagem linear tem limitações quando as perturbações são significativas ou quando ocorrem fenômenos complexos na subsuperfície (??)Aster2004).

Por outro lado, a inversão geofísica não linear lida com problemas mais complexos, nos quais as relações entre as observações geofísicas e os parâmetros de subsuperfície são não lineares, ou seja, equação  $d_{calc} = G(m).m$ . Em outras palavras, o modelo muda em função dos parâmetros, ou seja, a presença de  $G(m)$ . Essa abordagem é capaz de lidar com perturbações maiores e fenômenos não lineares, como interfaces irregulares, heterogeneidades complexas e efeitos de acoplamento entre diferentes propriedades, como no caso da inversão elástica que utiliza  $V_p$ ,  $V_s$  e  $Rho$ . A inversão não linear é computacionalmente mais cara quando comparada com a linear, pois geralmente requer algoritmos iterativos. Em resumo, a diferença fundamental entre a inversão geofísica linear e não linear está na natureza das relações assumidas entre as observações geofísicas e os parâmetros de interesse.

### Problema bem posto e mal posto

Considerando que o problema com as dimensões da matriz e sua não singularidade sejam superados, com todas as suas colunas linearmente independentes e determinante diferente de zero, a matriz  $G$  torna-se inversível. Porém, a solução do problema matemático nem sempre coincide com a solução do problema geofísico. No contexto de inversão, não

basta que  $G^+$  exista, mas  $G$  também precisa ser bem posta, o que inclui 3 requisitos (HADAMARD, 1902) (TIKHONOV; ARSENIN, 1977):

- Existência: a inversa deve existir, ou seja, com determinante diferente de zero;
- Unicidade: a matriz deve conter soluções únicas, ou seja, um modelo  $m_1$  gera um dado calculado  $d_1$ , enquanto que um diferente modelo  $m_2$  gera  $d_2$ , sendo  $d_1$  diferente de  $d_2$ ;
- Estabilidade: pouco sensível a ruídos, ou seja, pequenas perturbações nos dados devem resultar em pequenas perturbações nas soluções.

Se  $G^+$  não cumprir os requisitos, o problema inverso é mal posto, como em quase todo problema geofísico, a inversa pode sofrer instabilidade numérica. Matrizes mal postas tendem a ter valores singulares muito pequenos ou próximos de zero, o que pode levar a erros numéricos e instabilidade computacional no processo de inversão, resultando em valores calculados não realista.

A Figura 6 ilustra exemplos de bem posto e mal posto. Se for assumido que a solução de um sistema matemático é a interseção de duas funções  $f(x)$  e  $g(x)$ , então a Figura 6.a é um exemplo de mal posto, pois existem diversos pontos de interseção entre as funções, ou seja, não respeita o primeiro critério de unicidade. Por outro lado, a Figura 6.b possui apenas uma interseção e cumpri o primeiro critério de unicidade. Os critérios de robustez são avaliados medindo a instabilidade do sistema.

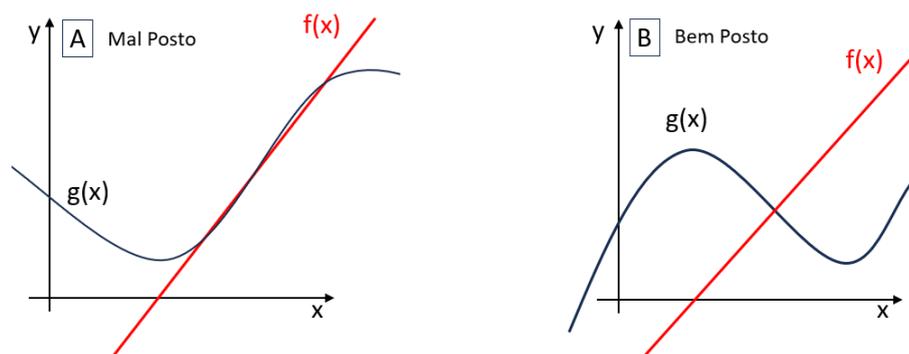


Figura 6 – Exemplo de problema bem posto e mal posto utilizando funções analíticas.

A instabilidade pode ser medida através do número de condição de uma matriz, que é uma medida que indica a sensibilidade da solução de um sistema linear em relação a pequenas perturbações nos dados de entrada. Em outras palavras, o número de condição mede o quão instável é o sistema em termos de ruído e incertezas da aquisição. Quanto maior o número de condição, maior é a sensibilidade do sistema.

### 3.1.3 Regularização

A regularização tem como papel tornar um problema mal posto em bem posto e adicionar informações *a priori*, tornando-se um aspecto fundamental na inversão sísmica. Entre os variados exemplos de regularização estão a norma  $L1$  (norma do valor absoluto), a norma  $L2$  (norma euclidiana) e a decomposição SVD (*Singular Value Decomposition*).

#### Regularização por Norma 1 e Norma 2

A regularização com norma  $L1$  ou  $L2$  minimiza um operador  $\Phi$  que possui uma componente de resíduo e uma referente aos parâmetros:

$$\Phi = \Phi_d + \lambda\Phi_m = \|Gm - d\|_L + \lambda\|m - m_{ref}\|_L, \quad (3.15)$$

onde  $L$  é a norma escolhida, podendo ser 1 ou 2,  $\Phi_d$  é a norma do resíduo e  $\Phi_m$  é a norma dos parâmetros, que é penalizada pelo fator de regularização  $\lambda$ . A regularização com norma  $L2$  no modelo de parâmetros penaliza variações abruptas e favorece soluções suavizadas, impondo continuidade. Já a norma  $L1$  no modelo de parâmetros favorece soluções esparsas. No resíduo, a norma  $L1$  é mais robusta que a norma  $L2$ , pois é pouco influenciada por pontos espúrios. Para aplicar a norma  $L2$  no resíduo, é assumida uma distribuição normal do resíduo, enquanto que para a norma  $L1$ , é assumida uma distribuição de Cauchy.

A norma  $L1$  é útil quando se espera que o modelo seja composto por um pequeno número de elementos significativos, como em casos de interfaces bem definidas entre camadas. Enquanto a norma  $L2$  é apropriada quando se espera que o modelo seja mais contínuo, sem mudanças abruptas. A norma  $L2$  é frequentemente usada como termo de regularização na inversão sísmica acústica, pois proporciona resultados com continuidade lateral. A escolha entre a regularização com norma  $L1$  ou  $L2$  depende das características do problema, das informações prévias disponíveis e das suposições sobre a natureza do modelo subsuperficial.

#### Decomposição SVD

A decomposição de valores singulares (SVD) é uma forma de fatoração de uma matriz em três componentes: uma matriz unitária a esquerda, uma matriz diagonal contendo os valores singulares e uma matriz unitária a direita. Os valores singulares são equivalentes aos autovalores da matriz hermitiana, e a SVD fornece informações sobre as propriedades e estrutura da matriz:

$$G = USV^T, \quad (3.16)$$

no qual  $U$  é uma matriz unitária  $m \times m$ ,  $S$  é uma matriz diagonal  $m \times n$  com valores singulares não negativos na diagonal principal e  $V^T$  é a matriz conjugada transposta (ou adjunta)  $n \times n$  da matriz unitária  $V$ .

A decomposição SVD tem diversas aplicações, por exemplo em processamento de imagens, análise de dados, reconhecimento de padrões e aprendizado de máquina.

Dentro do contexto de inversão sísmica, a decomposição SVD é utilizada para a construção pseudo-inversa de Moore-Penrose:

$$G^* = V_p S_p^{-1} U_p^T, \quad (3.17)$$

no qual  $G^*$  é a pseudoinversa,  $V_p$  é a matriz  $V$  truncada em  $p$ ,  $S_p^{-1}$  é a inversa da matriz diagonal  $S$  truncada em  $p$  e  $U_p^T$  é a transposta da matriz  $U$  truncada em  $p$ , sendo  $p$  o posto da matriz, o que reduzi a dimensão do problema através do truncamento e torna a solução computacionalmente viável (PENROSE, 1955; MOORE, 1920).

## 3.2 Inversão Determinística Bayesiana

Este trabalho utiliza o algoritmo CRAVA da SharpeReflections, chamado pela empresa de Inversão Determinística Bayesiana. Esta inversão é fundamentada na inversão AVO linearizada bayesiana de Buland e Omre (2003). Esta abordagem utiliza a solução de Estimativa Máxima a Posterior (MAP) e, por ser uma única solução, é reconhecida como determinística.

No contexto de estatística, a solução de um problema inverso não se limita a um único conjunto de parâmetros previstos, mas é representada por uma função de densidade de probabilidade (PDF) no espaço do modelo. Por isso, a distribuição posterior pode ser encontrada por meio de técnicas de simulação estocástica, mas soluções analíticas, como a de Buland e Omre (2003) e Gouveia e Scales (1998), são computacionalmente menos custosas em comparação a soluções baseadas em busca iterativa.

Gouveia e Scales (1998) definiram um modelo bayesiano não linear e otimizaram a distribuição a posterior por meio de um procedimento não linear de gradiente conjugado para encontrar o modelo de máxima a posteriori. De fato a abordagem foi muito mais rápida do que usar a simulação Monte Carlo, mas como o problema é complexo e fortemente não linear, o método ainda teve um alto custo computacional para a época, pois em 1998 os computadores não tinham a capacidade de processamento atual. Então, Buland e Omre (2003) desenvolveram um método de inversão AVO linearizada. A abordagem utiliza uma linearização da equação de ZOEPPRITZ para o coeficiente de reflexão com contrastes suaves. O método utiliza *angle stacks* parciais para obter a velocidade da onda compressional ( $V_p$ ), velocidade da onda cisalhante ( $V_s$ ) e densidade (RHO), entretanto, como discutido anteriormente, somente a informação acústica já é suficiente para distinguir a litologia salina.

### 3.2.1 Teorema de Bayes

O Teorema de Bayes é um princípio estatístico que descreve a probabilidade de ocorrência de um evento com base em conhecimento prévio sobre as condições que levam

à sua geração (BAYES, 1763):

$$P(m|d_{obs}) = \frac{P(d_{obs}|m) \cdot P(m)}{P(d_{obs})}, \quad (3.18)$$

no qual:

- $P(m|d_{obs})$  é a função de probabilidade a posteriori;
- $P(d_{obs}|m)$  é a função de verossimilhança, ou seja, contém a probabilidade dos dados observados ocorrerem dado o modelo a *priori*;
- $P(m)$  é a probabilidade do dado a *priori* ser verdadeiro;
- $P(d_{obs})$  é a evidência, ou seja, contém a probabilidade dos dados observados.

No entanto,  $p(d)$  pode ser descrito como:

$$P(d_{obs}) = \int p(d_{obs}|m)p(m)dm \quad (3.19)$$

Logo:

$$P(m|d_{obs}) = \frac{P(d_{obs}|m) \cdot P(m)}{\int p(d_{obs}|m)p(m)dm}, \quad (3.20)$$

Porém,  $P(m|d_{obs})$  descreve todas os cenários, de baixa e alta probabilidade, no entanto, o algoritmo utiliza apenas o cenário MAP, descrito em na seção 3.2.3.

### 3.2.2 Solução Geral

A solução proposta por Buland e Omre (2003) assume que o erro do dado observado tem uma distribuição normal gaussiana descrita por:

$$e \sim N_n(0, \sum_e), \quad (3.21)$$

e independe do modelo a *priori*. Os dados observados são:

$$d_{obs} \sim N_n(u_{dobs}, \sum_{dobs}), \quad (3.22)$$

onde:

$$d_{obs} = S \cdot A \cdot U'_m \quad (3.23)$$

$$\sum_{obs} = S \cdot A \cdot \sum''_m \cdot A^T \cdot S^T + \sum_e \quad (3.24)$$

no qual S e A são descritos na seção 3.1.1, e  $U'_m$  é a derivada do logaritmo das propriedades estimadas, como na equação 3.11. Com:

$$\sum_m = Cov\{m(t), m(s)\}, \quad (3.25)$$

$$\sum'_m = Cov\{m'(t), m(s)\}, \quad (3.26)$$

$$\sum''_m = Cov\{m'(t), m'(s)\}, \quad (3.27)$$

no qual  $m$  é o dado a *priori* no poço. Ou seja,  $\sum^*_m$  são as matrizes de covariâncias dos dados.

