

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

THIAGO MARTINS YAMAMOTO

**UMA METODOLOGIA PARA A CARACTERIZAÇÃO DA  
FORMAÇÃO ARIRI UTILIZANDO DADOS DE POÇOS E  
INVERSÃO SÍSMICA**

NITERÓI

2019

THIAGO MARTINS YAMAMOTO

**UMA METODOLOGIA PARA A CARACTERIZAÇÃO DA  
FORMAÇÃO ARIRI UTILIZANDO DADOS DE POÇOS E  
INVERSÃO SÍSMICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra para a obtenção do título de Mestre na área de Geologia e Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Moreira Lupinacci

Coorientador: MSc. Alexandre Rodrigo Maul

NITERÓI - RJ

2019

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

Y11m Yamamoto, Thiago Martins  
UMA METODOLOGIA PARA A CARACTERIZAÇÃO DA FORMAÇÃO ARIRI  
UTILIZANDO DADOS DE POÇOS E INVERSÃO SÍSMICA / Thiago Martins  
Yamamoto ; Wagner Lupinacci, orientador ; Alexandre Maul,  
coorientador. Niterói, 2019.  
127 p. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Niterói, 2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDOT.2019.m.33829869819>

1. Sais. 2. Propriedades petroelásticas. 3. Interpretação  
sísmica. 4. Inversão acústica. 5. Produção intelectual.  
I. Lupinacci, Wagner, orientador. II. Maul, Alexandre,  
coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Instituto  
de Geociências. IV. Título.

CDD -

Bibliotecária responsável: Yolle Vacariuc Bittencourt - CRB7/6040

# UMA METODOLOGIA PARA A CARACTERIZAÇÃO DA FORMAÇÃO ARIRI UTILIZANDO DADOS DE POÇOS E INVERSÃO SÍSMICA

THIAGO MARTINS YAMAMOTO

Dissertação apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra para a obtenção do título de Mestre na área de Geologia e Geofísica.

Aprovada em 31 de outubro de 2019.

Comissão Examinadora:

---

Dr. Álvaro Favinha Martini (Petrobras)

---

Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire (GIECAR/GGO/UFF)

---

Prof. Dr. Marco Antonio Cetale Santos (GIECAR/GGO/UFF)

---

Prof. Dr. Wagner Moreira Lupinacci - Orientador (GIECAR/GGO/UFF)

---

Prof. Msc. Alexandre Rodrigo Maul - Coorientador (Petrobras)

---

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por mais essa conquista e por tudo que me proporcionou na vida até hoje.

Aos meus pais Solange e Massayoshi que sempre estiveram ao meu lado me amando e apoiando ao longo de toda a minha vida. À minha noiva, Carol, pelo amor, carinho e cumplicidade incondicionais nestes momentos e nos que vão se seguir.

À minha irmã Karina, pelo carinho e apoio e ao meu cunhado Caio por estar sempre presente. Agradeço também a toda a minha família em especial aos meus avós Totonho (*in memoriam*) e Ambrozina. Padrinhos Tadashi, Moreno e Lucinha.

Gostaria de agradecer à Petrobras pela oportunidade de fazer este mestrado e por sempre apoiar o meu crescimento profissional.

Agradeço à Universidade Federal Fluminense, por me proporcionar um ensino de qualidade e um ambiente amigável. Sou grato aos docentes e funcionários dessa instituição de ensino.

Ao meu orientador, Wagner Lupinacci, pelas discussões, sugestões e apoio no decorrer do mestrado. Também gostaria de agradecer ao meu coorientador, Alexandre Maul, pela amizade, apoio e empenho na orientação deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos da Petrobras, que contribuíram com o apoio e conselhos no dia a dia. Em especial ao, Talles Meneguim, Luiz Eduardo Queiroz, Rejhane Cunha, Pedro Jonas, Kelita Lopes, Adriana Freitas, Rubens Monteiro, Olivia Leonardi, Gleidson Diniz, Frank Bulhões, Roberto Salomoni, Eliane Born, Gloria Cezar, Marlos Lipski, Leandro Thompson, Mario Paes, Carlos Eduardo Pereira, Antônio Tartarini.

Deixo um agradecimento especial aos meus amigos de São Paulo e Ouro Preto, que continuam ao meu lado nos momentos de alegrias e dificuldades. Em especial ao Jefferson Lima, Silas Sallaume, Marcelo Martins, Rafael Henrique, Gabriel Teixeira, Alan Becker, César Semensatti, Antônio Cruz, Pablo Munhoz, Amilcar Rocha, Caio Costa, Rory Brito, João Carvalho, Luís Lemos, Romulo Miranda, Leonardo Souza, Hugo Marx, Bruno Jales, Wanderson Silva (*in memoriam*) e Bruno Gomes (*in memoriam*).

“Existem muitas hipóteses na ciência que são erradas. Isso é perfeitamente correto; elas são a abertura para descobrir o que é certo. A ciência é um processo autocorretivo. Para serem aceitas, novas ideias devem sobreviver aos mais rigorosos padrões de evidência e escrutínio.”

Carl Sagan

## • **Resumo**

Com as descobertas dos reservatórios carbonáticos do Presal da Bacia de Santos uma nova fronteira exploratória se abriu na margem costeira do Brasil. Essas enormes reservas se encontram logo abaixo dos evaporitos da Formação Ariri, que podem chegar a mais de 2 quilômetros de espessura. O pacote evaporítico possui grande complexidade estrutural e alta variabilidade faciológica, sendo que os principais constituintes são os sais (halita, anidrita, gipsita, carnalita, taquidrita e silvita). A complexidade geológica da Formação Ariri representa um grande desafio no desenvolvimento e produção dos reservatórios do Presal e, devido a isso, há um enorme esforço da indústria para reconhecer as propriedades dos minerais existentes na formação. Este trabalho apresenta uma metodologia a respeito da caracterização destes minerais tanto na dimensão 1D como 3D. Nos estudos 1D foram utilizados perfis de poços para a quantificação dos minerais presentes e as respectivas propriedades petroelásticas (densidade, velocidades compressional e cisalhante). Nos estudos na dimensão 3D, foram utilizados um volume sísmico e seu respectivo modelo de velocidades. Durante esta etapa foram mapeadas as superfícies associadas aos principais eventos de sedimentação da Formação Ariri e a amarração dos poços na sísmica. Por último foi gerado um cubo de impedâncias através do processo de inversão sísmica acústica com intuito de caracterizar as propriedades dos sais especialmente no intervalo da Formação Ariri. Este trabalho propiciou uma melhor compreensão dos sais e suas propriedades petroelásticas na Formação Ariri, e, possui uma maior robustez quando comparado a estudos de interpretação baseados em informações de interfaces de camadas provenientes do dado sísmico. Os resultados podem também ser utilizados em estudos de geomecânica, construção de modelos de velocidades para fins de migração, otimização de trajetória de poços entre outros.

Palavras-chave: Sais; propriedades petroelásticas; interpretação sísmica; inversão acústica

- **Abstract**

The discoveries of oil and gas of pre-salt carbonates reservoirs in the Santos Basin, open a new hydrocarbon frontier on the Brazilian coast. These reserves are just below of evaporites with 2 km of thickness of the Ariri Formation. The evaporitic section has high structural complexity and mineralogical variability, where salts are the mains constituents (halite, anhydrite, gypsum, carnalite, tachydrate and silvite). The geological complexity of the Ariri Formation represents a challenge in the production of Presalt reservoirs and due to that, the industry makes efforts to characterize these minerals. This work presents a methodology to characterize the distribution (1D and 3D) of the minerals. In 1D studies, well logs were used to quantify the presence and petroelastic (density, compressional and shear velocities) properties of the salts. The seismic data and velocity model were used to perform the 3D studies, these processes included mapping the surfaces and well-to-seismic tieing. The final step was the impedance cube generation with the acoustic seismic inversion process. The impedance was used to characterize spatially the salt properties of Ariri Formation. This work provided a robust method to facies recognition and properties quantification compared to interpretation using only seismic data. The results can also be used in geomechanics studies, velocities model building, well trajectory optimization and others areas.

Key words: Salts; petroelastic properties; seismic interpretation; acoustic inversion

# Sumário

•	Resumo.....	viii
•	Abstract .....	ix
	Lista de Figuras .....	x
	Lista de Tabelas.....	xvii
1.	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	19
1.1	Objetivos .....	20
2.	<b>ASPECTOS GERAIS DOS SAIS</b> .....	22
2.1	Precipitação e Propriedades dos Sais.....	22
2.2	Tipos de Bacias Evaporíticas .....	31
2.3	Propriedades Mecânica e Tectônica do Sal .....	33
2.4	A Importância do Sal.....	41
2.5	Contexto Geológico da Bacia de Santos.....	43
3.	<b>SÍSMICA</b> .....	51
3.1	Inversão Sísmica .....	56
4.	<b>METODOLOGIA</b> .....	62
4.1	Localização da Área.....	63
4.2	Material e Aplicativos Utilizados .....	64
5.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	66
5.1	Caracterização 1D dos Sais .....	66
5.2	Interpretação 3D dos Sais .....	84
5.3	Importância da Inversão sísmica no Processo de Caracterização 3D das Propriedades dos Sais.....	98
6.	<b>CONCLUSÕES</b> .....	114
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	118
	Apêndice A.....	124
	Apêndice B.....	126

## Lista de Figuras

- Figura 1: Sequência de cristalização dos evaporitos (incluindo a calcita). Relação entre a densidade da salmoura ( $\text{g/cm}^3$ ) e o percentual de  $\text{H}_2\text{O}$  evaporado da água do mar. Adaptado de JUSTEN (2014). ..... 26
- Figura 2: Coluna de evaporação da água do mar e precipitação dos principais evaporitos e os seus volumes. Retirado de HARRAZ (2015). ..... 27
- Figura 3: Relação de velocidade versus densidade para diferentes litologias (retirado de GARDNER *et al.*, 1974). As propriedades dos sais apresentam um grande desvio em relação a linha de tendência estimada para as demais rochas sedimentares. .... 28
- Figura 4: Valores de densidade em relação a profundidades. Com o aumento da profundidade, os sais apresentam uma densidade constante enquanto os demais sedimentos aumentam, principalmente, por conta da perda de porosidade com a compactação. Extraído de HEIDARI *et al.* (2016). ..... 29
- Figura 5: Modelos de bacia proposto por WARREN (1989) A) Bacia profunda e nível de água raso; B) Bacia profunda e nível de água profundo; C) Bacia rasa e nível de água raso. .... 32
- Figura 6: Diagrama padrão para analisar as tensões (eixo y) e deformações (eixo x) sobre materiais submetidos a condições controladas de laboratório (Retirado de TOPPR, 2019). ..... 34
- Figura 7: Desenho esquemático dos módulos mecânicos. A) módulo de Young, B) módulo de Poisson, C) módulo de Compressibilidade (Bulk) e D) módulo de cisalhamento. Figura retirada de BIANCO (2011). ..... 36
- Figura 8: Gráfico de tensão (eixo y) por deformação (eixo x) nas amostras analisadas por DE PAOLA *et al.* (2009). Os testes foram triaxiais e testaram uma faixa de tensão efetiva de 10, 20 e 40 Mpa. Após os 20 Mpa a anidrita passa de um comportamento rúptil para dúctil/plástico. .... 38
- Figura 9: Gráfico de tensão (eixo y) por deformação (eixo x) em amostras analisadas por LIANG *et al.* (2007). Nota-se que a halita se deforma plasticamente enquanto a anidrita rúptilmente. Outro fato a se destacar é a ausência de um comportamento linear no início da deformação, como o ilustrado na Figura 06, demonstrando assim que rochas, no geral, possuem heterogeneidades em seus módulos mecânicos (modificado de LIANG *et al.*, 2007). ..... 39
- Figura 10: Exemplos de sobrecarga gravitacional sobre os sais: (A) Carga sobrejacente com espessura variante, o sal tende a fluir do ponto 1 para o 2; (B) Neste caso as camadas estão mergulhantes e o pacote acima do sal possui espessura constante, contudo por conta desse mergulho se cria um gradiente de tensão e o sal flui do ponto 1 para o 2. Retirado de HUDEC & JACKSON, 2007. .... 40
- Figura 11: Diagrama ilustrando o efeito de deslocamento nos sais. (A) Durante um encurtamento a tensão lateral é maior que a vertical, fazendo com que o sal flua para fora da superfície do sedimento. (B) Na extensão a carga gravitacional excede a tensão horizontal, tornando o pacote salífero menos espesso. Retirado de HUDEC & JACKSON (2007). ..... 40

Figura 12: Estruturas formadas em ambientes evaporíticos. Retirado de FOSSEN (2012).	41
Figura 13: (A) Seção sísmica (amplitude) de uma porção da Bacia de Santos; (B) velocidade intervalar constante; (C) modelo de velocidades resultante de tomografias de tempo de trânsito; (D) modelo de velocidades gerado a partir da resposta sísmica (amplitude); (E) modelo de velocidades utilizando a inversão sísmica como entrada (retirado de MAUL <i>et al.</i> , 2018 b).	43
Figura 14: Coluna estratigráfica da Bacia de Santos (Fonte: Moreira <i>et al.</i> , 2007).	44
Figura 15: Correlação de sais entre dois poços da Bacia de Santos. Retirado de FREITAS (2006) apud RODRIGUEZ <i>et al.</i> (2018).	47
Figura 16: Seção sísmica arbitrária entre dois poços da Bacia de Santos (A), a mesma seção com os ciclos interpretados (B) e seção geológica (C). Retirado de RODRIGUEZ <i>et al.</i> (2018).	49
Figura 17: Seção sísmica arbitrária da Bacia de Santos mostrando a interpretação realizada por FIDUK & ROWAN (2012) ilustrando seis ciclos interpretados (três zonas de detachment e três zonas de beam).	50
Figura 18: Diagrama ilustrando como acontece o particionamento de energia na interface da camada 1 com a 2. Uma onda P incidente se divide em ondas P e S refletidas e transmitidas.	52
Figura 19: Exemplo de modelagem convolucional de um traço sísmico.	53
Figura 20: Efeito de tuning associado a um modelo de cunha. Nota-se que os valores de amplitude aumentam de 0 a 5 ms de espessura chegando ao seu valor máximo em 15 ms (linha azul). Após os 15 metros de espessura os valores de amplitude diminuem até o chamado onset of tuning (linha verde), limite a partir da qual duas camadas são imageadas por reflexões com seus valores reais de amplitude (retirado de BIANCO, 2019).	55
Figura 21: Figura esquemática sobre o problema inverso e direto.	57
Figura 22: O registro do perfil sônico (primeiro painel) pode ser considerado como a soma de uma informação mais detalhada (6-250 Hz) com uma função de baixa frequência (0-5 Hz). Os componentes de baixa frequência dos perfis, geralmente, são utilizados nos processos de inversão sísmica (retirado de LINDSETH, 1979).	58
Figura 23: Principais tipos de inversão pre-stack e post-stack. Modificado de RUSSEL & HAMPSON (1999).	59
Figura 24: A) Espectro de frequência das impedâncias do poço utilizado por LANCASTER & WHITCOMBE (2000), a linha tracejada é a função de ajuste estimada. B) Operador calculado a partir da diferença da função de ajuste com o espectro da sísmica, nota-se que ele apresenta uma fase de 90 graus. Figuras retiradas de LANCASTER & WHITCOMBE (2000).	60
Figura 25: Inversão sparse spike realizada sobre um mesmo traço de entrada A) Usando uma densidade de spikes de 50 o valor da função foi de 98,19 B) Usando uma densidade de spikes de 70,85 o valor da função foi de 158,98. Pelas figuras, percebe-se que minimização da função objetivo foi maior ao utilizar uma densidade de spikes de 50. Modificado de RUSSELL (1988).	61

Figura 26: Mapa de localização da área de estudo com os poços utilizados na área (para fins de simplificação de nomenclatura, os poços foram renomeados para letras, maiores detalhes consulte a tabela 09 ).	63
Figura 27: Fluxograma utilizado na caracterização 1D dos sais (etapas em cinza) e em parte da interpretação 3D (etapas em azul).	66
Figura 28: Agrupamento de fácies para o poço A. Foram constatados a presença de carnalita, taquidrita, silvita, halita, gipsita, anidrita e carbonatos. Este último (carbonato) ocorria somente na base da Formação Ariri e na seção Presal, contudo conforme dito anteriormente, os carbonatos não serão objetos de estudos nesta dissertação. Pode-se notar também uma intensa intercalação entre os sais e a predominância das halitas (com 86,1% do total).	69
Figura 29: Perfis de fácies sobrepostos às velocidades nos dez poços.	70
Figura 30: Exemplo de edição e filtragem pela média móvel de um perfil de velocidades P (poço G).	71
Figura 31: Velocidades médias e desvios padrão para os sais agrupados da área de estudo.	72
Figura 32: Velocidades S dos perfis, nota-se que há a falta de informações em metade dos poços.	74
Figura 33: Médias e desvios padrão das velocidades S dos sais e suas respectivas proporções.	75
Figura 34: Densidade medida por perfil. Em apenas um poço foi adquirida essa informação	76
Figura 35: Histograma das densidades para o único poço com esta informação (poço J). Percebe-se que as distribuições de SBV e SAV não são normais, pela moda dos valores há o indicativo destas medidas serem representativas das anidritas e carnalitas com um maior grau de pureza.	76
Figura 36: Perfis do poço H. No primeiro trecho temos a VP, no 2 a curva de VS e pôr fim a densidade.	77
Figura 37: Modelo de velocidades com os perfis de velocidades dos poços. As velocidades dos poços foram extraídas ao longo da trajetória no modelo gerado pela tomografia sísmica.	79
Figura 38: Gráfico cruzado entre velocidades compressional (P) e cisalhante (S) para os poços B, C, F, H e J. Os círculos representam o intervalo de valores que é interpretado como sendo relativo aos sais puros. A equação estimada, correlação dos pontos em relação ao polinômio e o erro de ajuste estão descritos na parte superior da figura.	80
Figura 39: Gráfico cruzado entre velocidade S medidas por perfis e as calculadas através da relação de poços. Cerca de 95% dos valores estimados possuem até 10% de erro em relação ao medido por poços.	81
Figura 40: Gráfico cruzado entre velocidade P e a densidade para o poço J. Os círculos representam o intervalo de valores que é interpretado como sendo relativo aos sais puros. As equações estimadas, as correlações dos pontos em relação aos polinômios e os erros de ajuste estão descritos na parte inferior da figura.	82

Figura 41: Gráfico cruzado entre a densidade medida e calculada. Nota-se que a maioria dos valores estimados tiveram erros de até 20% em relação as medidas de poços.....	82
Figura 42: Curvas do poço H descrevendo todos os procedimentos adotados para complementar as curvas .....	83
Figura 43: A: Gráfico cruzado entre a velocidade S medida por perfil e a calculada por CASTAGNA <i>et al.</i> (1985). B: densidade de poço versus densidade estimada a partir de relação de GARDNER <i>et al.</i> (1974).....	84
Figura 44: Seção sísmica arbitrária em tempo passando pelos poços perfurados (trajetórias em roxo) na área de estudo.....	85
Figura 45: Espectro de amplitude da sísmica no intervalo equivalente à seção evaporítica. A frequência de pico é de aproximadamente 30 Hz.....	86
Figura 46: Estudo de fácies sísmica da seção evaporítica. Foram reconhecidas quatro fácies sísmicas que possuíam padrões diferenciados na disposição dos refletores. ....	87
Figura 47: Seção sísmica com a interpretação dos quatro ciclos salinos e do Albiano conforme GAMBOA <i>et al.</i> (2008). Foram mapeados no total seis superfícies referente a essas feições. A base da Formação Ariri equivale ao início do primeiro ciclo, e, o topo da seção evaporítica é relativo ao fim do quarto ciclo salino.....	88
Figura 48: Ciclos salinos reconhecidos nos poços, conforme GAMBOA <i>et al.</i> (2008). ....	89
Figura 49: Mapas com os topos estruturais (em tempo) dos ciclos salinos e a localização dos poços. (A) Base da seção Formação Ariri que equivale à base do ciclo 01; (B) Topo do ciclo 01; (C) Topo do ciclo 02; (D) Topo do ciclo 03; (E) Topo do ciclo 04 ou topo da seção evaporítica, o domo salino está circundado em roxo e o anticlinal em preto, as demais áreas são regiões sobrejacentes as minibacias do Albiano; (F) Polígono da área de estudo. ....	90
Figura 50: Mapas de espessura (em tempo) dos ciclos mapeados. (A) Espessura da Formação Ariri; (B) Espessura ciclo 01; (C) Espessura ciclo 02; (D) Espessura ciclo 03; (E) Espessura ciclo 04; (F) Polígono da área de estudo com a nomenclatura dos poços. ....	91
Figura 51: Amarração poço-sísmica do poço A. No painel da sísmica são apresentados os horizontes mapeados relativos aos quatro ciclos salinos. No painel do sintético são visualizados os traços sintéticos e o seu grau de correlação com a sísmica, no caso deste poço o valor foi de 80%. O painel das fácies ilustra os sais agrupado e, por fim, no ultimo painel é exibido a impedância acústica calculada a partir da velocidade e da densidade...	92
Figura 52: A) Amarração do poço B que está localizado em uma região com ocorrência de fácies sísmica homogênea, resultando em um fator de correlação de 31%; B) Amarração do poço F que perfurou uma região sísmica caótica, o fator de correlação neste caso foi de 50%.....	94
Figura 53: Filtragem em frequência das curvas de fácies e de velocidades complementadas do poço A. Notar a diminuição de ocorrências de SAV e SBV e o aumento de espessura dos mesmos. Para as velocidades, as informações se tornaram menos variáveis e seus valores convergiam para as médias encontradas para a halita (4500 m/s). ....	95
Figura 54: Seções arbitrárias mostrando diferentes dados. A) Sísmica; B) Modelo de velocidades oriundo da tomografia sísmica; C) Atributo envelope de energia; D) Atributo frequência instantânea .....	98

Figura 55: Fluxograma básico da inversão realizada neste trabalho (modificado do manual do usuário do aplicativo Jason®).....	99
Figura 56: Wavelet média utilizada na inversão. A) As oito wavelets utilizadas no cálculo do operador médio (em preto); B) Wavelet média e seus respectivos espectros de amplitude e fase. Pelo espectro de amplitude constata frequência de pico de aproximadamente 28 Hz e a ausência dos chamados nós de frequência, já pelo o espectro de fase é demonstrado a não variação de fase ao longo do espectro. ....	101
Figura 57: Modelos de baixa frequência construídos neste trabalho com os poços filtrados a partir das frequências de 4 Hz. A) Seção sísmica; B) Modelo construído a partir dos horizontes relativos aos quatro ciclo salinos e informações de poços; C) Seção de impedância acústica obtido pela extrapolação dos dados de poços e superfícies de topo e base da Formação Ariri mais um horizonte intermediário; D) Seção de impedância acústica gerado a partir do modelo de velocidades tomográfico. ....	102
Figura 58: Controle de qualidade da inversão sísmica com o modelo gerado a partir dos ciclos salinos A) Resíduo final entre o sintético e a sísmica; B) Gráfico cruzado entre a impedância filtrada em 60 Hz do poço e o valor extraído da inversão; C) Comparação entre o perfil do poço filtrado e a curva da inversão. ....	104
Figura 59: Controle de qualidade das inversão sísmica com o modelo gerado à partir dos horizontes topo e base da Formação Ariri e os poços A) Resíduo final entre o sintético e a sísmica; B) Gráfico cruzado entre a impedância filtrada em 60 Hz do poço e o valor extraído da inversão; C) Comparação entre o perfil do poço filtrado e a curva extraída da inversão. ....	105
Figura 60: Controle de qualidade da inversão sísmica com o modelo construído do volume de velocidades tomográfico A) Resíduo final entre o sintético e a sísmica; B) Gráfico cruzado entre a impedância filtrada em 60 Hz do poço e o valor extraído da inversão; C) Comparação entre o perfil do poço filtrado e a curva extraída da inversão. ....	106
Figura 61: Resultado da inversão utilizando os horizontes dos ciclos salinos e as curvas dos poços.....	107
Figura 62: Resultado da inversão com modelo inicial gerado a partir do topo e base da seção evaporítica e informações de poços.....	108
Figura 63: Resultado da inversão a partir do cubo de impedâncias gerado pelo modelo de velocidades tomográfico.....	108
Figura 64: Mapas referentes a seção evaporítica; A) Mapa da espessura total, o domo salino está circundado em magenta, o anticlinal de sal e preto e as demais regiões são consideradas como zonas estratificadas; B), C) e D) são, respectivamente, mapas de RMS das impedâncias acústicas das inversões 1, 2 e 3.....	110
Figura 65: Mapas referentes ao primeiro ciclo salino; A) Mapa de espessura do ciclo; B), C) e D) são, respectivamente, mapas RMS das impedâncias acústicas da inversão com os ciclos salinos, utilizando topo e base do sal, e utilizando o modelo de impedâncias gerado a partir do volume de velocidades tomográfico. ....	111
Figura 66: Mapas referentes ao segundo ciclo salino; A) Mapa de espessura do ciclo; B), C) e D) são, respectivamente, mapas RMS das impedâncias acústicas da inversão com os ciclos salinos, utilizando topo e base do sal, e utilizando o modelo de impedâncias gerado a partir do volume de velocidades tomográfico. ....	112

Figura 67: Mapas referentes ao terceiro ciclo salino; A) Mapa de espessura do ciclo; B), C) e D) são, respectivamente, mapas RMS das impedâncias acústicas da inversão com os ciclos salinos, utilizando topo e base do sal, e utilizando o modelo de impedâncias gerado a partir do volume de velocidades tomográfico. .... 112

Figura 68: Mapas referentes ao quarto ciclo salino; A) Mapa de espessura do ciclo; B), C) e D) são, respectivamente, mapas RMS das impedâncias acústicas da inversão com os ciclos salinos, utilizando topo e base do sal, e utilizando o modelo de impedâncias gerado a partir do volume de velocidades tomográfico..... 113

Figura 69: Gráficos gerados durante o controle de qualidade para o parâmetro seismic misfit signal to noise ratio. A) Razão sinal/ruído da sísmica; B) Correlação poço e pseudocurva da inversão; C) Desvio padrão da pseudocurva pelo desvio padrão do poço; D) Esparsidade; E) Misfits combinados. Por esses gráficos é possível verificar que, para valores mais alto de seismic misfit signal to noise ratio há um aumento da razão sinal/ruído, correlação dos poços e os misfits combinados são minimizados ao ponto em que os valores se estabilizam em um patamar. Contudo, há um aumento da esparsidade o que configura uma deteriorização no termo de contraste da função objetivo. .... 127

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Teor médio dos diferentes íons dissolvidos na água dos mares mundiais em seu contexto atual. Modificada de MOHRIAK <i>et al.</i> (2008).....	23
Tabela 2: Compilação das propriedades dos principais minerais evaporíticos. *(MAVKO <i>et al.</i> , 2009), **(CRAIN, 2017).....	26
Tabela 3: Sequência de precipitação dos evaporitos a partir de evaporação de uma salmoura básica a 25°C (concentração é uma média da água dos mares). Valores extraídos de HARRAZ (2015). A tabela ilustra que com a sucessiva perda de água de um sistema hipotético, há um aumento da concentração dos íons na salmoura e estes começam a se precipitar para formar os evaporitos que seguem uma sequência de deposição similar a proposta por SONNENFELD (1984 <i>apud</i> JUSTEN, 2014).....	27
Tabela 4: Velocidade compressional (P) e cisalhante (S) medidas em laboratório sob diferentes condições de pressão e de temperatura. Nota-se que as velocidades pouco se modificam com a variação dos valores de pressão e temperatura. ....	29
Tabela 5: Síntese de alguns valores de velocidade compressional (m/s) para os sais encontrados em trabalhos publicados na literatura. ....	31
Tabela 6: quadro da relação entre as propriedades petroelásticas e os módulos de deformação e rigidez. Na tabela aparece o primeiro parâmetro de Lamé que não foi discutido nesta dissertação. Tabela retirada de BIANCO (2011).....	36
Tabela 7: Ciclos salinos interpretados na Bacia de Santos segundo GAMBOA <i>et al.</i> (2008), FIDUK; ROWAN (2012) e RODRIGUEZ <i>et al.</i> (2018).....	49
Tabela 8: Vértices do polígono do volume e do modelo de velocidade usados para o desenvolvimento deste trabalho ( <i>datum</i> Sirgas 2000). ....	64
Tabela 9: Perfis dos poços disponibilizados pela ANP. Com X estão marcadas as curvas com informações, ao menos em parte, no intervalo relativo à Formação Ariri. ....	65
Tabela 10: Proporção dos sais presente nos poços.....	68
Tabela 11: Proporções, espessura do sal e velocidades médias dos sais para cada poço na área de estudo. A velocidade do SAV para o poço D não foi apresentada na tabela, pois o valor obtido não foi confiável devida a baixa amostragem dessas fácies.....	73
Tabela 12: Quadro comparativo entre os valores de correlação sísmica/ sintético, espessura do sal e fácies sísmica. Na última coluna a primeira fácies descrita corresponde à feição predominante no poço. Nota-se que locações em regiões com predomínio de fácies sísmica estratificada apresentam as maiores correlações enquanto que nas porções com ocorrência de fácies homogênea a correlação é baixa. ....	93
Tabela 13: Comparação entre as proporções de fácies agrupadas originais e das reamostradas. Pelos valores, nota-se que houve um aumento das proporções de halita e diminuição dos SAV e SBV para quase todos os poços.....	96
Tabela 14: Tabela com as velocidades médias e desvio padrão da onda P para os sais nas curvas originais e filtradas, assim como para o valor extraído do modelo de velocidades. .	96

Tabela 15: Impedâncias estimadas dos poços e dos volumes oriundos da inversão.....	107
Tabela 16: Impedâncias estimadas a partir dos resultados das inversões. Os valores foram separados por ciclo salino e estrutura geológica presente na área.....	111
Tabela 17: Parâmetros de inversão. ....	126

# 1. INTRODUÇÃO

A Bacia de Santos está localizada na margem sudeste brasileira, limitada a norte pelo Alto de Cabo Frio e a sul pelo Alto de Florianópolis. Possui cerca de 350 mil km<sup>2</sup> de área cobrindo o litoral dos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina. Esta bacia sedimentar se originou a partir de processos geológicos que culminaram com a separação do supercontinente Gondwana iniciada há 180 milhões de anos durante o período Jurássico (STOREY, 1995; MCLOUGHLIN, 2001).

A Bacia de Santos é, atualmente, umas das maiores produtoras de hidrocarbonetos do mundo. Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) esta província produz aproximadamente 1,95 milhões de barris de óleo equivalente por dia (boe/d)<sup>1</sup>, o que corresponde a cerca de 60% da produção brasileira.

Os reservatórios do Polo Presal da Bacia de Santos são carbonatos complexos, depositados durante as fases rifte e sag das Formações Itapema e Barra Velha. Logo acima desta importante zona produtora estão depositados os evaporitos da Formação Ariri (MOREIRA *et al.*, 2007).

Segundo GAMBOA *et al.* (2008), a Formação Ariri foi depositada num ambiente marinho restrito durante o Aptiano (125-113 milhões de anos atrás). Os principais elementos encontrados nesta formação são carbonatos, rochas vulcânicas e sais, tais como a halita, anidrita, taquidrita, carnalita e silvita. Esta sequência evaporítica apresenta grande complexidade estrutural, podendo se mencionar: muralhas de sal, diápiros, almofadas e minibacias. Os processos formadores dessas estruturas podem estar relacionados tanto a forças halocinéticas como esforços extensionais ou compressionais (MOHRIAK *et al.*, 2008).

Sais desempenham papel importante nos estudos de modelagem de sistemas petrolíferos, pois exercem a função de selo para algumas acumulações de hidrocarbonetos. Esses minerais também são bons condutores termais,

---

<sup>1</sup> Dado obtido do Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural divulgado pela ANP. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/arquivos/publicacoes/boletins-anp/producao/2019-08-boletim.pdf>

podendo aumentar o grau de maturação dos hidrocarbonetos (MUBARAK *et al.*, 2009).

Caracterizar devidamente as propriedades dos sais é de extrema relevância para algumas disciplinas envolvidas nas etapas de exploração e produção de óleo e gás. Dentre estas atividades, pode-se mencionar: na modelagem geomecânica para quantificar os módulos mecânicos (*Young* e *Poisson*), em estudo a respeito da integridade do selo, na predição da pressão de poros (SAYERS & SCHUTJENS, 2007; ZOBACK, 2007); na elaboração do quadro de previsão geológica que é utilizado para a otimização da trajetória dos poços e desvio de possíveis ocorrências de sais solúveis (COSTA *et al.*, 2011); na construção de modelos de velocidades para fins de migração sísmica (MAUL *et al.*, 2018a).

## **1.1 Objetivos**

O objetivo principal desta dissertação foi reconhecer quais são os sais presentes na Formação Ariri, e, caracterizar suas propriedades petroelásticas (densidade, velocidades da onda compressional e cisalhante) através da combinação de informações de perfis poços e dados sísmicos. Para o estudo foram utilizados dados de amplitude, modelo de velocidades e poços disponibilizados pela ANP.

O trabalho está estruturado em seis capítulos. Dando sequência à introdução do tema da dissertação e definição dos objetivos apresentados neste primeiro capítulo, o segundo capítulo trata sobre aspectos gerais associados aos sais como a sequência de precipitação dos evaporitos, suas propriedades, os tipos de bacias evaporíticas, a tectônica salífera e o contexto geológico da Bacia de Santos. O terceiro capítulo descreve os fundamentos do método sísmico e da inversão sísmica. O quarto trata sobre a metodologia desenvolvida nesta dissertação e os dados utilizados. O quinto capítulo descreve os resultados obtidos ao longo do trabalho e discussões acerca dos mesmos. Os principais resultados obtidos no decorrer do mestrado foram: o reconhecimento dos sais presentes nos poços e suas propriedades petroelásticas (densidade, velocidades compressional e cisalhante), a interpretação das distribuições dos

sais pela Formação Ariri utilizando o dado sísmico e, por fim, a inversão sísmica acústica que foi utilizada na caracterização espacial das propriedades das fácies reconhecidas. No último capítulo são abordadas as conclusões referentes aos estudos realizados ao longo do mestrado.

## 2. ASPECTOS GERAIS DOS SAIS

### 2.1 Precipitação e Propriedades dos Sais

Sais são o resultado da reação conhecida como neutralização, entre um ácido e uma base formando o composto salino em conjunto com a água. Esses minerais são compostos iônicos que, em contato com a água, liberam cátions diferentes do (H<sup>+</sup>) e ânions distintos da hidroxila (OH<sup>-</sup>). Na natureza, os sais geralmente são formados pela precipitação de íons a partir de uma salmoura concentrada:

- NaOH (base) + HCl (ácido) → NaCl (sal) + H<sub>2</sub>O (Neutralização)
- Na<sup>+</sup><sub>(aq)</sub> + Cl<sup>-</sup><sub>(aq)</sub> → ↓NaCl(sal) + H<sub>2</sub>O↗ (Precipitação)

Segundo WARREN (1989), sais formados em ambientes de circulação restrita recebem a denominação de evaporitos salinos. A precipitação dos evaporitos a partir de salmouras concentradas ocorre sob condições específicas. Entre estes fatores incluem: a bacia deve ser isolada, o sistema necessita estar submetido a um baixo aporte de material terrígeno, o volume de saída de água da salmoura (geralmente por evaporação) precisa ser maior que a quantidade entrante, e, por fim o sistema necessita estar associado a clima áridos (WARREN, 1989; MOHRIAK *et al.*, 2008).

Evaporitos são identificados do Proterozóico até o recente, contudo não há como afirmar a composição média dos íons dissolvidos nos oceanos ao longo das eras geológicas através destes registros. Porém, devido à predominância da halita em depósitos evaporíticos, pode-se concluir que mares pretéritos eram enriquecidos em Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup>. Atualmente, a água do mar possui concentração média de íons diversos de aproximadamente 36.500 mg/l, sendo que os elementos mais comuns são o Na<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> e SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, conforme apresentado na Tabela 1. A composição apresentada nessa tabela é praticamente constante nos oceanos e mares mundiais atuais (MOHRIAK *et al.*, 2008).

Tabela 1: Teor médio dos diferentes íons dissolvidos na água dos mares mundiais em seu contexto atual. Modificada de MOHRIAK *et al.* (2008).

Íons	Teor Água Mar (ppm)	Sais	Porcentagem em Peso
Cl <sup>-</sup>	18980	NaCl	78,03
Na <sup>+</sup>	10560	MgCl <sub>2</sub>	9,21
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	2650	MgSO <sub>4</sub>	6,53
Mg <sup>++</sup>	1270	CaSO <sub>4</sub>	3,84
Ca <sup>++</sup>	400	KCl	2,11
K <sup>+</sup>	380	CaCO <sub>3</sub>	0,33
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	140	MgBr	0,25
Br <sup>-</sup>	65	SrSO <sub>4</sub>	0
		NaF	0,01

Condições tectônicas e climáticas diferentes das atuais, ao longo do tempo geológico, permitiram a deposição de grandes sequências evaporíticas, tanto em espessura como em extensão, para os quais não se encontram análogos modernos (WARREN, 1989; MOHRIAK *et al.*, 2008).

Segundo WARREN (1989), os evaporitos podem ser divididos em dois grupos, os salinos (compostos por sulfatos e cloretos) e os carbonáticos. Estes últimos não serão abordados nesta dissertação, de modo que todo comentário referente a evaporito é exclusivamente feito aos sais.

SONNENFELD (1984 *apud* JUSTEN, 2014) afirma que sais podem ser formados tanto em ambientes marinhos como continentais. Estes minerais se cristalizam influenciados por uma série de condições específicas (já comentados anteriormente), seguindo uma sequência determinada pela concentração e grau de solubilidade dos íons conforme o gráfico apresentado na Figura 1.

Segundo o mesmo autor, os primeiros evaporitos a precipitar são os carbonáticos (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>). Com o prosseguimento da evaporação da salmoura e aumento da concentração dos íons, os evaporitos salinos iniciam sua deposição. Os primeiros sais a precipitar são os sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) seguidos então pelos cloretos (Cl<sup>-</sup>). Neste mesmo trabalho é apresentado uma lista de mais de cem minerais evaporíticos e suas principais alterações diagenéticas. No entanto, na Formação Ariri, trabalhos como o de GAMBOA *et al.* (2008), constataram a ocorrência dos seguintes minerais salinos: gipsita (CaSO<sub>4</sub>\*2H<sub>2</sub>O), anidrita (CaSO<sub>4</sub>), halita (NaCl), silvita (KCl), carnalita (KMgCl<sub>3</sub>\*6H<sub>2</sub>O) e taquidrita (CaMg<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub>\*12H<sub>2</sub>O). Estes serão os sais abordados neste trabalho.