### 3.2.2.1 Modelo a posteriori

A distribuição a posterior é dada por:

$$m|d_{obs} \sim N_n(U_{m|d_{obs}}, \sum_{d_{obs}}), \quad (3.28)$$

onde a expectativa a posterior e sua covariância são:

$$u_{m|d_{obs}} = u_m + (S.A. \sum'_m)^T \sum_{d_{obs}}^{-1} (d_{obs} - u_{d_{obs}}) \quad (3.29)$$

$$\sum_{m|d_{obs}} = \sum_m - (S.A. \sum'_m)^T \sum_{d_{obs}}^{-1} S.A. \sum'_m \quad (3.30)$$

A distribuição posterior, encontrada de forma analítica explícita, contém a solução completa do problema inverso, incluindo a incerteza.

### 3.2.3 Maximum a Posteriori Estimation - MAP

Como  $m$  representa o logaritmo dos parâmetros, então a impedância acústica é obtida pela transformação inversa  $\exp[m(i)]$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Logo a solução de Estimativa Máxima a *Posteriori* (MAP) para os parâmetros  $\exp[m]$  pode ser determinada componente por componente por:

$$MAP\{\exp[m]\} = \exp[u_{m|d_{obs}} - \sigma_{m|d_{obs}}^2], \quad (3.31)$$

enquanto a expectativa posteriori é :

$$E\{\exp[m]\} = \exp[u_{m|d_{obs}} + \frac{\sigma_{m|d_{obs}}^2}{2}], \quad (3.32)$$

no qual  $m$  é uma componente de  $m$ ,  $u_{m|d_{obs}}$  é a expectativa posterior para  $m$  e  $\sigma_{m|d_{obs}}^2$  é a variância posterior. Tipicamente,  $\sigma_{m|d_{obs}}^2$  é maior que  $u_{m|d_{obs}}$ , de forma que a distribuição log-gaussiana seja aproximadamente simétrica e  $\exp[\mu m|d_{obs}]$  seja uma boa aproximação tanto para  $MAP\{\exp[m]\}$  quanto para  $E\{\exp[m]\}$ .

A solução do Estimador de Máxima à Posteriori (MAP) é geralmente caracterizada por uma maior suavidade em comparação a uma componente específica  $m(i)$ . À medida que o nível de ruído na expressão 3.21 aumenta, a distribuição posteriori converge para a distribuição *priori*. Em cenários com altos níveis de ruído, a solução MAP é predominantemente determinada pelo máximo da distribuição *priori*. Em contrapartida, quando o ruído se aproxima de zero, a solução é amplamente influenciada pelos dados sísmicos, diminuindo a relevância do modelo *priori*.

### 3.3 Aplicações da Inversão Sísmica

A impedância, derivada da técnica de inversão sísmica, oferece uma série de vantagens significativas para o estudo de formações geológicas. A principal vantagem é a transformação dos dados de propriedades de interface em dados de propriedades de camada. Essa transformação possibilita uma análise mais detalhada das variações litológicas dentro das camadas, resultando em um ganho de resolução. Além disso, a impedância é o ingrediente essencial para a geomodelagem.

O potencial da inversão sísmica é tão grande que, mesmo antes de estimar propriedades ou classificar fácies, a simples informação de resistência do meio a onda compressional já trás detalhes sobre a geologia local. Um exemplo está no trabalho de [Leaubon \*et al.\* \(2023\)](#), no qual a inversão colorida, integrada com atributos e dados petrofísicos de poços, revelou variações de impedância acústica no interior das soleiras do Parque de Gaviões, localizado na Bacia do Parnaíba. Essas variações de impedância foram atribuídas a diferenças mineralógicas e químicas nas intrusões, demonstrando como a análise da impedância pode fornecer informações valiosas sobre a composição e a distribuição dos corpos geológicos em uma área específica.

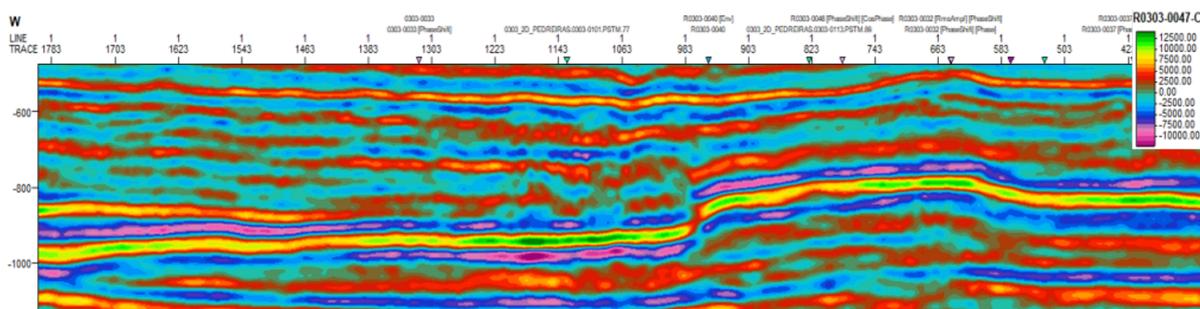


Figura 7 – Inversão acústica colorida aplicada na sísmica R0303-0047 aplicada com informações do dado de impedância acústica do poço 4-OGX-49-MA. Fonte: [Leaubon \*et al.\* \(2023\)](#)

Como abordado anteriormente no Capítulo 2.3.2, os evaporitos podem ser categorizados em diferentes tipos, como sais de baixa velocidade, halita e anidrita. Ao examinar os dados de impedância em evaporitos, é possível identificar padrões distintos associados a cada tipo de sal. Essa abordagem pode ajudar na caracterização inicial das camadas de evaporitos, fornecendo um contexto importante para a análise posterior das fácies e processos deposicionais relacionados.

A impedância acústica está diretamente relacionada às velocidades compressional e cisalhante, densidade, Módulo de Young e Razão de Poisson, Figura 8. Essas relações fornecem informações valiosas que não seriam possíveis de ser obtidas fora do poço. Por exemplo, em reservatórios, a impedância acústica é comumente utilizada para estimar volumes de porosidade e permeabilidade ([SIMM; BACON, 2014](#)), propriedades úteis para a geomodelagem. Além disso, a impedância, tanto sozinha quanto em conjunto com os

parâmetros petrofísicos estimados, é utilizada para a classificação de fácies (PIVOT; PERNIA, 2015).

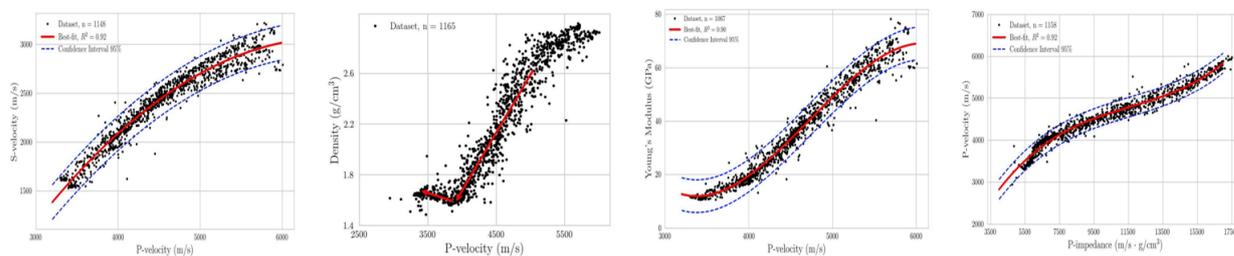


Figura 8 – Crossplot de A)  $V_s$  vs  $V_p$ , B) Densidade vs  $V_p$ , C) Módulo de Young vs  $V_p$  e D)  $V_p$  vs  $I_p$ ; com curvas de regressão. Fonte: Teixeira e Lupinacci (2019)

No entanto, é essencial uma análise dos dados de poços para verificar as relações entre impedância acústica, fácies e propriedades petrofísicas, pois elas podem variar de acordo com a área de estudo. Em algumas cenários, como por exemplo em carbonatos, a impedância  $P$  não é suficiente para distinguir fácies, sendo necessário remover a ambiguidade através da inversão elástica que resulta na impedância  $S$  (fruto da velocidade cisalhante  $V_s$ ), visto que diferentes classes e parâmetros petrofísicos podem apresentar a mesma assinatura de impedância  $P$ . Sendo assim, a realização do Teste de Viabilidade deve preceder a etapa de classificação, o que envolve a utilização de *crossplots* e histogramas dos perfis, bem como a interpretação, para separar as classes de acordo com a assinatura nos perfis. No caso da Classificação Bayesiana, por exemplo, são criadas matrizes de verossimilhança utilizando os dados de poço, e então uma classificação é inicialmente realizada no poço. Após a realização do Teste de Viabilidade, as curvas que foram ajustadas para estimativa de propriedades e as matrizes de verossimilhança utilizadas para classificação de fácies são aplicadas para todo o cubo de impedância. Esse processo permite obter uma visão mais completa das características do reservatório e torna possível inferir informações sobre as propriedades em locais onde não há dados de poços disponíveis.

No caso de evaporitos, Teixeira e Lupinacci (2019) caracterizaram as estruturas internas dos corpos de sal na Bacia de Santos utilizando dados de poços e sísmicos 3D e estabeleceram equações empíricas para predição de propriedades. Os autores demonstraram que é possível estimar as propriedades elásticas a partir da velocidade de compressão. Uma inversão sísmica foi realizada para gerar a distribuição espacial da impedância acústica e as equações empíricas foram aplicadas para gerar volumes de velocidades de compressão e cisalhamento, densidade, módulo de Young e coeficiente de Poisson. Em seguida, um poço "cego" validou a abordagem. Sendo assim, no caso dos evaporitos, é possível poupar os recursos de uma inversão elástica e realizar uma inversão acústica e calcular as demais propriedades através do volume de impedância  $P$ .

Um exemplo do potencial da inversão sísmica foi demonstrado por Fernandes e Lupinacci (2022), os autores propuseram uma abordagem para os carbonatos do pré-sal

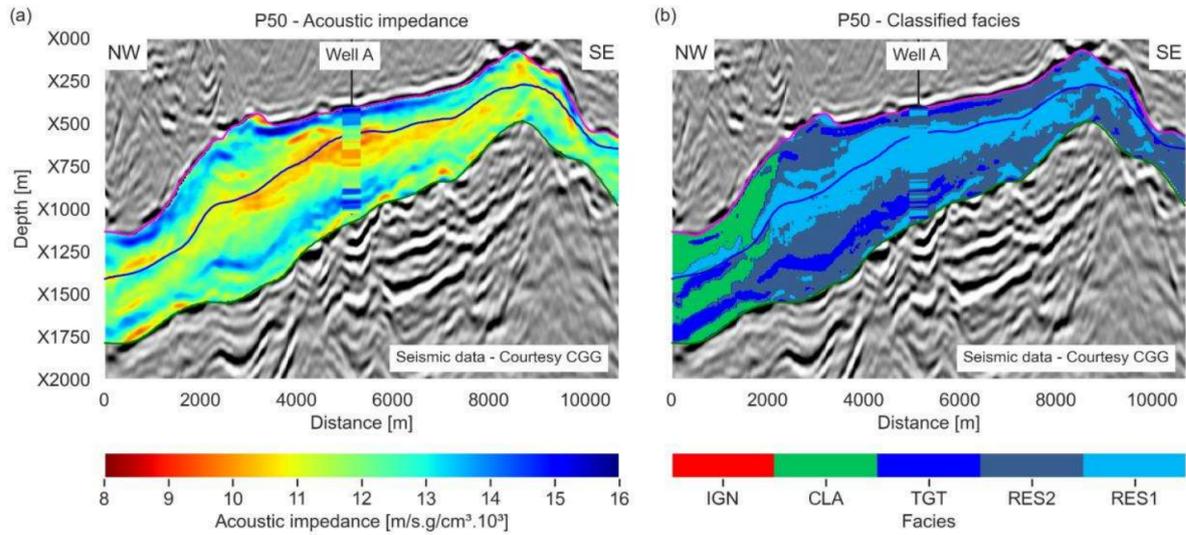


Figura 9 – Caracterização dos bancos de coquinas. (a) P50 da Impedância Acústica (b) Fácies classificadas a partir do P50. As linhas verde, azul e magenta representam as discordâncias Pré-Jiquitá, Pré-Alagoas e Base do Sal respectivamente. Fonte: [Fernandes e Lupinacci \(2022\)](#).

da Bacia de Santos. A metodologia utilizou inversão sísmica estocástica e classificação Bayesiana, considerando percentis de impedância acústica. Além disso, foram incorporados conhecimentos geológicos na determinação das probabilidades de ocorrência das fácies para identificação da distribuição de fácies em um banco de coquinas e na extensão de uma intrusão ígnea.

## 4 Dados e Materiais

Neste trabalho foram utilizados um cubo sísmico 3D migrado full azimuth comparado com 4 volumes processados com seções azimutais. Além disso, foram utilizados 3 poços, sendo um como poço cego para controle de qualidade.

### 4.1 Sísmica OBN de Bacalhau

A aquisição sísmica nodal foi completada em 2021 pela CGG. A área de aquisição com fontes abrange 1.304 km<sup>2</sup> e a área coberta por nodes equivale a 410 km<sup>2</sup> e possui aproximadamente 2.600 nodes. A razão da escolha de nodes em vez de streamers foram devido a geologia de Bacalhau, o que inclui uma complexa geometria salina.

A Figura 11 ilustra o fluxo de processamento. Os volumes sísmicos utilizados são *Full Track Post Stack* processados utilizados onda P e campo de onda descendente (Down) com filtros de Eliminação de Múltiplas Relacionadas à Superfície (SRME) e Atenuação Múltipla Interna (IMA). Uma abordagem *top-down* foi aplicada pela CGG para a construção do modelo de velocidade, incluindo atualizações de *Time-Lag Full Wave Inversion* (TL-FWI) para cada zona (pós-sal, sal e pré-sal) e uma tomografia anisotrópica.



Figura 10 – Fluxo de processamento do Full Track. Fonte: Santos *et al.* (2022)

Também foram realizadas uma Migração Reversa no Tempo (RTM) de 45 Hz e uma Migração Pre-Stack em Profundidade (PSDM) de Kirchhoff, além disso, foi utilizado um volume com de Migração Reversa no Tempo com Mínimos Quadrados (LSRTM), um tipo de migração reversa no tempo que busca a minimização do resíduo entre o dado sísmico e modelo sintético sem perder o sentido geológico das refletividades (SANTOS *et al.*, 2022). Os novos dados sísmicos abrangem toda a área do campo e fornecem um aumento significativo quando comparado com os dados sísmicos históricos, que sofrem de problemas de imagem no reservatório devido à espessura variável do sal de Bacalhau (HANSEN *et al.*, 2021).

Os produtos azimutais foram divididos em 4 seções, com ângulos de 0° à 180°, Tabela 2. Como todos são Full Stack, estes possuem os mesmos ângulos de incidência, sendo a média 12° graus.

Tabela 1 – Propriedades dos cubos sísmicos

Volume	Ângulo médio de reflexão	Azimuth Inicial	Azimuth Final
Full Azimuth	12°	0°	180°
Azimuth Seção 01	12°	0°	45°
Azimuth Seção 02	12°	45°	90°
Azimuth Seção 03	12°	90°	135°
Azimuth Seção 04	12°	135°	180°

#### 4.1.1 Vantagens dos OBN sobre streamer

A utilização da sísmica com geofones no fundo oceânico, conhecida pelo termo em inglês OBN, de Ocean Bottom Nodes, tem crescido bastante na última década para aquisição sísmica *offshore*. Isso se dá tanto pelas vantagens técnicas, quanto pela redução do alto custo de aquisição que essa tecnologia tem experimentado.

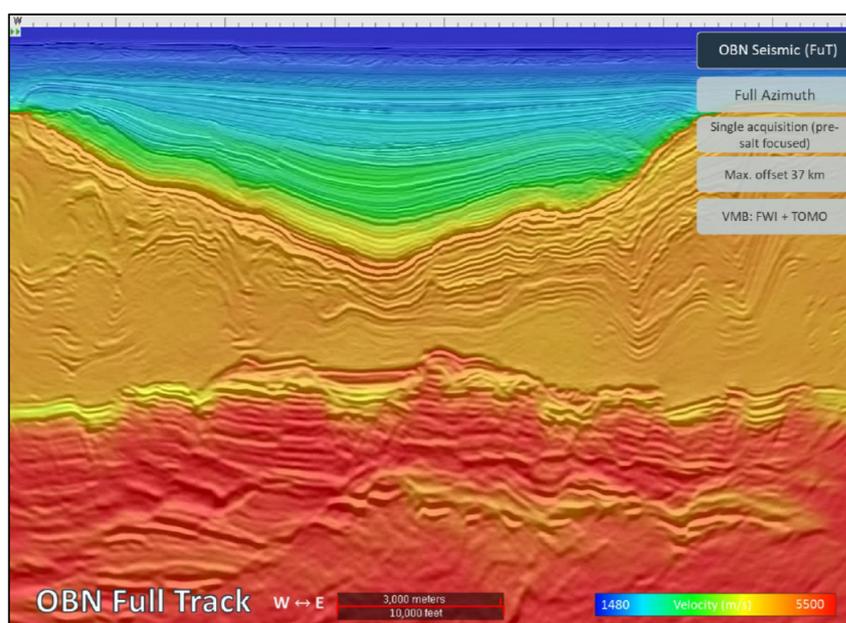


Figura 11 – Modelo de Velocidade do OBN de Bacalhau gerado por FWI. Fonte: Santos *et al.* (2022)

A aquisição OBN possui cobertura de azimute completa, *offsets* longos e alta relação de sinal-ruído, permitindo que algoritmos de Full Wave Inversion (FWI) operem de forma mais eficiente para atualizar o modelo de velocidade (por exemplo, Cypriano *et al.*, 2019). Em bacias salinas, onde o forte contraste lateral de velocidade entre os diápiros de sal e os sedimentos siliciclásticos provocam severos problemas de iluminação, e essa metodologia é capaz de melhor imagear as porções pré-salinas. Dados de *streamer* geralmente possuem azimute estreito, além disso, a utilização de longos *offsets* é desafiador devido a complicações no gerenciamento dos cabos dos steamers. Isto torna a iluminação

limitada, o que acarreta em falhas ao fornecer resultados adequados para construção de modelos de velocidade.

Como na aquisição com OBN não é necessário rebocar streamers, é a aplicação mais viável em campos em desenvolvimento, pois a presença de plataformas e navios auxiliares não afetam o posicionamento dos receptores.

#### 4.1.2 Least-Squares Reverse Time Migration (LSRTM)

A migração de tempo reverso (RTM) é a tecnologia de imagem mais usada para estruturas complexas (LIU *et al.*, 2019). O método é baseado na equação completa da onda e faz uso do tempo duplo de trânsito. Quando comparado com a migração Kirchhof, as imagens geradas tendem a lidar melhor com presenças de fortes contrastes de velocidade, verticalmente e horizontalmente, ou em regiões com características geológicas complexas, como a de Bacalhau. Porém, ainda assim, a RTM não representa com perfeição a refletividade real da subsuperfície, devido à aproximação dos efeitos inversos da propagação da onda. Sendo assim, as imagens RTM geralmente sofrem com artefatos de migração, amplitudes irregulares e resolução limitada, especialmente para áreas com estruturas complexas onde a incerteza de velocidade é grande. Sendo assim, a migração de mínimos quadrados (LSM) se apresenta como uma abordagem para superar essas limitações a partir da derivação de uma estimativa mais precisa do inverso do operador de modelagem direta (LIU *et al.*, 2019).

## 4.2 Poços em Bacalhau

A descoberta do Campo de Bacalhau (anteriormente Carcará) foi feita pelo poço BR-4-BRSA-971B-SPS no bloco BM-S-8, perfurado em 2012 pela Petrobras. A operação do BM-S-8 foi transferida para a Equinor em 2016, juntamente com a aquisição da licença Bacalhau Norte (anteriormente Norte de Carcará) em 2017 por um consórcio formado pela Equinor, ExxonMobil e Petrogal durante a 2<sup>a</sup> Rodada de Licitação do Pré-Sal. Antes da transferência da operação para a Equinor em 2016, a Petrobras havia perfurado mais dois poços de exploração (BR-3-BRSA-1216DA-SPS e BR-3-BRSA-1290-SPS) na área do BM-S-8, e realizado dois testes de coluna de perfuração (DSTs), confirmando a produtividade das zonas de reservatório BVE100 e BVE200. Dois poços adicionais foram perfurados pela Equinor em 2018/2019 em Bacalhau Norte: BR-3-EQNR-1-SPS e BR-3-EQNR-3-SPS, que confirmaram a extensão norte do campo a partir da área do BM-S-8 para Bacalhau Norte (HANSEN *et al.*, 2021). A partir de 2023, a Equinor começou uma nova campanha de perfuração com 2 poços perfurados até o momento de conclusão deste trabalho.

A inversão utilizou 3 poços nomeados A, B e C, ilustrados na Figura 12, porém um total de 5 poços foram utilizados na etapa de pré condicionamento para reforçar o

treinamento do algoritmo preditor de perfis baseado em aprendizagem de máquina.

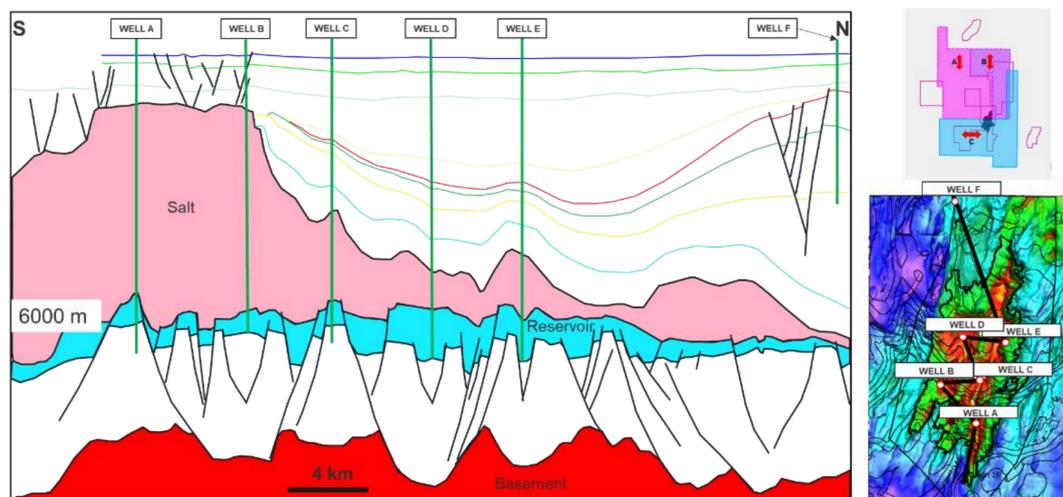


Figura 12 – Seção geológica ao longo do Campo de Bacalhau. Fonte: Santos *et al.* (2022)

## 5 Metodologia

A metodologia utilizada, como ilustrado na Figura 13, envolveu uma etapa de controle de qualidade de perfis de poço, predição de perfis de velocidade compressional ( $V_p$ ) e densidade ( $RHO$ ) para profundidades com ausência desses dados, um teste de viabilidade que consiste em uma classificação automática das fácies e um estudo das diferentes respostas acústicas. Em seguida, um fluxo de amarração poço sísmica que envolveu um estudo das *wavelets* e das frequências nos evaporitos, a construção do modelo de baixa frequência utilizando krigagem e, por fim, a inversão acústica determinística bayesiana com foco na impedância acústica gerada com os cubos sísmicos *full azimuth* comparado com 4 produtos azimutais. Foram utilizados 2 poços para construção do modelo de baixa e um poço cego.