Os principais minerais carbonáticos que ocorrem em depósitos evaporíticos são a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), a aragonita (polimorfa da calcita) e a dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Os carbonatos são formados nos estágios iniciais de uma salmoura supersaturada e apresentam um grau menor de solubilidade em relação aos sais. Podem estar associados a bioconstruções ou acumulações inorgânicas (MOHRIAK *et al.*, 2008). Em poços perfurados na Bacia de Santos, os carbonatos estão restritos ao início da sequência evaporítica, associados ou não a uma anidrita basal (GAMBOA *et al.*, 2008). Os carbonatos da Formação Ariri, conforme mencionado anteriormente, não são objetos de estudo desta dissertação.

Seguindo a sequência de precipitação dos evaporitos proposta por SONNENFELD (1984 *apud* JUSTEN 2014), temos a sedimentação dos sais que são as fácies mais comuns no registros geológico, e englobam os grupos dos sulfatos e cloretos. Os sulfatos são representados pela gipsita e anidrita, enquanto que os cloretos são compostos principalmente por carnalita, halita, silvita e taquidrita.

O primeiro mineral salino a precipitar a partir de salmouras concentradas é a gipsita. Este mineral é um sulfato hidratado que se forma, preferencialmente, sob condições de temperatura e pressão baixas (WARREN, 1989). A gipsita é quimicamente estável em profundidades de até 600 m, acima destas cotas este mineral perde moléculas estruturais de água e se transforma em anidrita (MOHRIAK *et al.* 2008).

A anidrita é o outro representante do grupo dos sulfatos encontrado em depósitos evaporíticos, contudo sua formação não se dá através da precipitação de íons e sim pelo processo de desidratação da gipsita mencionado anteriormente (MOHRIAK *et al.* 2008). BRUTHANS *et al.* (2009) menciona ainda, que a anidrita em contato com a água pode se transformar em gipsita, podendo resultar em feições cársticas.

Segundo Mavko *et al.* (2009), a gipsita é um mineral cuja velocidade compressional (P) é de aproximadamente 5800 m/s e densidade de 2,35 g/cc<sup>3</sup> (MAVKO *et al.*, 2009). Já a anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), possui um comportamento mecânico mais rígido em relação aos demais minerais salinos, tendo sua velocidade P por volta de 6000 m/s e densidade de 3 g/cc<sup>3</sup>.

Com a saída contínua de água do sistema e a partir de determinada concentração de íons na salmoura (Tabela 2), dá-se início a precipitação da halita que corresponde ao mineral salino mais abundante da Formação Ariri (GAMBOA *et al.*, 2008), assim como em outras localidades e formações geológicas pelo mundo (HUDEC & JACKSON, 2007; MOHRIAK *et al.*, 2008).

A halita possui os seguintes valores de propriedades petroelásticas, caracterizada por MAVKO *et al.* (2009): velocidade compressional 4500 m/s, velocidade cisalhante 2600 m/s e densidade 2,1 a 2,2 g/cm<sup>3</sup>. Esse mineral apresenta um comportamento plástico por conta de sua estrutura cristalina cúbica, grande raio iônico e pequena valência dos seus íons. Devido a essa plasticidade, este mineral se deforma facilmente, resultando nas estruturas halocinéticas comuns em bacias evaporítica e muito marcantes na Bacia de Santos (MOHRIAK *et al.*, 2008).

O próximo mineral salino a precipitar é a silvita, que se diferencia da halita pela substituição do sódio pelo potássio, e devido a isto, estes sais apresentam estruturas cristalinas similares, ou seja, são minerais isomorfos. A silvita é um mineral solúvel em condições ambientais e possui um comportamento plástico. Sua velocidade é de aproximadamente 3880 m/s e sua densidade é por volta de 2 g/cc<sup>3</sup> (MAVKO *et al.*, 2009).

A precipitação dos sais prossegue com a formação da carnalita e, a depender da concentração de íons, termina com a precipitação da taquidrita e/ou bischofita (este último mineral não será analisado ao longo da dissertação). Estes sais apresentam um alto grau de solubilidade e grande proporção de água em suas estruturas cristalinas (MOHRIAK *et al.*, 2008). A carnalita pode se transformar em silvita, devida a dissolução de íons de magnésio e água da estrutura cristalina. A carnalita e taquidrita também podem se formar em zonas associadas a percolação de fluidos hidrotermais ricos em K e Mg (FREITAS, 2006).

A carnalita possui velocidade compressional de 3900 m/s e densidade de 1,57 g/cc<sup>3</sup>. A velocidade compressional da taquidrita é aproximadamente 3300 m/s e sua densidade de 1,66 g/cc<sup>3</sup> (CRAIN, 2019). A Tabela 2 apresenta uma compilação das principais propriedades elásticas, composição química e estrutura cristalina dos evaporitos.

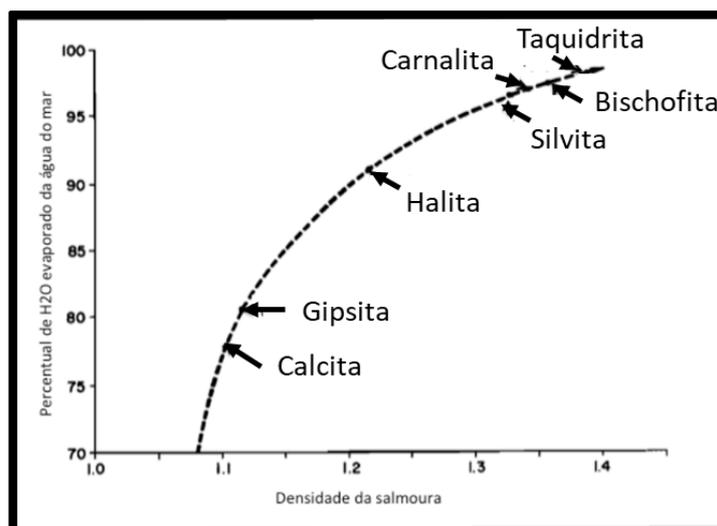


Figura 1: Sequência de cristalização dos evaporitos (incluindo a calcita). Relação entre a densidade da salmoura ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) e o percentual de  $\text{H}_2\text{O}$  evaporado da água do mar. Adaptado de JUSTEN (2014).

Tabela 2: Compilação das propriedades dos principais minerais evaporíticos. \*(MAVKO *et al.*, 2009), \*\*(CRAIN, 2017).

Mineral	Composição Química	Classe Mineral	Velocidade P (m/s)	Velocidade S (m/s)	Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Sistema Cristalino
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Carbonatos	6930-7340 *	3960-4230 *	2,87-2,88*	Trigonal
Calcita	$\text{CaCO}_3$	Carbonatos	6260-6640 *	3240-3440 *	2,70-2,71*	Trigonal
Anidrita	$\text{CaSO}_4$	Sulfatos	5640-6010 *	3130-3370 *	2,98 **	Ortorrômbico
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Sulfatos	5800 *		2,35 **	Monoclínico
Halita	$\text{NaCl}$	Cloretos	4500-4550 *	2590-2630 *	2,16*	Cúbico
Silvita	$\text{KCl}$	Cloretos	3880 *	2180 *	1,99*	Cúbico
Carnalita	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Cloretos	3908 **		1,57 **	Ortorrômbico
Taquidrita	$\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Cloretos	3313 **		1,66 **	Hexagonal

HARRAZ (2015) apresentou um modelo hipotético de precipitação dos sais a partir de uma salmoura com 1000 metros de coluna d'água (Figura 2), vale ressaltar que a evaporação ininterrupta de uma salmoura com tal grandeza é praticamente impossível por vias naturais. O autor estima que ao final da evaporação de toda a salmoura é possível precipitar aproximadamente 17 metros de evaporitos. Neste estudo, é apresentado que os carbonatos se precipitam a partir da vaporização de aproximadamente 50% da salmoura e representam cerca de 0,6% do total dos minerais formados. A gipsita se forma com 80-85% da salmoura fora do sistema e corresponde a cerca de 3,6% do volume final. A halita se sedimenta com a evaporação de 90% da salmoura, representando a maior proporção dos evaporitos, com cerca de 78,2%. Por fim, com mais de 95% da salmoura fora do sistema se formam os sais solúveis de K e Mg com 17,6% da proporção final. A Tabela 3 apresenta os valores de fator de

concentração, porcentagem de água liberada e a densidade de salmoura característicos para a precipitação dos evaporitos.

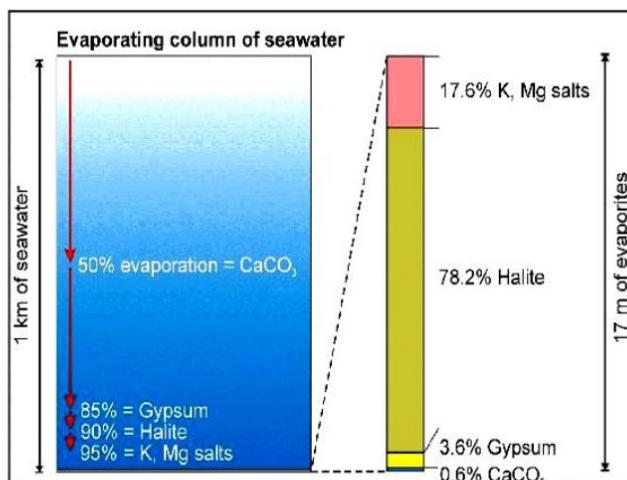


Figura 2: Coluna de evaporação da água do mar e precipitação dos principais evaporitos e os seus volumes. Retirado de HARRAZ (2015).

Tabela 3: Sequência de precipitação dos evaporitos a partir de evaporação de uma salmoura básica a 25°C (concentração é uma média da água dos mares). Valores extraídos de HARRAZ (2015). A tabela ilustra que com a sucessiva perda de água de um sistema hipotético, há um aumento da concentração dos íons na salmoura e estes começam a se precipitar para formar os evaporitos que seguem uma sequência de deposição similar a proposta por SONNENFELD (1984 *apud* JUSTEN, 2014).

Mineral	% Perda de Água em Relação a Salmoura inicial	Fator de Concentração dos Íons	Densidade da Salmoura (g/cm <sup>3</sup> )
Sais K-Mg	98,70%	63x	1,29
Halita	90,00%	11x	1,21
Gipsita	80,00%	5x	1,13
CaCO <sub>3</sub>	50,00%	2-3x	1,1
Água do Mar	0,00%	1x	1,04

Segundo GARDNER *et al.* (1974), os evaporitos salinos apresentam propriedades petroelásticas diferenciadas em relação aos demais tipos de rochas sedimentares. Sais possuem, em média, alta velocidade e baixa densidade, conforme valores apresentados no gráfico da Figura 3. Os valores destas propriedades variam conforme a composição química dos sais, sendo que os sulfatos apresentam valores petroelásticos maiores em relação aos cloretos. Já dentro do grupo dos cloretos, os sais de K e Mg correspondem às menores propriedades petroelásticas, enquanto a halita apresenta os maiores valores.

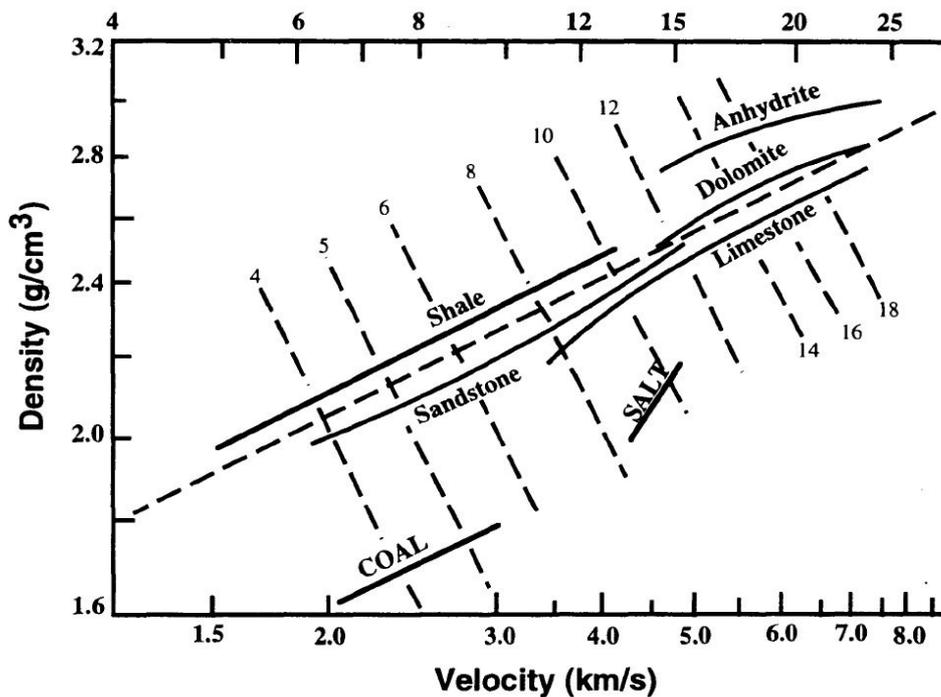


Figura 3: Relação de velocidade versus densidade para diferentes litologias (retirado de GARDNER *et al.*, 1974). As propriedades dos sais apresentam um grande desvio em relação a linha de tendência estimada para as demais rochas sedimentares.

Rochas sedimentares, geralmente, apresentam uma relação de aumento dos valores petroelásticos com a profundidade, devido aos efeitos de compactação, redução de porosidade, cimentação e diagênese. Contudo, esse comportamento não se apresenta da mesma forma com os sais, pois as propriedades de velocidades e densidade são quase constantes com o aumento da profundidade (MOHRIAK *et al.*, 2008; HEIDARI *et al.*, 2016; CORNELIUS & CASTAGNA 2018; TEIXEIRA & LUPINACCI, 2019). A razão para esta invariância das propriedades é que os sais se precipitam com porosidade inicial quase nula (Figura 4). Apenas a anidrita pode ter algum componente de compactação em função da profundidade, devido ao seu comportamento mais rúptil (MAUL *et al.*, 2018b).

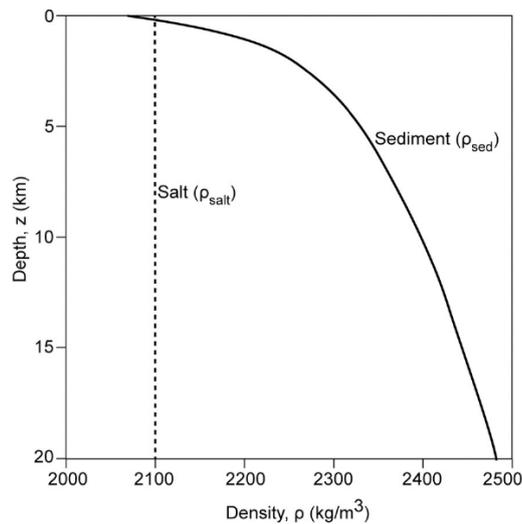


Figura 4: Valores de densidade em relação a profundidades. Com o aumento da profundidade, os sais apresentam uma densidade constante enquanto os demais sedimentos aumentam, principalmente, por conta da perda de porosidade com a compactação. Extraído de HEIDARI *et al.* (2016).

YAN *et al.* (2016) estudaram os impactos da temperatura e pressão nas velocidades compressional e cisalhante em amostras de halitas da região do Golfo do México (Tabela 4: ). Pelas análises, um aumento de 10 Mpa (100% de aumento) na tensão pouco impacta os valores de velocidades, com variação sempre inferior a 1%. No caso da temperatura, o seu aumento implicou em um acréscimo de cerca de 3%. Os autores também não constataram anisotropia nas amostras analisadas.

Tabela 4: Velocidade compressional (P) e cisalhante (S) medidas em laboratório sob diferentes condições de pressão e de temperatura. Nota-se que as velocidades pouco se modificam com a variação dos valores de pressão e temperatura.

Velocidade (m/s) em diferentes pressões (Mpa)							
T (°C)	Onda	5	10	20	30	40	50
23	P	4637	4643	4644	4647	4651	4654
	S	2561	2567	2569	2570	2572	2571
53	P	4595	4599	4603	4607	4610	4612
	S	2531	2539	2544	2546	2548	2551
83	P	4556	4562	4566	4569	4572	4575
	S	2518	2527	2530	2530	2534	2535
113	P	4514	4522	4526	4529	4534	4536
	S	2491	2502	2509	2509	2512	2510
143	P	4480	4488	4493	4497	4501	4504
	S	2466	2473	2478	2478	2480	2481

LANDRO *et al.* (2011) estimaram os parâmetros de anisotropia de THOMSEN (1986) em algumas amostras de halita de uma mina de sal na

Espanha. Os autores constataram a presença de anisotropia nos materiais analisados, contudo a mesma estava associada à presença de finos folhelhos presentes nas amostras e não ao comportamento da halita propriamente dita.

As medidas das propriedades petroelásticas dos sais por perfis elétricos podem apresentar dispersões relacionadas a fatores como: mistura de minerais, resolução da ferramenta ou a problemas operacionais (JUSTEN, 2014, CORNELIUS & CASTAGNA, 2018). Por esta razão, estes tipos de medições podem apresentar valores discrepantes em relação aos realizados sob condições mais controladas, como é o caso dos laboratórios. Estas possíveis diferenças nas aferições podem impactar nos valores apresentados no decorrer desta dissertação.

Ao longo dos últimos anos, uma série de trabalhos foram realizados com objetivo de caracterizar as propriedades petroelásticas dos sais presentes na Formação Ariri da Bacia de Santos. Estes estudos utilizavam informações de perfis elétricos, descrições de amostras de calhas, sísmica e de modelos de velocidades para fins de migração sísmica (AMARAL *et al.*, 2015; MENEGUIM *et al.*, 2015; GOBATTO *et al.*, 2016; GONZALES *et al.*, 2016; YAMAMOTO *et al.*, 2016; FALCÃO, 2017; TORIBIO *et al.*, 2017; TEIXEIRA *et al.*, 2017; MAUL *et al.*, 2018a, b; YAMAMOTO *et al.*, 2019; TEIXEIRA & LUPINACCI, 2019). A Tabela 05 apresenta os valores de velocidades estimados por alguns destes autores. Nos trabalhos de YAMAMOTO *et al.*, 2016, 2019 e MAUL *et al.*, 2018b, os autores optaram por agrupar as fácies salinas com base no comportamento das velocidades das mesmas:

01) Halita: representa o principal constituinte nesses estudos.

02) Sais de alta velocidade: este grupo englobava as anidritas e gipsitas.

03) Sais de baixa velocidade: nesta classe os principais constituintes são taquidrita, carnalita e silvita.

CORNELIUS & CASTAGNA (2018) analisaram as propriedades dos sais na região do Keathley Canyon (Golfo do México) utilizando perfis elétricos de 55 poços. Os autores estimaram a proporção de cada sal através do perfil de descrição litológica das amostras de calha (Tabela 5). As velocidades para cada

tipo de sal foram calculadas a partir dos perfis sônicos e depois foram realizados estudos estatísticos sobre os valores estimados.

Tabela 5: Síntese de alguns valores de velocidade compressional (m/s) para os sais encontrados em trabalhos publicados na literatura.

	Halita	Anidrita	Gipsita	Taquidrita	Carnalita	Silvita	Sais de Alta Velocidade	Sais de Baixa Velocidade
YAMAMOTO <i>et al.</i> (2019)	4530 ± 90						5350 ± 470	4195 ± 295
MAUL <i>et al.</i> (2018b)	4548 ± 223						5281 ± 493	4188 ± 249
MAUL <i>et al.</i> (2018a)	4550	6100	5810	3300	3910	3910		
CORNELIUS & CASTAGNA (2018)	4501 ± 8	6610 ± 63	5509 ± 88	-	-	3965 ± 110	-	-
YAMAMOTO <i>et al.</i> (2016)	4535 ± 281						4902 ± 375	4257 ± 222
AMARAL <i>et al.</i> (2015)	4560	6100	5470	3480	3930	4240	-	-
MENEGUIN <i>et al.</i> (2015)	4550 ± 200	5450 ± 400	-	3800 ± 200	4400 ± 250	-	-	-
CRAIN (2015)	4549	6096	5751	3313	3908	4119	-	-
JONES & DAVISON (2014)	4500	6500	5700	3500	3900	4110	-	-
MAVKO <i>et al.</i> (2009)	4500-4550	5640-6010	5800	-	-	3880	-	-
MOHRIAK <i>et al.</i> 2008	4549	6096	5806	-	3908	4119	-	-
FREITAS (2006)	4500-4550	5640-6010	5800	-	-	3880	-	-

TEIXEIRA & LUPINACCI (2019) realizaram estudos a respeito das propriedades petroelásticas dos sais da Formação Ariri, utilizando perfis de poços e sísmica. Os autores combinaram análises de física de rochas e inversão sísmica para interpretar, quantitativamente, o sinal associado às amplitudes das intercalações dos sais. Também estimaram os valores dos módulos de Young e Poisson através da densidade, velocidade compressional e cisalhante.

## 2.2 Tipos de Bacias Evaporíticas

Segundo WARREN (1989), bacias evaporítica são identificadas desde o Proterozóico até o recente. O modelo de sedimentação dos evaporitos mais aceito, atualmente, é de bacias sedimentares isoladas por barreiras naturais, que inibiam a troca de salmoura com os oceanos. O mesmo autor classificou as bacias evaporíticas em três tipos, de acordo com profundidade do fundo da estrutura e da altura da lâmina de água (Figura 5).

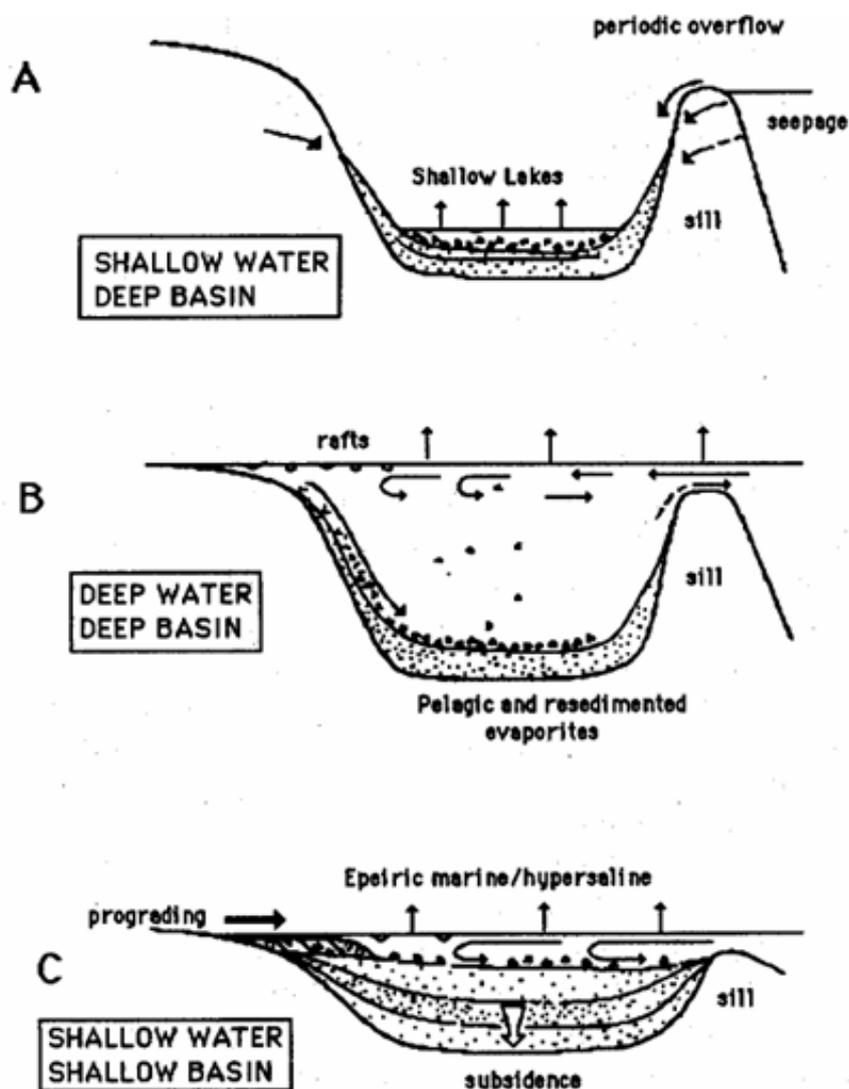


Figura 5: Modelos de bacia proposto por WARREN (1989) A) Bacia profunda e nível de água raso; B) Bacia profunda e nível de água profundo; C) Bacia rasa e nível de água raso.

O primeiro modelo se caracteriza por ser uma bacia profunda e nível d'água raso. Neste caso, a bacia estaria isolada do oceano por algum tipo de barreira, dificultando o aporte de água ao sistema e, conseqüentemente, conservando a lâmina d'água baixa. A entrada de água na bacia poderia ser o resultado de variações eustáticas do nível do mar ultrapassando, assim, a sua barreira natural.

Outro modelo proposto foi o de bacia e lâmina d'água profunda. Neste caso, os evaporitos se formariam na interface água-ar e se precipitariam no fundo da bacia. A ocorrência de depósitos evaporíticos com alta continuidade, tanto vertical como lateral, e com seus ciclos internos de deposição bem

demarcados, seria a principal evidência deste tipo de modelo. Contudo, não existem análogos modernos para este modelo o que dificulta na sustentação científica do mesmo.

O terceiro modelo foi caracterizado como sendo uma bacia rasa e nível de água raso, onde a fisiografia do fundo da bacia estaria baixo do início ao fim. A constante subsidência do depocentro da bacia geraria espaço de acumulação para os evaporitos. Este tipo de deposição estaria ligado aos riftes e estaria marcado na base por uma sequência continental (folhelhos orgânicos).

### 2.3 Propriedades Mecânica e Tectônica do Sal

Rochas quando submetidas a um campo de tensões (*stress* -  $\sigma$ ) sofrem algum tipo de deformação (*strain* -  $\epsilon$ ). A deformação pode ser definida como a alteração de uma geometria inicial para uma forma final por meio de rotação ou translação de um corpo rígido, deformação interna (*distortion, strain*) e/ou mudança de volume (FOSSEN, 2012). A tensão é a relação da intensidade de uma força pela área aplicada. A forma com que estas grandezas se relacionam é descrita pela lei de Hooke:

$$\sigma = k \cdot \epsilon \quad (1)$$

onde  $k$  é a constante elástica,  $\sigma$  a tensão (força/área a unidade é o Pascal),  $\epsilon$  a deformação (adimensional)

O tipo de deformação dos corpos é função da resistência mecânica da rocha, da intensidade das tensões e do tempo de deformação. Uma rocha sob a ação de diferentes forças estará em equilíbrio quando a soma vetorial do campo de tensões for igual a zero (ZOBACK, 2007, SCHON, 2016).

As deformações resultantes sobre um corpo podem ser classificadas em três tipos: elástica, plástica/dúctil e rúptil. A deformação elástica é aquela em que removidas as tensões atuantes sobre o corpo, o mesmo recupera a sua forma e volume original. A deformação plástica é aquela em que cessados os esforços, não há recuperação da forma inicial. Por fim, a deformação rúptil ocorre a partir de um determinado ponto onde o material não consegue comportar mais as tensões e acaba por se romper (SCHON, 2016).

No campo da mecânica dos materiais, os estudos das tensões aplicadas e das conseqüentes deformações dos corpos são realizados com base no diagrama de tensão e deformação (ZOBACK, 2007; SCHON, 2016). De acordo com estes autores o comportamento dos materiais durante uma deformação pode ser exemplificado pela Figura 6. Até o ponto A, a relação entre esforço/deformação é linear, o material se comporta elasticamente e a Lei de Hooke consegue refletir bem esse comportamento. O ponto B é o limite do comportamento elástico/plástico. Do ponto C até o E o corpo entra no regime de deformação plástica, ou seja, quando cessado a tensão o material não retorna ao seu estado original. Por fim, a partir do ponto E (ponto de ruptura), o corpo apresenta um comportamento rúptil.

O gráfico apresentado na Figura 6 exemplifica o comportamento de alguns materiais durante a deformação, contudo rochas/minerais sob a ação de tensões geológicas apresentam um maior grau de complexidade em suas deformações, resultando assim em comportamentos diferentes ao apresentado pelo diagrama.

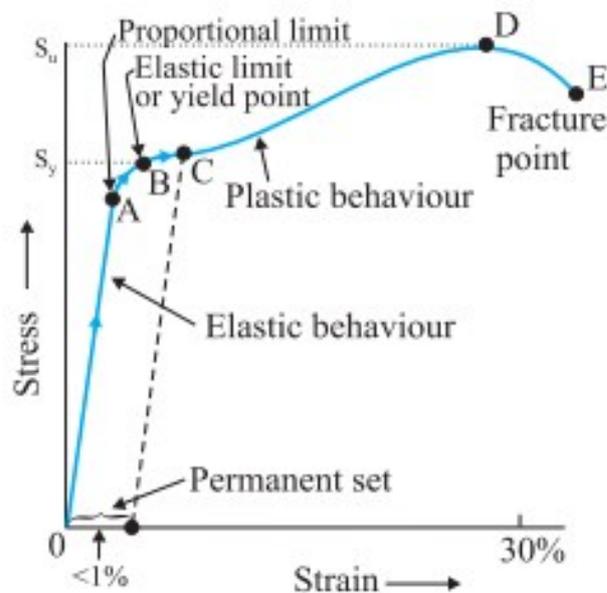


Figura 6: Diagrama padrão para analisar as tensões (eixo y) e deformações (eixo x) sobre materiais submetidos a condições controladas de laboratório (Retirado de TOPPR, 2019).

As principais propriedades elásticas de deformação são os módulos de Young ( $E$ ) e Poisson ( $\nu$ ). Já os parâmetros de rigidez são dados pelo módulo volumétrico (*Bulk- K*), cisalhante ( $G$ ) e rigidez uniaxial ( $M$ ). Este último possui

pouca importância nos estudos de resistência de materiais e não será discutido neste trabalho.

O módulo de Young é a relação entre tensão axial e a deformação axial num material sob o regime elástico:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/W \cdot L}{\Delta L/L}, \quad (2)$$

$W$  e  $L$  são comprimentos dos corpos na direção  $x-y$ ,  $F$  a força aplicada sobre o material e  $\Delta$  representa a variação de alguma medida. Na Figura 6,  $E$  representa o coeficiente angular da reta definida pela origem e o ponto A.

O módulo de Poisson ( $\nu$ ) é definido como a mudança relativa do raio dividido pela mudança relativa de comprimento axial, ou seja, é a razão entre a deformação transversal com a longitudinal (MAVKO *et al.*, 2009):

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} = \frac{\Delta W/W}{\Delta L/L}, \quad (3)$$

O módulo de compressibilidade é a razão entre a tensão hidrostática (que também é conhecida como pressão -  $P$ ) pela deformação volumétrica ( $\Delta V/V$ ), ou seja, é o comportamento da variação do volume sob um campo de tensões isotrópico:

$$K = \frac{P}{\Delta V/V}, \quad (4)$$

O módulo de cisalhamento (Eq. 5) é definido como a razão entre a tensão de cisalhamento e a deformação ao cisalhamento do corpo de prova (MAVKO *et al.*, 2009):

$$G = \frac{F/W L}{\Delta L/L}, \quad (5)$$

sendo  $F$  a força aplicada em Newton. O sinal negativo na Eq. 3 é adotado por conta que as deformações longitudinais e transversais possuem sinais contrários. A Figura 7 representa uma esquematização das deformações em relação as tensões atuantes no corpo de prova.

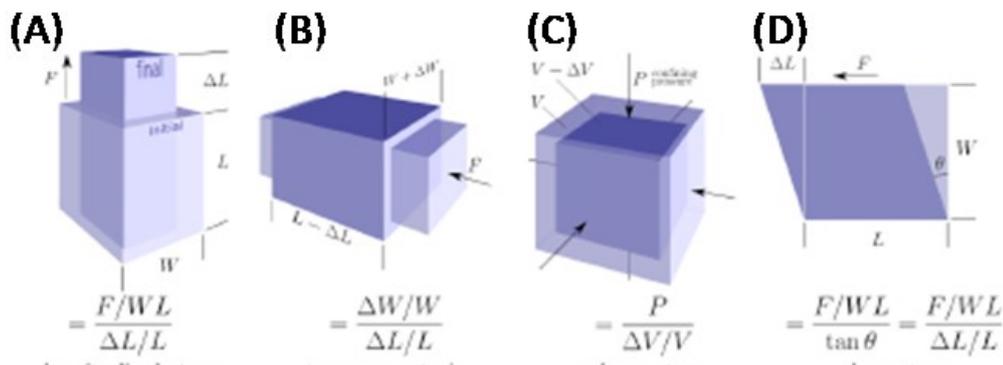


Figura 7: Desenho esquemático dos módulos mecânicos. A) módulo de Young, B) módulo de Poisson, C) módulo de Compressibilidade (Bulk) e D) módulo de cisalhamento. Figura retirada de BIANCO (2011).

Propriedades como densidade e velocidades compressional e cisalhante são amplamente empregadas para calcular propriedades mecânicas de rochas por terem relação física com as propriedades de resistência e deformabilidade (ZOBACK, 2007). Estas relações são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: quadro da relação entre as propriedades petroelásticas e os módulos de deformação e rigidez. Na tabela aparece o primeiro parâmetro de Lamé que não foi discutido nesta dissertação. (Tabela retirada de BIANCO, 2011).

Elastic parameters	$E$ Young's modulus [kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-2</sup> ]	$\nu$ Poisson's ratio [dimensionless] aka $\sigma$	$K$ bulk modulus [kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-2</sup> ] aka volumetric modulus	$\mu$ shear modulus [kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-2</sup> ] aka rigidity, $G$	$\lambda$ 1st Lamé parameter [kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-2</sup> ] aka incompressibility	$V_p$ P-wave velocity [m/s] aka compressional vel	$V_s$ S-wave velocity [m/s] aka shear velocity	$\Gamma$ $V_p/V_s$ ratio [dimensionless]
Engineers... ( $E, \nu$ )			$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	$\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$\sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$	$\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$	$\sqrt{\frac{1-\nu}{\frac{1}{2}-\nu}}$
Fluid substitution... ( $K, \mu$ )	$\frac{9K\mu}{3K+\mu}$	$\frac{3K-2\mu}{2(3K+\mu)}$			$K - \frac{2}{3}\mu$	$\sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\mu}}$
Rock physicists... ( $\mu, \lambda$ )	$\frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}$	$\frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$	$\lambda + \frac{2}{3}\mu$			$\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\mu}}$
Geophysicists... ( $V_p, V_s$ )	$\rho V_s^2 \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}$	$\frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$	$\rho \left( V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2 \right)$	$\rho V_s^2$	$\rho (V_p^2 - 2V_s^2)$			$\frac{V_p}{V_s}$

As medições realizadas por perfis elétricos podem ser utilizadas nos cálculos dos módulos mecânicos. Contudo, há uma diferença dessas estimativas (módulos dinâmicos) com os valores obtidos através de testes mecânicos em laboratório sobre algum corpo de prova (módulos estáticos). A principal diferença entre os dois métodos é que os testes laboratoriais possuem medições com grandes intervalos de tempo, enquanto que os valores aferidos por perfis elétricos são obtidos quase que instantaneamente. Para rochas, em geral, os

valores dos módulos dinâmicos são maiores do que os estáticos (ZOBACK, 2007; SCHON, 2016).

O tipo e grau de deformação nas rochas podem apresentar variações em razão do campo de tensões atuantes, profundidade que as forças foram aplicadas e o comportamento reológico dos materiais. A depender dos fatores citados, as rochas podem se deformar de modo plástico, elástico, rúptil ou permanecerem inalteradas caso consigam resistir aos esforços a qual estejam submetidas. Normalmente, rochas sujeitas a tensões em condições de baixa pressão e temperatura, tendem a se deformar rúptilmente, gerando estruturas como falhas e fraturas. Já rochas submetidas a campos de tensões em profundidades maiores, tendem a se deformar de modo plástico/elástico, podendo formar estruturas típicas de zonas de cisalhamento (FOSSEN, 2012).

Além da complexidade reológica das rochas, temos que os campos de tensões atuantes sobre diferentes bacias podem apresentar uma complexidade associado a variabilidade dos processos geológicos (compressão, distensão entre outros) atuantes ao longo do espaço e tempo geológico (ZOBACK, 2007).

As disciplinas da geologia que estudam os estados de tensão e as deformações que elas provocam são a tectônica (estrutura numa escala maior) e a geologia estrutural (estruturas numa escala menor). Caso as deformações tenham ocorrido em rochas evaporíticas, temos a denominação de halocinese, tectônica salífera ou ainda tectônica do sal. A tectônica do sal pode estar associada tanto a regimes distensivos como compressivos (MOHRIAK *et al.*, 2008).

Anidrita e gipsita apresentam comportamento mecânico diferente em relação aos demais tipos de sais. DE PAOLA *et al.* (2009) realizaram testes mecânicos em amostras de anidrita e constataram um comportamento rúptil sob tensões de até aproximadamente 20 Mpa e dúctil acima desses valores (Figura 8).

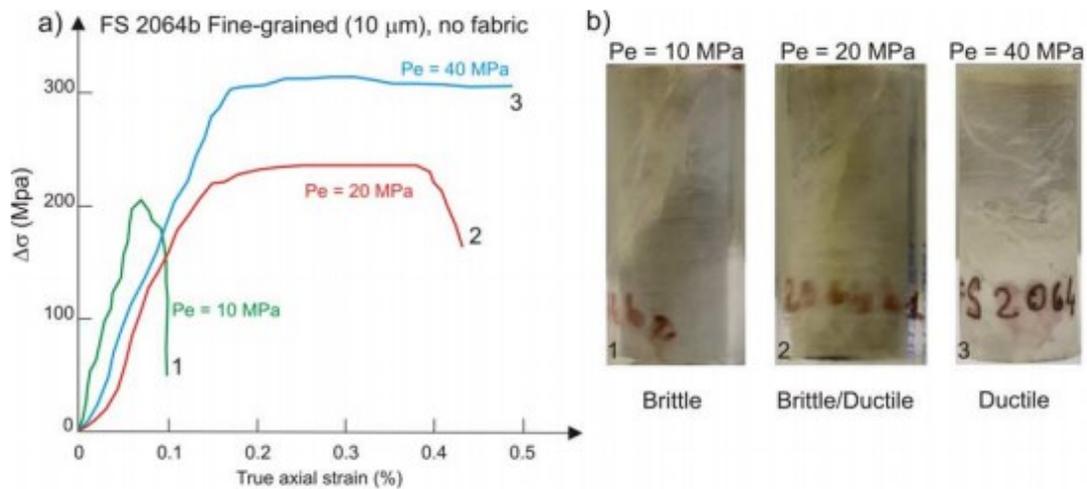


Figura 8: Gráfico de tensão (eixo y) por deformação (eixo x) nas amostras analisadas por DE PAOLA *et al.* (2009). Os testes foram triaxiais e testaram uma faixa de tensão efetiva de 10, 20 e 40 Mpa. Após os 20Mpa a anidrita passa de um comportamento rúptil para dúctil/ plástico.

A halita é um material com comportamento viscoso, ou seja, possui baixa fluência o que resulta numa lenta mobilização. Este mineral também possui comportamento plástico, conforme mencionado anteriormente. Por conta destas duas propriedades, halita é considerada um material viscoplástico (SENSENY *et al.*, 1992; WEIJERMARS *et al.*, 1993; MUNSON, 1997). LIANG *et al.* (2007) realizaram testes de tensões triaxiais em amostras de sais e constataram o comportamento dúctil/plástico para as halitas e rúptil nas anidritas (Figura 9).

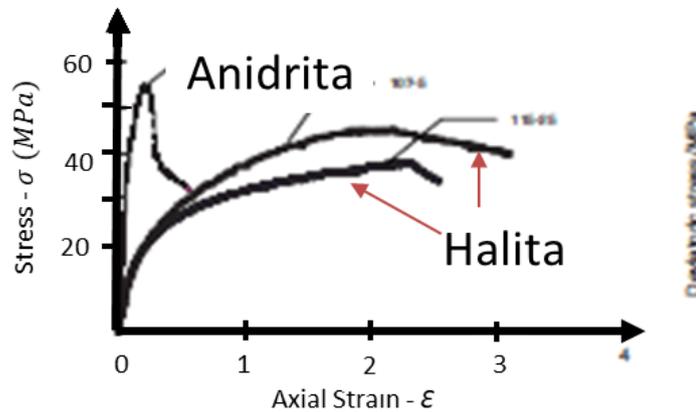


Figura 9: Gráfico de tensão (eixo y) por deformação (eixo x) em amostras analisadas por LIANG et al. (2007). Nota-se que a halita se deforma plasticamente enquanto a anidrita ruptilmente. Outro fato a se destacar é a ausência de um comportamento linear no início da deformação, como o ilustrado na Figura 06, demonstrando assim que rochas, no geral, possuem heterogeneidades em seus módulos mecânicos (modificado de LIANG *et al.*, 2007).

HUDEC & JACKSON (2007) realizaram estudos a respeito do comportamento mecânico dos sais em bacias evaporíticas, no referido trabalho a halita era o mineral predominante. Os autores constataram que sais possuem um comportamento mecânico singular em relação aos outros tipos de sedimentos, esta característica única é resultante de sua menor densidade em comparação aos demais sedimentos. Como resultado, bacias salíferas tendem a se deformar mais facilmente do que os demais tipos, com efeitos significativos para a tectônica e geomecânica. Camadas salíferas tendem a fluir de regiões com maiores sobrecargas para as menores, normalmente, esta movimentação ocorre em direção as regiões onde a espessura dos pacotes sedimentares subjacentes aos evaporitos são menores. Segundo MOHRIAK *et al.* (2008), as camadas salíferas da Formação Ariri se movimentaram em direção as águas profundas.

Ainda segundo HUDEC & JACKSON (2007), há três tipos possíveis de sobrecarga atuantes em bacias sedimentares que podem resultar na movimentação do sal: a sobrecarga gravitacional, a sobrecarga por deslocamento e a sobrecarga térmica. A sobrecarga gravitacional é resultante da combinação entre o peso dos sedimentos depositados acima do sal e as forças de corpo atuantes dentro do sal (Figura 10). A sobrecarga por deslocamento é derivada do deslocamento forçado de uma camada em relação

a outra (Figura 11). A sobrecarga térmica ocorre quando há alteração do volume de rocha ocasionado por mudanças na temperatura.

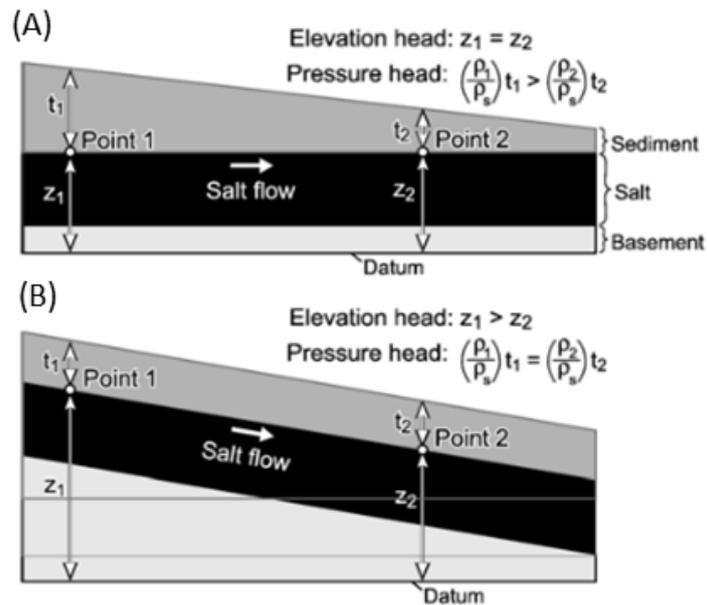


Figura 10: Exemplos de sobrecarga gravitacional sobre os sais: (A) Carga sobrejacente com espessura variante, o sal tende a fluir do ponto 1 para o 2; (B) Neste caso as camadas estão mergulhantes e o pacote acima do sal possui espessura constante, contudo por conta desse mergulho se cria um gradiente de tensão e o sal flui do ponto 1 para o 2. Retirado de HUDEC & JACKSON, 2007.

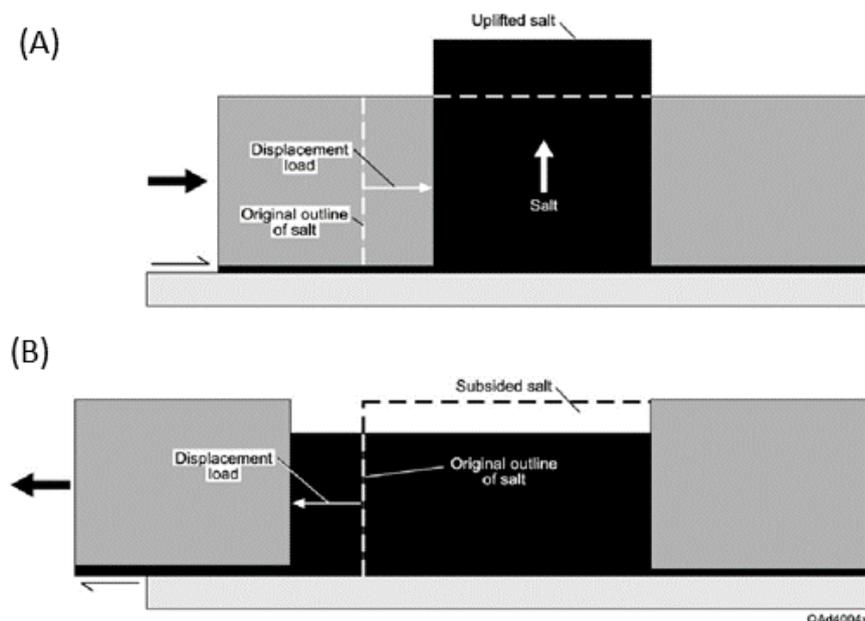


Figura 11: Diagrama ilustrando o efeito de deslocamento nos sais. (A) Durante um encurtamento a tensão lateral é maior que a vertical, fazendo com que o sal flua para fora da superfície do sedimento. (B) Na extensão a carga gravitacional excede a tensão horizontal, tornando o pacote salífero menos espesso. Retirado de HUDEC & JACKSON (2007).

Segundo FOSSEN (2012), a halocinese atuante sobre os evaporitos podem resultar nas mais diversas feições geológicas (Figura 12). As estruturas formadas durante a movimentação do sal podem exibir dimensão que variam desde a escala regional (com dezenas de quilômetros quadrados) até outras mais locais, contemplando poucos metros. Entre essas estruturas destacam-se:

- (i) Domos de sal, que são corpos de grande dimensão que podem estar concordantes ou não com as camadas sobrejacentes;
- (ii) Diápiro de sal, que é o termo utilizado para uma grande estrutura que flui intrudindo as rochas suprajacentes, podendo ocorrer em diferentes geometrias;
- (iii) Muralhas de sal, que são diápiros mais alongados, geralmente dispostos transversalmente à direção de extensão da bacia.

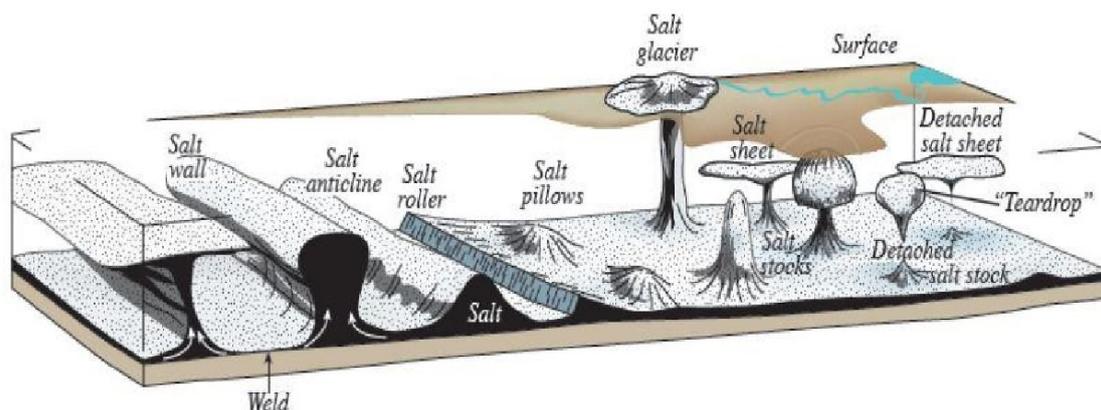


Figura 12: Estruturas formadas em ambientes evaporíticos. Retirado de FOSSEN (2012).

Um importante conceito utilizado na literatura é quanto ao posicionamento original da sedimentação do sal. O termo “sal autóctone” é utilizado quando o corpo se encontra em sua posição original de precipitação, já o termo “sal alóctone” é utilizado para ilustrar sais que estão depositados distantes em relação ao posicionamento inicial de sua precipitação, geralmente intrudindo pacotes sedimentares mais novos (FOSSEN, 2012).

## 2.4 A Importância do Sal

O sal desempenha um papel importante em atividades da exploração e produção de alguns campos de hidrocarbonetos ao redor do mundo. A movimentação de evaporitos podem exercer forte influência sobre a

posicionamento dos sedimentos encaixantes, ser um possível selo de reservatórios, como é o caso do Polo Presal da Bacia de Santos (MOHRIAK *et al.*, 2008). Além disso, sua propriedade de condutividade térmica pode ser essencial no processo de maturação de rochas geradoras e, conseqüentemente, na geração de hidrocarbonetos (MOHRIAK *et al.*, 2008, MUBARAK *et al.*, 2009).. A caracterização dos tipos de sais e suas propriedades mecânicas são importantes para estudos geomecânicos de reservatórios (SAYERS & SCHUTJENS, 2007, ZOBACK, 2007) e para o quadro de previsão geológica utilizado pela equipe de acompanhamento de poços (COSTA *et al.*, 2011).

Nos últimos anos inúmeros trabalhos foram publicados a respeito da construção de modelos de velocidades para o intervalo da seção evaporítica da Bacia de Santos (MAUL *et al.*, 2015; 2018 a b; JARDIM *et al.*, 2015; GOBATTO *et al.*, 2016; GONZALES *et al.*, 2016; YAMAMOTO *et al.*, 2016; FALCÃO *et al.*, 2016; 2017; BARROS *et al.*, 2017; FONSECA *et al.*, 2018; DIAS *et al.*, 2019). Em resumo, estes estudos constataram que modelos de velocidades oriundos de tomografia sísmica não contemplam de forma satisfatória as feições geológicas presentes na Formação Ariri. Estes autores discutem como incorporar as estratificações presentes na seção salina utilizando as informações de perfis de poços, atributos sísmicos e física de rochas para a atualização dos modelos de velocidades para fins de migração sísmica ou como modelo inicial para iterações tomográficas ou FWI – *Full Waveform Inversion*. Os volumes de velocidades obtidos por estes estudos, apresentam caráter mais geológico e também resultam em imagens sísmicas mais adequadas em razão do melhor alinhamento de gathers e menores erros entre as profundidades previstas pela sísmica com as constatadas por poços (*misties*). A Figuras 13.A, 13.B, 13.C e 13.D apresentam alguns dados utilizados por MAUL *et al.* (2018b) para a atualização do modelo de velocidades em uma porção da Formação Ariri (Figura 13.E).

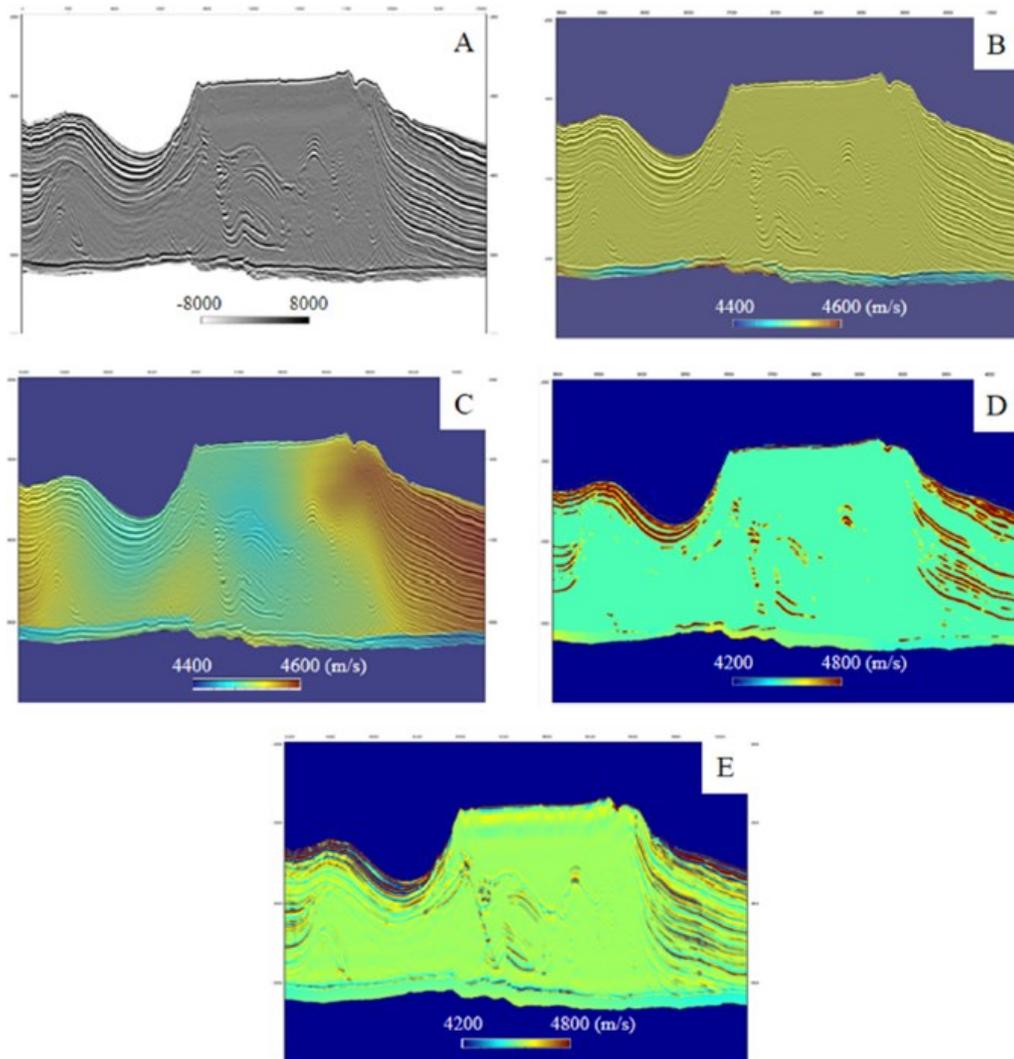


Figura 13: (A) Seção sísmica (amplitude) de uma porção da Bacia de Santos; (B) velocidade intervalar constante; (C) modelo de velocidades resultante de tomografias de tempo de trânsito; (D) modelo de velocidades gerado a partir da resposta sísmica (amplitude); (E) modelo de velocidades utilizando a inversão sísmica como entrada (retirado de MAUL *et al.*, 2018b).

## 2.5 Contexto Geológico da Bacia de Santos

A formação da Bacia de Santos ocorreu a partir dos processos geológicos que culminaram com a ruptura do supercontinente conhecido como Gondwana, durante o Cretáceo (WHITE & MACKENZIE, 1989). A partir de um determinado estágio de abertura deste supercontinente, um protoceano se instalou, propiciando o espaço de acomodação para os sedimentos evaporíticos da Formação Ariri, objeto de estudo desta dissertação.

Segundo MOREIRA *et al.* (2007), a evolução tectonoestratigráfica da Bacia de Santos pode ser dividida em três Superseqüências: rifte, pós-rifte e drifte (Figura 14). Rochas do pré-cambriano da Faixa Ribeira formaram o embasamento da bacia. O espaço de acomodação dos sedimentos destas seqüências foi gerado a partir da subsidência relacionada aos esforços distensivos que resultaram na ruptura do Gondwana.

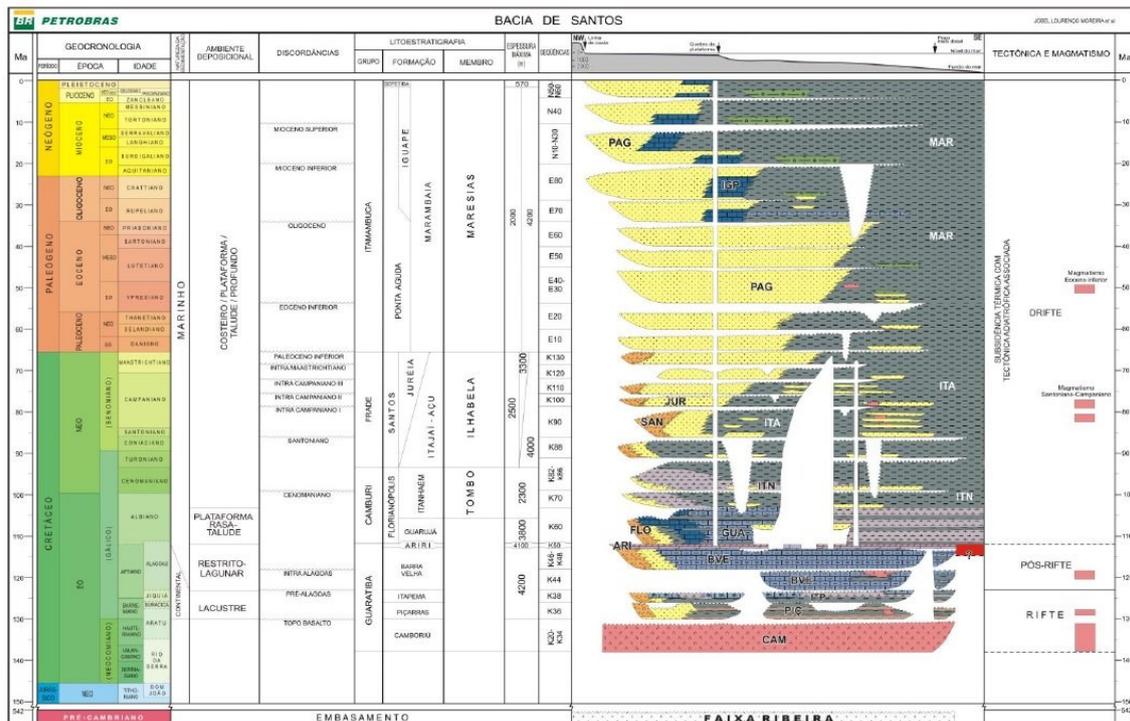


Figura 14: Coluna estratigráfica da Bacia de Santos (Fonte: Moreira *et al.*, 2007).

A fase rifte se estendeu do Hauteriviano ao Aptiano e é representada pelas formações Camboriú, Piçarras e Itapema (Grupo Guaratiba Inferior). A seção rifte teve sua origem no afinamento crustal, o que ocasionou um intenso magmatismo basáltico, representado pela Formação Camboriú (CHANG *et al.*, 1992).

A Formação Camboriú marca o começo do rifte e é composta, basicamente, por derrames basálticos. Sobre este repousam, discordantemente, os sedimentos da Formação Piçarras, representados por conglomerados e arenitos de leques aluviais nas porções proximais a sua área fonte e por intercalações entre pelitos (silte e argila) com arenitos lacustres nas porções mais distais. A fase final do rifte é representada pela Formação Itapema que é composta por carbonatos e folhelhos escuros (MOREIRA *et al.*, 2007).

A supersequência pós-rifte, onde se encontra o objeto deste estudo, se estende entre Aptiano e o Albiano e abrange as formações Barra Velha e Ariri (Grupo Guaratiba Superior), que foram depositadas em um ambiente transicional entre o continental e marinho raso. A Formação Barra Velha é uma sequência depositada em um ambiente extenuante e corresponde aos principais reservatórios do “Polo Presal da Bacia de Santos”. Esta formação é constituída principalmente por carbonatos microbiais, estromatólitos, laminitos e grainstones (MOREIRA *et al.*, 2007).

Provavelmente ao final do Aptiano, houve um período de intensa aridez associado à barreiras fisiográficas representadas pela Dorsal de São Paulo e pelo Alto de Florianópolis, que resultou na deposição do espesso pacote evaporítico denominado de Formação Ariri do Grupo Guaratiba (GAMBOA *et al.*, 2008). Os evaporitos, com espessuras de até 2000 m no Platô de São Paulo, correspondem a um evento cuja duração foi estimada em cerca de 0,6 Ma, o que corresponde a uma sequência de quarta ordem (Dias, 2004). A idade de deposição dos evaporitos da Bacia de Santos é de difícil definição. Alguns estudos revelam que a sedimentação pode ter ocorrido entre 10 e 0,4 Ma (DIAS, 2004. FREITAS, 2006; KARNER & GAMBOA, 2007; MOREIRA *et al.*, 2007).

Estudos sugerem que a conexão com o oceano aberto se dava na porção sul, onde uma barreira composta pelo Alto do Rio Grande e Platô de São Paulo confinou o Atlântico Sul que, naquela época, estava em franco desenvolvimento. Havia entrada recorrente de água do mar, que associada a paleofisiografia local forneceu as condições necessárias para a deposição e preservação dos evaporitos salinos. Estas barreiras se formaram durante o vulcanismo Paraná (Barremiano) e atuaram na restrição da circulação da salmoura antes que as condições de mar aberto fossem restabelecidas no Albiano, retomando a formação de evaporitos carbonáticos (KARNER & GAMBOA, 2007; MOREIRA *et al.*, 2007; GAMBOA *et al.*, 2008; DAVISON *et al.*, 2012).

Inundações da plataforma continental foi responsável pela origem dos sedimentos siliciclásticos representados pelas Formações Santos, Juréia e Itajaí-Açu. A progradação originada pela incursão de sedimentos e a subsidência térmica talvez tenham sido os principais responsáveis pela deformação e

deslocamento dos evaporitos em direção ao depocentro da bacia, concomitante com o desenvolvimento da Falha de Cabo Frio (GAMBOA *et al.*, 2008).

A Formação Ariri apresenta alta complexidade estrutural, podendo-se mencionar: muralhas, diápiros, troncos e almofadas. Os processos de formação dessas estruturas estão relacionados, principalmente, a tectônica salina (halocinese) e esforços extensionais que atuaram durante a formação da Bacia de Santos (GAMBOA *et al.*, 2008).

FREITAS (2006) dividiu a Formação Ariri em duas zonas: a primeira dominada por estruturas de domos e muralhas de sal, com uma halocinese intensa e a segunda onde os evaporitos ocorrem estratificados e/ou em forma tabular, com uma tectônica salífera menos intensa. Na primeira zona, a halocinese teria sido desencadeada pelo gradiente inclinado do substrato e os esforços foram predominantemente distensivos. Esse processo foi resultante dos fluxos de regiões de alta pressão (energia) para os de baixa pressão.

A halita corresponde ao sal predominante na Formação Ariri, constituindo entre 80% a 90% dos minerais presentes (GAMBOA *et al.*, 2008; AMARAL *et al.*, 2015; YAMAMOTO *et al.*, 2016). Outros minerais tais como taquidrita, carnalita, silvita, gipsita e anidrita também ocorrem na Formação Ariri, porém em menores proporções. Segundo GAMBOA *et al.* (2008), estes sais se intercalam com a halita formando ciclos bem definidos, respondendo às características do ambiente e percentagem de íons dissolvidos na salmoura. Também há registros, a partir de informações de poços, de ocorrências de rochas vulcânicas. Entretanto, estes tipos de rochas correspondem a uma proporção marginal em relação aos sais, e não serão discutidos ao longo do texto.

FREITAS (2006) correlacionou dois poços da Bacia de Santos e concluiu que pacotes evaporíticos com predomínio de halita e sais como carnalita e taquidrita se espessam em direção à bacia oceânica, enquanto evaporitos com maior proporção de sulfatos se espessam em direção ao continente (Figura 15). O autor interpreta que este padrão é resultante do menor grau de salinidade associado a regiões proximais ao paleocontinente. Estas porções sofreram com a entrada periódica de água doce no sistema, resultando em uma menor concentração de íons na salmoura e, conseqüentemente, diminuiu a taxa de precipitação dos sais solúveis.

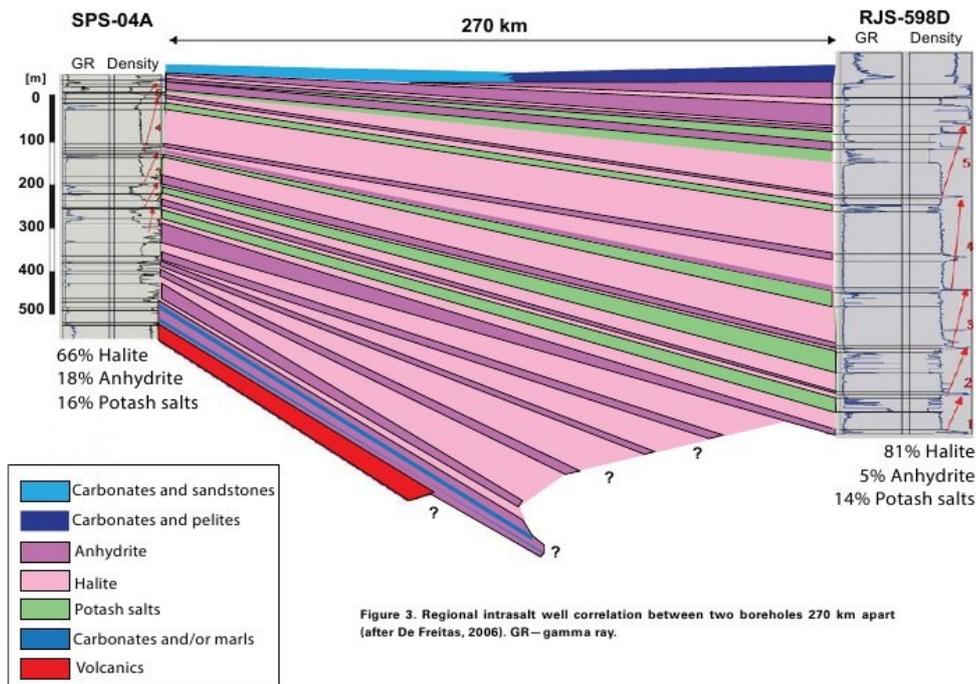


Figura 15: Correlação de sais entre dois poços da Bacia de Santos. Retirado de FREITAS (2006) *apud* RODRIGUEZ *et al.* (2018).

MAUL *et al.* (2018b) propuseram uma divisão para as formas de ocorrência dos sais da Formação Ariri, baseado em padrões de fácies sísmica e proporção dos evaporitos constatados nos poços da área de estudo. O primeiro foi denominado “domínio sem estratificação” e se caracteriza pela ausência de reflexões sísmica e predomínio da halita com ou sem intercalações com outros sais. O segundo foi chamado de “domínio francamente estratificado” representado por regiões com uma intensa alternância de refletores na sísmica. Os poços utilizados nesta análise também apresentaram intercalações entre a halita e os demais sais presentes na bacia. Os autores interpretam que a sobrecarga dos *rafts* carbonáticos do Albiano provocaram a mobilização de parte dos sais solúveis (mostrada também por HUDEC & JACKSON, 2007). O terceiro foi denominado como “domínio com estratificações aleatórias” e consiste em estratificações caóticas provocadas pela mobilização dos sais. Por fim, denominam o último padrão de “domínio com estratificações escondidas” e o caracterizam como sendo regiões com a presença de intercalações de sais nos poços, contudo a sísmica não exibe reflexões associadas ao contraste entre as camadas dos sais.

GAMBOA *et al.* (2008) e RODRIGUEZ *et al.* (2018) definiram quatro sequências evaporíticas baseadas em informações de sísmica e poços. A primeira sequência exibiu fácies sísmica homogênea, grande espessura e é composta predominantemente por halita, o qual foi denominado “Pacote Espesso de Halita” por GAMBOA *et al.* (2008) e A1 por RODRIGUEZ *et al.* (2018). A segunda sequência apresenta uma fácies sísmica estratificada resultante da alternância entre halita, anidrita e sais complexos (carnalita, taquidrita e silvita) e corresponde ao “Pacote Estratificado Formado por Camadas de Sais Diversos” de GAMBOA *et al.* (2008) e A2 de RODRIGUEZ *et al.* (2018). A terceira sequência também é constituída predominantemente de halita, porém mais delgada em relação ao primeiro ciclo, sendo denominada de “Pacote Delgado de Halita” por GAMBOA *et al.* (2008) e A3 por RODRIGUEZ *et al.* (2018). Por fim, a quarta sequência é demarcada por uma fácies estratificada na sísmica resultante da intercalação entre anidrita e halita. O topo da seção é demarcado por uma anidrita contígua em toda a Formação Ariri, esta última sequência foi denominada de “Pacote Superior Composto por Anidrita e Halita” por GAMBOA *et al.* (2008) e A4 por RODRIGUEZ *et al.* (2018). A Figura 16 apresenta os padrões reconhecidos em cada ciclo por RODRIGUEZ *et al.*, 2018.

FIDUK & ROWAN (2012) dividiram os ciclos salinos em seis sequências, três das quais foram denominados como “beam” e as demais como zonas de descolamento (*detachment zone*). As três zonas de *beam* possuem reflexões contínuas que intercalam entre si, já as zonas de descolamento são regiões onde não ocorrem refletores ou, quando estes se manifestam, são pouco contínuos, possuindo baixos valores de amplitude (Figura 17). Um resumo da denominação e característica de cada sequência está expresso na Tabela 7.

Tabela 7: Ciclos salinos interpretados na Bacia de Santos segundo GAMBOA *et al.* (2008), FIDUK; ROWAN (2012) e RODRIGUEZ *et al.* (2018).

	Ciclo Salinos	
	Gamboa <i>et al.</i> (2008)	Fiduk & Rowan (2012)
Pacote Superior Composto por Anidrita e Halita	Beam 1	A4
Pacote Delgado de Halita	Detachment 1	A3
Pacote Estratificado Formado por Camadas de Sais Diversos	Beam 2	A2
Pacote Espesso de Halita	Detachment 2	A1
	Beam 3	
	Detachment 3	

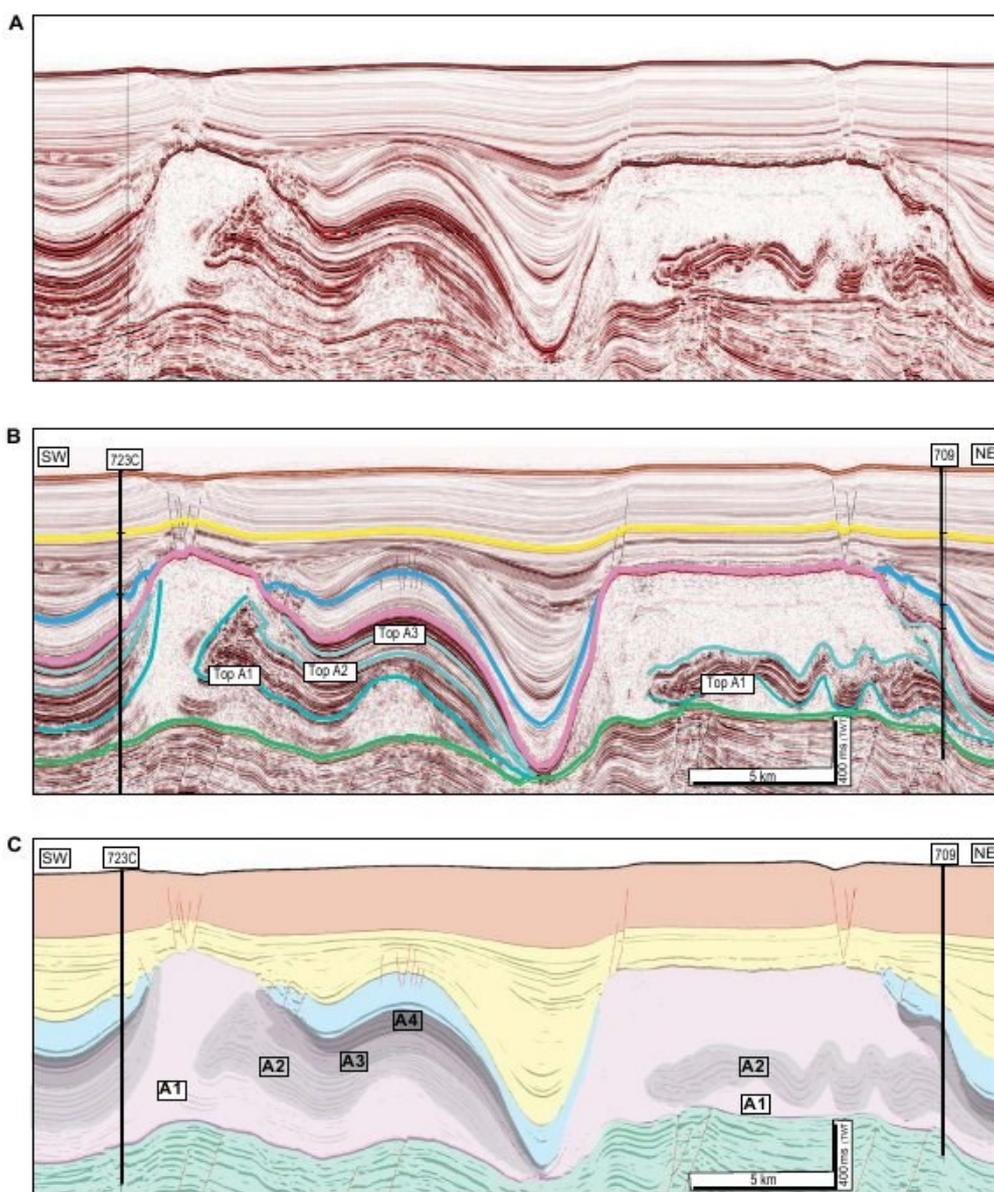


Figura 16: Seção sísmica arbitrária entre dois poços da Bacia de Santos (A), a mesma seção com os ciclos interpretados (B) e seção geológica (C). Retirado de RODRIGUEZ *et al.* (2018).

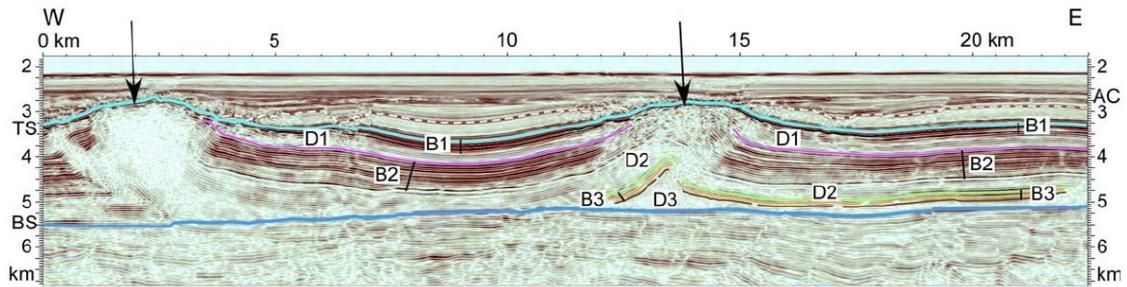


Figura 17: Seção sísmica arbitrária da Bacia de Santos mostrando a interpretação realizada por FIDUK & ROWAN (2012) ilustrando seis ciclos interpretados (três zonas de *detachment* e três zonas de *beam*).

Por fim, a fase drifte se iniciou com a deposição dos carbonatos Albianos da Formação Guarujá, que são sedimentos de uma fase marinha mais profunda, evoluindo para um afogamento contínuo da bacia. Com o soerguimento da Serra do Mar, há um grande influxo de sedimentos siliclásticos das Formações Santos, Juréia e Itajaí- Açú. A entrada dessa grande carga sedimentar foi a principal responsável pela movimentação do sal da Formação Ariri (MOREIRA *et al.*, 2007).

### 3. SÍSMICA

A partir dos anos 30, a sísmica de reflexão começou a ser utilizada como método para prospecção de petróleo. Os primeiros equipamentos de registro eram analógicos e as fontes mais comuns utilizadas na geração das ondas sísmicas eram as dinamites. Desde então, os equipamentos foram continuamente aprimorados. Atualmente, temos os mais diversos tipos de fontes tais como *airguns* e *vibroscis*, e receptores geofones, hidrofones e *nodes*.