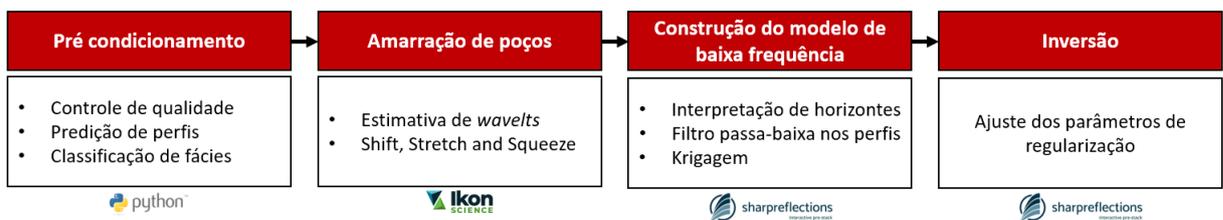


Figura 13 – Fluxo de trabalho para inversão sísmica.

### 5.1 Pré-condicionamento dos dados

O presente estudo empregou dados de perfis de poços obtidos da base de dados da Equinor, previamente corrigidos e com controle de qualidade. O pré condicionamento dos dados foi realizado apenas com o objetivo de verificar se a distribuição original dos dados poderia apresentar algum efeito adverso na fase de inversão. O perfil de raios *gamma*, o qual possui uma taxa de amostragem mais alta que os demais, foi reamostrado para igualar a taxa de amostragem dos perfis de velocidade de onda compressional ( $V_p$ ), velocidade de onda cisalhante ( $V_s$ ) e densidade ( $Rho$ ).

Observou-se a presença de valores de raios *gamma* superiores a 200 API. Embora exista uma correlação geológica com essa escala de API, optou-se por realizar um procedimento de corte (*cutoff*), a fim de evitar possíveis impactos nos algoritmos utilizados, visto que esses valores distanciam muito da média.

#### 5.1.1 Predição de perfis de poços com aprendizagem de máquina

Os três poços deste estudo apresentam lacunas de dados de velocidade de onda compressional ( $V_p$ ) ou densidade ( $Rho$ ) em certas seções localizadas no intervalo do sal.

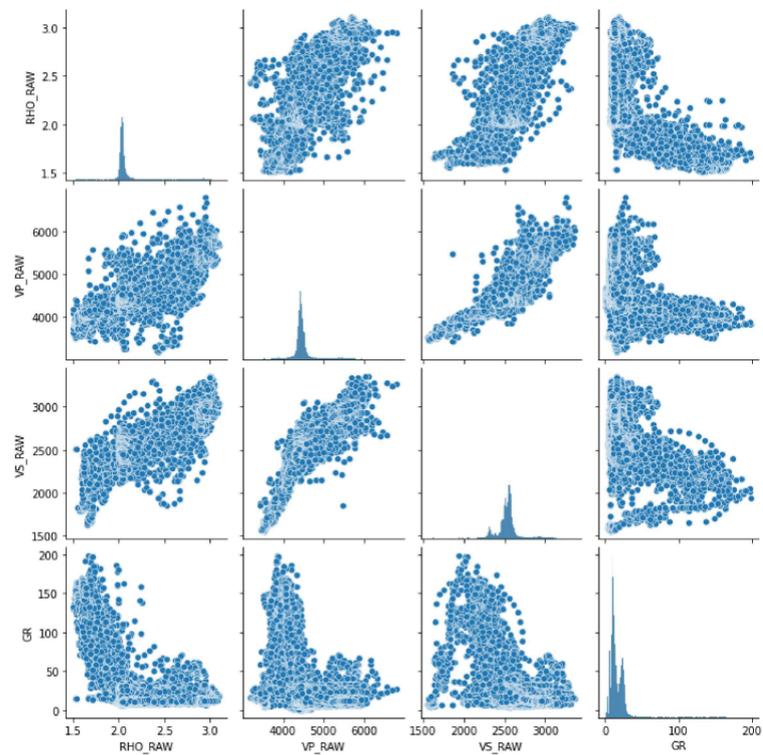


Figura 14 – Distribuições dos perfis de poços.

Em algumas profundidades ocorre a ausência de dados de Rho, enquanto em outras há falta de ambos os parâmetros Vp e Rho. Por isso, foram avaliados seis algoritmos distintos de previsão de variáveis em três modelos diferentes:

- Predizer RHO em função de Vp e Gr
- Predizer RHO em função somente de GR
- Predizer Vp em função de GR.

Embora a relação entre GR e os perfis Vp e RHO não seja clara (Figura 14), o GR é um perfil presente em todo o intervalo. Então ele foi utilizado para a regressão. Além disso, foram utilizados dois outros poços, pois cruzam um intervalo estratificado com perfilagem útil para o treinamento do modelo.

### Treinamento e teste

O treinamento foi realizado com 70% do data set disponível e os outros 30% foram utilizados para testes de avaliação de desempenho. Os indicadores para a avaliação dos diferentes algoritmos foram o *Root Mean Square Error* (RMSE) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

O RMSE é uma medida de dispersão dos erros entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo. Ele calcula a raiz quadrada da média dos erros ao quadrado,

fornecendo uma estimativa da diferença média entre os valores reais e os valores previstos. Quanto menor o valor do RMSE, melhor o ajuste do modelo aos dados. O RMSE é expresso na mesma unidade da variável dependente. Por outro lado, o R-quadrado ( $R^2$ ) é uma medida que indica a proporção da variabilidade total dos dados que é explicada pelo modelo. Ele varia de 0 a 1, sendo que um valor próximo de 1 indica um bom ajuste do modelo aos dados. O  $R^2$  mede a proporção da variância da variável dependente que pode ser explicada pelas variáveis independentes incluídas no modelo.

O  $R^2$  igual a 1 significa que todas as variações na variável dependente são explicadas pelas variáveis independentes, enquanto um valor próximo de 0 indica que o modelo não consegue explicar a variabilidade dos dados.

Em resumo, o RMSE avalia a precisão das previsões do modelo, enquanto o  $R^2$  avalia a qualidade geral do ajuste do modelo aos dados, indicando o quanto a variabilidade é explicada pelas variáveis independentes. Ambos os indicadores são importantes para avaliar a eficácia e a validade do modelo de regressão.

### Escolha do preditor

Os métodos mais tradicionais utilizados na indústria, regressão linear ou regressão multivariável, apresentaram métricas inferiores aos demais algoritmos de aprendizagem de máquina. Os algoritmos baseados em árvore de decisão (Random Florest, Decision Tree, XGBoost, LGBM e Cat Boost) produziram o mesmo RMSE e diferentes  $R^2$ . O método XGBoost foi escolhido por apresentar o maior coeficiente ( $R^2$ ).

Modelo de RHO baseado em Vp e GR			Modelo de RHO baseado em GR			Modelo de Vp baseado em GR		
Regressor	RMSE	$R^2*100$	Regressor	RMSE	$R^2*100$	Regressor	RMSE	$R^2*100$
Multiple Linear Regression	0.11	70.92	Linear Regression	0.20	10.72	Linear Regression	269	8.80
Random Florest	0.09	81.40	Random Florest	0.20	16.69	Random Florest	262	12.96
Decision Tree	0.09	81.22	Decision Tree	0.20	16.43	Decision Tree	263	12.32
XGBoost	0.09	82.01	XGBoost	0.20	16.87	XGBoost	262	13.07
LGBM	0.09	81.63	LGBM	0.20	16.73	LGBM	262	13.01
Cat Boost	0.09	81.94	Cat Boost	0.20	16.76	Cat Boost	262	13.03

Figura 15 – Tabela com métricas dos modelos preditores.

O XGBoost é um algoritmo de código aberto desenvolvido pela Universidade de Washington para aprendizagem baseado em árvores de decisão com estrutura de Gradient Boosting (CHEN; GUESTRIN, 2016) e tem sido utilizado pelo GIECAR na solução de problemas geofísicos.

### Fusão dos modelos

Os modelos com predição a partir de Vp e GR (tabelas da Figura 15) apresentaram maiores métricas em comparação com os modelos baseado somente em GR (tabela 2). Por isso, para a construção dos perfis finais de RHO foi utilizado uma concatenação dos valores

com uma lógica que prioriza o modelo que utiliza Vp e GR e utiliza o modelo baseado somente em GR quando há ausência de Vp.

### Limitações

Observou-se (Figura 16) que os modelos baseado em GR não possuem assinatura em anidritas, somente nas halitas e nos sais de baixa velocidade. A partir disso, foi realizado substituições manuais dos valores dos perfis de Vp e RHO para anidritas mais espessas que 5 metros com ocorrência no perfil composto como, por exemplo, no topo da Formação Ariri. No total foram realizadas apenas 4 substituições.

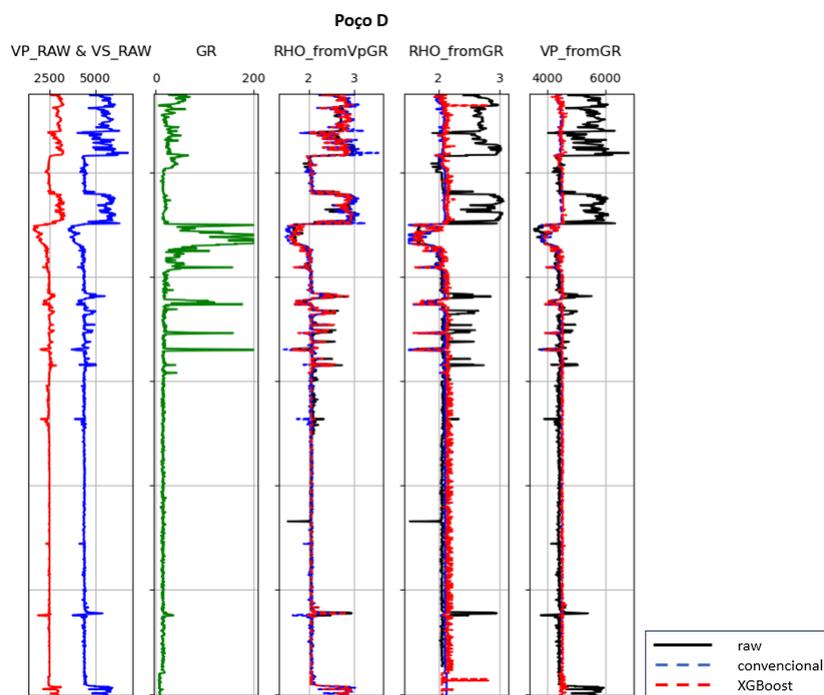


Figura 16 – Resultados dos perfis preditos utilizando os métodos regressão linear e XGBoost no Poço D.

Além disso, os valores the densidade superiores a  $2,10g/cm^3$  foram reposicionados para  $2,10g/cm^3$ . Foi comparado os modelos com os valores medidos e realizado um *shift* para reposicionar a linha de base da halita.

## 5.2 Teste de viabilidade

O teste de viabilidade consistiu em verificar a qualidade dos dados para o uso da impedância acústica na diferenciação dos diferentes tipos de sais nos perfis de poços com o método K-means. Primeiro, foi realizado uma classificação automática de fácies com K-means e o seu resultado foi utilizado para estudar a resposta acústica das diferentes fácies.

### 5.2.1 Classificação de fácies nos poços com K-means

O algoritmo K-means é um método de agrupamento de dados, conhecido como clusterização, não supervisionado que visa encontrar grupos/clusters de pontos de dados similares (MACQUEEN, 1967). Ele é amplamente utilizado em várias áreas para análise de dados, aprendizado de máquina e reconhecimento de padrões.

A ideia principal por trás do K-means é dividir um conjunto de dados em  $K$  grupos distintos. Neste caso foram separados em 3 grupos: sais de baixa, halita e anidrita. Cada grupo é representado por um centroide, que é um ponto no espaço de dados que representa o centro médio dos pontos do grupo. Essa separação é possível, pois o perfil composto indicou uma separação brusca entre as fácies a partir dos perfis de  $V_p$ ,  $V_s$  e  $RHO$ .

O objetivo do algoritmo é minimizar a soma das distâncias entre cada ponto de dados e o centroide do grupo ao qual pertence.

---

#### Algoritmo 1: Algoritmo K-means

---

**Data:** Conjunto de dados  $X$ , número de grupos  $K$

**Result:** Grupos  $G_1, G_2, \dots, G_K$

**Inicialização;**

Inicialize os centróides  $C_1, C_2, \dots, C_K$  aleatoriamente;

**repeat**

**Atribuição de pontos aos grupos;**

    Crie grupos vazios  $G_1, G_2, \dots, G_K$ ;

**foreach** ponto  $x_i \in X$  **do**

        | Atribua  $x_i$  ao grupo  $G_j$ , onde  $j = \arg \min_k \text{dist}(x_i, C_k)$ ;

**end**

**Atualização dos centróides;**

**foreach** grupo  $G_j$  **do**

        | Atualize o centróide  $C_j$  como a média dos pontos em  $G_j$ ;

**end**

**until** *Convergência*;

---

O algoritmo inicia de forma aleatória  $K$  centroides iniciais, ou utiliza centroides configurados pelo usuário, e para cada iteração percorre o set de dados e atribui cada amostra do dado ao centroide mais próximo, criando-se clusters. Então, recalcula o centroide dentro do seu próprio cluster. Este processo iterativo aproxima o centroide para o centro do cluster, permitindo que amostrar mais distantes sejam atribuídas a clusters vizinhos, agrupando os dados.

## 5.2.2 Estudo da relação acústica com as fácies

O algoritmo conseguiu separar os 3 tipos de sais. Os grupos nomeados de 0, 1 e 2 foram renomeados de acordo com o intervalo de impedância.

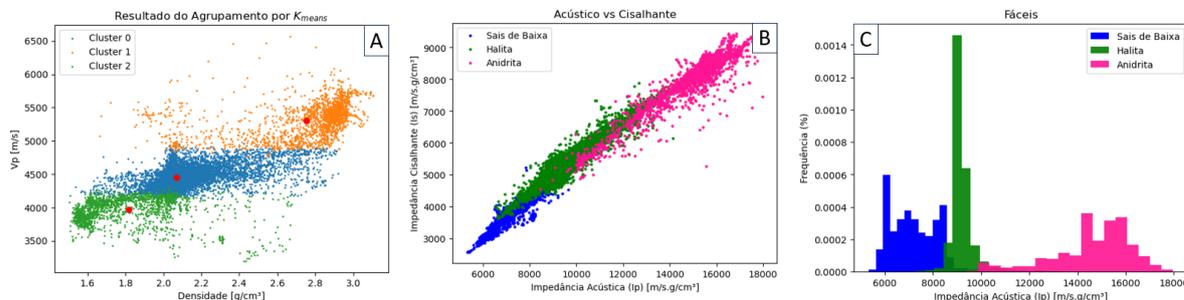


Figura 17 – Resultado do agrupamento de fácies por  $K_{means}$ . A) Crossplot de  $V_p$  vs densidade, colorido por *cluster*. Centroides em vermelho. B) Crossplot de impedância S vs impedância P colorido por fácies. C) Histograma de impedância acústica das fácies salinas.

A distribuição de  $I_p$  das 3 fácies indica que a halita tem um valor médio de impedância acústica em torno de  $9218g/cm^3 * m/s$ , com desvio padrão de  $5667g/cm^3 * m/s$ . Os sais de baixa impedância acústica possuem um desvio padrão de  $973g/cm^3 * m/s$  e a anidrita de  $1629g/cm^3 * m/s$ . A separação entre halita e anidrita tem um contraste forte, onde podemos assumir que valores acima de  $11000g/cm^3 * m/s$  tem quase nenhuma probabilidade de ser halita. Por outro lado, sais abaixo de  $8000g/cm^3 * m/s$  podem ser classificados como sais de baixa impedância acústica.

Além disso, a Figura 17.b demonstra que  $I_p$  e  $I_s$  possuem uma relação aproximadamente linear, logo isto demonstra que não há a necessidade de utilizar a informação cisalhante para distinguir os diferentes tipos de sais.

## 5.3 Amarração poço-sísmica

Os perfis de poços são adquiridos no domínio da profundidade, enquanto que os levantamentos sísmicos são adquiridos no domínio do tempo. Portanto, o processo de amarração sísmica consiste em posicionar as amostras dos perfis de poços no mesmo domínio da sísmica.

O fluxo de amarração depende de uma tabela inicial de conversão de profundidade para tempo, chamada de tabela DT (do inglês *depth to time*), além do perfil sônico (ou  $V_p$ ), o perfil de densidade ( $RHO$ ) e uma *wavelet*. O resultado da amarração de poços é a obtenção da tabela de conversão final profundidade-tempo e um subproduto é a criação de um perfil sintético, que é gerado durante o processo de amarração para comparação entre as velocidades atribuídas a tabela DT e a da sísmica, mas também possui diversas

aplicações, como na interpretação quantitativa, caracterização de reservatórios e para cálculo de resíduo nos algoritmos de inversão sísmica.

O fluxo de amarração começa com uma tabela de profundidade inicial, geralmente obtida a partir de *checkshots*. No entanto, na ausência desses dados podem ser utilizados o modelo de velocidade, o perfil sônico suavizado, uma tabela DT de poços próximos ou até mesmo a criação manual de uma tabela utilizando as velocidades conhecidas das litologias da região. A tabela DT inicial realiza a conversão do domínio do poço para o domínio do tempo. No entanto, esse não é o fim do fluxo de amarração, pois a diferença de frequência entre o poço e a sísmica, além de outras fontes de incertezas, fazem com que nem todas as amostras estejam adequadamente correlacionadas. Portanto, é gerado um modelo convolucional, capítulo 3.1.1, a partir dos dados de  $V_p$ ,  $Rho$  e a *wavelet*, a fim de gerar um traço sísmico sintético. A comparação entre o traço sintético e a sísmica verdadeira permite identificar os tempos que estão desalinhados e, em seguida, aplicar correções na tabela DT inicial.

Tempo e profundidade podem ser representados por velocidade, logo, correções são aumentos ou decréscimos da velocidade com o objetivo de atrasar ou adiantar as reflexões do perfil sintético, a fim de fazer com que as reflexões do perfil sintético coincidam com o traço sísmico extraído em torno do poço. Existem dois tipos de correções bem estabelecidas. O *shift*, que é um deslocamento do traço que adianta ou atrasa todo o perfil na mesma proporção, e o *Stretch and Squeeze (S&S)*, do inglês esticar e comprimir, que é responsável por modificar a velocidade apenas em um intervalo do perfil sintético, a fim de preservar outros intervalos que já possuem uma correlação satisfatória. O *shift* é um procedimento comum e necessário e não possui implicações preocupantes na velocidade, no entanto, o *S&S* pode modificar as velocidades para valores irrealistas, então este procedimento deve ser utilizado com cautela. Não existe um valor limite para *S&S*, mas deve ser realizado o mínimo possível. Neste trabalho, foram utilizados nos 3 poços A, B e C as quantidades 3, 2 e 4 de *S&S*, respectivamente.

A escolha das *wavelets* também possui um impacto relevante na amarração, por isso, é crucial escolher uma *wavelet* que cubra bem as frequências da sísmica para obter um maior coeficiente de correlação no processo de amarração.

Há *checkshots* para todos os poços utilizados neste projeto e devido ao processo de predição perfis também há neste momento perfis disponíveis em todo o intervalo salino. Então, os perfis foram importados do ambiente python para o *software* RokDoc da Ikon (Figura 18), para utilização da ferramenta de controle de qualidade de *wavelets* e amarração de poços.

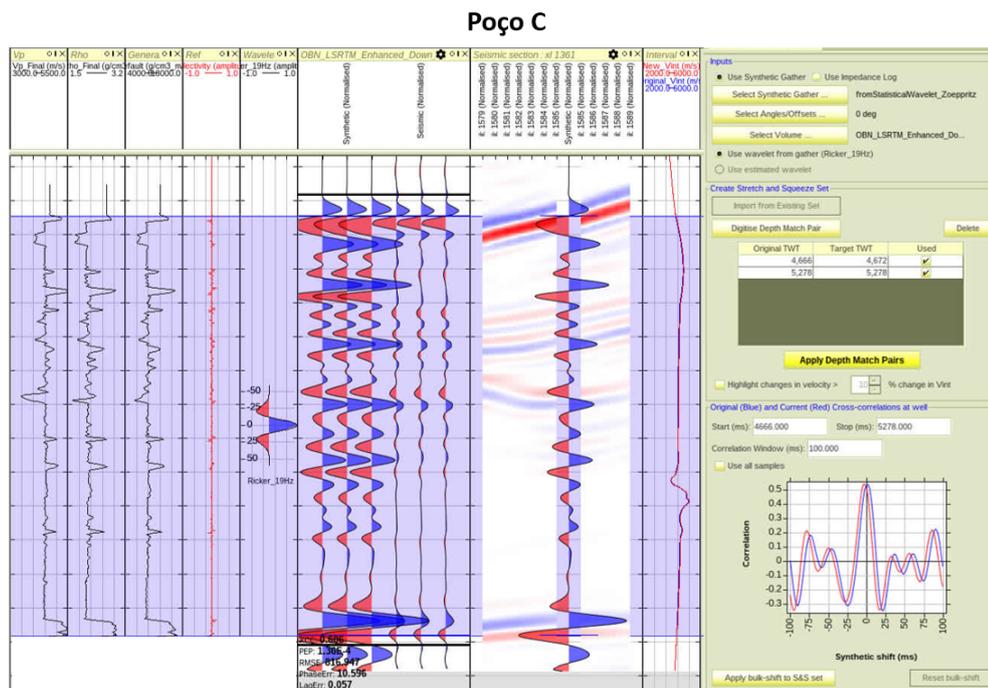


Figura 18 – Janela de amarração no *software RokDoc*.

## 5.4 Inversão Sísmica

Nesta etapa do fluxo de trabalho, foi construído um modelo de baixa frequência utilizando os horizontes interpretados e os perfis de poços. Este processo é importante para inserir na inversão sísmica, pois a informação de baixa frequência é ausente na sísmica. Em seguida, o modelo de baixa frequência, o volume de amplitude, a *wavelet* e os poços amarrados foram inseridos no módulo de inversão com os parâmetros ajustados para a geração do volume de impedância.

### 5.4.1 Construção do Modelo de Baixa Frequência

O modelo de baixa frequência (Figura 19) foi construído considerando 3 horizontes como guias: topo do sal, intra-sal e topo da anidrita e os perfis dos poços filtrados em  $5Hz$ . Para a criação desse modelo foi utilizado o algoritmo de Krigagem inbutido no módulo CRAVA do *software PsPro* da *Sharpe Reflections*.

A escolha de interpretar o topo da anidrita basal, em vez de interpretar a base do sal (base da anidrita basal), foi motivada pelo efeito de *tuning* observado entre o topo da Anidrita e a base do sal em certas áreas da região de estudo, devido a limitações na resolução sísmica. Portanto, a inversão foi realizada com a inclusão de um intervalo de 200 ms tanto abaixo quanto acima dos horizontes limitantes, esta adição leva em consideração os lobos das *wavelets* das interfaces pós-sal/sal e sal/pré-sal. Adicionalmente, foi realizada a interpretação de um terceiro horizonte, denominado máscara de halita, a fim de auxiliar na distribuição dos valores, uma vez que os refletores na porção inferior tendem a seguir a

inclinação da base do sal, enquanto os refletores mais próximos do topo seguem a inclinação do topo.