Nos levantamentos para prospecção de petróleo, as ondas sísmicas viajam por vibrações mecânicas nos pacotes rochosos. A velocidade de propagação e a trajetória das mesmas dependem das propriedades petroelásticas das rochas, da disposição das camadas, continuidade entre outros fatores. Existem alguns tipos de onda, sendo que as principais são a onda compressional (P) e a onda cisalhante (S). O primeiro tipo se propaga na mesma direção da frente de onda, já o segundo se movimenta perpendicularmente a frente de onda (AKI & RICHARDS, 2002). As demais classes de ondas sísmicas não serão abordadas neste trabalho.

Considerando uma onda incidente compressional viajando de um meio com propriedades específicas (velocidades P e S e densidade) para um outro meio com um comportamento distinto (Figura 18). Na interface entre os meios ocorre o particionamento em ondas P e S, sendo que parte da energia é refletida de volta e outra parte é transmitida para o meio inferior. A onda transmitida continua sua propagação atingindo assim novas interfaces, onde serão geradas novas ondas refletidas e transmitidas, de forma análoga à anterior.

As equações de ZOEPPRITZ (1919) descrevem matematicamente o comportamento da partição da energia na interface de dois meios (Figura 18). Essas relações são importantes no campo da geofísica, porque relacionam a amplitude da onda P incidente com as amplitudes das ondas P e S refletidas e refratadas aos seus respectivos ângulos dos raios de frente de onda. Zoeppritz deduziu um sistema de quatro equações e quatro incógnitas:

$$\begin{bmatrix} R_P \\ R_S \\ T_P \\ T_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & -\cos \phi_1 & \sin \theta_2 & \cos \phi_2 \\ \cos \theta_1 & -\sin \phi_1 & \cos \theta_2 & -\sin \phi_2 \\ \sin 2\theta_1 & \frac{V_{P1}}{V_{S1}} \cos 2\phi_1 & \frac{\rho_2 V_{S2}^2 V_{P1}}{\rho_1 V_{S1}^2 V_{P2}} \cos 2\phi_1 & \frac{\rho_2 V_{S2} V_{P1}}{\rho_1 V_{S1}^2} \cos 2\phi_2 \\ -\cos 2\phi_1 & \frac{V_{S1}}{V_{P1}} \sin 2\phi_1 & \frac{\rho_2 V_{P2}}{\rho_1 V_{P1}} \cos 2\phi_2 & \frac{\rho_2 V_{S2}}{\rho_1 V_{P1}} \sin 2\phi_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ \cos 2\phi_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

no qual  $R_p$  representa a onda P refletida,  $R_s$  a onda S refletida,  $T_p$  a onda P transmitida,  $T_s$  a onda S transmitida,  $V_p$  a velocidade P,  $V_s$  a velocidade S,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  são ângulos das ondas P e S refletidas e transmitidas.

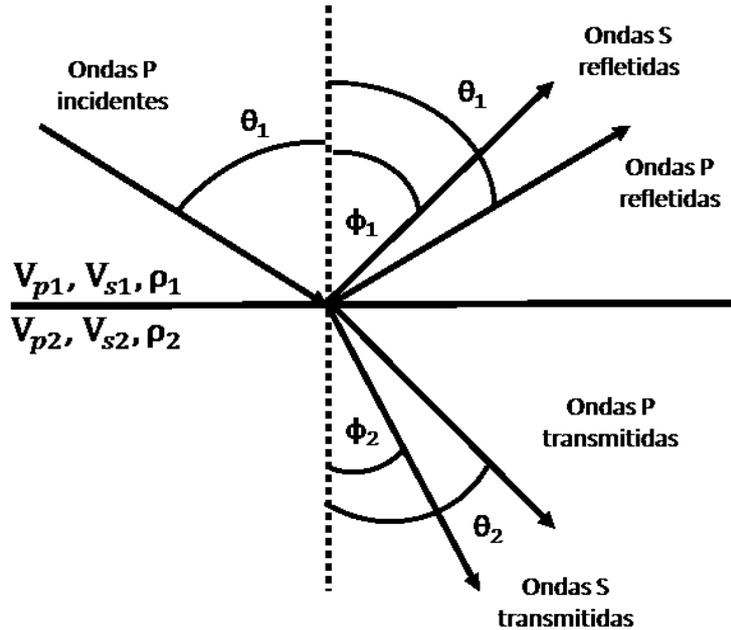


Figura 18: Diagrama ilustrando como acontece o particionamento de energia na interface da camada 1 com a 2. Uma onda P incidente se divide em ondas P e S refletidas e transmitidas.

Assumindo que a estrutura geológica seja representada por um conjunto de camadas plano paralelas com propriedades constantes e que a incidência dos raios sísmicos seja normal, tem-se que o traço sísmico ( $S_t$ ) pode ser definido como a convolução entre os coeficientes de refletividade ( $R_t$ ) com o pulso sísmico (*wavelet*– $W_t$ ) mais os diferentes ruídos ( $r_t$ ) associados durante a aquisição e processamento sísmico:

$$S_t = R_t * W_t + r_t. \quad (7)$$

Uma análise mais apropriada do traço precisaria também incluir efeitos como absorção, divergência geométrica, perdas por transmissão, reflexões múltiplas, entre outros. Contudo, estes efeitos são ignorados na maioria dos

estudos tendo como base volumes sísmicos, pois em teoria o processamento de dados mitiga estes efeitos (YILMAZ, 2001).

No caso acústico, a refletividade ( $R_{i,i+1}$ ) representa o contraste de impedâncias entre duas camadas. Impedância acústica ( $I$ ) é o produto entre a velocidade compressional ( $Vp$ ) e densidade ( $\rho$ ) da rocha. No caso onde os raios são de incidência normal e as camadas plano paralelas, tem-se que a refletividade é dada por:

$$R_{i,i+1} = \frac{I_{i+1} - I_i}{I_{i+1} + I_i} = \frac{\rho_{i+1}Vp_{i+1} - \rho_iVp_i}{\rho_{i+1}Vp_{i+1} + \rho_iVp_i} \quad (8)$$

A Figura 19, ilustra um exemplo de traço sintético modelado a partir de propriedades petroacústicas de sais (anidrita e halita), com a camada superior sendo composta por folhelhos e a inferior por carbonatos.

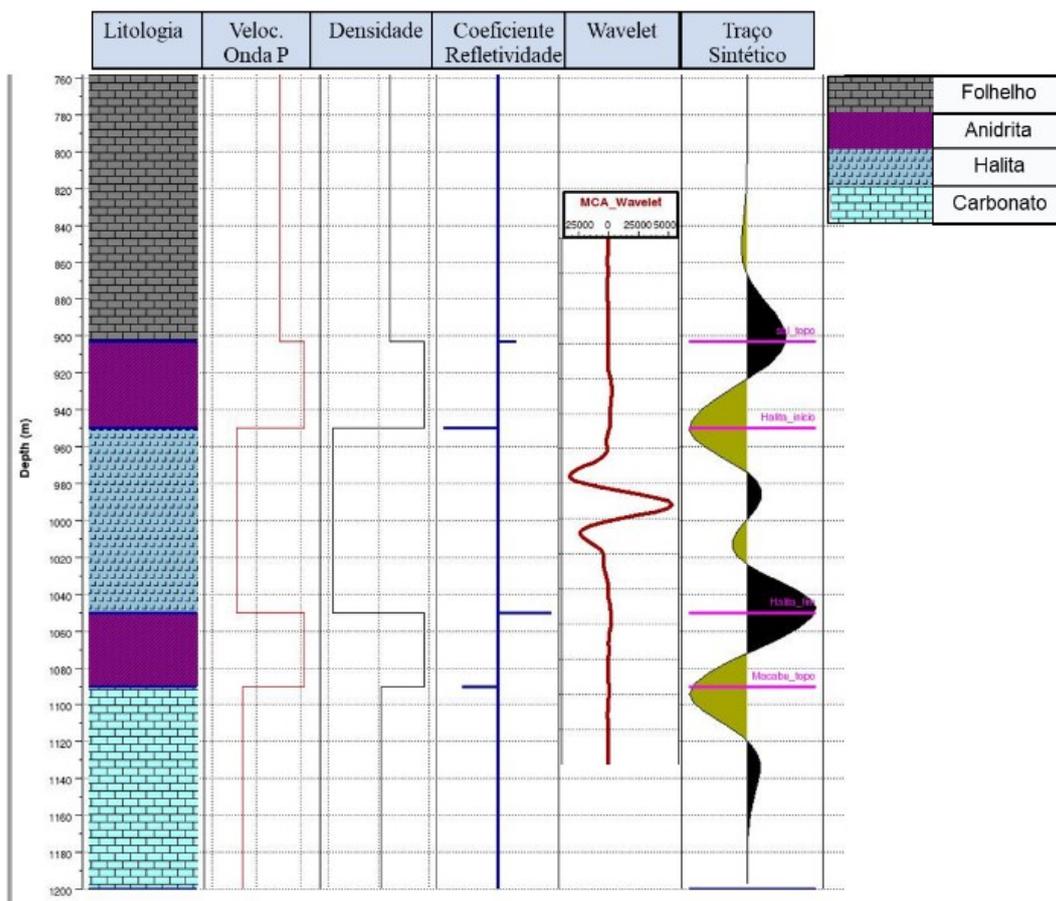


Figura 19: Exemplo de modelagem convolucional de um traço sísmico.

O pulso sísmico (*wavelet* no inglês) é um sinal com energia finita e concentrado num pequeno intervalo de tempo. No domínio da frequência, a

*wavelet* é caracterizada pelo seu espectro de amplitude e fase. As *wavelets* do tipo Ricker (RICKER, 1943; RICKER, 1944) são importantes operadores utilizados no processamento do sinal sísmico.

A resolução vertical da sísmica é definida como a capacidade de se resolver um determinado evento (WIDESS, 1973), ou seja, é a habilidade de se reconhecer o topo e a base da camada. Já a resolução espacial pode ser considerada como habilidade de detectar e resolver feições lateralmente. A resolução espacial na *crossline* será diferente da *inline*, por conta, da diferença entre o espaçamento dos dois.

De acordo com WIDESS (1973), uma camada é considerada abaixo do limite de detecção da sísmica, quando sua espessura é menor que  $\lambda/8$ , no qual  $\lambda$  é o comprimento de onda correspondente a frequência dominante da camada em questão. Na presença de ruído, o que ocorre quase sempre, o mesmo autor amplia o critério de resolução para  $\lambda/4$  e este será o parâmetro utilizado neste trabalho. KALLWEIT & WOOD (1982) estudaram a resolução sísmica através do critério de Rayleigh e chegaram a uma conclusão similar. Neste critério é estabelecido que o limite de um determinado instrumento para separar imagem de algum objeto ocorre quando as duas imagens de difração são separadas pela distância entre o pico e a cava do padrão de difração.

Segundo BROWN *et al.* (1986) algumas reflexões na sísmica podem estar associadas ao efeito dos lobos laterais e de *tunning* conforme Figura 20. O *tunning* é um fenômeno muito comum associado a finas camadas imageadas ou não pela sísmica. Este efeito pode resultar no aumento ou diminuição da amplitude sísmica associado a interferência construtiva ou destrutiva dos eventos.

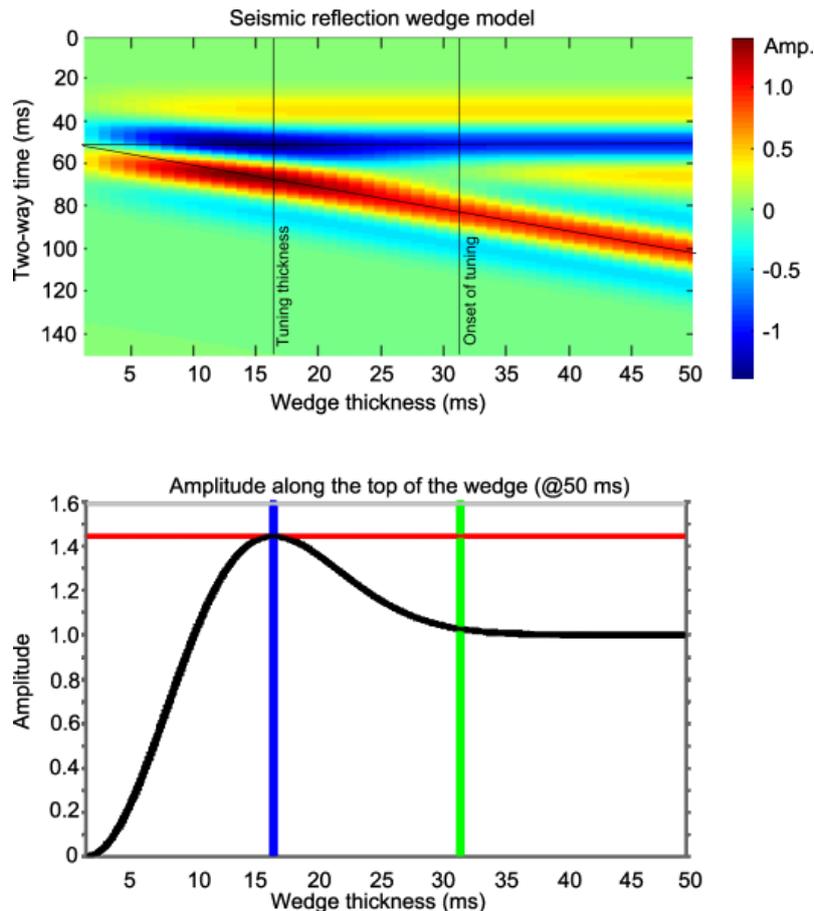


Figura 20: Efeito de *tuning* associado a um modelo de cunha. Nota-se que os valores de amplitude aumentam de 0 a 5 ms de espessura chegando ao seu valor máximo em 15 ms (linha azul). Após os 15 metros de espessura os valores de amplitude diminuem até o chamado *onset of tuning* (linha verde), limite a partir da qual duas camadas são imageadas por reflexões com seus valores reais de amplitude (retirado de BIANCO, 2019).

Um fenômeno de grande impacto no dado de amplitude é a atenuação sísmica e esta é caracterizada pela progressiva redução do conteúdo das altas frequências do sinal. Há dois tipos de atenuação, o primeiro associado a uma atenuação causada pela sucessão de finas camadas geológicas em ambientes sedimentares (O'DOHERTY & ANSTEY, 1971) e o segundo tipo é a transformação de energia mecânica em calor (AKI & RICHARDS, 2002). A atenuação afeta mais as altas frequências do que as baixas, reduzindo assim a amplitude do sinal de uma forma desigual.

A atenuação também impacta nos harmônicos de baixa frequência, contudo o mecanismo de perda desta faixa de informação é diferente em relação a alta frequência. Um dos motivos para perda da baixa frequência, neste caso para dados marítimos, é que o comprimento dos cabos de receptores não possui

dimensão suficiente para registrar os grandes comprimentos de onda, sendo necessário cabos de dezenas de quilômetros, o que tornaria operacionalmente inviável um levantamento sísmico utilizando as tecnologias atuais. Outro motivo para ausência das baixas frequências é que os receptores sísmicos possuem um efeito de amortecimento (*damping*) nas baixas frequências, devido à resistência dos componentes elétricos (EVANS, 1997).

Por esta ausência dos harmônicos de baixas e altas frequências, o dado sísmico é dito ser banda limitada. A atenuação da alta frequência diminui a resolução vertical do dado sísmico e a baixa frequência é uma importante informação a respeito das propriedades absolutas das rochas. As baixas frequências também podem ser consideradas como a tendência média dos valores de amplitude da sísmica, enquanto as altas representam o desvio em relação a essa média (OLDENBURG *et al.*, 1983).

### **3.1 Inversão Sísmica**

Dados sísmicos são intensamente utilizados na exploração e produção de hidrocarbonetos pela indústria, principalmente para o mapeamento estrutural e reconhecimento da distribuição das rochas na dimensão 3D. Contudo, estes dados fornecem informações a respeito das interfaces entre as rochas e não das propriedades de camadas. Para transformar o dado sísmico em um volume de propriedades são utilizados algoritmos baseados nos problemas inversos (RUSSELL, 1988; TARANTOLA, 2005; BOSCH *et al.*, 2010). A inversão sísmica é amplamente empregada na caracterização das propriedades inerente às rochas reservatórios tais como: porosidade, volume de argila, densidade, razão de Poisson, permeabilidade e saturação (AVSETH *et al.*, 2005).

Uma maneira simples de entender a lógica dos problemas diretos e inversos é pensar sob a ótica de causa e efeito, no problema direto estudam-se os efeitos a partir de certas causas, já no problema inverso se estudam as causas a partir da observação dos efeitos (Figura 21). Num modelo matemático, causas são as condições iniciais e de contorno do sistema. Problemas inversos são amplamente estudados e empregados em uma série de áreas incluindo geofísica, medicina, astronomia entre outras.

Por problema direto, entende-se como conjunto de relações matemáticas que permitem a transformação de propriedades/parâmetros não observáveis de um sistema físico (causa) em grandezas observáveis (efeito) (TARANTOLA, 2005), conforme apresentado na Figura 21. Na caracterização de reservatórios, as propriedades não observáveis são dadas por parâmetros de rocha e fluido, enquanto que as grandezas observáveis são, por exemplo, amplitude e tempo de trânsito das reflexões do dado sísmico (AVSETH *et al.*, 2005).

Problemas inversos (Figura 21) de um modo geral são usados na obtenção de informações a respeito de um modelo ou objeto físico (causa), a partir de dados observados (efeito). No caso da inversão sísmica, é estimar o volume de propriedades físicas mais próximo ao que foi registrado pela sísmica (RUSSELL, 1988; BOSCH *et al.*, 2010). Matematicamente, problemas inversos se enquadram na classe dos problemas mal-postos. Por ser mal-posto, o problema inverso fere algumas ou todas as seguintes condições (DEMMELE, 1987):

- i) Existência da solução;
- ii) A solução é única;
- iii) A solução tem uma dependência com condições iniciais e de contorno.



Figura 21: Figura esquemática sobre o problema inverso e direto.

O processo de inversão pode ser considerado também como um problema de otimização, onde é necessário encontrar o melhor resultado dentre todas as possíveis soluções. O resultado ótimo do processo de inversão é aquele

que minimiza o erro da função objetivo. No caso da inversão sísmica, a função objetivo ( $f_{obj}$ ), é a relação entre o dado observado (sísmica -  $S_i$ ) e o calculado (sintético -  $Sint_i$ ). Um exemplo de função objetivo é a função mínimos quadrados (TARANTOLA, 2005):

$$f_{obj} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - Sint_i)^2} \quad (9)$$

Na geofísica, os métodos de inversão sísmica visam transformar reflexões (informação de interface) presentes no dado de amplitude para propriedades elásticas (informações de camada). Implicitamente, nesta aproximação está a integração de um modelo de baixa frequências (~0-4Hz) com o conteúdo de frequência da sísmica (~4-60Hz) (RUSSELL, 1988). Normalmente, a informação de baixa frequência vem de gradientes de propriedades regional ou perfis elétricos filtrados, como o apresentado na Figura 22 (LINDSETH, 1979).

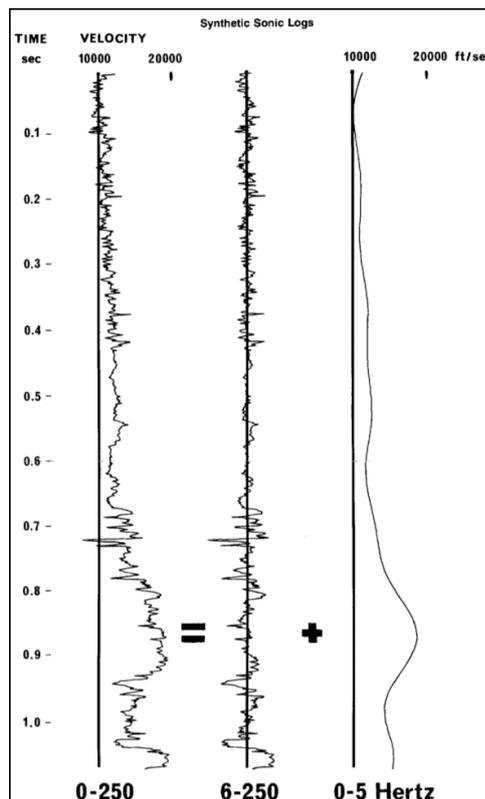


Figura 22: O registro do perfil sônico (primeiro painel) pode ser considerado como a soma de uma informação mais detalhada (6-250 Hz) com uma função de baixa frequência (0-5 Hz). Os componentes de baixa frequência dos perfis, geralmente, são utilizados nos processos de inversão sísmica (retirado de LINDSETH, 1979).

A sísmica por ser banda limitada, faz com que a solução da inversão não seja única, ou seja, é um problema mal-posto. A não unicidade do processo pode resultar em infinitas soluções plausíveis, os quais são consistentes com o dado sísmico (LATIMER *et al.*, 2000). Além da não unicidade, a inversão é passível de outros efeitos inerentes aos processos de aquisição, processamento e interpretação geofísica. Suposições são assumidas para reduzir a solução para alguns candidatos plausíveis (BOSCH *et al.*, 2010).

Segundo RUSSELL & HAMPSON (1999), a inversão sísmica pode ser realizada no dado aberto (*pre-stack*), empilhado (*post-stack*) ou nos empilhamentos parciais (por afastamento fonte-receptor ou ângulo). Esta dissertação focará na inversão do tipo *post-stack*. Segundo o mesmo autor, existem principalmente três métodos de inversão sísmica *post-stack*: a banda limitada, a *sparse-spike* e a baseada em modelo (*model-based*). A Figura 23 apresenta os principais tipos de inversão sísmica analisados por RUSSELL & HAMPSON (1999).

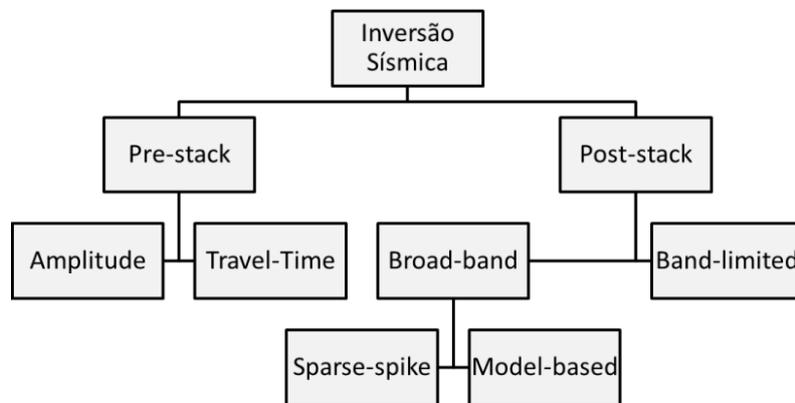


Figura 23: Principais tipos de inversão *pre-stack* e *post-stack*. Modificado de RUSSELL & HAMPSON (1999).

A inversão banda limitada (RUSSELL, 1988) é uma metodologia simples, onde normalmente a sísmica é utilizada como único dado de entrada. Nesta metodologia, as impedâncias relativas são estimadas diretamente do dado sísmico por técnicas como rotação de fase, integração do traço e processos recursivos. Por sua simplicidade, os resultados podem apresentar erros em

relação ao verdadeiro valor de impedância das rochas, fato atribuído a ausência da baixa frequência do dado sísmico.

LANCASTER & WHITCOMBE (2000) desenvolveram um método de inversão banda limitada, o qual nomearam de inversão colorida (*coloured inversion*). Nesta técnica, calcula-se um operador que é convolvido com o dado empilhado, gerando o cubo de impedância relativa. Este operador é gerado em três etapas: inicialmente calcula-se uma função de ajuste pelo espectro de frequência da impedância do poço (Figura 24.A), depois é estimado a diferença dessa função com espectro do dado sísmico e, por fim, converte-se esta diferença dos espectros para o operador que será utilizado na inversão (Figura 24.B).

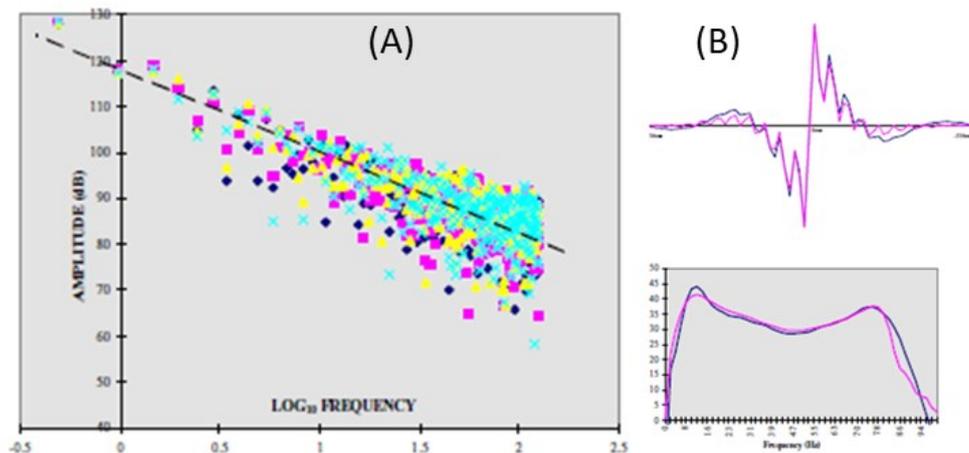


Figura 24: A) Espectro de frequência das impedâncias do poço utilizado por LANCASTER & WHITCOMBE (2000), a linha tracejada é a função de ajuste estimada. B) Operador calculado a partir da diferença da função de ajuste com o espectro da sísmica, nota-se que ele apresenta uma fase de 90 graus. Figuras retiradas de LANCASTER & WHITCOMBE (2000).

O método de inversão *sparse-spike* (RUSSELL, 1988) envolve estimar um conjunto de coeficientes de reflexão esparsos (*sparse spike*) a partir do dado sísmico, restringindo as reflexões com o modelo inicial de propriedades filtrado na baixa frequência e, em seguida, inverte-se o dado para obter o volume de impedâncias. Os termos da função objetivo são norma  $L^1$  e consistem, principalmente, no resíduo entre a sísmica e o sintético e as refletividades esparsas (Figura 25.A e 25.B).

<sup>2</sup> O conceito de norma está relacionado a noção geométrica de comprimento. A norma  $L^1$  é a soma da diferença absoluta de vetores.

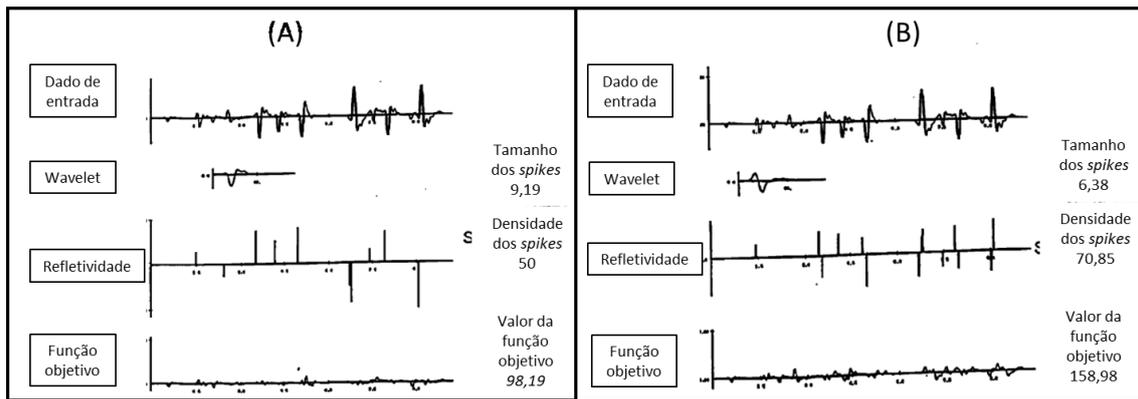


Figura 25: Inversão *sparse spike* realizada sobre um mesmo traço de entrada A) Usando uma densidade de *spikes* de 50 o valor da função foi de 98,19 B) Usando uma densidade de *spikes* de 70,85 o valor da função foi de 158,98. Pelas figuras, percebe-se que minimização da função objetivo foi maior ao utilizar uma densidade de *spikes* de 50. Modificado de RUSSELL (1988).

As inversões baseadas em modelo (RUSSELL, 1988) geralmente são fundamentadas em algoritmos de inversão linear (COOKE & SCHNEIDER, 2002), no qual se assume que o traço sísmico e a *wavelet* são conhecidos e que há um conhecimento *a priori* do modelo de propriedades físicas das rochas. Este modelo é modificado e convolvido com a *wavelet* gerando um sintético que é comparado com o dado observado. Este processo se repete até que o resíduo (diferença entre o sintético e a sísmica) fique dentro de um valor estipulado. Os termos da função objetivo desta inversão são de norma L2.

A inversão sísmica provem alguns benefícios quando utilizada, dentre os quais é possível citar: informação de camada ao invés de interface (contraste entre impedâncias), diminuição do efeito *tuning*, soma das informações geológicas vindas dos poços com as amplitudes da sísmica, atenuação de ruídos aleatórios, aumento do conteúdo de frequências do dado sísmico, calibração com os dados de poços e possível inclusão de *constraints* provindos de conhecimentos *a priori* (AVSETH *et al.*, 2005).

## 4. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido utilizando informações de 10 poços e um volume sísmico (PSTM – *post-stack time migration*) que abrange uma área com cerca de 100 km<sup>2</sup> localizada na Bacia de Santos. O principal objetivo deste estudo foi realizar uma inversão acústica, a fim de melhor caracterizar as propriedades físicas dos sais presentes na Formação Ariri.

Essencialmente, o trabalho foi dividido em três etapas. Inicialmente foram carregados os dados disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Depois realizou-se estudos de caracterização das propriedades petroelásticas e proporções dos sais presentes nos poços. Algumas dessas curvas não foram adquiridas ao longo de todo intervalo relativo a Formação Ariri e precisaram passar por um processo de complementação dos valores. Nesta etapa, as propriedades petroelásticas ausentes foram estimadas a partir de relações entre os valores medidos pelos poços, também foram calculadas curvas a partir de equações da literatura.

A segunda etapa abrangeu a interpretação 3D da seção evaporítica, quando foram mapeadas as superfícies de topo e base da Formação Ariri e os três níveis internos, que propiciaram a separação das quatro unidades que podem ter correspondência aos ciclos salinos estudados por GAMBOA *et al.* (2008) e RODRIGUEZ *et al.* (2018). Também foi realizado estudos a respeito do *upscaling* dos perfis elétricos para uma escala compatível a sísmica, e, por fim a amarração dos poços ao dado de amplitude disponibilizado pela ANP.

Na última parte dos estudos, foi realizada a inversão sísmica acústica utilizando o algoritmo do tipo *sparse spike*. Para executar este processo, foi preciso estimar uma *wavelet* média única que fosse representativa para todo o dado e a construção de um modelo inicial de baixa frequência, a partir dos horizontes interpretados e informações de poços. Foram construídos três modelos iniciais que resultaram em três cubos de impedâncias acústicas. A partir desses resultados, realizou-se estudos de caracterização 3D das propriedades dos sais presentes na região.

## 4.1 Localização da Área

A área de estudo se localiza na porção central da Bacia de Santos, plataforma continental brasileira. A Bacia de Santos é limitada a norte pelo Alto de Cabo Frio e a sul pelo Alto de Florianópolis. Geograficamente, sua extensão vai do Rio de Janeiro até Santa Catarina, abrangendo assim uma área de cerca de 350 mil km<sup>2</sup>.

O polígono da região de estudo possui área de aproximadamente 100 km<sup>2</sup> e está a cerca de 360 km de distância da costa do estado de São Paulo e 290 km da cidade do Rio de Janeiro, em lâmina d'água média da ordem de 2 km (Figura 26). Esta região se encontra dentro do limite do chamado Polo Presal da Bacia de Santos (PPBS), especificamente, inserida dentro do polígono do Campo de Sapinhoá. Em termos gerais, este polo é conhecido por suas grandes reservas de hidrocarbonetos e que representa mais de 60% da produção brasileira de petróleo, ou seja, cerca de 1,95 milhões de barris de óleo equivalente por dia (ANP, 2019).

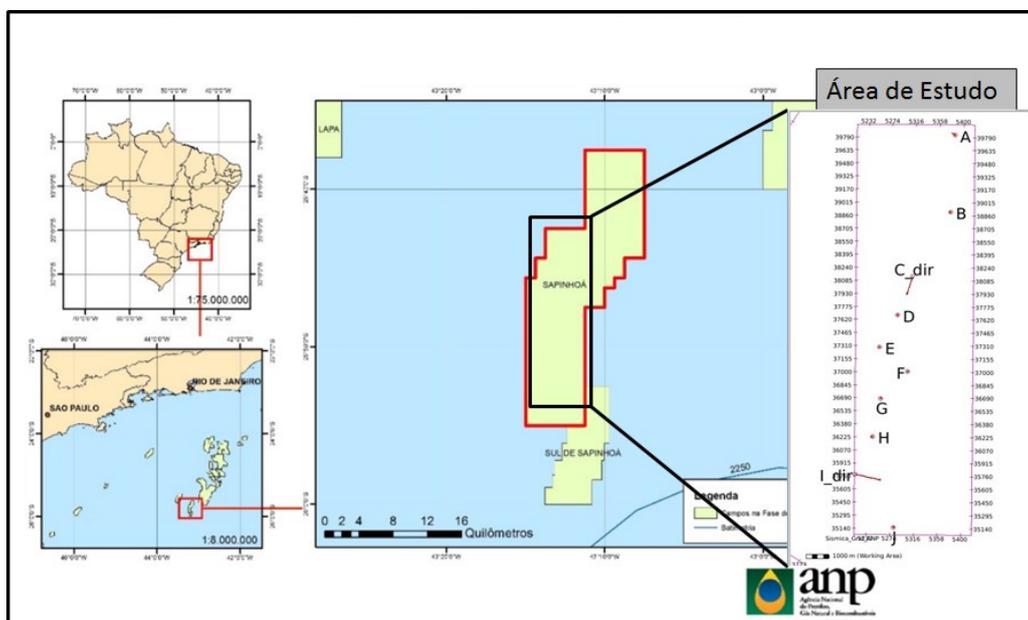


Figura 26: Mapa de localização da área de estudo com os poços utilizados na área (para fins de simplificação de nomenclatura, os poços foram renomeados para letras, maiores detalhes consulte a tabela 09 ).

## 4.2 Material e Aplicativos Utilizados

Os dados utilizados neste estudo foram solicitados junto à ANP, com o número do protocolo 089525/2018 em 05/07/2018. A solicitação abrangeu informações de dez poços, um volume sísmico e um modelo de velocidade, vide Tabela 8.

Tabela 8: Vértices do polígono do volume e do modelo de velocidade usados para o desenvolvimento deste trabalho (*datum* Sirgas 2000).

	Latitude	Longitude	UTM X	UTM Y
Ponto 1	25° 51' 42.633'' S	43° 14' 12.488'' W	676680	7138430
Ponto 2	25° 51' 40.322'' S	43° 11' 5.025'' W	681900	7138430
Ponto 3	25° 41' 46.691'' S	43° 11' 14.056'' W	681900	7156700
Ponto 4	25° 41' 48.985'' S	43° 14' 21.260'' W	676680	7156700
Área (km <sup>2</sup> )				95,3694

O nome do arquivo sísmico solicitado junto à ANP foi 0282\_BM\_S\_FASE2\_3D\_MIG\_FIN.sgy e o relatório a respeito do fluxograma do processamento sísmico não estava disponível no boletim de remessa oriundo da ANP. Também foi disponibilizado o modelo de velocidades utilizado na migração do dado sísmico.

O conjunto de poços contemplou os seguintes perfis: caliper, raios gama, resistividade, sônico, densidade e neutrão. Algumas dessas curvas, como o raio gama, foram perfiladas ao longo de toda a perfuração. Contudo, a maioria dessas informações foram adquiridas apenas no intervalo correspondente aos reservatórios carbonáticos do Presal. Detalhes a respeito da disponibilidade dos perfis elétricos, no intervalo da seção evaporítica, estão presentes na Tabela 9.

Também foram disponibilizados os chamados perfis compostos que consistem em informações a respeito do posicionamento, trajetória, valores levantados pelos perfis elétricos e descrições de amostras de calhas. Para fins de simplificação, os poços foram renomeados para letras conforme a tabela abaixo.

Tabela 9: Perfis dos poços disponibilizados pela ANP. Com X estão marcadas as curvas com informações, ao menos em parte, no intervalo relativo à Formação Ariri.

Nome do poço-ANP	Nova nomenclatura do poço	X (utm)	Y (utm)	Mesa (m)	P-Sônico	S-Sônico	Densidade	Caliper	Neutrão	Raios Gama
8-SPH-23-SPS	A	681190	7156260	24	X	-	-	-	-	X
7-SPH-08-SPS	B	680980	7152820	24	X	X	-	-	-	X
7-SPH-04D-SPS	C	679061	7149189	24	X	X	-	-	-	X
9-BRSA-928-SPS	D	678651	7148241	24	X	-	-	-	-	X
7-SPH-05-SPS	E	677848	7146823	26	X	-	-	-	-	X
9-BRSA-1043-SPS	F	679100	7145725	28	X	X	-	-	-	X
1-BRSA-594-SPS	G	677915	7144540	32	X	-	-	-	-	X
7-SPH-01-SPS	H	677524	7142823	26	X	X	-	-	-	X
7-SPH-02D-SPS	I	677859	7140905	26	X	-	-	-	-	X
3-BRSA-923A-SPS	J	678471	7138793	26	X	X	X	X	-	X

Para o desenvolvimento do projeto foram utilizados os softwares Landmark DecisionSpace® da empresa Halliburton e o Jason® da Compagnie Générale de Géophysique (CGG). O DecisionSpace® foi utilizado no mapeamento de feições na sísmica, enquanto que o Jason® foi empregado nos demais estudos desta dissertação.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação dos resultados e discussões foi dividida em três etapas. Na primeira parte foi abordado a caracterização 1D dos sais utilizando perfis de poços. Neste estudo foram estimadas as proporções dos sais e seus respectivos valores petroelásticos (densidade, velocidade compressional - P e velocidade cisalhante - S). A segunda etapa consistiu em mapear as principais superfícies da Formação Ariri, filtragem dos perfis de poços para frequências próxima ao dado de amplitude e a amarração dos poços na sísmica. Por fim, a terceira etapa consistiu na inversão acústica e caracterização 3D dos sais. No processo de inversão foram utilizados os poços amarrados, horizontes mapeados da etapa anterior, a *wavelet* média estimada por poço e um modelo inicial de impedâncias filtrado nas baixas frequências. Com o volume de impedância foi realizada a caracterização espacial das propriedades dos sais.

### 5.1 Caracterização 1D dos Sais

A caracterização 1D dos sais foi baseada nas informações dos perfis de poços perfurados na área. O fluxograma dos estudos é apresentado na Figura 27. Na figura, as etapas em cinza foram desenvolvidas ao longo deste capítulo e as em azul estão na seção referente a interpretação 3D dos sais.

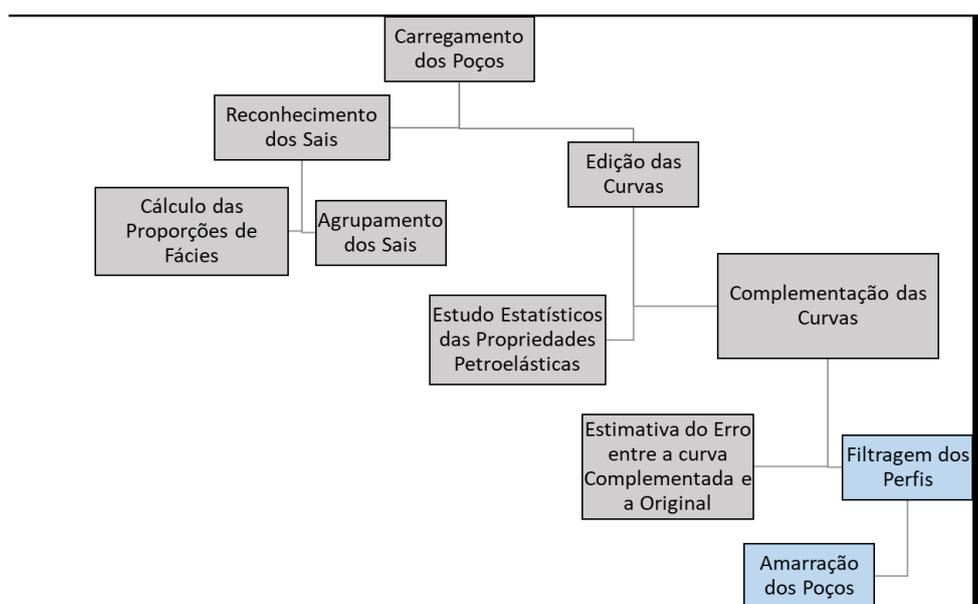


Figura 27: Fluxograma utilizado na caracterização 1D dos sais (etapas em cinza) e em parte da interpretação 3D (etapas em azul).

O perfil composto disponibilizado pela ANP continha informações referente as litologias reconhecidas nos poços resultantes da interpretação de informações provenientes das amostras de calhas<sup>3</sup>. Estas descrições são importantes na ausência de testemunhos e amostras laterais. Estas duas últimas informações não foram disponibilizadas para a realização deste trabalho e, portanto, não foram utilizadas.

As descrições de amostras de calhas estão sujeitas a uma série de problemas, tais como erros de interpretação, profundidade real da amostra, possível dissolução de sais solúveis pela fluido de perfuração e a problemas relacionados a operação de poços. Outra dificuldade inerente a essas interpretações é em relação as simplificações feitas durante o acompanhamento dos poços, pois fragmentos de diferentes minerais/rocha (mistura de materiais) são, normalmente, classificados como um agregado único e não como a proporção entre os diferentes fragmentos. Este último problema impacta diretamente em algumas análises realizadas ao longo do trabalho, tais como o cálculo de proporção dos sais e estimativas de propriedades petroelásticas a partir dos perfis elétricos.

Pelo perfil composto disponibilizado pela ANP, foram analisadas as ocorrências de sais nos poços e suas respectivas proporções. Foram encontradas descrições de halita, taquidrita, silvita, carnalita, anidrita e gipsita. A halita é o mineral predominante na área de estudo com cerca de 89% do total, seguido pela anidrita com 7,1%, carnalita com 3,7% e taquidrita com apenas 0,1%. São raras as ocorrências de gipsita e silvita, algumas poucas amostras em quilômetros de descrições, fato que pode ser atribuído ao campo de estabilidade destes minerais, com a gipsita se transformando em anidrita e a silvita em carnalita (MOHRIAK *et al.*, 2008). Apesar de ser questionável a ocorrência destes minerais (gipsita e silvita), as mesmas foram mantidas nos estudos. Os valores de proporções de fácies por poço e a média geral podem ser consultados na Tabela 10.

---

<sup>3</sup> Amostras de calhas são fragmentos resultantes da trituração das rochas pela broca de perfuração.

Tabela 10: Proporção dos sais presente nos poços.

	Halita	Taquidrita	Silvita	Carnalita	Anidrita	Gipsita
A	86,1%	0,1%	0,0%	6,2%	7,5%	0,0%
B	94,4%	0,0%	0,0%	1,6%	4,0%	0,0%
C	92,7%	0,1%	0,0%	4,9%	2,4%	0,0%
D	97,9%	0,0%	0,0%	1,4%	0,7%	0,0%
E	94,4%	0,0%	0,0%	0,6%	5,0%	0,0%
F	83,8%	0,1%	0,0%	5,2%	10,9%	0,0%
G	92,1%	0,1%	0,0%	2,9%	4,9%	0,0%
H	87,8%	0,1%	0,0%	3,5%	8,7%	0,0%
I	90,4%	0,1%	0,0%	4,2%	5,3%	0,0%
J	83,7%	0,1%	0,0%	4,6%	11,6%	0,0%
Média	89,0%	0,1%	0,0%	3,7%	7,1%	0,0%

Pelas propriedades petroelásticas dos minerais salinos os sais foram agrupados em três grupos (Figura 28). Esse agrupamento foi baseado no comportamento das velocidades P dos sais e seguiu a metodologia proposta por YAMAMOTO *et al.* (2016) e MAUL *et al.* (2018a):

i) **Halita**: litologia predominante, sendo assim considerada como referência (*background*);

ii) **Sais de Alta Velocidade (SAV)**: anidritas e gipsitas que possuem velocidades intervalares maiores que a halita;

iii) **Sais de Baixa Velocidade (SBV)**: taquidrita, carnalitas e silvitas, cujas velocidades são menores que a halita.

As demais fácies foram reunidas em um mesmo grupo, denominado de **OUTROS**. Apesar dos **SAV** e **SBV** agruparem dois ou mais minerais, eles basicamente refletem a porcentagem da anidrita no caso dos **SAV** e carnalita para o caso dos **SBV**, pois as demais fácies ocorrem em proporções diminutas como demonstrado na Tabela 10.

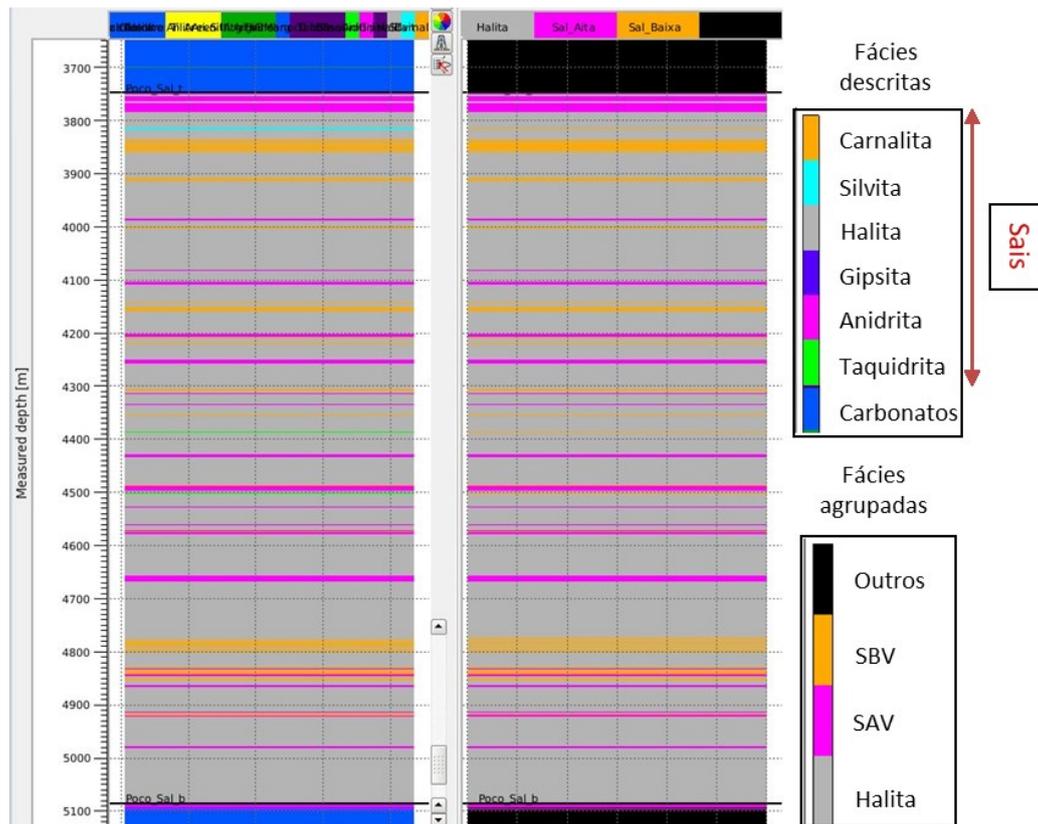


Figura 28: Agrupamento de fácies para o poço A. Foram constatados a presença de carnalita, taquidrita, silvita, halita, gipsita, anidrita e carbonatos. Este último (carbonato) ocorria somente na base da Formação Ariri e na seção Presal, contudo conforme dito anteriormente, os carbonatos não serão objetos de estudos nesta dissertação. Pode-se notar também uma intensa intercalação entre os sais e a predominância das halitas (com 86,1% do total).

Todas as análises realizadas nesta seção foram feitas nos sais agrupados. A razão para isto reside na simplificação dos estudos devido a redução do número de fácies (3 ao invés de 6), e, também evita possíveis erros de análises associados aos minerais pouco representativos na seção evaporítica (taquidrita, silvitas e gipsitas).

As velocidades dos sais foram calculadas a partir dos perfis sônicos. As ferramentas sônicas medem o tempo de trânsito (vagarosidade) de um pulso entre dois pontos fixos de uma formação. A velocidade de propagação do pulso depende das propriedades petroelásticas da formação, sendo maior nos sólidos do que nos líquidos e gases. Composição dos minerais, porosidade, tipo de fluido entre outros causam impactos nos valores medidos pelas ferramentas sônicas. Analisando as curvas de velocidades P sobrepostas ao perfil de fácies foi possível verificar uma boa concordância entre as informações, com os **SAV**

(fácies roxas) apresentando maiores velocidades em relação a halita (em cinza) e os **SBV** (alaranjado) com menores valores em relação ao cloreto de sódio (Figura 29).

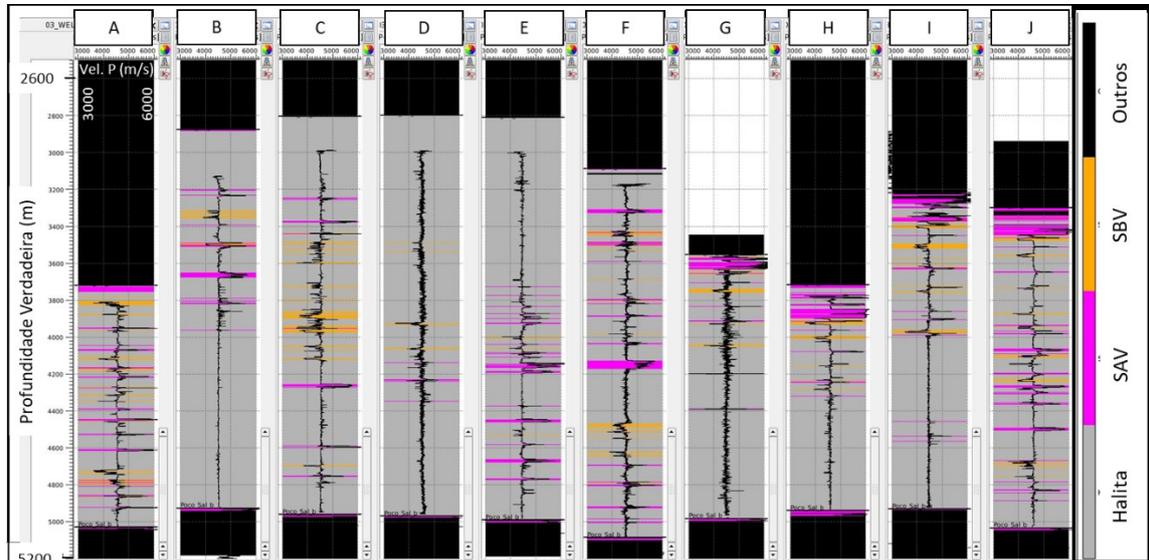


Figura 29: Perfis de fácies sobrepostos às velocidades nos dez poços.

Todos os poços possuem o perfil sônico, contudo o levantamento não é contíguo ao longo do intervalo de ocorrência dos sais. Apenas dois poços (G e I) possuem curvas ao longo de toda a seção evaporítica e parte do pós-sal. Porém, como pode ser observado na Figura 29, não haviam informações disponíveis na região próxima ao topo da Formação Ariri para os demais poços. Esta falta de informação geralmente está associada ao grande diâmetro do poço e/ou à troca de fase da coluna de perfuração. Normalmente, os poços perfurados para produção nos carbonatos do Presal possuem um grande diâmetro em sua fase inicial (24 polegadas) e este é reduzido (16 polegadas) no intervalo de ocorrência da Formação Ariri. A troca de fase do poço ocorre justamente um pouco abaixo do topo da seção evaporítica, na denominada anidrita de topo, por questões de segurança operacional, já que o assentamento da sapata de perfuração tem que ser realizado em porções mais rígidas, o que é o caso da anidrita. Esta sapata de mudança de fase – um tipo de cimento – impossibilita a perfilagem da região. O mesmo processo de assentamento de sapata ocorre na denominada anidrita basal da seção evaporítica.

O controle de qualidade nos perfis sônicos foi outra etapa crucial nesta dissertação. Curvas de caliper e de coerência do sônico ajudaram a identificar

zonas onde as medidas poderiam não ser confiáveis. Valores que não possuíam significado físico ou que estavam fora do esperado para os sais foram removidos. Por fim, foram aplicados filtros de média móvel nas curvas ruidosas a fim de suavizar os valores (Figura 30).

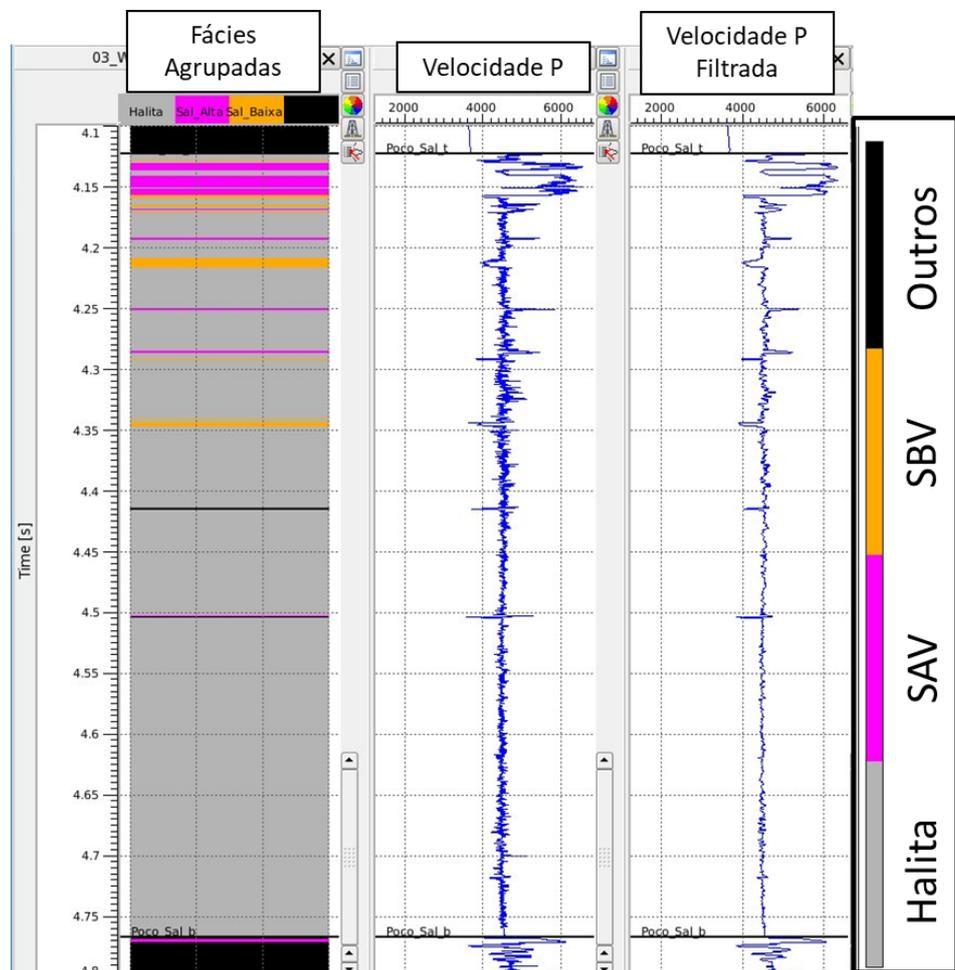


Figura 30: Exemplo de edição e filtragem pela média móvel de um perfil de velocidades P (poço G).

As fácies foram associadas, ponto a ponto, aos seus respectivos valores de velocidades. Posteriormente foram estimados as médias e os desvios padrão dessas propriedades para cada sal agrupado (Figura 31). Para a **halita** se obteve o valor médio e desvio de  $4531 \pm 91$  m/s, para os **SAV**  $5308 \pm 484$  m/s, para os **SBV**  $4176 \pm 263$  m/s e, considerando todas as fácies, o valor médio encontrado foi de  $4560 \pm 238$  m/s.

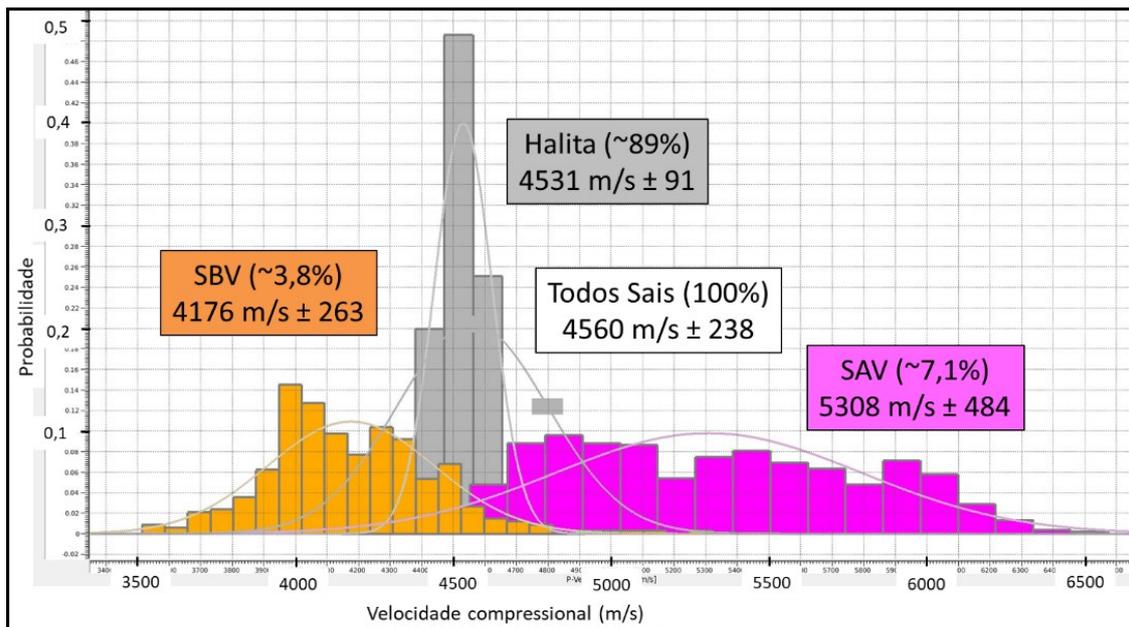


Figura 31: Velocidades médias e desvios padrão para os sais agrupados da área de estudo.

As velocidades médias estimadas levando em consideração todos os sais são próximos aos encontrados para halita. Este fato é facilmente explicado pela grande predominância deste mineral nos poços perfurados na área, ou seja, as propriedades da halita, que tem mais de 80% do total, prevalece no comportamento da seção como um todo. Esta predominância também é uma razoável explicação para diversos processos, especialmente os que utilizam o valor da velocidade da halita no intervalo do sal para a construção de modelos de velocidades utilizados em migrações de dados sísmicos.

Os **SAV** e **SBV** apresentaram alto grau de dispersão em seus valores de velocidade, já a **halita** exibiu um padrão mais comportado, devido ao menor desvio padrão de suas velocidades (Figura 31). A variação das velocidades para os SAV e SBV pode estar associada a possíveis erros de descrição de fácies, efeitos de anisotropia ou misturas de sais. No trabalho de CORNELIUS & CASTAGNA (2018) também foi constatado uma dispersão nas velocidades dos sais do Golfo do México, os autores concluíram que este efeito foi devido a mistura de minerais que não foram devidamente tratados durante a interpretação das amostras de calhas. Neste trabalho, o possível impacto do efeito de mistura de minerais sobre as propriedades estimadas dos sais, será melhor abordado nos próximos parágrafos.

A Tabela 11 apresenta as estimativas de velocidades P dos sais a cada poço, nela foi possível constatar a variação dos valores médios entre as locações e o impacto provocado na estimativa global das velocidades para os sais da Formação Ariri, assunto abordado nos parágrafos anteriores. A velocidade da **halita** variou entre 4450 a 4600 m/s, números próximos ao verificado na literatura (Tabela 2). Já a variação dos **SAV** foi em torno de 5050 a 5750 m/s e os **SBV** ficou em 4050 a 4350 m/s, valores estes discrepantes em relação aos apurados pela literatura. A razão desta diferença reside no fato de que as análises realizadas nas bibliografias consultadas foram em amostras de sais puros. No presente estudo, interpreta-se que a dispersão das velocidades está associada ao efeito de mistura de minerais, onde amostras de calhas com fragmentos de carnalita/halita (descritas como carnalitas) aumentaram as velocidades dos SBV, enquanto que misturas de halita/anidrita (descritas como anidrita) diminuíram os valores dos SAV.

Poços que apresentaram grandes proporções de **SAV** (A, F, H e J), possuem velocidades média altas, com valores acima de 4600 m/s. Já poços com maior frequência de **SBV** (A, C, F), exibiam velocidades médias de aproximadamente 4500 m/s, ou seja, próximos as estimativas realizadas para a **halita**. A partir dos valores retratados na Tabela 11, foi possível afirmar que os SAV apresentaram um maior impacto na velocidade média por poço do que os SBV.

Tabela 11: Proporções, espessura do sal e velocidades médias dos sais para cada poço na área de estudo. A velocidade do SAV para o poço D não foi apresentada na tabela, pois o valor obtido não foi confiável devida a baixa amostragem dessas fácies.

	% Halita	%SAV	%SBV	Espessura Sal	VP Média	VP Halita	VP SAV	VP SBV
A	86,13%	7,54%	6,33%	1297,36	4605 ± 267	4590 ± 115	5442 ± 402	4333 ± 256
B	94,37%	4,05%	1,58%	2048,65	4550 ± 175	4536 ± 65	5061 ± 291	4206 ± 183
C	92,65%	2,38%	4,97%	2155,41	4532 ± 213	4523 ± 91	5277 ± 433	4077 ± 264
D	97,90%	0,73%	1,37%	2168	4522 ± 99	4517 ± 62	-	4207 ± 207
E	94,39%	4,99%	0,62%	2182,01	4511 ± 223	4462 ± 64	5117 ± 237	4103 ± 184
F	83,76%	10,92%	5,32%	1998,93	4601 ± 181	4578 ± 88	5089 ± 227	4335 ± 205
G	92,14%	4,91%	2,95%	1429,97	4569 ± 328	4512 ± 98	5746 ± 490	4229 ± 306
H	87,78%	8,67%	3,56%	1223,89	4674 ± 369	4591 ± 70	5712 ± 406	4092 ± 215
I	90,43%	5,25%	4,32%	1711,98	4520 ± 307	4480 ± 98	5430 ± 510	4125 ± 292
J	83,69%	11,62%	4,69%	1734,05	4646 ± 305	4596 ± 85	5309 ± 501	4128 ± 182
Média	<b>89,03%</b>	<b>7,13%</b>	<b>3,84%</b>	<b>17950,25</b>	<b>4560 ± 238</b>	<b>4531 ± 91</b>	<b>5308 ± 484</b>	<b>4176 ± 263</b>

Ainda pela Tabela 11, foi possível reconhecer uma possível relação entre a espessura da coluna de sal perfurada pelo poço com a proporção de fácies.

Nas locações onde foram atravessados mais de 2000 m de sais (B, C, D e E), a frequência de ocorrência das halitas foi maior que 92%, já para os demais poços houve uma variação na proporção dos sais em razão da espessura da seção evaporítica. Esta relação entre espessura da Formação Ariri e proporção de fácies será melhor discutido no próximo capítulo, referente a interpretação 3D.

Os perfis sônicos cisalhantes foram perfilados em cinco poços, ou seja, em metade das locações (Figura 32). Estas curvas também apresentaram o mesmo problema reconhecido para a onda P: que foi a falta de informação no topo da seção evaporítica. Os valores de velocidades médias e desvios padrão da cisalhante obtidas a partir dos perfis (Figura 33) foram de  $2552 \pm 55$  m/s para a halita, de  $2785 \pm 194$  m/s para os SAV,  $2247 \pm 168$  m/s para os SBV e para todos os tipos de sais foi de  $2554 \pm 113$  m/s.

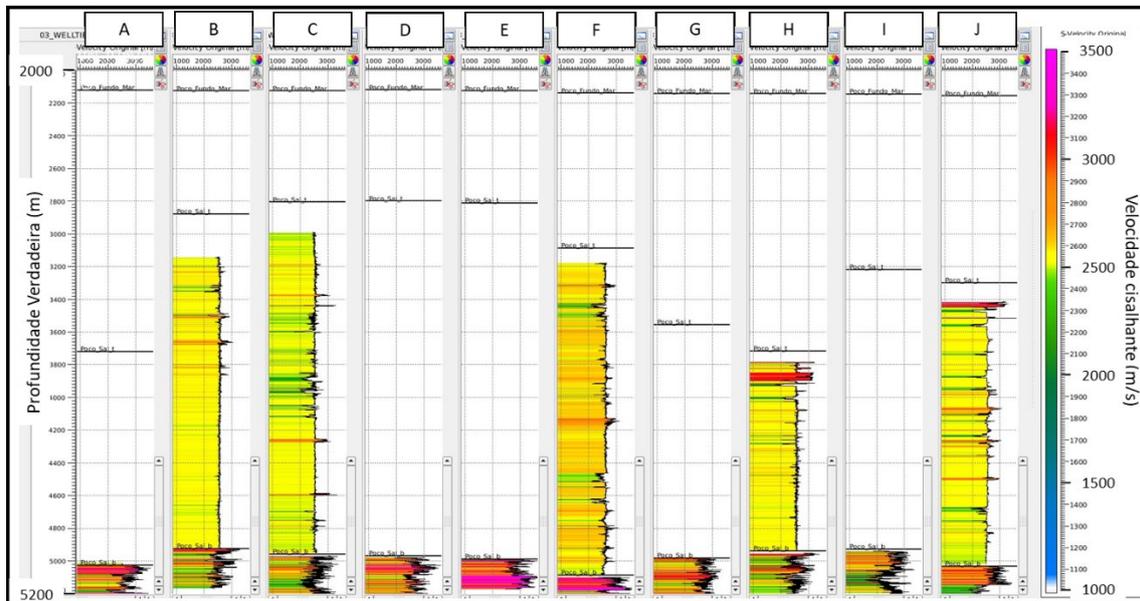


Figura 32: Velocidades S dos perfis, nota-se que há a falta de informações em metade dos poços.

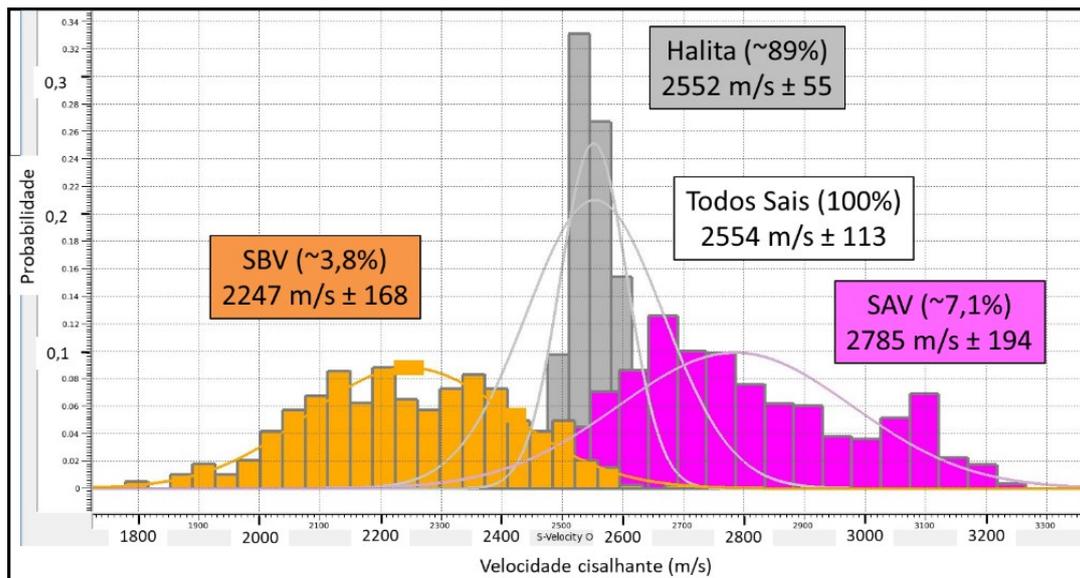


Figura 33: Médias e desvios padrão das velocidades S dos sais e suas respectivas proporções.

O princípio da ferramenta que adquire o perfil de densidade consiste em uma fonte que emite raios gama de média energia na formação. Os raios gama emitidos colidem com os elétrons na formação e a cada colisão o raio perde um pouco de sua energia. Os raios gama espalhados que conseguem atingir o detector são contados e a quantidade resultante é uma proporção da densidade da formação. Por se tratar de um perfil que emite radioatividade, o mesmo necessita de licenças ambientais específicas e devido a isto muitas vezes não é adquirido. Nos dez poços utilizados neste estudo, havia apenas uma curva disponível no intervalo de ocorrências dos sais da Formação Ariri (Figura 34).

Por existir apenas uma curva de densidade, as análises para esta propriedade se tornaram menos confiáveis quando comparado às de velocidades. Pelo perfil de densidade temos que a média para todos os sais foi cerca de  $2155 \pm 268 \text{ kg/m}^3$  e para a halita  $2085 \pm 79 \text{ kg/m}^3$  (Figura 35). Os valores obtidos para os SAV foi de  $2648 \pm 838 \text{ kg/m}^3$  e os SBV ficou em torno  $1840 \pm 470 \text{ kg/m}^3$ . Contudo, analisando o histograma nota-se que as densidades dos sais SBV e SAV não possuem uma distribuição normal, como no caso da halita e de todos os sais juntos. Examinando os valores que mais ocorrem para os sais de baixa e de alta verificou-se que os SAV possuem uma moda nos valores de  $2932 \text{ kg/m}^3$  e os SBV em  $1633 \text{ kg/m}^3$ . Estes números são próximos aos verificados na literatura, que é de  $2980 \text{ kg/m}^3$  para a anidrita e  $1570 \text{ kg/m}^3$  para a carnalita (vide Tabela 2). Estas modas podem representar as densidades das

anidritas e carnalitas mais puras na região de estudo, já as demais medidas devem estar relacionadas às misturas de minerais.



Figura 34: Densidade medida por perfil. Em apenas um poço foi adquirida essa informação

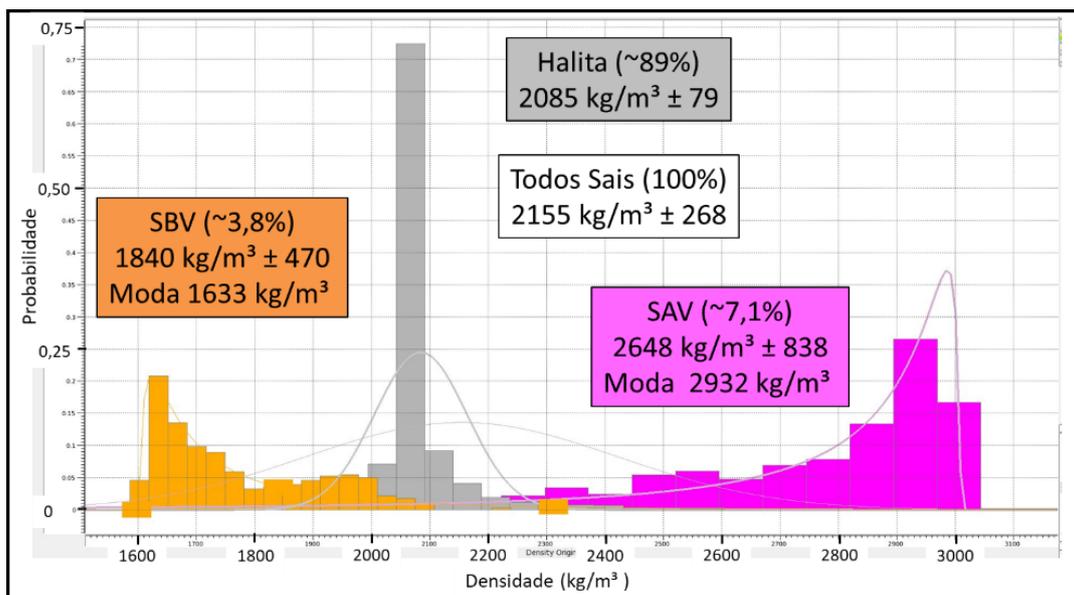


Figura 35: Histograma das densidades para o único poço com esta informação (poço J). Percebe-se que as distribuições de SBV e SAV não são normais, pela moda dos valores há o indicativo destas medidas serem representativas das anidritas e carnalitas com um maior grau de pureza.

Como visto anteriormente, os perfis densidade e sônicos cisalhantes não foram adquiridos para todos os poços e mesmo os perfis de sônicos compressional não são contínuos ao longo de toda a seção evaporítica (Figura 36). Estas informações são importantes no processo de inversão sísmica e

demais estudos associados à interpretação das reflexões originadas pelas intercalações dos sais. Nesta seção, será apresentado o trabalho de complementação das curvas, utilizando relações calculadas nos poços, fácies descrita em campo e expressões levantadas da literatura.

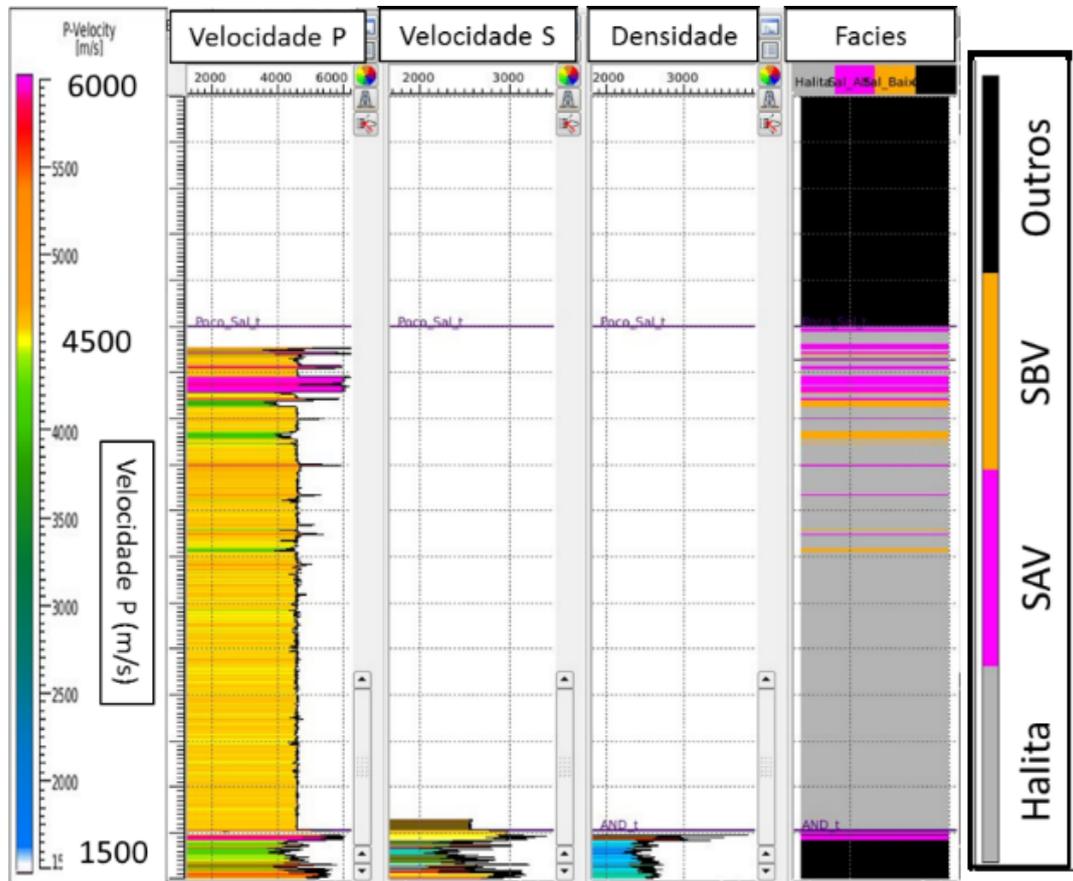


Figura 36: Perfis do poço H. No primeiro trecho temos a VP, no 2 a curva de VS e pôr fim a densidade.

A velocidade compressional (P) foi a primeira curva a ser complementada. Nos trechos onde não haviam informações no intervalo de ocorrência dos sais, o perfil foi completado atribuindo o valor de velocidade encontrado em literatura às respectivas fácies descritas nos poços. Os valores utilizados foram de 4500 m/s para halita, 6000 m/s para os SAV e de 3900 m/s para os SBV.