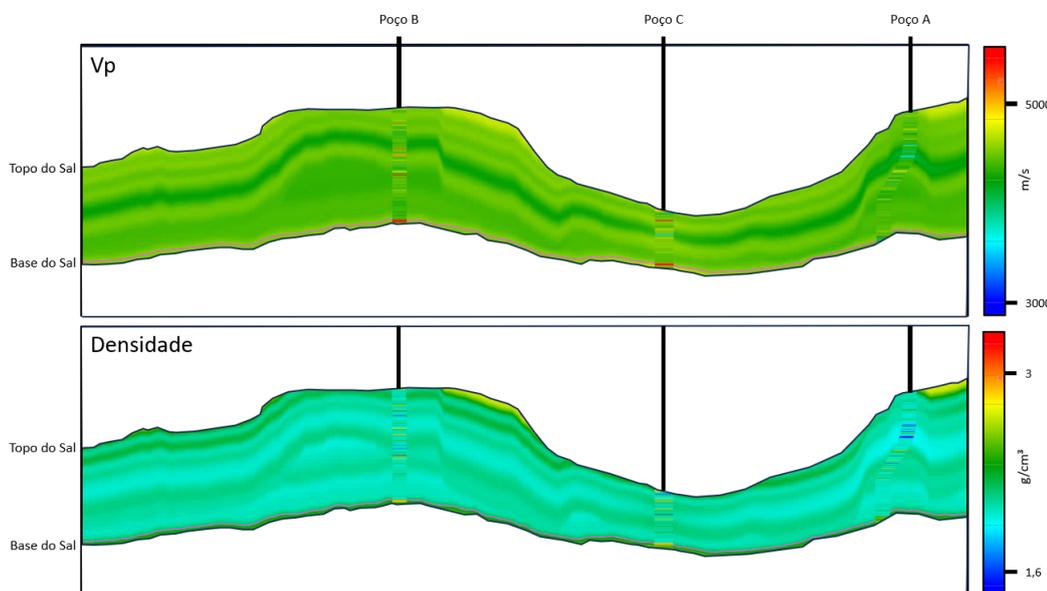


Figura 19 – Modelo de baixa frequência de Vp e Densidade gerado por Krigagem.

Um filtro passa-baixa com frequência de corte de 5Hz foi aplicado nos perfis de poços. Em seguida, os valores de velocidade P ( $V_p$ ) e densidade ( $RHO$ ) foram distribuídos horizontalmente utilizando um variograma de 1 km. As propriedades foram guiadas da base até o intra-sal seguindo a conformidade pela base (Figura 20.A) e e guiados do horizonte intra-sal até o topo do sal utilizando conformidade com a base e o topo em simultâneo (Figura 20.B).

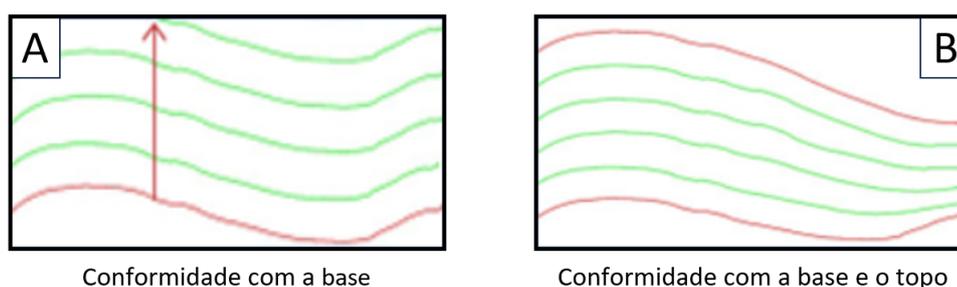


Figura 20 – Diferentes opções para distribuição de propriedades para a etapa de construção do modelo de baixa frequência. Fonte: Manual do *PsPro*.

#### 5.4.2 Cubo de Impedância Acústica

A inversão foi realizada com o algoritmo CRAVA, do *software* PreStack Pro da Sharp Reflections. Como demonstrado no Capítulo 5.2, a classificação dos sais pode ser realizada apenas com a impedância acústica, não sendo necessário a impedância cisalhante e uma abordagem com *angle stacks*, visto que para inversão acústica o volume *full stack* é

suficiente. Por isso, foi utilizado os cubos *full stacks* tanto no caso *full azimuth* quanto com os produtos *narrow azimuths*. Para a inversão acústica, a entrada no *software* foi realizada considerando ângulo de incidência igual a zero;

O algoritmo de [Buland e Omre \(2003\)](#) considera como parâmetros de entrada uma razão sinal ruído e um escalar para parametrização da *wavelet*. Sendo estas as principais variáveis de modificação da inversão. Os valores de  $S/N = 60$  e  $Scale = 40000$  foram escolhidos iterativamente utilizando como indicador o resultado da inversão nos poços de controle. Além disso, o *software* calcula uma matriz de covariância utilizando os dados dos dois poços de controle. A *wavelet* utilizada foi uma Ricker de 21Hz, por ser uma frequência intermediária das *wavelets* utilizadas na amarração dos 3 poços. A inversão sísmica gerou 5 cubos de impedância acústica, um para o *full azimuth* e outros 4 para cada seção azimutal.

## 6 Resultados e Discussão

Os resultados foram analisados utilizando uma única linha arbitrária que cruza os 3 poços.

### 6.1 Avaliação da inversão

A avaliação tem como objetivo verificar a confiabilidade da inversão. No entanto, parte deste trabalho é feito iterativamente durante a escolha dos argumentos, no qual diversas inversões são testadas para compreender como o algoritmo se comporta a diferentes modelos de baixa frequência e diferentes parâmetros de regularização.

#### 6.1.1 Coeficientes de correlação dos poços

A amarração dos poços foi um desafio devido à baixíssima ocorrência de eventos reflexivos na região de halita não estratificada, em contraste com a alta frequência dos perfis de poços. Por esse motivo, os coeficientes de correlação (Tabela 2) foram estimados apenas na região com presença de eventos reflexivos, pois é nessa região que a amarração é possível. No poço A foram utilizados 3 pontos de *S&S*: um no topo do sal, um na base dos eventos reflexivos intra-sal superior e outro no topo da anidrita. No poço B, que é um poço desviado, foram utilizados 2 pontos *S&S*: no topo e na base do sal, além de dois pontos em uma região onde o poço desvia a trajetória e passa por ângulos maiores, cruzando a seção lateralmente. O poço C obteve a melhor correlação na amarração, pois está posicionado no flanco do sal, uma região mais estratificada e com maior quantidade de eventos sísmicos. Em todos os poços, o topo do sal estava em um zero-cross, enquanto a base estava em *tuning*.

Tabela 2 – Coeficientes de correlação

Nome do Poço	Wavelet	Frequência de Pico	Correlação
Poço A	Ricker	23 Hz	52,8%
Poço B	Ricker	21 Hz	54,2%
Poço C	Ricker	19 Hz	60,6%

Foram extraídas *wavelets* estatísticas em uma região de 50 metros ao redor de cada poço. No entanto, melhores coeficientes foram obtidos com a utilização de Rickers com frequências mais baixas, conforme apresentado na Tabela 2. A frequência da *wavelet* foi escolhida de forma iterativa, iniciando-se com uma Ricker com frequência em torno de 25

Hz, que é aproximadamente a frequência de pico da *wavelet* estatística. Em cada iteração, testou-se uma frequência menor até que o coeficiente de correlação deixasse de aumentar ou não proporcionasse uma melhoria significativa para a redução da frequência.

### 6.1.2 Análise nos poços de controle

O resultado da inversão sísmica comparado com os perfis dos poços de controle tiveram máxima correlação de impedância acústica na anidrita basal dos dois poços de controle. A região com baixa ocorrência de reflexões, logo acima da anidrita basal, foi dominada pela tendência imposta pelo modelo de baixa frequência, sem correlações diretas entre poço e o cubo de inversão. Uma camada espessa de sais de baixa impedância acústica, confirmada pelo perfil composto como carnalita, é revelada com a sua continuidade e espessura lateral na região em torno dos dois poços de controle.

No poço de controle A, há uma fina camada com impedância acústica maior do que o valor da halita, indício de anidrita confirmado pelo perfil composto. Porém, os valores não são na mesma escala da anidrita basal e anidrita do topo, que são consideradas mais pura. A impedância acústica em torno de  $12000g/cm^3 * m/s$  indica que a composição não é totalmente pura, provavelmente possuindo em sua composição uma porcentagem de halita. A ocorrência desta anomalia de impedância acústica ocorre ainda mais leve no poço C, um indício de uma diminuição da presença deste sal da porção A para C. A anidrita de topo dos dois poços de controle possuem valores de impedância acústica altos e na mesma escala, tanto nos poços quanto no volume obtido.

### 6.1.3 Análise no poço cego

O poço cego não possui a região de baixa reflexão como nos poços de controle, então todo o seu intervalo salino pode ser avaliado. Iniciando da base, a anidrita está perfeitamente alinhada, tanto em espessura quanto no valor da impedância acústica, aproximadamente  $18000g/cm^3 * m/s$ . Os valores de impedância logo acima representam a halita com pequenas variações, o que indica uma composição misturada com os sais de baixa.

Logo acima da halita, existem alguns contraste entre sais de baixa e anidrita, com continuidade lateral no cubo de impedância e diretamente correlacionado com o poço cego. No topo, que possui uma sequência de 3 camadas consideravelmente espessa de anidrita, um sal de baixa e anidrita de topo respectivamente. Sendo a anidrita anterior ao sal de baixa representada nos perfis de poço como intercalações entre anidrita e halita.

O poço cego demonstrou que a inversão teve sucesso em revelar as características espaciais da impedância acústica, tornando possível uma interpretação 3D dos evaporitos desta região.

### 6.1.4 Interpretação qualitativa

A inversão sísmica obteve sucesso em recuperar as impedâncias acústicas em escalas compatíveis com as encontradas nos perfis de poços. O volume de impedância (Figura 21) acústica revela a distribuição geoespacial da impedância, o que permite uma interpretação da continuidade lateral dos diferentes sais.

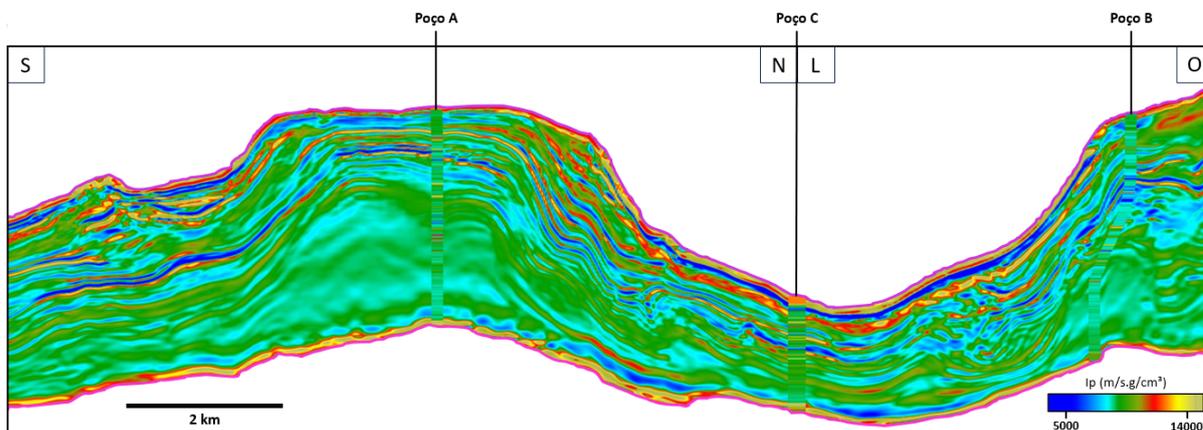


Figura 21 – Seção arbitrária de Impedância Acústica ( $I_p$ ) cruzando os poços de controle e o poço cego.