Além de completar as curvas na seção salífera, também foi necessário estimar os valores de trechos do pós-sal. A motivação para isto foi a necessidade de dispor do contraste de impedâncias associado ao topo da Formação Ariri com sedimentos depositados subjacentes. Essa interface é importante no processo de amarração dos poços que será melhor abordado no próximo capítulo.

Em dois poços (poços G e I) haviam informações da onda P no pós-sal. Estes valores poderiam ter sido utilizados na obtenção de velocidades na região acima da Formação Ariri através de interpolações entre os poços. Contudo, esse procedimento possui baixo grau de confiança devido a problemas como:

- i) A variação da velocidade em relação ao grau de compactação das rochas siliciclásticas e carbonáticas na região de estudo que não é bem compreendida;
- ii) A pouca disponibilidade de perfil petroelásticos no pós-sal;
- iii) A grande distância entre os poços, o que dificulta a interpolação entre os valores e poderia levar a erros consideráveis.

Para contornar o problema de complementação de velocidades no pós-sal, foram utilizados os valores oriundos do modelo de velocidades usado no processo de migração sísmica (Figura 37). A partir deste modelo foram extraídas pseudo-curvas ao longo da trajetória dos poços no pós-sal (do fundo do mar até o topo da Formação Ariri). O modelo de velocidades apresentava valores de velocidades suavizados que não contemplavam, de forma satisfatória, a complexidade geológica das diferentes fácies do pós-sal. Contudo, para o presente trabalho estas velocidades atendem ao objetivo de se construir o contraste de impedância associado à interface entre os sais da Formação Ariri e os sedimentos a ela sobrejacentes.

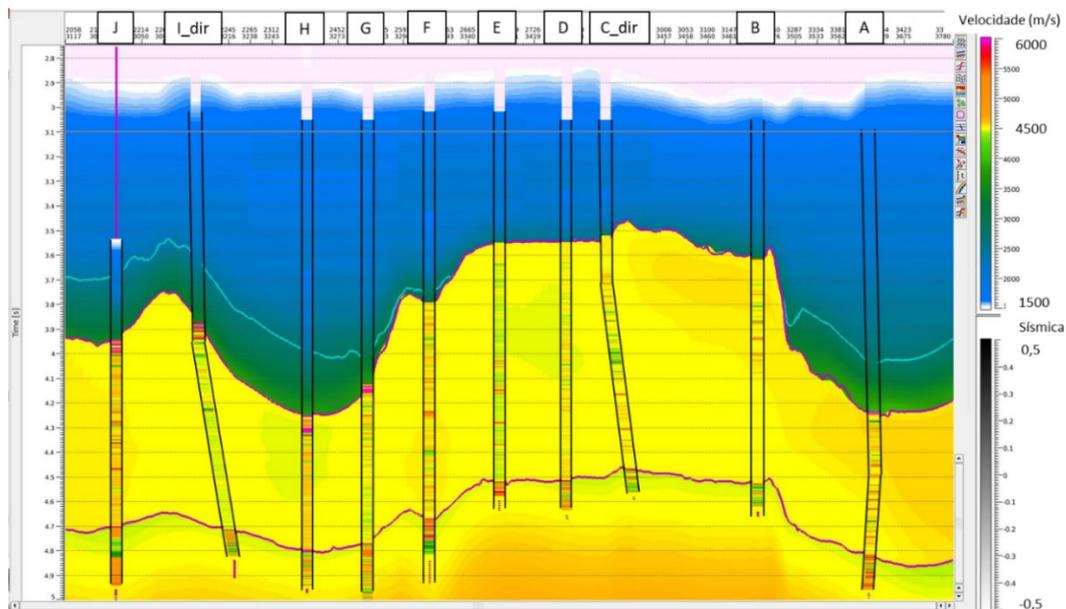


Figura 37: Modelo de velocidades com os perfis de velocidades dos poços. As velocidades dos poços foram extraídas ao longo da trajetória no modelo gerado pela tomografia sísmica.

Para a complementação da curva de velocidade S, analisou a relação entre esta propriedade com a onda P (Figura 38). Ao ajustar um polinômio de terceira ordem através da técnica dos mínimos quadrados, obteve-se uma curva cuja correlação foi de 0,91 e erro médio de 61,65 m/s em relação aos pontos medidos pelos perfis S. Levando em consideração uma velocidade S de 2600 m/s, temos que o erro médio foi próximo a 2,5%, o que representa um bom ajuste nos valores. A partir dessa relação polinomial, foram calculadas as velocidades S em função das velocidades P nas regiões onde não haviam medidas de perfis sísmicos cisalhantes no intervalo de ocorrência da Formação Ariri.

No gráfico da Figura 38, constataram-se três regiões com uma densidade maior de pontos (círculos vermelhos na Figura 38), que foram interpretadas como possíveis ocorrências de sais mais puros. Outro motivo para sustentar esta interpretação, foi que estes valores estão próximos as medições realizadas em laboratório por MAVKO *et al.* (2009), conforme apresentado na Tabela 2.

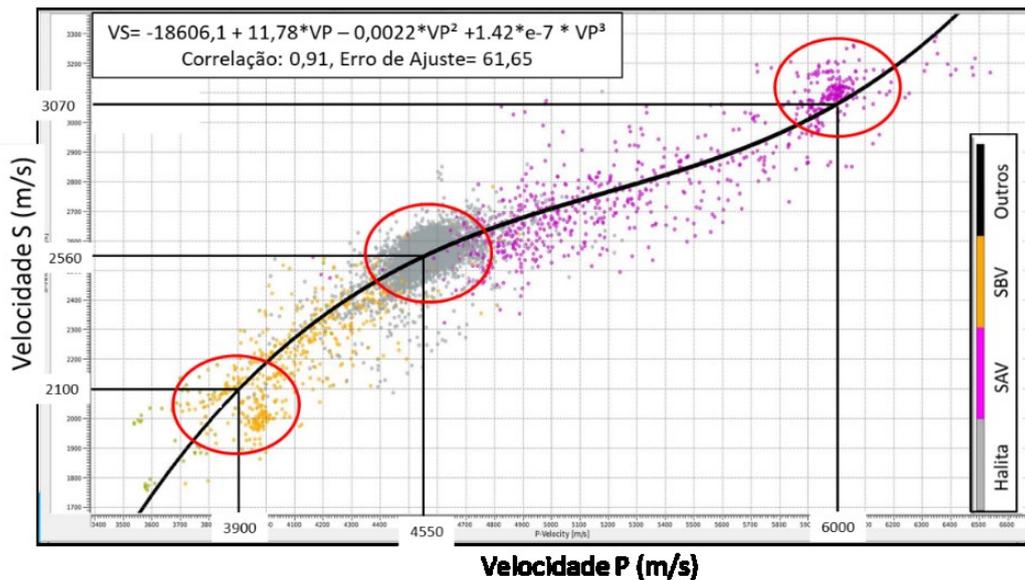


Figura 38: Gráfico cruzado entre velocidades compressional (P) e cisalhante (S) para os poços B, C, F, H e J. Os círculos representam o intervalo de valores que é interpretado como sendo relativo aos sais puros. A equação estimada, correlação dos pontos em relação ao polinômio e o erro de ajuste estão descritos na parte superior da figura.

Como controle de qualidade das curvas geradas se comparou os valores medidos pelos perfis com os valores estimados através da regressão polinomial (Figura 39). Pelo gráfico cruzado foi possível constatar que os valores estimados estavam satisfatórios, pois o erro médio ficou na casa dos 2% e aproximadamente 95% das estimativas apresentaram uma dispersão máxima de 10%.

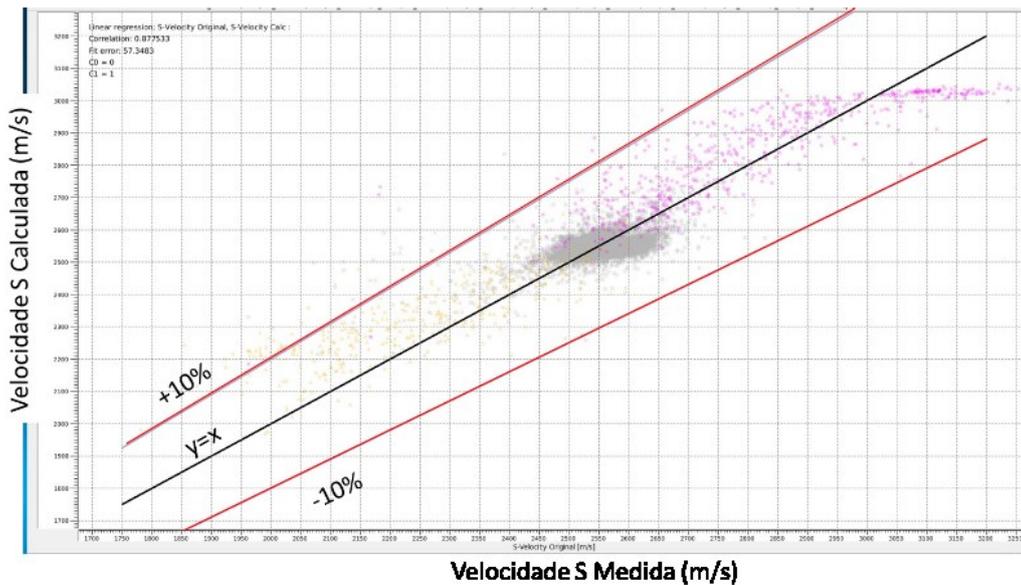


Figura 39: Gráfico cruzado entre velocidade S medidas por perfis e as calculadas através da relação de poços. Cerca de 95% dos valores estimados possuem até 10% de erro em relação ao medido por poços.

Para completar a informação da velocidade cisalhante no pós-sal utilizou-se a relação de CASTAGNA *et al.* (1985), conforme se segue:

$$V_p = 1160 * V_s + 1360. \quad (10)$$

no qual  $V_p$  é a velocidade compressional em m/s e  $V_s$  a velocidade cisalhante em m/s.

Para a complementação da curva de densidade, foi estimado uma relação entre esta propriedade e a velocidade P (Figura 40). Contudo, as tentativas de ajustar uma relação entre as propriedades, independente do grau polinomial, levaram a erros acima do tolerável (até 5%) entre o medido e o calculado. A provável razão para o alto desvio reside no fato de que o estudo dispõe apenas de um perfil de densidade para a região. Devida a baixa disponibilidade de informações de densidade e ao alto erro, optou-se por estimar regressões para cada tipo de sal. Para a halita e os SBV foram calculados relações lineares, já para os SAV foi utilizado um polinômio do segundo grau.

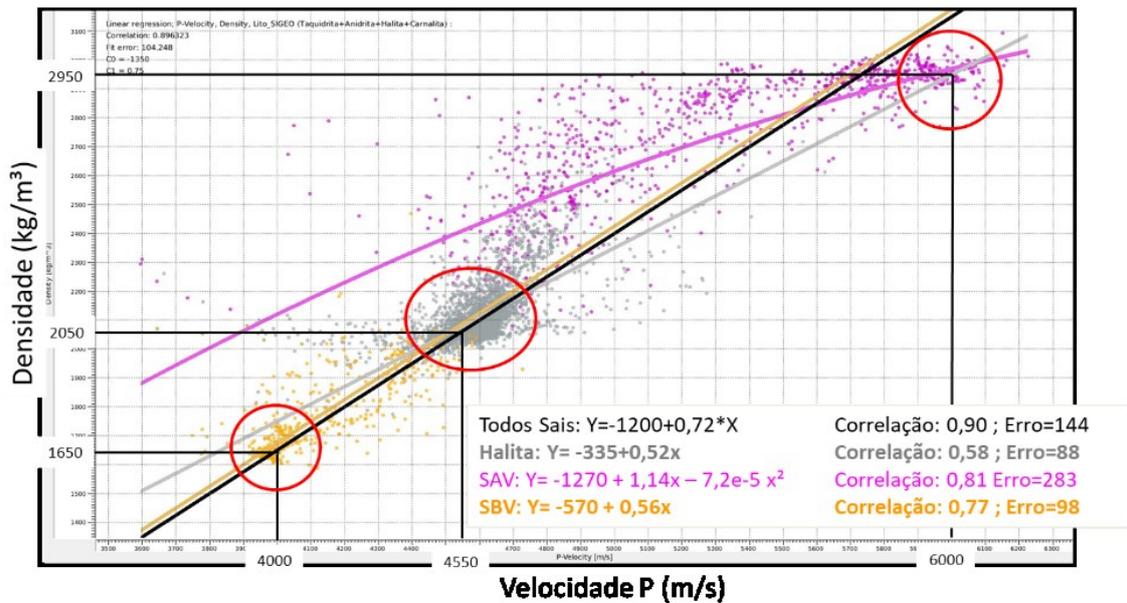


Figura 40: Gráfico cruzado entre velocidade P e a densidade para o poço J. Os círculos representam o intervalo de valores que é interpretado como sendo relativo aos sais puros. As equações estimadas, as correlações dos pontos em relação aos polinômios e os erros de ajuste estão descritos na parte inferior da figura.

Contraopondo a densidade medida com a calculada (Figura 41), constatou-se um erro maior quando comparado à predição da velocidade S. Os valores estimados apresentaram uma dispersão de até 20% em relação ao valor medido e um erro médio de 5,5%. A menor previsibilidade para a densidade se deu justamente pela baixa disponibilidade de medidas desta propriedade.

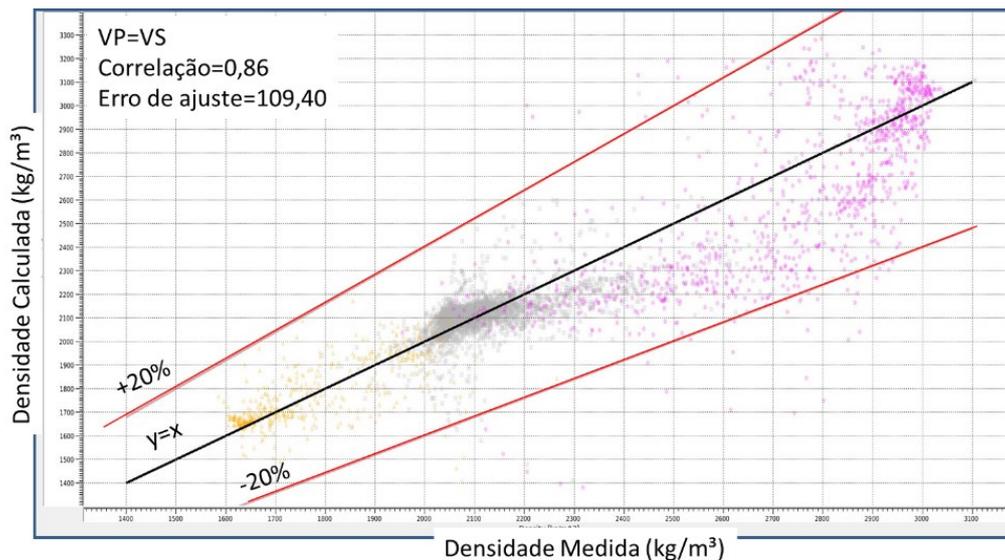


Figura 41: Gráfico cruzado entre a densidade medida e calculada. Nota-se que a maioria dos valores estimados tiveram erros de até 20% em relação as medidas de poços.

A densidade, assim como o perfil sônico S, não possui informações no pós-sal na área de estudo. Para complementar essa propriedade foi utilizada a relação de GARDNER *et al.* (1974) sobre os valores extraídos do modelo de velocidades a partir da tomografia:

$$\rho = a \times Vp^b, \quad (11)$$

com  $a = 310$  e  $b = 0,25$ ,  $\rho$  a densidade em  $\text{kg/m}^3$  e  $Vp$  a velocidade compressional em m/s.

A Figura 42 apresenta um resumo de todos os procedimentos realizados para a complementação das curvas do poço H. Pela figura é possível notar que todas as propriedades petroelásticas foram preenchidas nos intervalos da seção evaporítica e pós-sal.

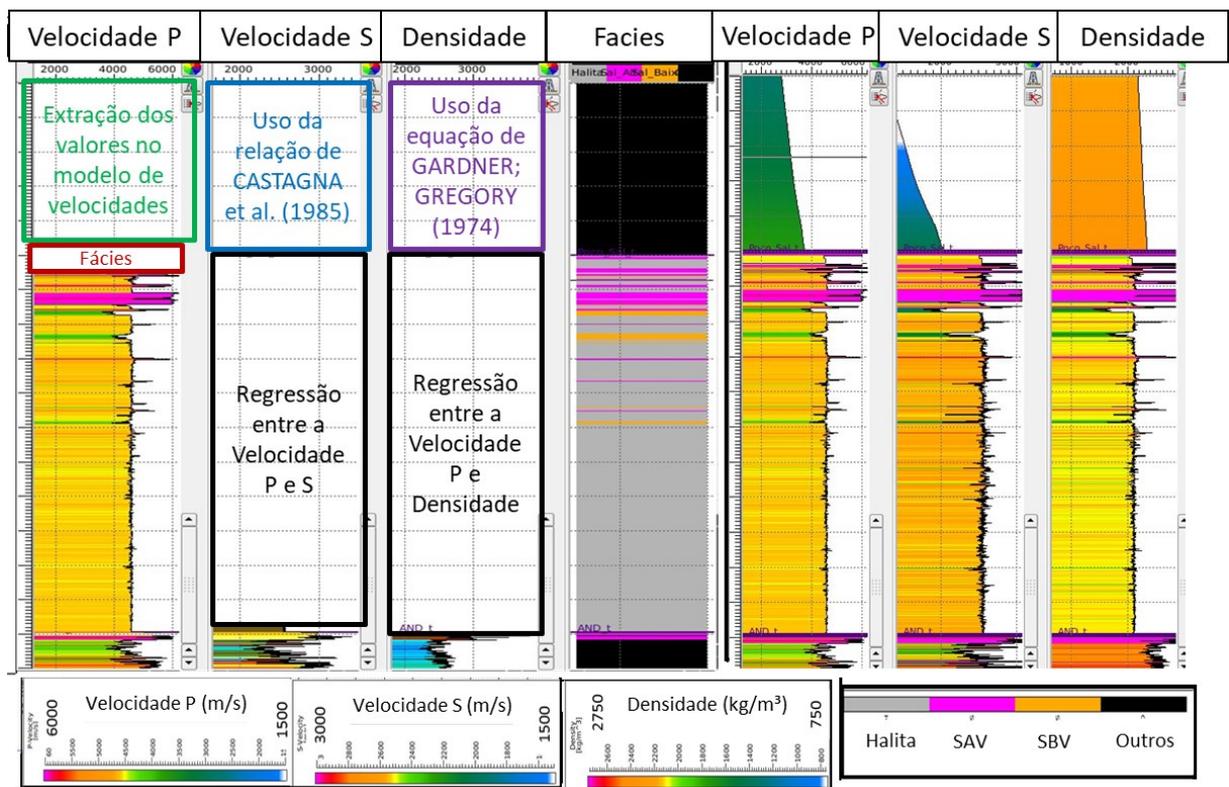


Figura 42: Curvas do poço H descrevendo todos os procedimentos adotados para complementar as curvas

Além de complementar os perfis pelos procedimentos descritos anteriormente, tentou-se verificar a aplicabilidade das relações de literatura nas estimativas das propriedades a partir das medidas de velocidade P no intervalo da seção evaporítica para todos os poços. Para esta tarefa foram utilizadas

novamente a relação de CASTAGNA *et al.* (1985) no cálculo das velocidade S (Figura 43.A) e GARDNER *et al.* (1974) para estimar a densidade (Figura 43.B).

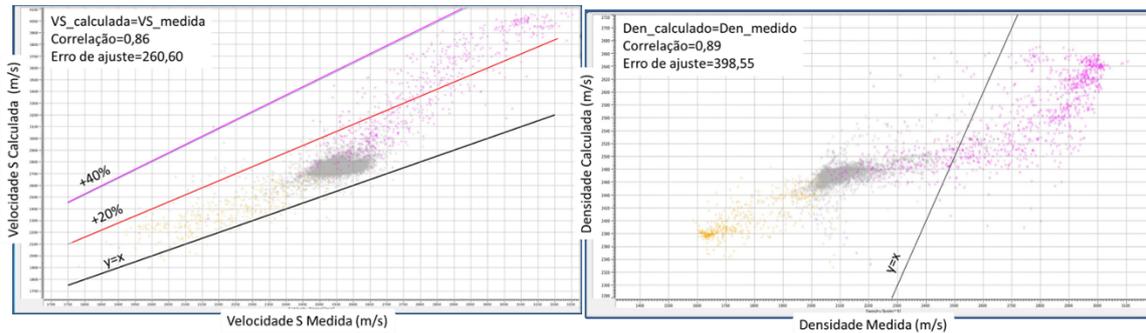


Figura 43: A: Gráfico cruzado entre a velocidade S medida por perfil e a calculada por CASTAGNA *et al.* (1985). B: densidade de poço versus densidade estimada a partir de relação de GARDNER *et al.* (1974).

As predições resultantes das equações da literatura apresentaram erros consideráveis entre os valores medidos por poços com os calculados. As estimativas das velocidades S atingiram até 40% de dispersão e um erro médio na ordem de 10% nos valores. Outro aspecto verificado, foi que mais de 95% das estimativas ficaram acima das leituras obtidas por perfis. Com base nessas constatações, foi possível concluir que a relação de CASTAGNA *et al.* (1985) superestima os valores de velocidade S para os sais, ao menos nesta área de estudo. Já a predição da densidade através da relação de GARDNER *et al.* (1974) apresentaram erros ainda maiores, com valores médios próximos a 19%.

Os desvios entre os valores estimados através das equações consagradas na literatura com as medidas dos poços, provavelmente deve-se ao fato destas relações terem sido concebidas para rochas siliciclásticas (arenitos e folhelhos). Conforme mencionado anteriormente, as propriedades petroelásticas dos sais apresentam uma grande discrepância em relação aos demais tipos de sedimentos (Figura 3).

## 5.2 Interpretação 3D dos Sais

Neste capítulo serão abordados os estudos a respeito da interpretação 3D do intervalo da seção evaporítica, utilizando informações de poços, sísmica e modelo de velocidades oriundo de uma tomografia sísmica. O dado de amplitude apresentou, de uma maneira geral, boa qualidade e um alto nível de sinal/ruído. As informações das amplitudes chegavam até o tempo duplo de 8 segundos,

sendo que as reflexões relativas a Formação Ariri ocorriam entre os intervalos de 3 a 6 segundos (Figura 44). Neste trabalho, optou-se por trabalhar com a sísmica em tempo para evitar as conversões entre os domínios do tempo e profundidade, poupando assim o custo de máquina associado a este processo.

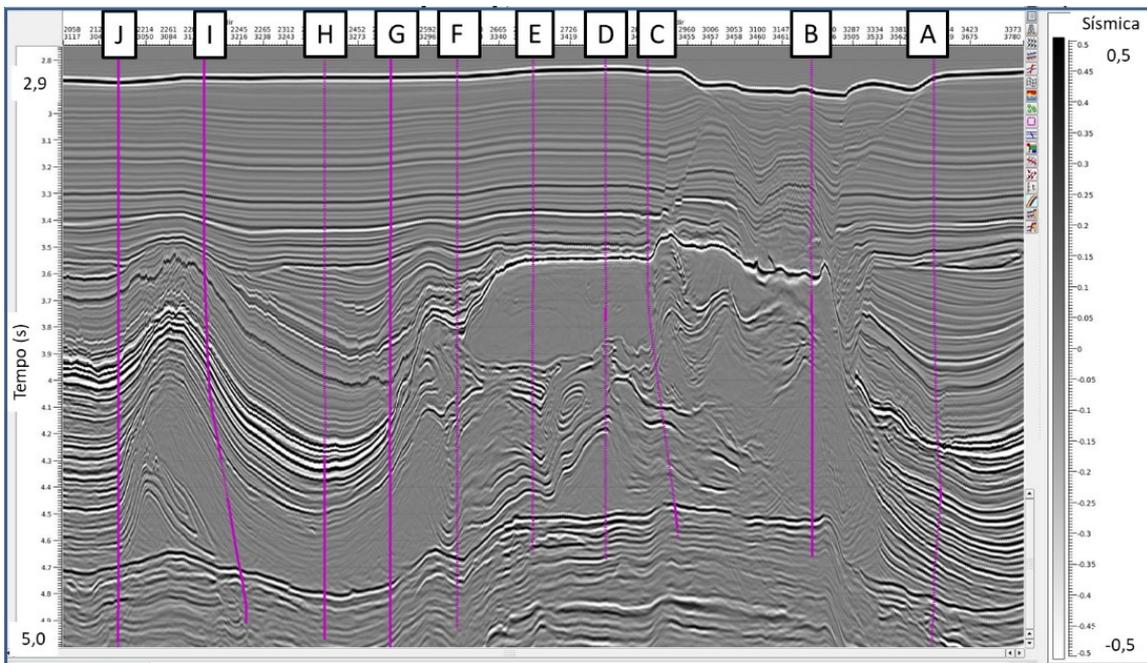


Figura 44: Seção sísmica arbitrária em tempo passando pelos poços perfurados (trajetórias em roxo) na área de estudo.

A frequência de pico da sísmica, no intervalo de ocorrência da Formação Ariri, foi em torno de 30 Hz (Figura 45). Levando em consideração esta frequência de pico, uma velocidade compressional média na ordem de 4500 m/s e o critério de resolução sísmica como sendo um quarto do comprimento de onda (WIDESS, 1973), tem-se que a resolução vertical do dado é aproximadamente 37,5 m.

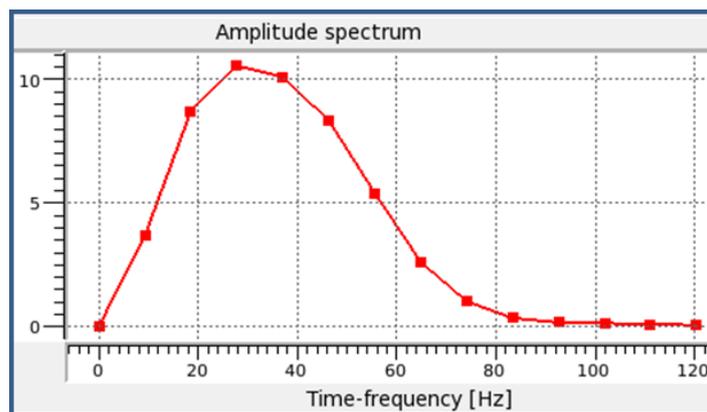


Figura 45: Espectro de amplitude da sísmica no intervalo equivalente à seção evaporítica. A frequência de pico é de aproximadamente 30 Hz.

Pela sísmica foi possível reconhecer feições geológicas como falhas, discordâncias, *rafts* carbonáticos, minibacias e diferentes estruturas originadas da halocinese dos sais. Quatro fácies sísmicas foram identificadas na seção evaporítica, estas interpretações foram baseadas no comportamento das reflexões sísmicas e dos sais identificados nos poços (Figura 46). As definições utilizadas para o reconhecimento das fácies sísmica são similares às proposições de YAMAMOTO *et al.* (2016) e MAUL *et al.* (2018a):

- i) Fácies sísmica estratificada: foi representada por regiões com uma intensa alternância de refletores na sísmica. Na Figura 46 foi possível verificar a concordância entre os sais presentes nos poços e as reflexões sísmicas;
- ii) Fácies sísmica homogênea: caracterizou-se pela ausência de reflexões da sísmica e predominância da halita com ou sem intercalações de outros sais, cujas espessuras estão abaixo do limite de resolução da sísmica;
- iii) Fácies sísmica caótica: áreas onde as reflexões apresentavam geometrias erráticas, inclinadas, dobradas;
- iv) Fácies sísmica oculta: No dado de amplitude, esta fácies caracterizou-se pela ausência de refletores, porém em poços foram constatados pacotes de sais (diferentes da halita) com espessura acima do limite de resolução da sísmica.

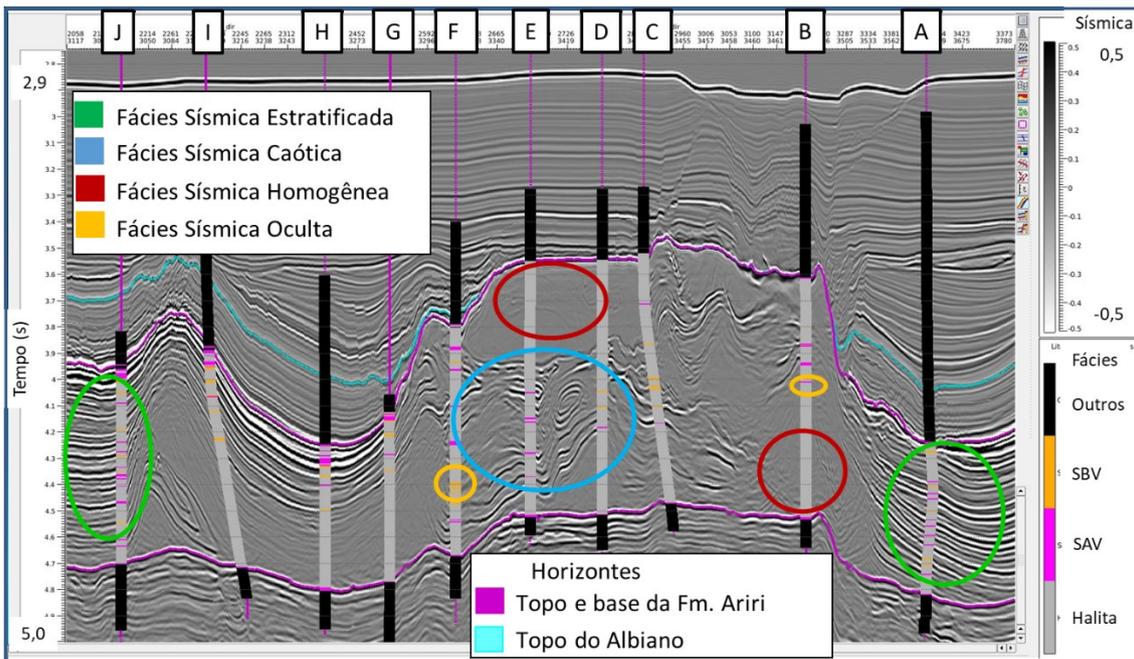


Figura 46: Estudo de fácies sísmica da seção evaporítica. Foram reconhecidas quatro fácies sísmicas que possuíam padrões diferenciados na disposição dos refletos.

Concomitante ao estudo de fácies sísmica, foi realizado o mapeamento dos refletos associados às intercalações dos sais. A interpretação sísmica foi baseada nos conceitos de ciclos salinos propostos por GAMBOA *et al.* (2008) e RODRIGUEZ *et al.* (2018). Foram mapeados topo e base da seção evaporítica, três superfícies internas relativas à separação dos quatro ciclos salinos e, ainda, o topo dos carbonatos do Albiano.

A base e o topo da Formação Ariri, assim como o topo dos carbonatos do Albiano são representados por refletos de boa continuidade e rastreabilidade na sísmica e, devido a isso, puderam ser interpretados por toda a extensão da área. Já os mapeamentos das superfícies internas da Formação Ariri por outro lado, apresentaram um maior grau de complexidade devido à ausência de refletos em algumas regiões. Nas porções sem reflexões, os horizontes foram gerados através de interpolações utilizando pontos adjacentes (Figura 47).

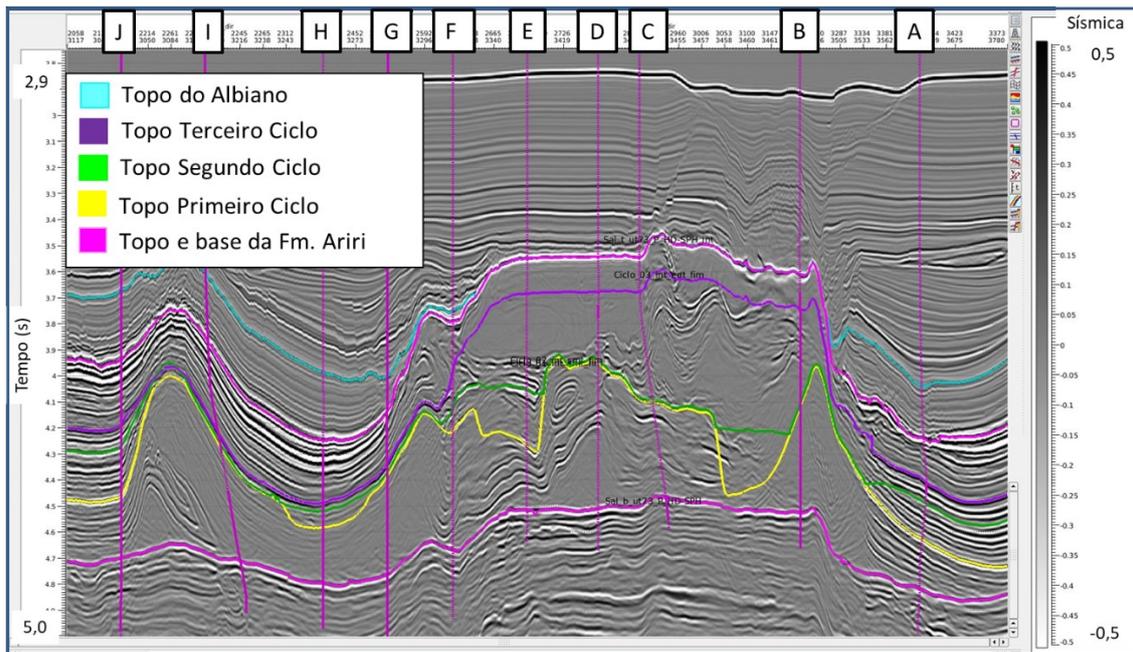


Figura 47: Seção sísmica com a interpretação dos quatro ciclos salinos e do Albiano conforme GAMBOA *et al.* (2008). Foram mapeados no total seis superfícies referente a essas feições. A base da Formação Ariri equivale ao início do primeiro ciclo, e, o topo da seção evaporítica é relativo ao fim do quarto ciclo salino.

Nos poços, os ciclos salinos foram interpretados baseados nas informações das curvas de amostra de calha, perfis elétricos e horizontes interpretados na área (Figura 48). Os ciclos identificados nos poços honraram satisfatoriamente o posicionamento em relação ao respectivo horizonte. Nos casos em que foram identificadas discrepâncias entre os posicionamentos, os horizontes passavam por uma reinterpretação focada na região dos poços a fim de mitigar essas diferenças. Os ciclos de precipitação dos sais definidos neste trabalho apresentavam as seguintes características:

- i) O primeiro ciclo consiste em uma anidrita basal que chega a ter 50 metros de espessura e corresponde ao selo dos reservatórios carbonáticos do Presal, logo acima ocorre uma espessa sequência de halita que representa a principal fácies deste ciclo (Figura 48). Na sísmica, este ciclo é demarcado na base pelo forte refletor associado a base da Formação Ariri e no topo pelo mesmo mineral, no restante da seção este ciclo apresenta uma fácies sísmica homogênea;
- ii) O segundo ciclo é delineado na base por uma anidrita e é constituído por intercalações de halita, SAV e SBV. Às vezes, os sais complexos

de K e Mg não ocorrem no ciclo. Na sísmica este ciclo apresenta uma intensa intercalação entre refletores associados a essa variação de sais;

- iii) O terceiro ciclo se inicia pela anidrita de topo da sequência anterior e é constituído predominantemente por halita. O seu topo por vezes não é bem definível pelas fácies dos poços. Este ciclo apresenta características parecidas ao primeiro, contudo sua espessura é menor. Na sísmica ele apresenta fácies sísmica homogênea e suas superfícies foram difíceis de se delimitar;
- iv) O quarto e último ciclo é representado por uma intensa intercalação de sais nos poços e também pela baixa espessura constatada na sísmica. Este ciclo corresponde ao final da sedimentação da Formação Ariri e o seu topo é demarcado por uma anidrita espessa e contigua. No dado de amplitude, este ciclo apresenta fácies sísmica estratificada, caótica e em algumas regiões fácies sísmicas homogêneas.

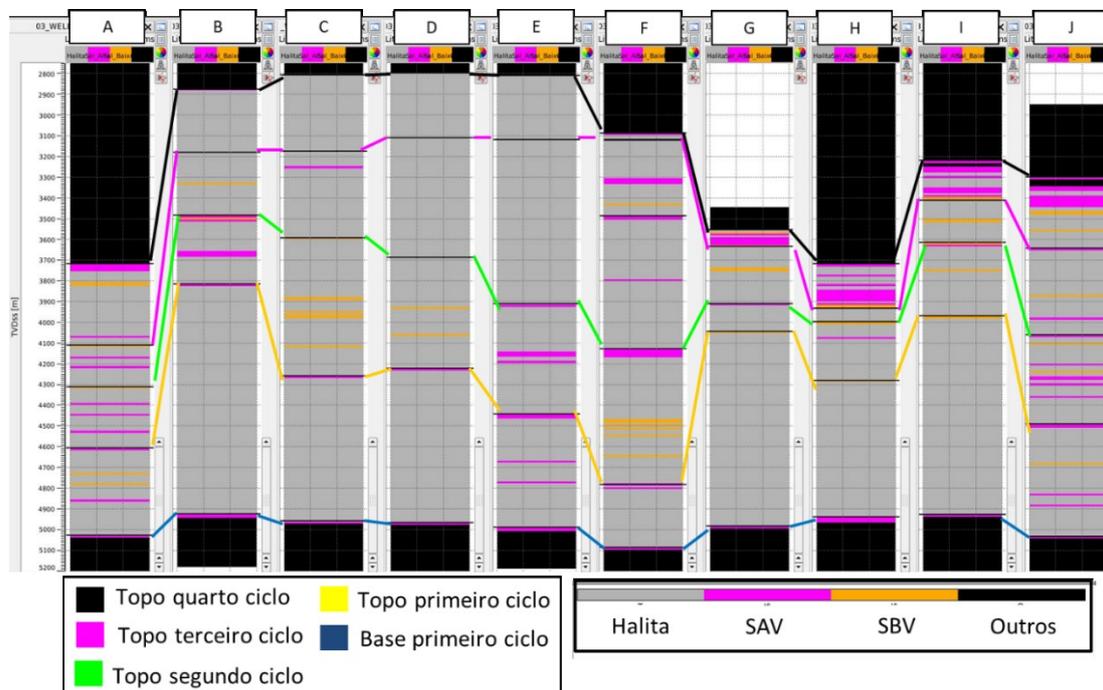


Figura 48: Ciclos salinos reconhecidos nos poços, conforme GAMBOA *et al.* (2008).

Pela Figura 49 é possível observar que a seção evaporítica apresenta uma considerável variação topográfica (em tempo) na região de estudo. Na

porção centro norte da área, um grande domo salino foi formado com direção preferencial NE-SO (região em rosa da Figura 49.E), ao seu redor a seção evaporítica torna-se mais delgada e está sotoposta a espessas camadas de carbonatos depositados durante o Albiano. Ao sul da área, tem-se a ocorrência de um anticlinal de sal (região em preto da Figura 49.E), demarcado pela estruturação do topo da Formação Ariri e pelas reflexões internas que jazem paralelas em relação a crista desta feição (Figura 47 e Figura 49.E).

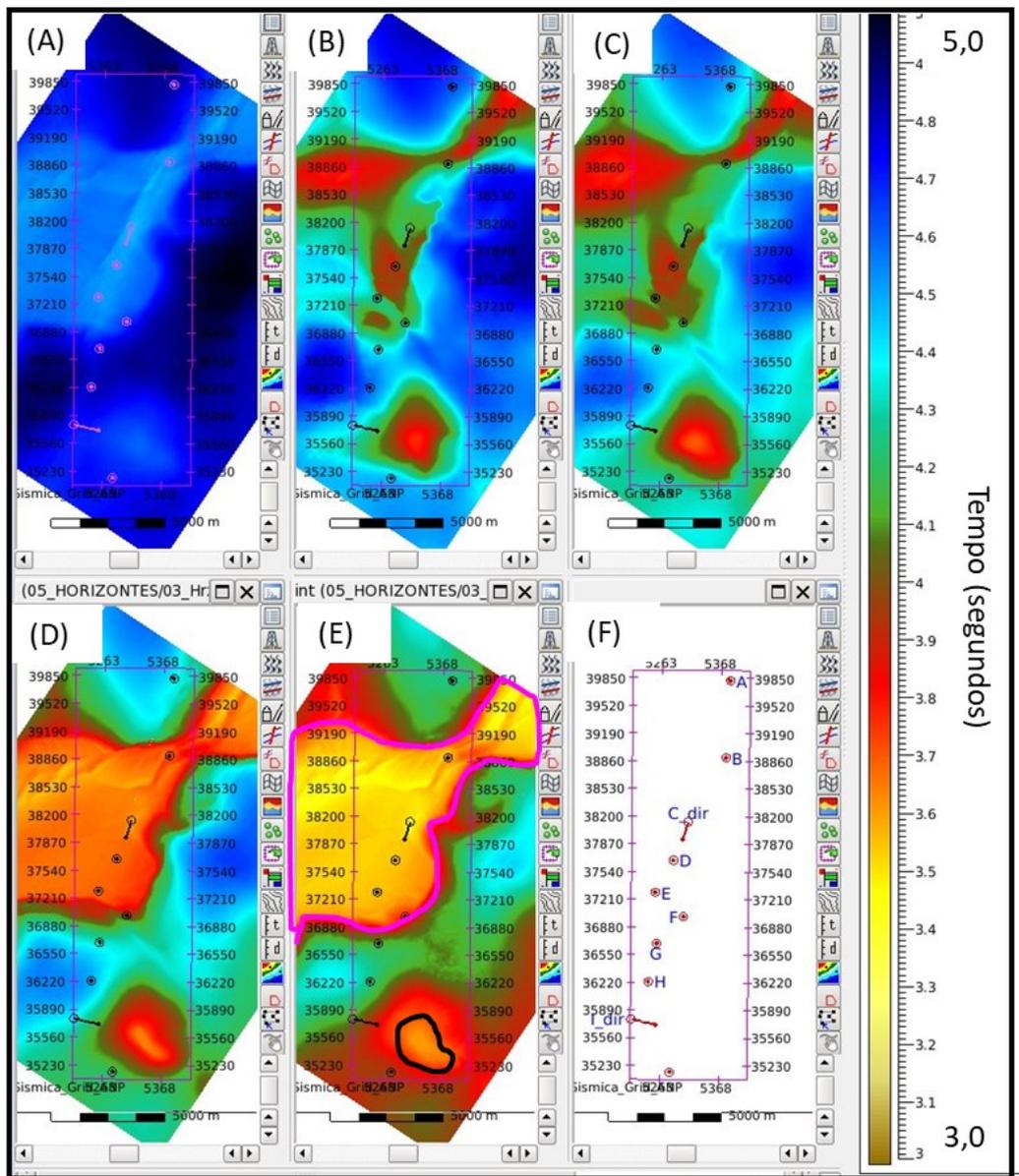


Figura 49: Mapas com os topos estruturais (em tempo) dos ciclos salinos e a localização dos poços. (A) Base da seção Formação Ariri que equivale à base do ciclo 01; (B) Topo do ciclo 01; (C) Topo do ciclo 02; (D) Topo do ciclo 03; (E) Topo do ciclo 04 ou topo da seção evaporítica, o domo salino está circundado em roxo e o anticlinal em preto, as demais áreas são regiões sobrejacentes as minibacias do Albiano; (F) Polígono da área de estudo.

Analisando os mapas de espessuras (em tempo) dos ciclos salinos da Formação Ariri contatou-se uma variabilidade conforme exposto na Figura 50. A espessura total da Formação Ariri apresentava o valor de 1 s na região do domo salino, de 0,5-0,6 s nas zonas onde ocorriam a fácies sísmica estratificada (minibacias) e 0,9 s no anticlinal localizado na porção sul. Quanto a espessura dos ciclos salinos, contatou-se que o primeiro ciclo apresentava os maiores valores (Figura 50.B) enquanto o segundo foi o mais delgado (Figura 50.C).

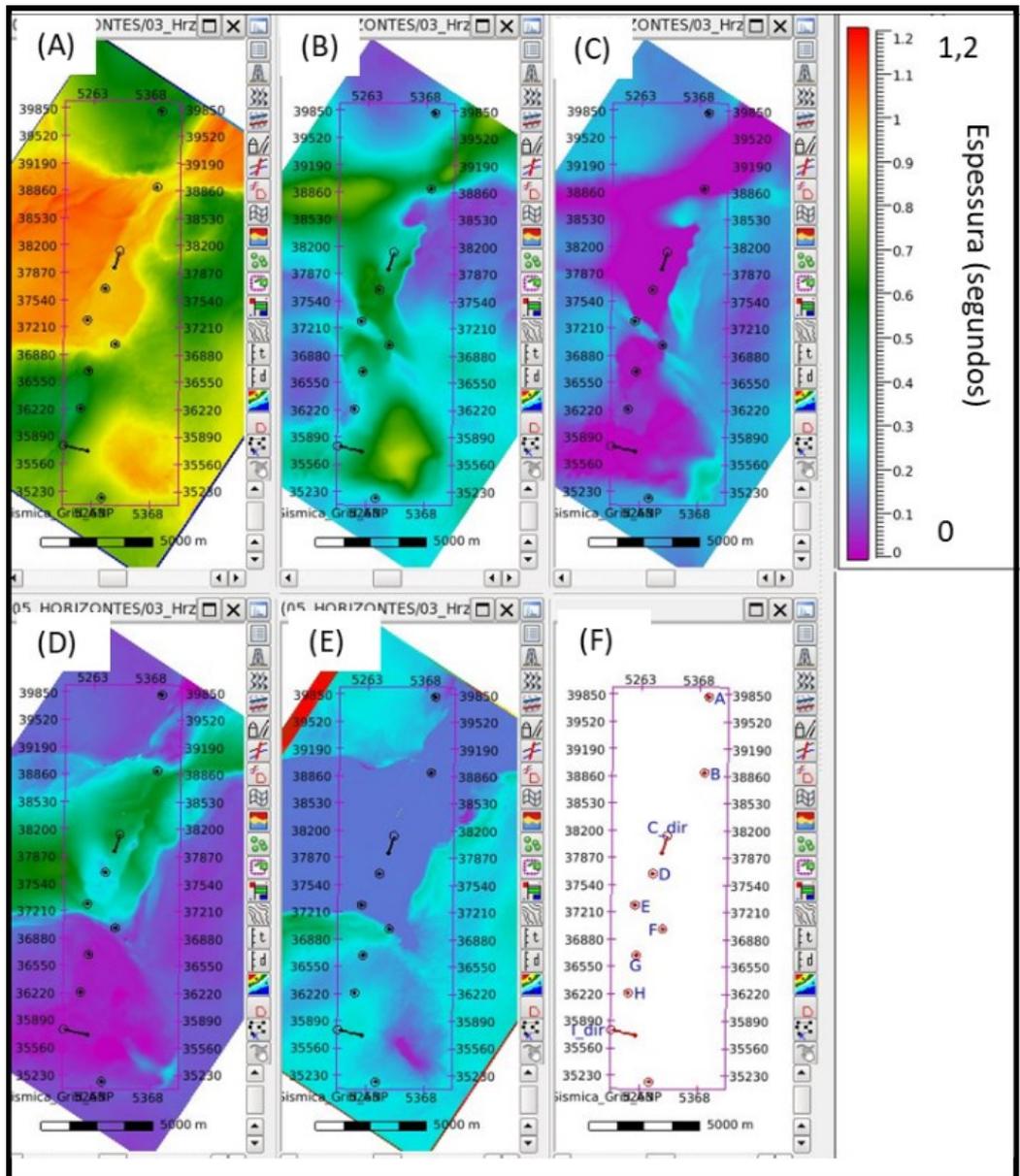


Figura 50: Mapas de espessura (em tempo) dos ciclos mapeados. (A) Espessura da Formação Ariri; (B) Espessura ciclo 01; (C) Espessura ciclo 02; (D) Espessura ciclo 03; (E) Espessura ciclo 04; (F) Polígono da área de estudo com a nomenclatura dos poços.

Finalizado a interpretação 3D da Formação Ariri, realizou-se então o processo de amarração dos poços ao dado sísmico em tempo (Figura 51). Os sintéticos foram obtidos a partir da convolução entre a refletividade dos poços com as *wavelets* estimadas durante o processo de amarração. Estes operadores foram calculados a partir das informações dos traços sísmicos ao redor dos poços e dos perfis sônicos. Cada *wavelet* teve comprimento equivalente a 0,104 s e janela de estimativa de aproximadamente 0,360 s. A fase do operador foi imposta como sendo zero, devido ao fato do processamento sísmico ser também de fase zero. Para maiores detalhes a respeito do processo de amarração consulte o Apêndice A.

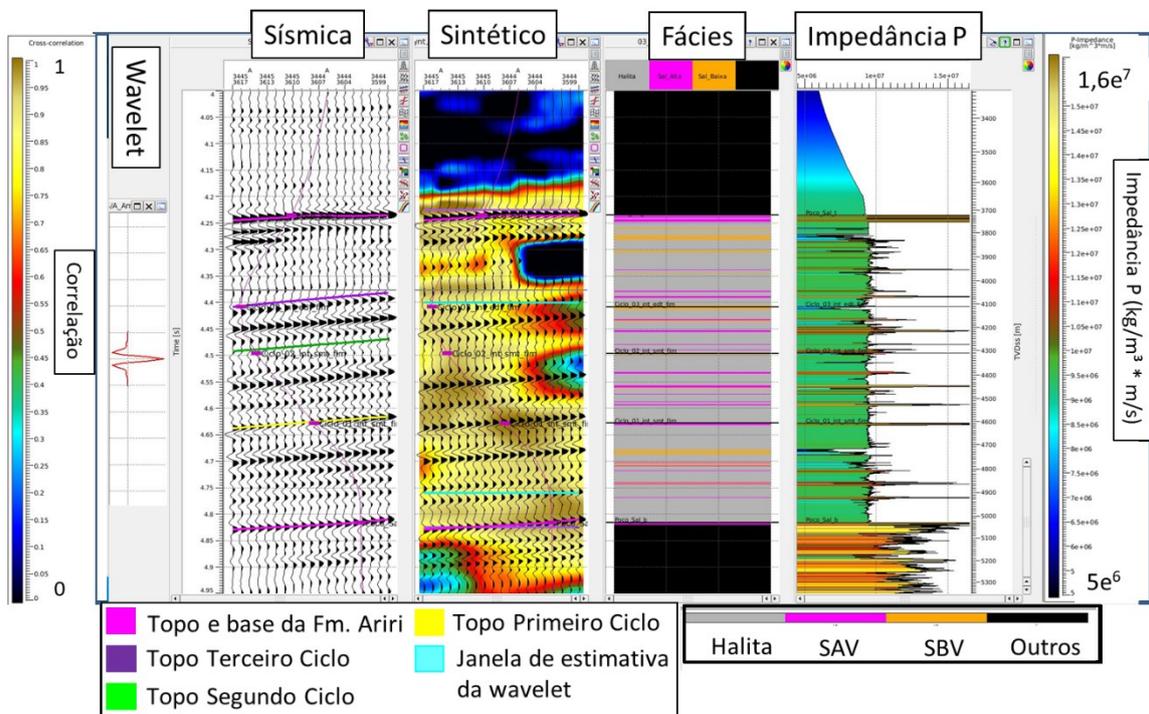


Figura 51: Amarração poço-sísmica do poço A. No painel da sísmica são apresentados os horizontes mapeados relativos aos quatro ciclos salinos. No painel do sintético são visualizados os traços sintéticos e o seu grau de correlação com a sísmica, no caso deste poço o valor foi de 80%. O painel das fácies ilustra os sais agrupado e, por fim, no ultimo painel é exibido a impedância acústica calculada a partir da velocidade e da densidade.

Variações quanto à disposição e comportamento petroelásticos dos sais impactaram na amarração dos poços. O grau de correlação entre o dado sintético e a sísmica foi um dos balizadores da qualidade do processo, quanto maior for este fator, melhor ajustado o poço está na sísmica (Tabela 12). Poços perfurados em regiões com predominância de fácies sísmica estratificada

apresentaram boas correlações (como foi o caso do poço A mostrado na Figura 51). Já poços dispostos em zonas com fácies sísmica homogênea resultaram em baixas correlações em razão da não ocorrência de reflexão (Figura 52). Sem sinal não foi possível estabelecer uma correlação entre os traços sintético e sísmicos, levando o valor deste fator próximo a zero. Já zonas com predominância de fácies sísmica caótica, resultaram em correlações de aproximadamente 50% (Figura 52).

Tabela 12: Quadro comparativo entre os valores de correlação sísmica/ sintético, espessura do sal e fácies sísmica. Na última coluna a primeira fácies descrita corresponde à feição predominante no poço. Nota-se que locações em regiões com predomínio de fácies sísmica estratificada apresentam as maiores correlações enquanto que nas porções com ocorrência de fácies homogênea a correlação é baixa.

	Correlação média sísmica/ sintético	Espessura do sal (m)	Fácies sísmica
A	80,00%	1297,36	Estratificada
B	31,00%	2048,65	Homogênea/ Caótica
C	15,00%	2155,41	Homogênea/ Caótica
D	39,00%	2168	Homogênea/ Caótica
E	49,00%	2182,01	Caótica/ Homogênea
F	50,00%	1998,93	Caótica/ Homogênea
G	75,00%	1429,97	Estratificada/ Homogênea
H	91,00%	1223,89	Estratificada/ Homogênea
I	15,00%	1711,98	Homogênea/ Estratificada
J	85,00%	1634,05	Estratificada
Média	53,00%	1785,03	

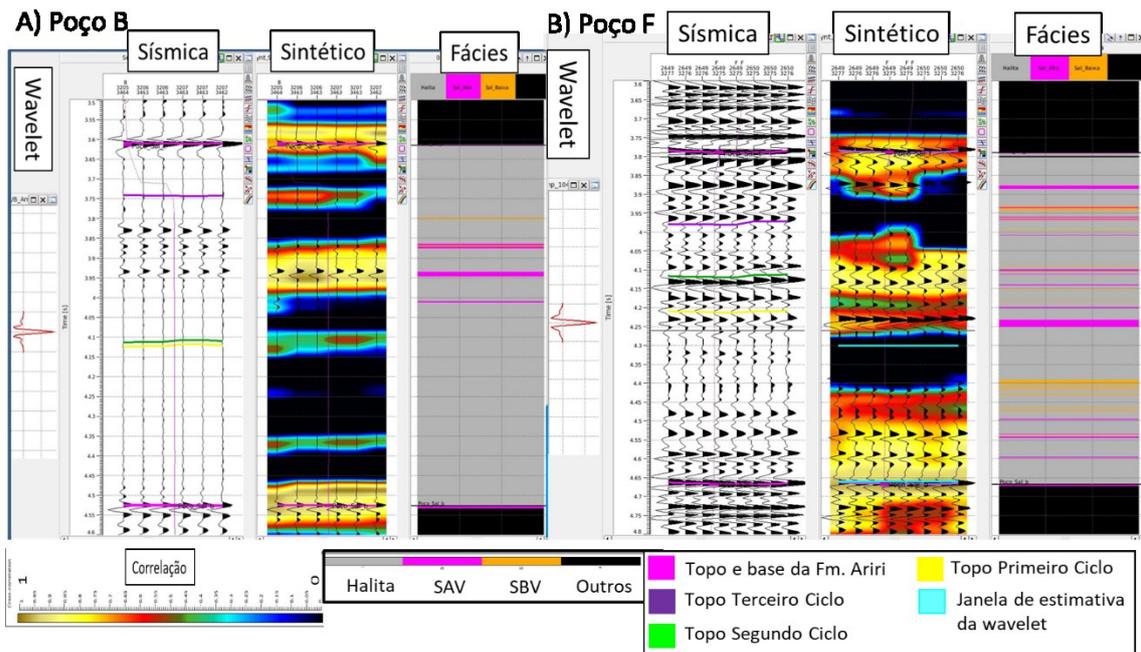


Figura 52: A) Amarração do poço B que está localizado em uma região com ocorrência de fácies sísmica homogênea, resultando em um fator de correlação de 31%; B) Amarração do poço F que perfurou uma região sísmica caótica, o fator de correlação neste caso foi de 50%.

As Figuras 51 e 52 ilustram diferenças entre as escalas de informação dos poços (com frequências de aquisição na ordem de kHz) e da sísmica (com frequências de pico de 30 Hz). Para analisar estes dados em conjunto, suas grandezas necessitam ser proporcionais, em vista disto, os perfis complementados foram filtrados de modo que ficassem em escala compatível com a sísmica (Figura 53).

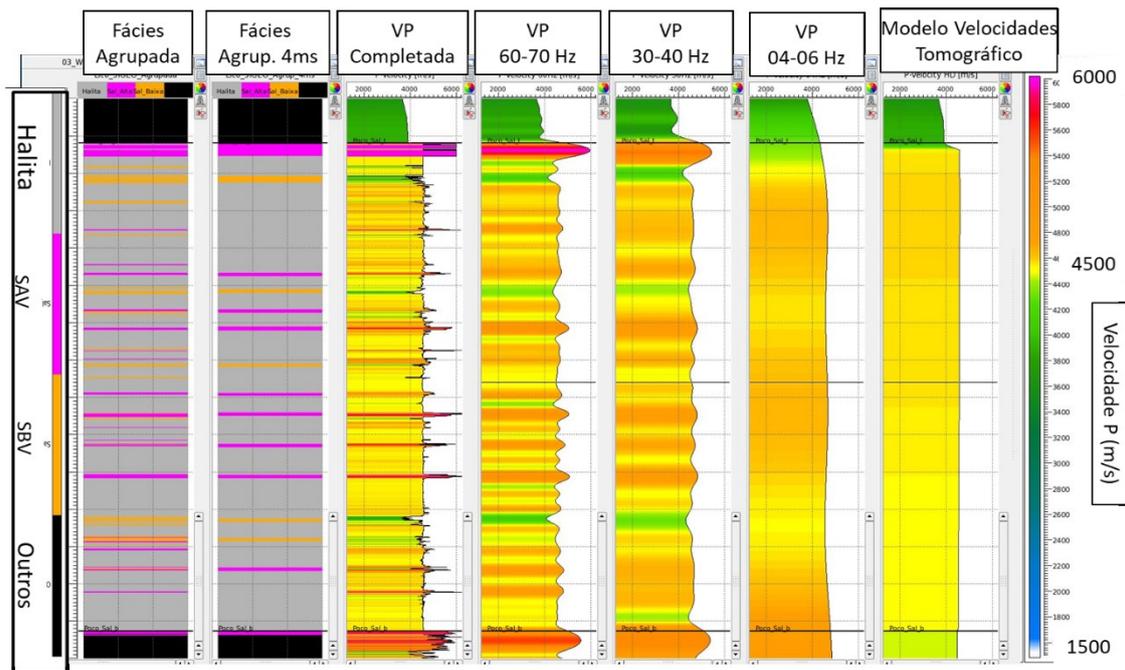


Figura 53: Filtragem em frequência das curvas de fácies e de velocidades complementadas do poço A. Notar a diminuição de ocorrências de SAV e SBV e o aumento de espessura dos mesmos. Para as velocidades, as informações se tornaram menos variáveis e seus valores convergiram para as médias encontradas para a halita (4500 m/s).

As curvas de sais agrupados foram reamostradas para 0,004 s em tempo, o que equivale a aproximadamente 5 metros em profundidade, visando uma melhor adequação da taxa de amostragem dos poços à sísmica (Tabela 13). Neste processo, camadas de SAV e SBV com espessuras iguais ou superiores a cinco metros continuaram presentes na curva reamostrada. Contudo, pacotes de sais que estavam abaixo deste limite (0,004 s) passaram a ser contabilizados como halita. Outro aspecto observado foi quanto ao espessamento de algumas camadas de SAV e SBV na curva reamostrada (Figura 53).

A proporção dos sais entre as curvas originais e as reamostradas apresentaram mudanças nos seus valores, conforme apresentado na Tabela 13. De um modo geral, houve aumento das ocorrências de halita e diminuição dos SAV e SBV. Porém, este padrão não se repete em todos os poços como foi o caso do poço H, onde verificou-se uma ligeira queda na proporção de halita e um aumento de SAV.

Tabela 13: Comparação entre as proporções de fácies agrupadas originais e das reamostradas. Pelos valores, nota-se que houve um aumento das proporções de halita e diminuição dos SAV e SBV para quase todos os poços.

	Halita	SAV	SBV	Halita (4ms)	SAV (4ms)	SBV (4ms)
A	86,13%	7,54%	6,33%	87,19%	9,01%	3,80%
B	94,37%	4,05%	1,58%	95,36%	3,78%	0,86%
C	92,65%	2,38%	4,97%	96,02%	1,35%	2,63%
D	97,90%	0,73%	1,37%	98,38%	0,86%	0,76%
E	94,39%	4,99%	0,62%	95,57%	4,43%	0,00%
F	83,76%	10,92%	5,32%	90,55%	6,52%	2,93%
G	92,14%	4,91%	2,95%	92,51%	4,54%	2,95%
H	87,78%	8,67%	3,56%	85,63%	11,08%	3,29%
I	90,43%	5,25%	4,32%	89,96%	6,32%	3,71%
J	83,69%	11,62%	4,69%	84,16%	12,35%	3,49%
Média	89,03%	7,13%	3,84%	92,22%	5,52%	2,26%

A suavização dos perfis petroelásticos para escalas próximas à sísmica consistiu em filtrar as altas frequências utilizando os seguintes valores: 60-70 Hz, 30-40 Hz e 4-6 Hz. O primeiro número, refere-se à frequência de corte e o segundo ao *slope* do filtro, que tem como função evitar o efeito indesejado conhecido como fenômeno de Gibbs<sup>4</sup>.

As filtrações das curvas, de um modo geral, reduziram os desvios padrão médio das velocidades, sendo que este efeito foi maior no filtro 4-6 Hz. Quanta a velocidade média, foi constatado uma diminuição quando se considerava todos os sais, a halita e os SAVs, contudo os SBVs apresentaram um aumento no valor conforme se reduzia o valor de corte do filtro de frequência. Pelos valores apresentados na Tabela 14, foi verificado que quanto menor é o valor do filtro, maior é a tendência das velocidades dos sais se aproximar do valor médio da halita, independente da fácies analisada.

Tabela 14: Tabela com as velocidades médias e desvio padrão da onda P para os sais nas curvas originais e filtradas, assim como para o valor extraído do modelo de velocidades.

Curva	Todos Sais	Halita	SAV	SBV
VP Original (m/s)	4566,03 ± 271	4535,77 ± 152	5369,88 ± 637	4163,04 ± 326
VP 60-70 Hz (m/s)	4552,16 ± 180	4533,5 ± 105	5145 ± 393	4262,12 ± 179
VP 30-40 Hz (m/s)	4551,48 ± 160	4531,03 ± 104	5022,86 ± 376	4352,33 ± 153
VP 04-06 Hz (m/s)	4548,86 ± 81	4523,99 ± 79	4608,93 ± 88	4467,16 ± 74

Simultaneamente, com os trabalhos de interpretação 3D da Formação Ariri foram calculados atributos sísmicos que auxiliaram no reconhecimento de

<sup>4</sup> O efeito de Gibbs é um fenômeno que diz respeito ao forte comportamento oscilatório dos valores à medida que se aproxima de algum ponto de descontinuidade.

feições presentes na Formação Ariri. Alguns dos atributos utilizados estão ilustrados nas seções sísmicas da Figura 54. O primeiro atributo apresentado, foi o modelo de velocidades tomográfico (Figura 54.B), que apesar de constar nesta seção, não foi obtido neste trabalho. Este modelo apresenta velocidades quase constantes com valores próximos à 4500 m/s e, portanto, não auxiliou na diferenciação dos sais na região de estudo.

O atributo envelope de energia (Figura 54.C) representa a energia instantânea do sinal e sua magnitude é proporcional ao coeficiente de reflexão, indicando possíveis regiões com contrastes de propriedades petroelásticas. Em seção é possível observar que este atributo consegue distinguir regiões com fácies sísmica estratificada das zonas homogêneas.

Por fim, o atributo frequência instantânea reflete a frequência do sinal sísmico. A Figura 54.D ilustra os valores estimados para este atributo, as regiões com reflexões na sísmica apresentaram as maiores frequências, já nas porções homogêneas este valor reduzia. Esta variação nas frequências foi resultante das limitações do algoritmo utilizado, pois o mesmo só conseguiu inferir valores em regiões onde haviam reflexões na sísmica.

Por todos os dados apresentados até aqui, foi possível observar uma relação entre o domo central, as minibacias e os padrões de fácies sísmicas presente na área de estudo. Baseado em evidências de poços e sísmica, chegou-se à conclusão que houve nesta área uma intensa mobilização dos SBV e halita em direção ao domo central, devido à sobrecarga resultante dos carbonatos do Albiano. Estas duas fácies se movimentaram devido ao seu comportamento mais plástico em relação aos SAV. Os SAV pouco se mobilizaram e ficaram concentrados nas regiões abaixo das minibacias. Apesar da movimentação dos sais (halita e SBV) em direção ao domo, a halita continuou sendo a fácies predominante nas regiões com fácies sísmica estratificada.

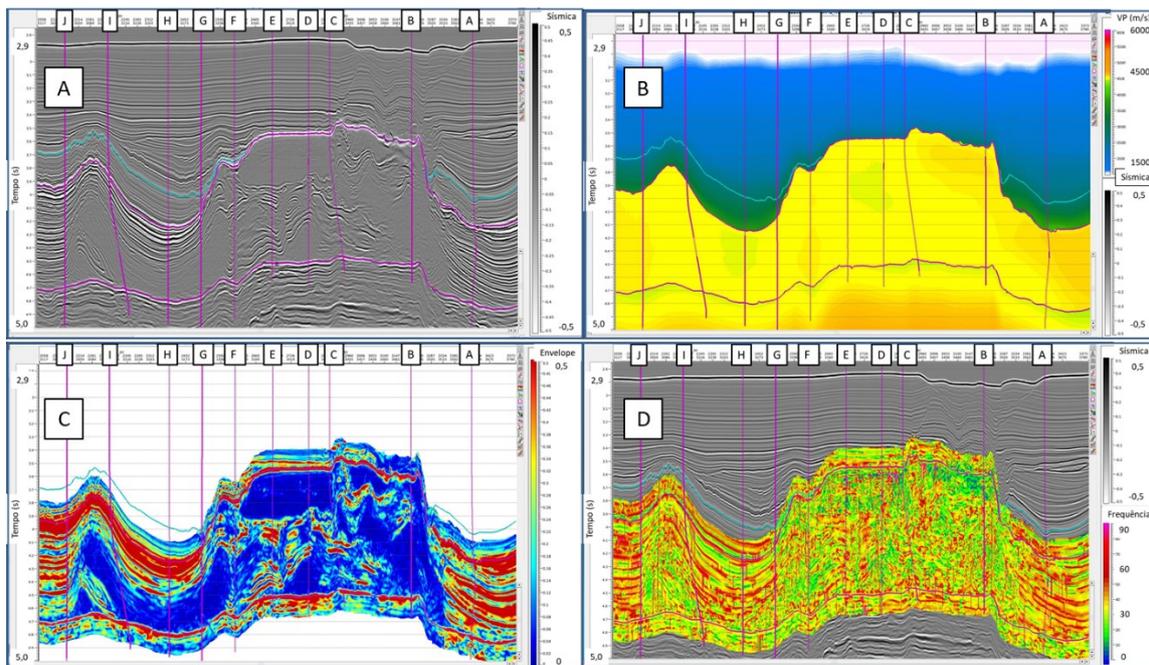


Figura 54: Seções arbitrárias mostrando diferentes dados. A) Sísmica; B) Modelo de velocidades oriundo da tomografia sísmica; C) Atributo envelope de energia; D) Atributo frequência instantânea

### 5.3 Importância da Inversão sísmica no Processo de Caracterização 3D das Propriedades dos Sais

Os trabalhos a respeito das distribuições de fácies e estruturas geológicas da Formação Ariri foram baseados em análises acerca das proporções e propriedades petroelásticas dos sais na escala 1D e interpretações geológicas utilizando o dado sísmico. Contudo, estudos a respeito do comportamento tridimensional das propriedades dos sais ainda não foram realizados. Nesta seção serão apresentadas as análises realizadas com o intuito de caracterizar as propriedades dos sais na dimensão 3D utilizando volumes de impedâncias oriundos do processo de inversão sísmica acústica.

O fluxograma do processo de inversão realizado e da caracterização 3D das propriedades está apresentado na Figura 55, onde os dados de entrada consistem no volume sísmico, perfis de poços e horizontes mapeados na área. Uma das etapas iniciais da inversão consistiu na amarração dos poços com a sísmica, processo já discutido no capítulo anterior. Durante a amarração de cada poço, foram estimadas *wavelets* que, por sua vez, entraram no cálculo do

operador médio utilizado na inversão. A partir dos poços amarrados e horizontes mapeados foram construídos modelos iniciais de propriedades com baixa frequência, extrapolando-se as propriedades (impedância acústica) seguindo a tendência gerada pelos horizontes mapeados. Com o modelo inicial, o volume sísmico e a *wavelet* média foi possível dar início ao processo de inversão sísmica acústica.

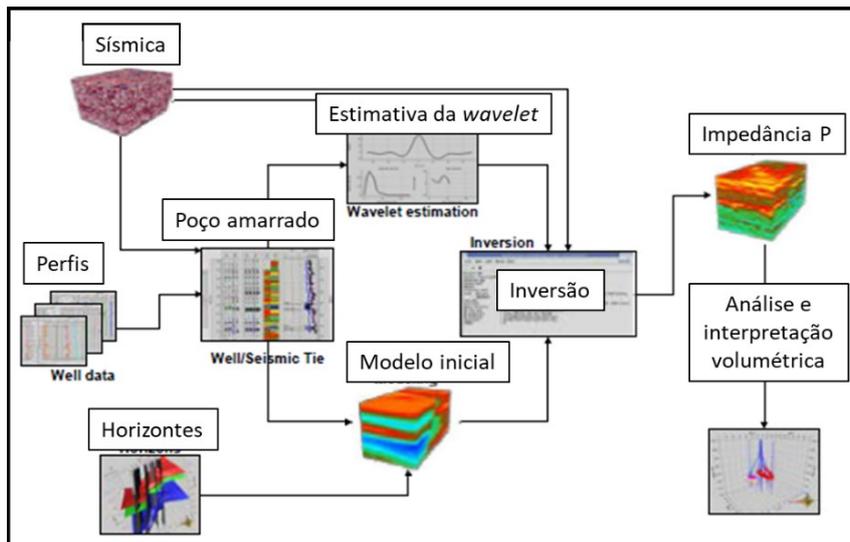


Figura 55: Fluxograma básico da inversão realizada neste trabalho (modificado do manual do usuário do aplicativo Jason®).

O aplicativo Jason®, baseia-se no algoritmo denominado *Constrained Sparse Spike Inversion* (inversão de picos esparsos com limitadores). Nesta rotina, o resultado considerado como ótimo (cubo de impedância acústica) é determinado pela minimização da função objetivo que contém as seguintes funções de *misfit*<sup>5</sup> todas de norma L1:

- i) Misfit do contraste: trata sobre esparsidade (*sparse*) da solução, isto é, se o resultado é ou não suave;
- ii) Misfit da sísmica: é baseado, principalmente, no resíduo entre a dado de amplitude e o sintético gerado durante o processo;
- iii) Misfit de tendência e espacial: ajusta a estabilização das baixas frequência do modelo inicial e das restrições impostas pela geologia da área (*geological constrains*).

<sup>5</sup> A tradução de *misfit* é desajuste, diferença.

As informações de 8 poços dos 10 disponíveis foram considerados como insumos na construção do modelo de baixa frequência e no controle de qualidade da parametrização da inversão. Os poços C e I foram excluídos do processo em razão do baixo coeficiente de correlação entre o traço sintético e o traço real da amarração. Estes poços foram utilizados posteriormente como testes cegos <sup>6</sup>(*blind tests*).

A *wavelet* é outro insumo essencial na inversão, no *software* utilizado apenas um único operador pode ser usado como entrada no processo de inversão. Em consequência disso foi estimado uma *wavelet* média dentre os oito operadores utilizados durante a amarração dos poços, as *wavelets* dos poços C e I também foram excluídas nesta etapa.

As *wavelets* utilizadas nas amarrações apresentaram uma variação de amplitude, com os operadores D e G apresentando os maiores valores enquanto as *wavelets* B e F exibiram as menores amplitudes (Figura 56.A). Esta inconstância dos valores de amplitude foi resultante da energia dos traços utilizados nas estimativas das *wavelets*, onde regiões com mais alta energia resultaram em operadores com valores maiores de amplitude. A *wavelet* média (Figura 56.B) também manteve as características dos dados de entrada, tais como o comprimento de 0,104 s e a fase zero. Sua frequência de pico foi de aproximadamente 28 Hz e não houve nós (*notches*) de frequência<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup>Testes cegos consistem em extrair informações de algum volume sísmico ou atributo na trajetória dos poços, gerando assim pseudocurvas que são utilizadas na comparação entre a propriedade do volume com o seu correspondente medido pelos poços.

<sup>7</sup> Nós de frequência é relativo ao efeito caracterizado pela ausência ou forte atenuação de informações em determinada(s) faixa(s) de frequência(s).

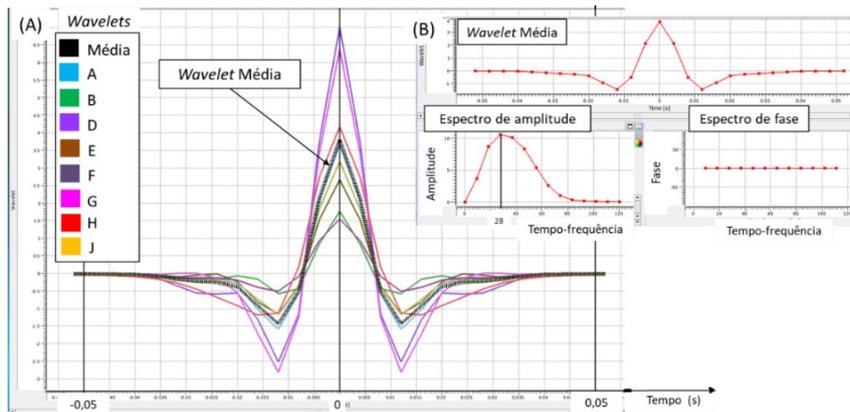


Figura 56: *Wavelet* média utilizada na inversão. A) As oito *wavelets* utilizadas no cálculo do operador médio (em preto); B) *Wavelet* média e seus respectivos espectros de amplitude e fase. Pelo espectro de amplitude constata frequência de pico de aproximadamente 28 Hz e a ausência dos chamados nós de frequência, já pelo o espectro de fase é demonstrado a não variação de fase ao longo do espectro.

O processo de inversão é um problema de solução não única, conforme comentado anteriormente. Para condicionar melhor o processo e reduzir o número de soluções possíveis, foi necessário construir um modelo inicial de propriedades filtrados na baixa frequência. No presente trabalho, foram construídos três modelos iniciais de impedância acústica filtrados com corta alta de 4-6 Hz.

Os três modelos foram construídos a partir de abordagens diferentes utilizando ou não informações de horizontes, poços e o volume de velocidades tomográfico. Em todos os modelos, a janela de estimativa começou no tempo menos 0,15 s em relação ao topo da seção salífera e terminou no tempo mais 0,15 s da base da Formação Ariri. Esta janela ampliada teve como objetivo evitar possíveis efeitos de borda que podem ocorrer associados ao resultado da inversão. A Figura 57.A ilustra a seção sísmica utilizada na visualização dos modelos iniciais, enquanto que as Figuras 57.B, 57.C e 57.D exibem os três modelos de baixa frequência gerados a partir das seguintes abordagens:

- i) **Modelo 1:** gerado a partir da interpolação<sup>8</sup> dos perfis de impedância acústica suavizados dos poços utilizando os horizontes mapeados

<sup>8</sup> A interpolação utilizada foi do tipo inverso do quadrado da distância. Nesta técnica é considerado o valor de cada ponto ponderado pelo inverso da distância com o ponto vizinho.

dos ciclos salinos como guia na distribuição dessa propriedade (Figura 57.B);

- ii) **Modelo 2:** foi construído utilizando como entrada os perfis de impedância acústica suavizados dos poços, as superfícies referentes ao topo e base da seção evaporítica mais um terceiro horizonte obtido através da média dos tempos entre o topo e base da seção evaporítica (Figura 57.C);
- iii) **Modelo 3:** elaborado a partir do volume de velocidades tomográfico. Aplicou-se a regressão estimada entre as velocidades compressional e as densidades dos poços ( $RHO=0,52*VP-335$ ) no cubo tomográfico, resultando assim no volume de densidade. A impedância acústica então foi obtida pela multiplicação dos volumes de densidade e de velocidade tomográfico (Figura 57.D).