A cor azul está associada a baixa impedância acústica, indício de sais de baixa, tais como taquidrita, carnalita e silvita, enquanto que as cores vermelha e amarela estão associadas as anidritas que possuem alta impedância acústica. Como "fundo", a cor verde indica halita, o sal mais abundante da seção evaporítica da Bacia de Santos. A seção arbitrária da Figura 21 ilustra que os sais de baixa estão presentes em camadas consideravelmente espessas em toda a extensão do campo.

## 6.2 Impedâncias acústicas dos produtos azimutais

Todos os cubos de impedância acústica dos produtos azimutais foram extraídos com os mesmos parâmetros da inversão do volume *full azimuth*.

As impedâncias acústica dos cubos azimutais compartilham a mesma estrutura salina do cubo gerado pelo *full azimuth*. Como observado na Figura 22, a diferença entre as impedâncias são menos expressivas para a maior extensão do volume e só possuem valores realmente significantes nos sais de baixa impedância acústica e com diferenças que seguem a lateralidade destas fácies. Estas diferenças variam entre  $-500$  e  $500 \text{ m/s.g/cm}^3$ .

Com base na Figura 22, as maiores discrepâncias quantitativas são observadas nos sais de baixa velocidade ao sul da linha arbitrária e na anidrita do flanco norte em relação à posição do poço de controle A. No primeiro caso, a seção azimutal 02 indica uma espessura maior de carnalita, enquanto a seção 04 indica o oposto. No caso das diferenças observadas no flanco, a seção 01 destaca uma espessura maior de anidrita, enquanto a seção

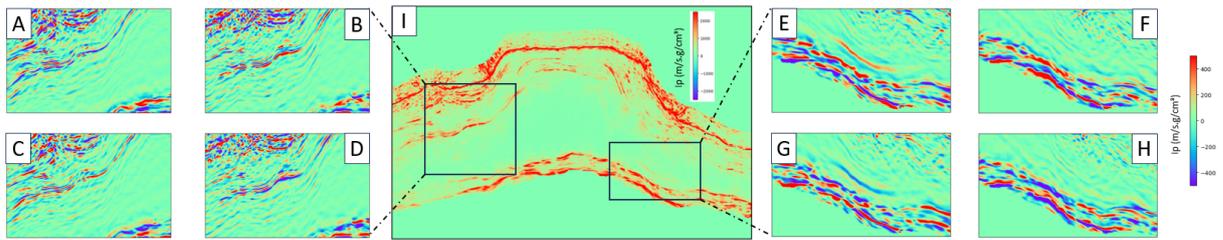


Figura 22 – I) Seção com a soma acumulada das diferenças absoluta de cada volume de impedância acústica das quatro seções azimutais em relação ao volume de impedância acústica gerado pelo *full azimuth*. Os retângulos A/E, B/F, C/G e D/H são as diferenças relativas entre as seções 01, 02, 03 e 04, respectivamente, e o *full azimuth*.

03 subestima essa espessura. No entanto, no mesmo flanco, mais próximo da base, uma camada de alta impedância acústica presente no *full azimuth* possui valores menores em comparação com a seção 01 e uma diferença positiva em relação à seção 03. Isto demonstra que dependendo do azimute pode tanto subestimar quanto superestimar a impedância acústica quando comparado ao resultado do *full stack*.

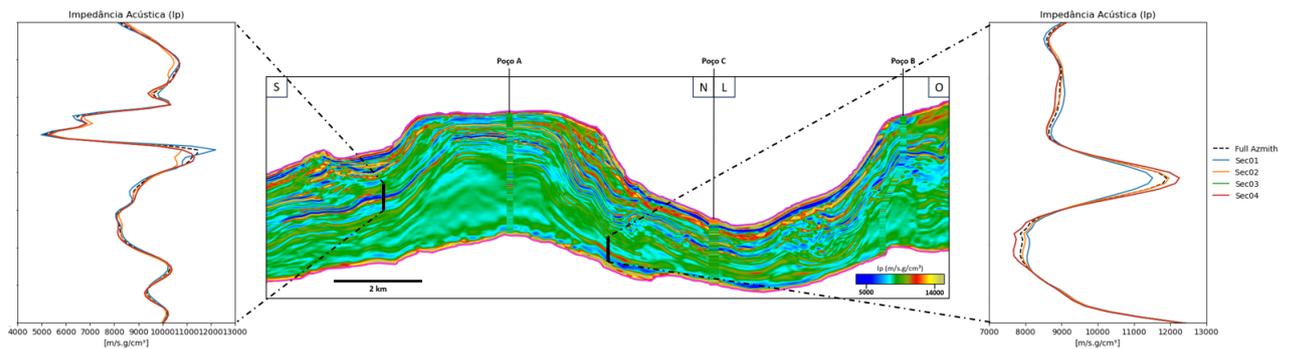


Figura 23 – Seção arbitrária com a diferença de impedância acústica entre a seção azimutal 01 e o *full azimuth* cruzando os poços A, C, e B respectivamente.

A Figura 23 mostra que as diferenças das impedâncias acústicas acompanham a espessura das fácies. Então, no caso analisado, apesar de haver uma diferença de espessura interpretada qualitativamente, os diferentes produtos azimutais são mais sensíveis a interpretação relacionada a composição do que de espessura, visto que as variações em torno de  $1000g/cm^3 * m/s$  ocorrem ao longo de uma mesma camada ou nas interfaces.

## 7 Conclusões

Com base nos resultados da inversão sísmica, foi possível obter a distribuição geoespacial da impedância acústica, resultando na compressão 3D dos evaporitos do Campo de Bacalhau. Foi demonstrado no teste de viabilidade uma forte relação entre a impedância acústica e os três grupos de sais estudados: sais de baixa velocidade (como taquidrita, carnalita e silvita), halita e anidrita. A etapa de predição de perfis ausentes, como velocidades e densidade, foi crucial para a conclusão do fluxo de inversão sísmica. Uma boa predição desses perfis é essencial, pois eles são utilizados na construção do modelo de baixa frequência e no controle de qualidade, influenciando diretamente o resultado final. Comparando com a abordagem convencional de regressão polinomial, os modelos preditivos com os métodos das famílias de árvores de decisão obtiveram melhores indicadores de desempenho.

Além disso, o fluxo de inversão sísmica com os diferentes produtos azimutais mostrou que as diferentes seções azimutais revelam as mesmas estruturas e fácies salinas do *full azimuth*, porém com espessuras e valores de impedância acústica diferentes. As impedâncias acústica variaram entre -500 e 500 m/s.g/cm<sup>3</sup>, o que pode indicar uma interpretação de rocha mais limpa (composição mais próxima da halita) ou com maior percentual de outros sais.

Os resultados deste trabalho exemplificam o potencial da inversão sísmica na contribuição para a compreensão da geologia local e no planejamento de novos poços na região. Além de transformar uma propriedade de interface em camadas, a inversão sísmica fornece informações úteis sobre espessura, composição e fácies, estas informações são importantes para a equipe de engenharia compreender quais são os esforços físicos contra a estrutura dos poços, o que garante operações de perfurações mais seguras e reduz riscos no desenho do poço. Além disso, a partir deste trabalho, novos parâmetros petrofísicos, como Módulo de Young e Razão de Poisson podem ser calculados em futuras pesquisas.

## Referências

- AKI, K.; RICHARDS, P. G. *Quantitative Seismology*. [S.l.]: [S.l.: s.n.], 1980. Citado 3 vezes nas páginas 9, 19 e 20.
- AMARAL, P. *et al.* Estudo estatístico da velocidade dos sais na camada evaporítica na bacia de santos. In: *International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Anais*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2015. Citado na página 17.
- ASTER R. C, T. C. H.; BORCHERS, B. *Parameter Estimation and Inverse Problems*. [S.l.]: Academic Press, 2004. Citado na página 21.
- BAYES, T. An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 53, p. 370–418, 1763. Citado na página 26.
- BULAND, A.; OMRE, H. Bayesian linearized AVO inversion. *GEOPHYSICS*, Society of Exploration Geophysicists, v. 68, n. 1, p. 185–198, jan. 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1190/1.1543206>>. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 44.
- CHEN, T.; GUESTIN, C. Xgboost. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. ACM, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>>. Citado na página 37.
- COELHO, P. *et al.* Regional aspects of the pre-salt interval on the outer high, santos basin. In: *Third EAGE Conference on Pre Salt Reservoirs*. European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3997/2214-4609.202288032>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 13.
- FERNANDES, F. J. D.; LUPINACCI, W. An approach to seismic facies classification in pre-salt carbonate reservoir. In: *Third EAGE Conference on Pre Salt Reservoirs*. European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3997/2214-4609.202288012>>. Citado 3 vezes nas páginas 9, 29 e 30.
- FIDUK, J.; ROWAN, M. Analysis of folding and deformation within layered evaporites in blocks bm-s-8 & -9, santos basin, brazil. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 363, n. 1, p. 471–487, 2012. Citado na página 17.
- FRANÇOLIN, J.; SZATMARI, P. Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem norte brasileira. *Revista Brasileira de Geologia*, v. 17, p. 196–207, 1987. Citado na página 13.
- GAMBOA, L. *et al.* Chapter 10: Seismic, magnetic, and gravity evidence of marine incursions in the santos basin during the early aptian. In: *Memoir 124: The Supergiant Lower Cretaceous Pre-Salt Petroleum Systems of the Santos Basin, Brazil*. AAPG, 2021. p. 257–272. Disponível em: <<https://doi.org/10.1306/13722322msb.10.1853>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 13.
- GAMBÔA, L. *et al.* *Evaporitos Estratificados no Atlântico Sul: Interpretação sísmica e controle tectono-estratigráfico na Bacia de Santos*. Primeira ed. [s.l.: s.n.]: [s.n.], 2008. 18 p. Citado na página 17.

- GOUVEIA, W. P.; SCALES, J. A. Bayesian seismic waveform inversion: Parameter estimation and uncertainty analysis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, American Geophysical Union (AGU), v. 103, n. B2, p. 2759–2779, fev. 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/97jb02933>>. Citado na página 25.
- HADAMARD, J. Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique. *Princeton University Bulletin*, p. 49–52, 1902. Citado na página 23.
- HANSEN, L. The carcará project – from discovery to development. In: *First EAGE Workshop on Pre-Salt Reservoir: from Exploration to Production*. European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3997/2214-4609.201982027>>. Citado na página 14.
- HANSEN, L. J. *et al.* Bacalhau project: An innovative development strategy for a unique field. In: *Second EAGE Conference on Pre-Salt Reservoir*. European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3997/2214-4609.202183028>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 33.
- HUNT, D. The bacalhau field: New insights into lacustrine carbonate platform development, Santos basin, Brazil. In: *Second EAGE Conference on Pre-Salt Reservoir*. European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3997/2214-4609.202183037>>. Citado 3 vezes nas páginas 9, 15 e 16.
- LEAUBON, E.; FREIRE, F.; VITAL, J. C. D. S. Caracterização sísmica 2d da soleira de diabásio principal da Área do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba, através da integração com dados de rocha e de perfis digitais. Unpublished, 2023. Disponível em: <<https://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.23196.36484>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 28.
- LIU, Y. *et al.* Least-squares RTM with ocean bottom nodes: Potentials and challenges. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019*. Society of Exploration Geophysicists, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1190/segam2019-3216736.1>>. Citado na página 33.
- LU, Q.; SONG, C.; LIU, C. A new prestack three-parameter amplitude variation with offset inversion method. *Journal of Geophysics and Engineering*, Oxford University Press (OUP), v. 15, n. 4, p. 1300–1309, abr. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1742-2140/aaa871>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 20.
- MACQUEEN, J. B. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: CAM, L. M. L.; NEYMAN, J. (Ed.). *Proc. of the fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. [S.l.]: University of California Press, 1967. v. 1, p. 281–297. Citado na página 39.
- MASCLE, J. Atlantic-type continental margins: distinction of two basic structural types. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 48, n. Supp., p. 149–155, 1976. Open Access version. Disponível em: <<https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/4987/>>. Citado na página 13.
- MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S. dos. *Sal: Geologia e Tectônica*. São Paulo: Beca edições Ltda, 2008. ISBN 978-85-87256-49-2. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.

MOORE, E. H. On the reciprocal of the general algebraic matrix. *Bulletin of American Mathematical Society*, C, v. 23, p. 394–395, 1920. Citado na página 25.

MOREIRA, J. L. P. *et al.* Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, p. 531–549, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 9, 13 e 14.

PENROSE, R. A generalized inverse for matrices. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Cambridge University Press (CUP), v. 51, n. 3, p. 406–413, jul. 1955. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/s0305004100030401>>. Citado na página 25.

PIVOT, F.; PERNIA, L. Integrating fully stochastic seismic inversion in geomodels. In: *Proceedings*. EAGE Publications BV, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412315>>. Citado na página 29.

RODRIGUEZ, C. *et al.* Dual tectonic-climatic controls on salt giant deposition in the Santos basin, offshore Brazil. *GEOSPHERE*, v. 14, n. 1, p. 1–28, 2018. Citado na página 17.

SANTOS, P. *et al.* Bacalhau OBN: Equinor's first deep-water node seismic. In: *Third EAGE Conference on Pre Salt Reservoirs*. European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3997/2214-4609.202288024>>. Citado 4 vezes nas páginas 9, 31, 32 e 34.

SIMM, R.; BACON, M. *Seismic Amplitude*. Cambridge University Press, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/cbo9780511984501>>. Citado na página 28.

TEIXEIRA, L.; LUPINACCI, W. M. Elastic properties of rock salt in the Santos basin: Relations and spatial predictions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Elsevier BV, v. 180, p. 215–230, set. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.05.024>>. Citado 5 vezes nas páginas 9, 11, 17, 18 e 29.

TIKHONOV, A. N.; ARSENIN, V. Y. *Solutions of Ill-Posed Problems*. New York: Winston, 1977. ISBN 0-470-99124-0. Citado na página 23.

YAMAMOTO, T.; MAUL, A.; LUPINACCI, W. Analysis of velocities, density and seismic facies of Ariri formation – Santos basin. In: *International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Anais*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2019. Citado na página 17.

ZOEPPRITZ, K. On the reflection and propagation of seismic waves. *Gottinger Nachrichten*, v. 1, p. 66–68, 1919. Citado 4 vezes nas páginas 9, 19, 20 e 25.

## 8 Anexos

Este capítulo contém as figuras que detalham a amarração de poços. Para garantir uma melhor organização e facilitar a visualização das informações, essas figuras foram agrupadas neste capítulo de anexos.

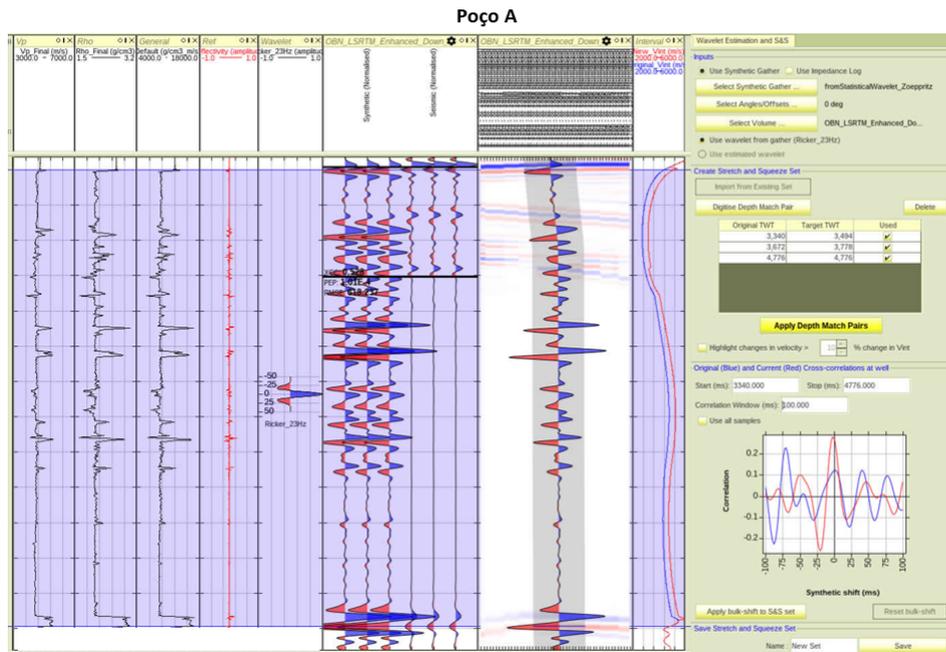


Figura 24 – Janela de amarração do poço A

Poço B

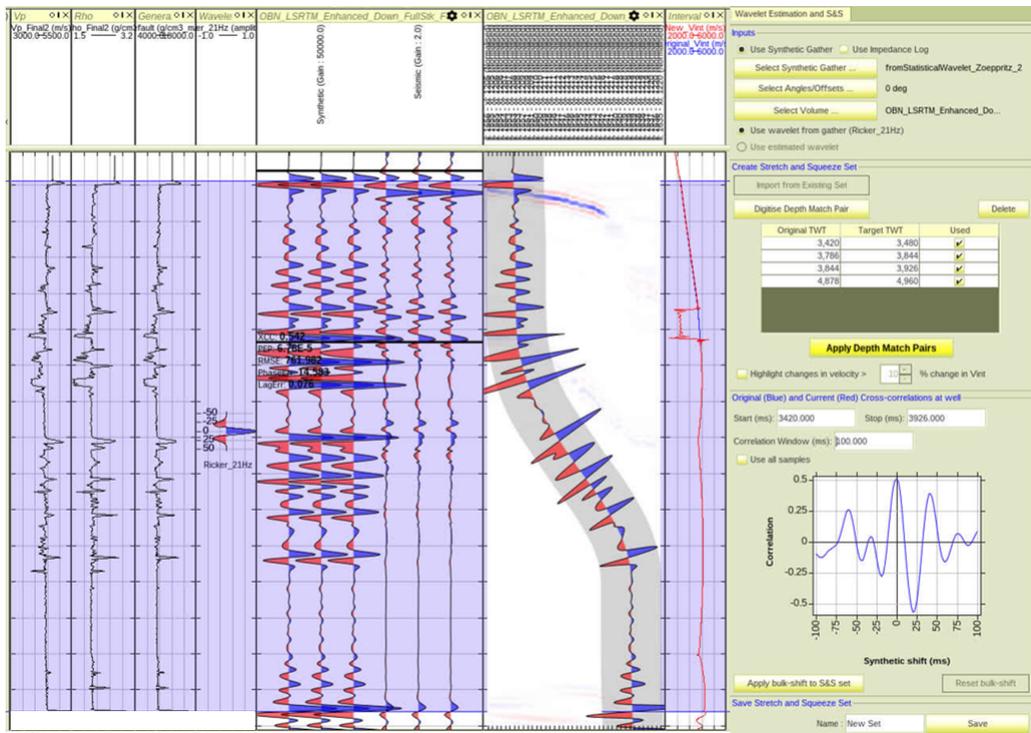


Figura 25 – Janela de amarração do poço B, RokDoc

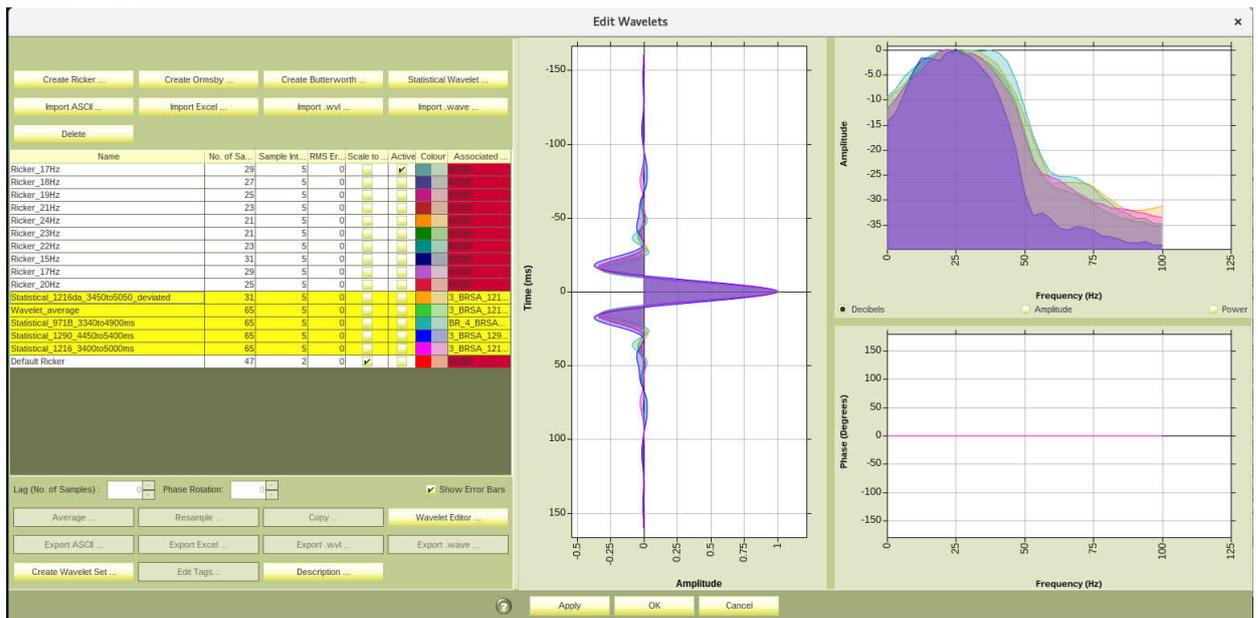


Figura 26 – Wavelets geradas no projeto.

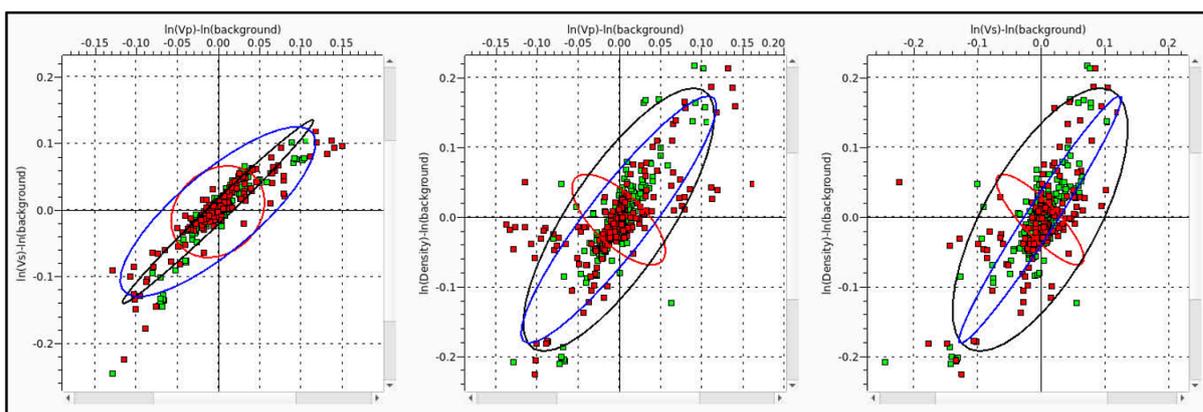


Figura 27 – Elipsoides de covariância calculados pelo CRAVA do PsPro.