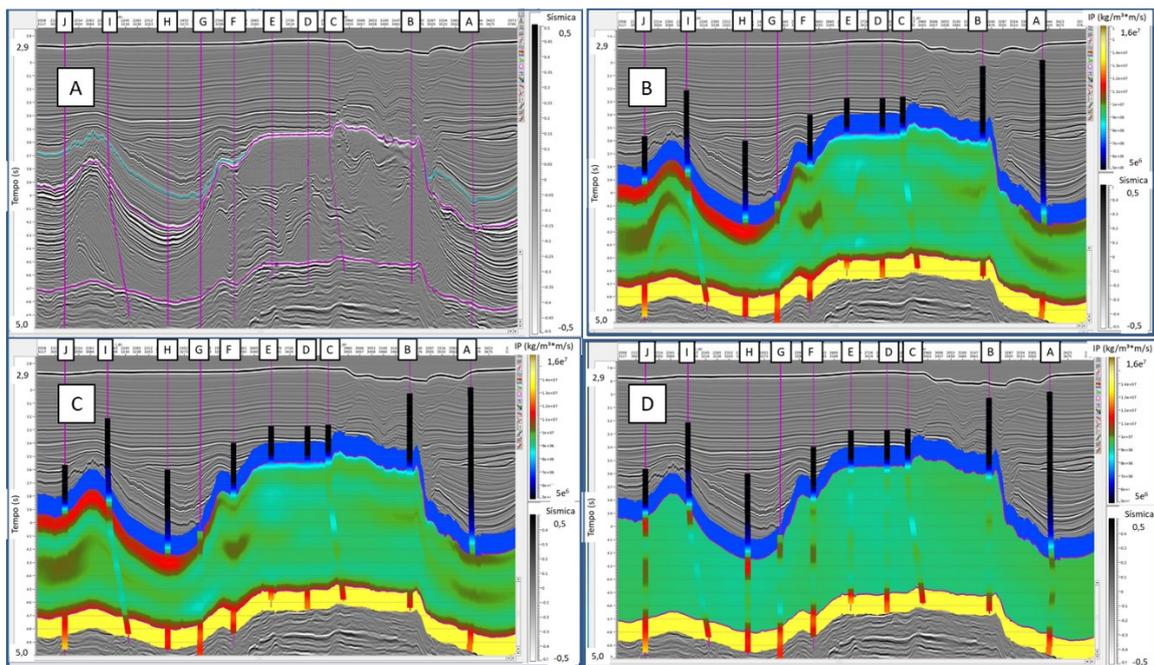


Figura 57: Modelos de baixa frequência construídos neste trabalho com os poços filtrados a partir das frequências de 4 Hz. A) Seção sísmica; B) Modelo construído a partir dos horizontes relativos aos quatro ciclo salinos e informações de poços; C) Seção de impedância acústica obtido pela extrapolação dos dados de poços e superfícies de topo e base da Formação Ariri mais um horizonte intermediário; D) Seção de impedância acústica gerado a partir do modelo de velocidades tomográfico.

Com o volume sísmico, os três modelos de baixa frequência, os horizontes interpretados, a *wavelet* média e os poços amarrados, deu-se início ao processo

de inversão acústica. Foram realizados testes baseados nos dados de entrada e nos parâmetros que controlam os termos da função objetivo (*misfits* de contraste, sísmica e tendência). Estes parâmetros controlam, principalmente o resíduo entre o dado sísmico e o sintético da inversão, a variabilidade das impedâncias em torno dos valores do modelo de baixa e o quão esparsos serão os valores do resultado da inversão. De uma maneira geral, foi atribuído um maior peso a sísmica, minimizando-se mais o *misfit* da sísmica em relação aos demais termos da função objetivo. Para maiores detalhes a respeito destes termos e sobre a parametrização da inversão, consulte o Apêndice B.

Foram gerados três cubos de impedância acústica, cada um baseado em um modelo inicial. As análises a respeito dos resultados obtidos pela inversão serão divididas em duas partes: a primeira irá tratar sobre os controles de qualidade do processo (Figuras 58 a 60) e a segunda parte irá se referir à caracterização das propriedades petroacústicas a partir dos volumes de impedâncias (Figuras 61 a 68).

O controle de qualidade da inversão sísmica consistiu na análise do comportamento do resíduo entre a sísmica e o sintético gerado durante o processo, e, da comparação entre as impedâncias dos poços com as estimadas através da inversão.

O resíduo da inversão utilizando o modelo com os ciclos salinos (modelo 1) foi baixo, conforme apresentado na Figura 58.A. Este atributo teve um sutil aumento em áreas onde ocorrem as fácies sísmicas caóticas, por conta da complexidade do comportamento dos refletores nestas regiões. Comparando as impedâncias acústicas dos poços, filtradas em 60 Hz, e as extraídas da inversão sísmica, observa-se que os valores possuem dispersões de até 20% e um erro médio da ordem de 9,5%, entre os valores dos poços e os estimados pela inversão (Figura 58.B). Sobrepondo os perfis de impedância acústica dos poços com os da inversão, foi constatado um bom ajuste nas zonas com intercalações de sais e onde o sal é homogêneo. Há pequenos desajustes locais, contudo isto pouco impacta no resultado da inversão, ao menos nos poços analisados (Figura 58.C).

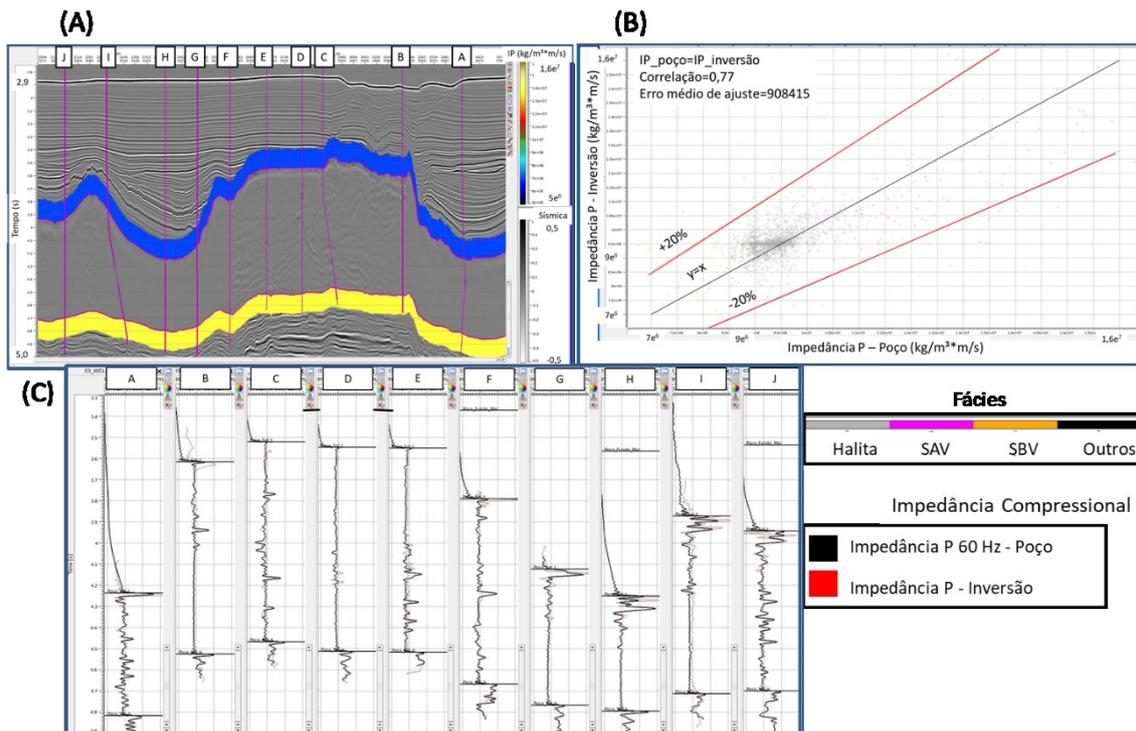


Figura 58: Controle de qualidade da inversão sísmica com o modelo gerado a partir dos ciclos salinos A) Resíduo final entre o sintético e a sísmica; B) Gráfico cruzado entre a impedância filtrada em 60 Hz do poço e o valor extraído da inversão; C) Comparação entre o perfil do poço filtrado e a curva da inversão.

O resíduo referente à inversão com o segundo modelo (Figura 59.A) apresentou a menor diferença dentre os três resultados. O grau de dispersão entre as impedâncias acústicas dos poços com o resultante da inversão apresentou valores, em sua maioria, de até 20% e erro médio na ordem de 9%, entre o valor obtido da inversão e o perfil de poço filtrado (Figura 59.B). Comparando as impedâncias acústicas dos poços com o da inversão se constata um bom ajuste entre as curvas (Figura 59.C).

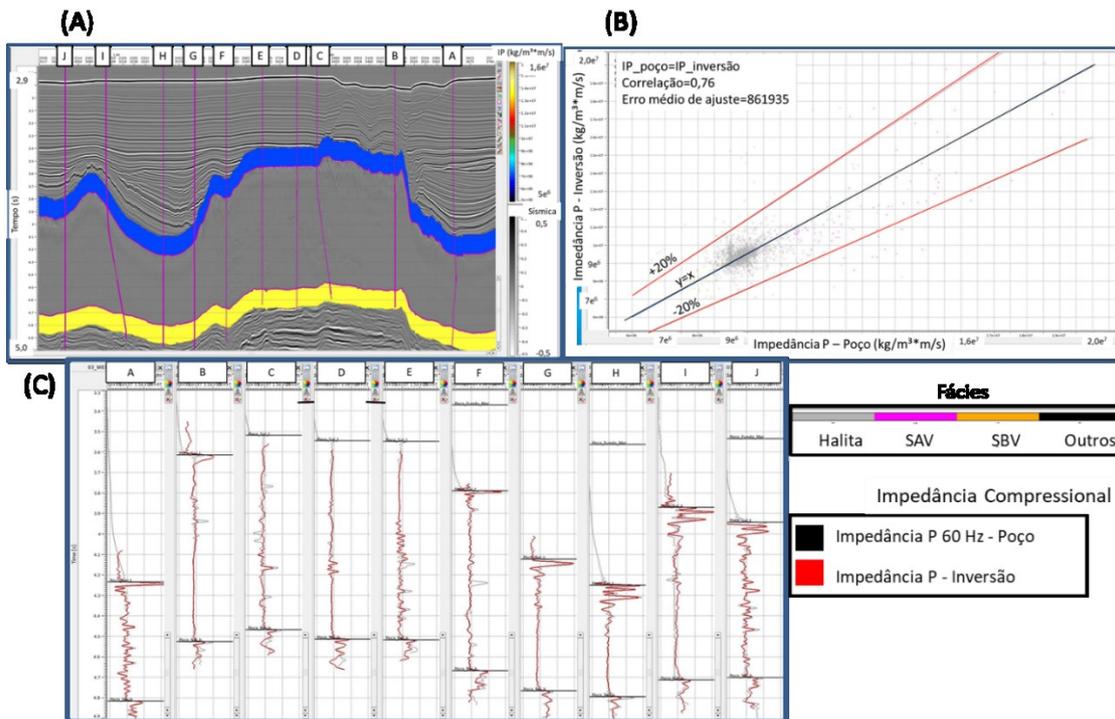


Figura 59: Controle de qualidade das inversão sísmica com o modelo gerado à partir dos horizontes topo e base da Formação Ariri e os poços A) Resíduo final entre o sintético e a sísmica; B) Gráfico cruzado entre a impedância filtrada em 60 Hz do poço e o valor extraído da inversão; C) Comparação entre o perfil do poço filtrado e a curva extraída da inversão.

Quanto ao controle de qualidade da inversão utilizando o modelo 3 (Figura 60.A), percebeu-se uma leve piora no resíduo em relação aos demais resultados. Os valores de dispersão, em sua maioria, também ficaram até 20%. Contudo, foi notado um aumento do número de pontos fora desta faixa, o que resultou em uma média maior de erros de aproximadamente 10,5% do resultado da inversão em relação aos dados de poços (Figura 60.B). Apesar desta leve piora, as impedâncias estimadas na inversão ficaram próximas as dos poços (Figura 60.C).

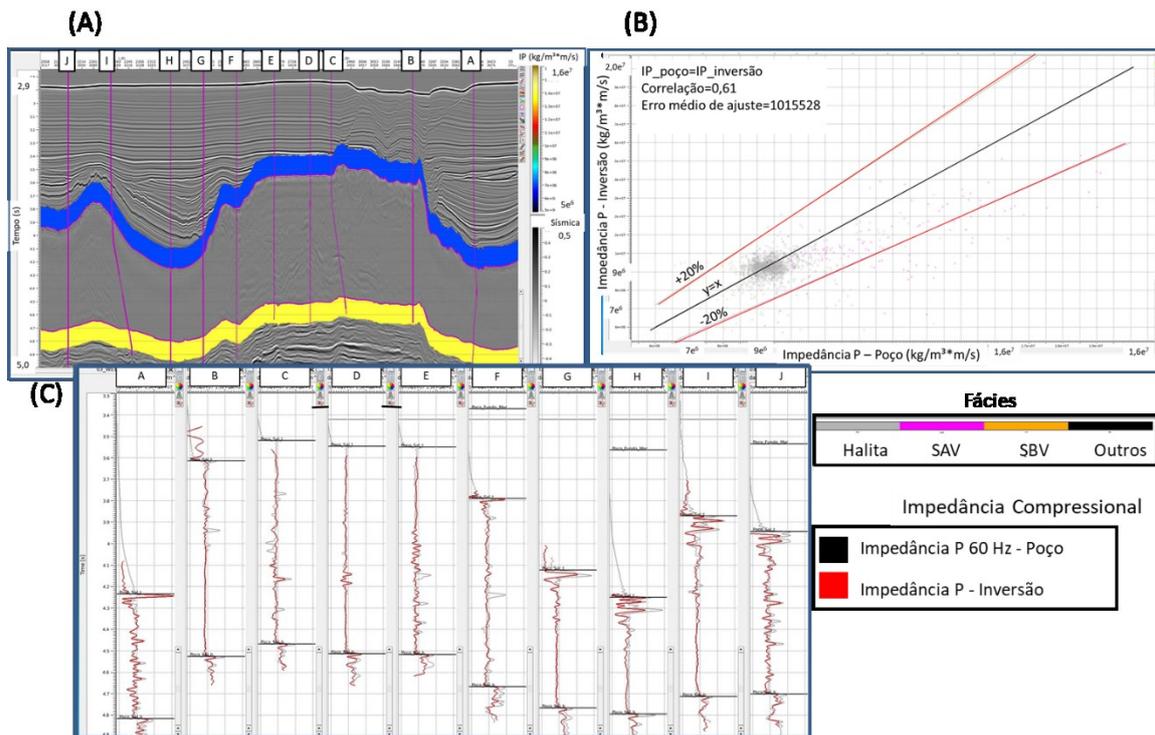


Figura 60: Controle de qualidade da inversão sísmica com o modelo construído do volume de velocidades tomográfico A) Resíduo final entre o sintético e a sísmica; B) Gráfico cruzado entre a impedância filtrada em 60 Hz do poço e o valor extraído da inversão; C) Comparação entre o perfil do poço filtrado e a curva extraída da inversão.

Terminado o controle de qualidade dos resultados das inversões, iniciaram-se os estudos de caracterização das propriedades dos sais. As inversões (Figuras 61 a 63) exibiram impedâncias variando entre  $5e^6$  a  $2e^7$   $kg/m^3*m/s$ . Apesar do intervalo de valores ser amplo, não foi constatado grandes divergências entre as impedâncias obtidas nos três resultados. Pelas figuras, foi possível observar uma boa concordância entre os volumes oriundos das inversões com a geologia representada pelas reflexões na sísmica.

Através das impedâncias estimadas nos poços (Tabela 15) com as obtidas através das inversões, foi possível distinguir três intervalos de valores relacionados aos sais da Formação Ariri. As impedâncias baixas (coloração azul nas seções) variavam entre  $5e^6$  até  $9e^6$   $kg/m^3*m/s$  e foram correspondentes as propriedades dos SBV. Valores entre  $9e^6$  e  $1e^7$   $kg/m^3*m/s$  (zonas esverdeadas) foram reconhecidos como zonas de ocorrências da halita. Já as impedâncias acima de  $1e^7$   $kg/m^3*m/s$  foram caracterizadas como SAV (colorações avermelhadas e amareladas). Apesar dos SAV apresentarem valores de até  $2e^7$

kg/m<sup>3</sup>\*m/s, optou-se por limitar a escala de cor nas figuras em 1,6e<sup>7</sup> kg/m<sup>3</sup>\*m/s em razão da baixa ocorrência de impedâncias acima deste limite.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 61 a 63, foi constatado uma boa correlação entre os valores de impedâncias dos poços com os volumes oriundos das inversões. As locações utilizadas como *blind tests* (C e I), apresentaram um menor grau de semelhança entre os valores, porém ainda dentro do limite tolerável de até 20% de diferença. Estes poços foram os que mais contribuíram nas dispersões apresentadas nos gráficos cruzados das Figura 58.B, Figura 59.B e Figura 60.B. Os valores de impedâncias estimados nos poços e das inversões acústicas se encontram na Tabela 15.

Tabela 15: Impedâncias estimadas dos poços e dos volumes oriundos da inversão.

	Poço 60 Hz (impedância média ± desvio padrão em kg/m <sup>3</sup> *m/s)	Inversão (intervalo de variação aproximado para os três resultados em kg/m <sup>3</sup> *m/s)
Halita	9,58e <sup>6</sup> ± 0,49e <sup>6</sup>	9e <sup>6</sup> - 1e <sup>7</sup>
SAV	1,46e <sup>7</sup> ± 0,24e <sup>7</sup>	Acima de 1e <sup>7</sup>
SBV	7,34e <sup>6</sup> ± 0,86e <sup>6</sup>	Abaixo de 9e <sup>6</sup>

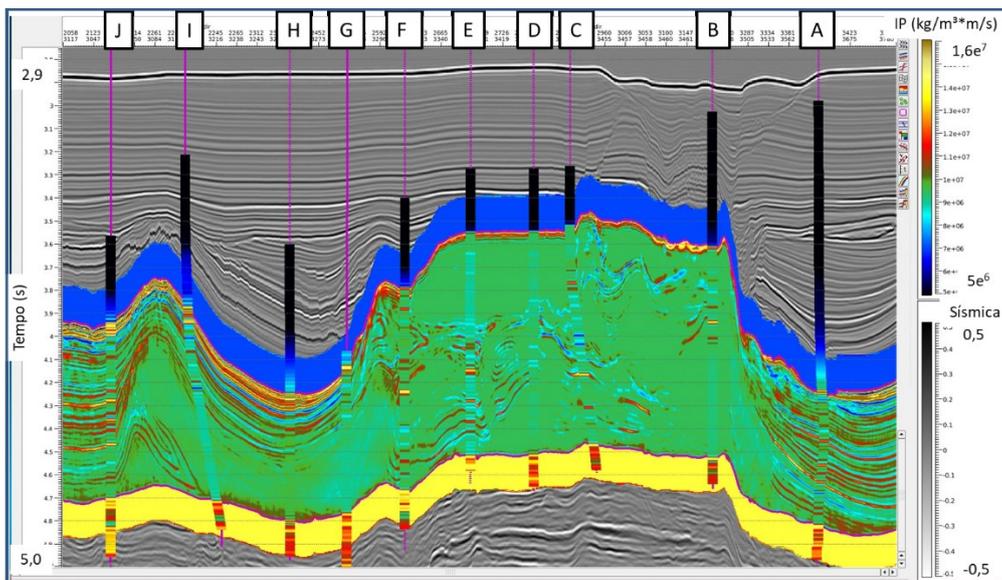


Figura 61: Resultado da inversão utilizando os horizontes dos ciclos salinos e as curvas dos poços.

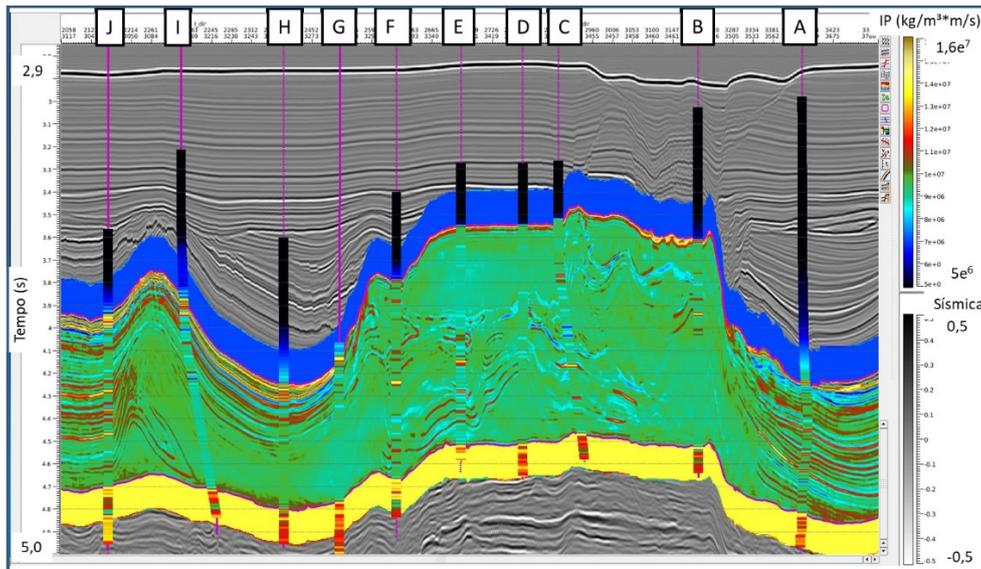


Figura 62: Resultado da inversão com modelo inicial gerado a partir do topo e base da seção evaporítica e informações de poços

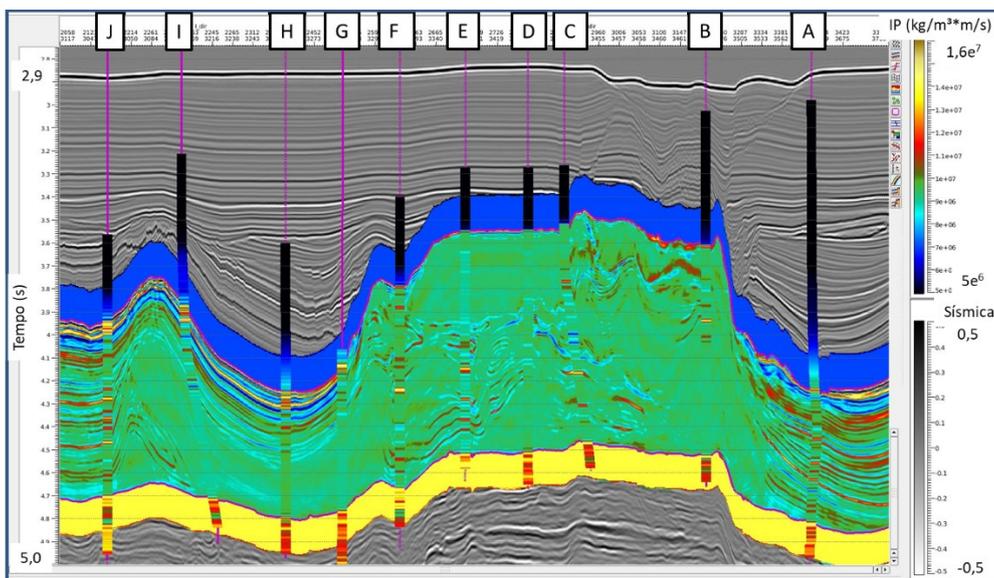


Figura 63: Resultado da inversão a partir do cubo de impedâncias gerado pelo modelo de velocidades tomográfico

Os cubos de impedâncias também foram utilizados na interpretação das fácies sísmicas estudadas na seção anterior (Capítulo 5.2). Zonas com fácies sísmica homogênea ocorriam, predominantemente, no domo central da área e apresentavam impedâncias correspondentes à halita (zonas esverdeadas). Regiões com fácies sísmica estratificada exibiam alternância de impedâncias relativos aos três tipos de sais, e, concentravam-se abaixo das minibacias do Albiano. Áreas com ocorrência de fácies sísmica caótica apresentavam camadas

com geometrias complexas e impedâncias relacionadas a alternância entre os SAV e halitas.

Mapas dos valores RMS das impedâncias acústicas foram gerados a partir dos horizontes dos ciclos salinos e dos volumes oriundos das inversões (Figuras 64 a 68). Estes mapas foram utilizados nas análises a respeito das distribuições de impedâncias ao longo da área de estudo.

A Figura 64 apresenta os mapas RMS das impedâncias da Formação Ariri. A região que abrange o domo de direção NE-SO (espessura em tempo maior), apresentou valores de  $\approx 9,6e^6$  kg/m<sup>3</sup>\*m/s para a primeira inversão,  $\approx 9,5e^6$  kg/m<sup>3</sup>\*m/s na segunda e de  $\approx 9,0e^6$ - $9,5e^6$  kg/m<sup>3</sup>\*m/s na terceira. Estes valores estão dentro do intervalo característico da halita. Quanto as regiões depositadas abaixo das minibacias, as impedâncias foram ligeiramente maiores, com valores acima de  $\approx 1,0e^7$  kg/m<sup>3</sup>\*m/s nos três resultados, evidenciando assim a alternância das propriedades entre as halitas e SAV. O anticlinal de sal apresentou impedâncias próximas as constatadas nas regiões de minibacias para as inversões 1 e 2, já no terceiro resultado foi constatado impedâncias maiores.

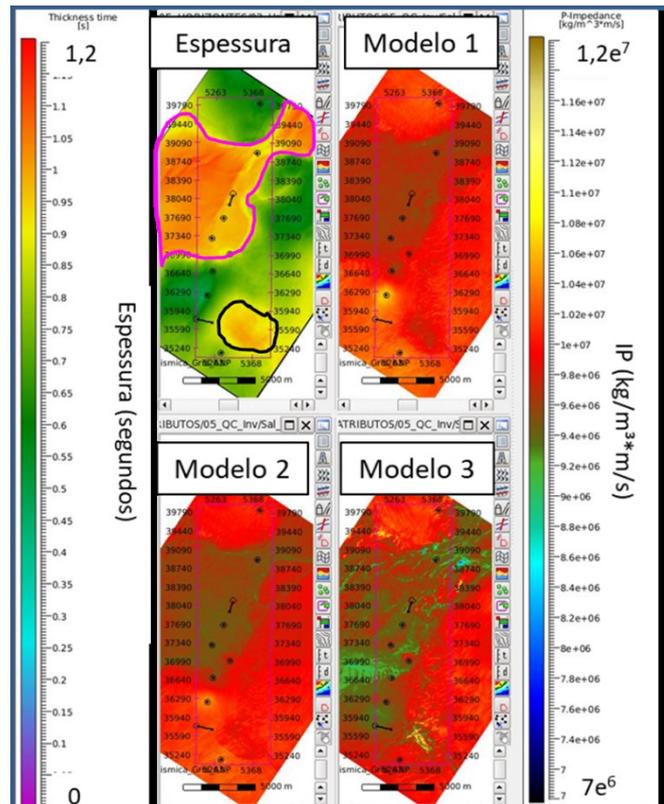


Figura 64: Mapas referentes a seção evaporítica; A) Mapa da espessura total, o domo salino está circundado em magenta, o anticlinal de sal e preto e as demais regiões são consideradas como zonas estratificadas; B), C) e D) são, respectivamente, mapas de RMS das impedâncias acústicas das inversões 1, 2 e 3

Os mapas RMS das impedâncias dos ciclos salinos (Figura 65 a 68) apresentaram variações em consequência dos resultados das inversões e também conforme a região analisada, a saber: domo salino, anticlinal de sal e nas zonas sobrejacentes a minibacias do Albiano. A Tabela 16 foi elaborada com o intuito de facilitar na visualização e compreensão do comportamento das impedâncias nos quatro ciclos salinos baseados nos valores obtidos pelas inversões.

De um modo geral, as impedâncias associadas ao domo salino foram as menores, enquanto que os maiores valores ocorreram nas regiões abaixo das minibacias. Quanto aos ciclos, as menores impedâncias foram constatadas no segundo ciclo e as maiores no quarto ciclo.

Tabela 16: Impedâncias estimadas a partir dos resultados das inversões. Os valores foram separados por ciclo salino e estrutura geológica presente na área.

		Impedâncias Obtidas das Inversões em $\text{kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$				
		Ciclo 01	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Fm. Ariri
Inversão 1	Domo	$\approx 9,6e^6$	$\approx 7,5e^6 - 9,5e^6$	$\approx 9,6e^6$	$\approx 9,8e^6 - 1,1e^7$	$\approx 9,6e^6$
	Anticlinal	$\approx 9,6e^6$	$\approx 1e^7 - 1,05e^7$	$\approx 9,5e^6 - 1e^7$	$\approx 1,1e^7 - 1,2e^7$	$\approx 9,8e^6$
	Mini bacias	$\approx 1e^7$	$\approx 1e^7$	$\approx 9e^6 - 1e^7$	$\approx 1,05e^7 - 1,15e^7$	$>1e^7$
Inversão 2	Domo	$\approx 9,5e^6$	$\approx 7,5e^6 - 9,4e^6$	$\approx 9,2e^6 - 9,5e^6$	$\approx 1,1e^7$	$\approx 9,5e^6$
	Anticlinal	$\approx 9,6e^6$	$\approx 1e^7 - 1,1e^7$	$\approx 9,8e^6 - 1,1e^7$	$\approx 1,2e^7$	$\approx 1e^7$
	Mini bacias	$\approx 1,02e^7$	$\approx 1e^7$	$\approx 9e^6 - 1e^7$	$\approx 1e^7 - 1,15e^7$	$>1e^7$
Inversão 3	Domo	$\approx 9e^6 - 9,2e^6$	$\approx 7,5e^6 - 9,4e^6$	$\approx 9,2e^6 - 9,4e^6$	$\approx 9e^6 - 9,6e^6$	$\approx 9e^6 - 9,5e^7$
	Anticlinal	$\approx 9,2e^6$	$\approx 1e^7$	$\approx 9,8e^6 - 1,1e^7$	$\approx 9,5e^6 - 1,1e^7$	$1e^7 - 1,1e^7$
	Mini bacias	$\approx 9,8e^6$	$\approx 1e^7$	$\approx 8,6e^6 - 1e^7$	$\approx 9,8e^6 - 1e^7$	$>1e^7$

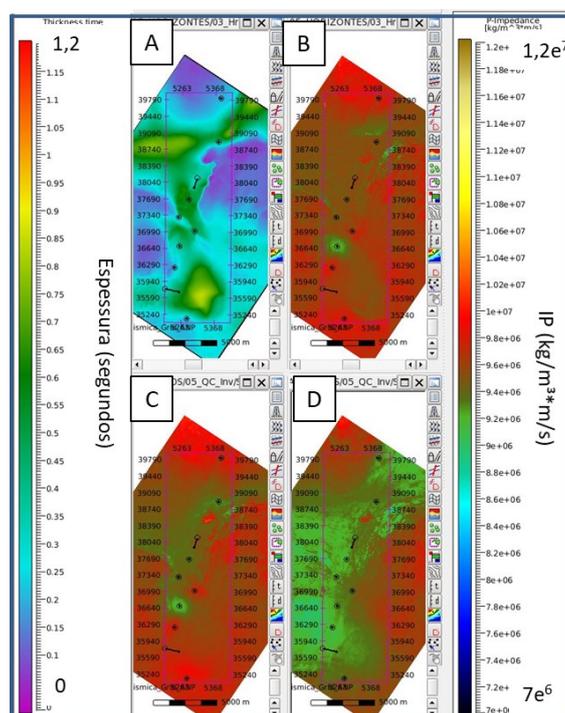


Figura 65: Mapas referentes ao primeiro ciclo salino; A) Mapa de espessura do ciclo; B), C) e D) são, respectivamente, mapas RMS das impedâncias acústicas da inversão com os ciclos salinos, utilizando topo e base do sal, e utilizando o modelo de impedâncias gerado a partir do volume de velocidades tomográfico.

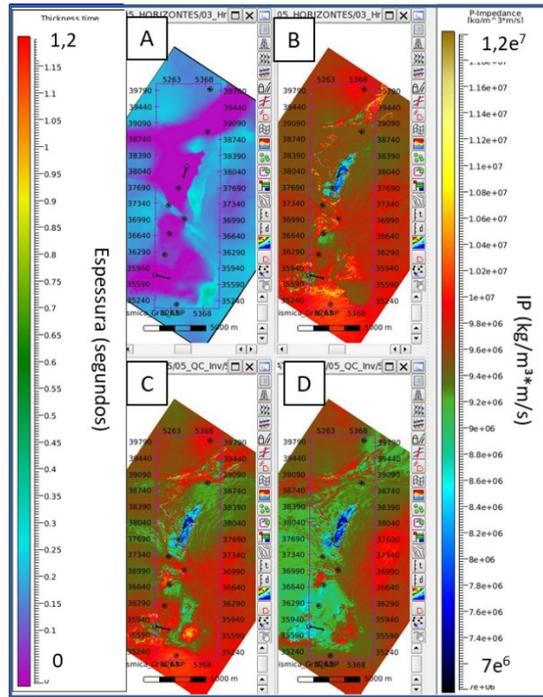


Figura 66: Mapas referentes ao segundo ciclo salino; A) Mapa de espessura do ciclo; B), C) e D) são, respectivamente, mapas RMS das impedâncias acústicas da inversão com os ciclos salinos, utilizando topo e base do sal, e utilizando o modelo de impedâncias gerado a partir do volume de velocidades tomográfico.

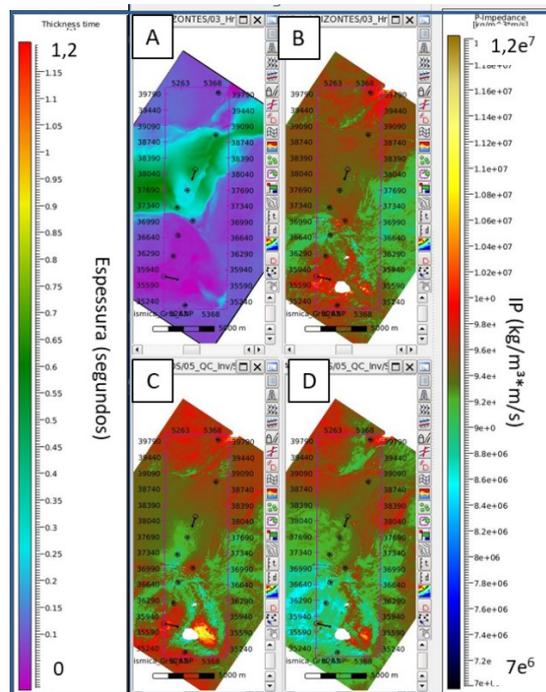


Figura 67: Mapas referentes ao terceiro ciclo salino; A) Mapa de espessura do ciclo; B), C) e D) são, respectivamente, mapas RMS das impedâncias acústicas da inversão com os ciclos salinos, utilizando topo e base do sal, e utilizando o modelo de impedâncias gerado a partir do volume de velocidades tomográfico.

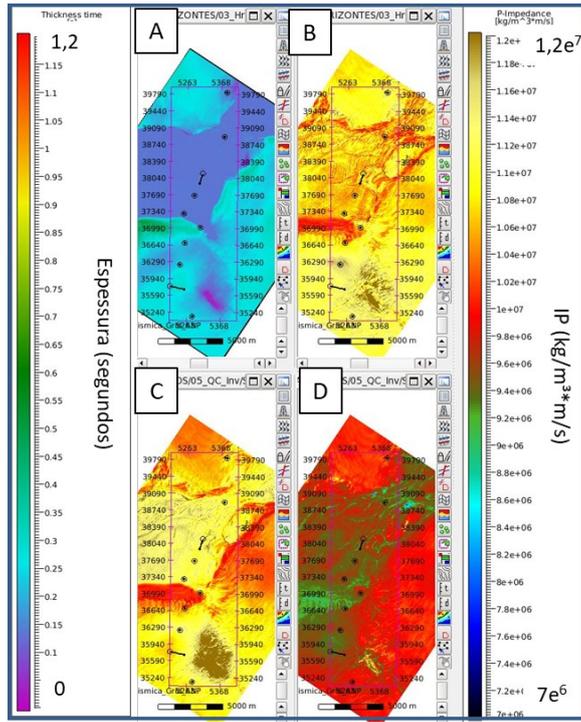


Figura 68: Mapas referentes ao quarto ciclo salino; A) Mapa de espessura do ciclo; B), C) e D) são, respectivamente, mapas RMS das impedâncias acústicas da inversão com os ciclos salinos, utilizando topo e base do sal, e utilizando o modelo de impedâncias gerado a partir do volume de velocidades tomográfico.

## 6. CONCLUSÕES

Na Formação Ariri da região de estudo foram reconhecidas ocorrências de anidrita, gipsita, halita, carnalita, taquidrita, silvita e carbonatos. A gipsita, a taquidrita e a silvita ocorriam em proporções insignificantes, quando comparadas com os outros sais. Há dúvidas quanto a presença de gipsita e silvita nos poços estudos, pois pela literatura consultada estes minerais são instáveis dados as condições geológicas da Formação Ariri. Devida a baixa ocorrência de alguns sais e baseado no comportamento das velocidades, optou-se por agrupar os evaporitos salinos em três grupos. O primeiro grupo composto basicamente por halita, que é o mineral dominante na seção evaporítica; um segundo grupo, representado por anidrita e gipsita, que foi denominado de sais de alta velocidade (SAV); e um último grupo, composto por carnalita, taquidrita e silvita, sendo denominado de sais de baixa velocidade (SBV).

Pela análise dos poços, a halita corresponde a fácies predominante da área, com cerca de 89% das ocorrências dos sais, seguido pelos SAV com cerca de 7% e os SBV representavam apenas 4%. As estimativas de velocidades compressional apontaram valores médios de 4530 m/s para a halita, 5310 m/s para os SAV, 4175 m/s para os SBV e 4560 m/s ao se considerar todos os sais em conjunto. A média da velocidade compressional para todos os sais ficou próxima ao constatado para halita, refletindo assim a influência deste mineral sobre as propriedades dos sais da Formação Ariri. Foi constatado uma alta dispersão dos valores de velocidade para os SAV e os SBV, efeitos que podem ser atribuídos as misturas de minerais. Quanto as demais propriedades, a halita possui densidade média de 2085 kg/m<sup>3</sup> e velocidade cisalhante média de 2550 m/s, os SAV apresentam densidade média de 2930 kg/m<sup>3</sup> e velocidade cisalhante média de 2785 m/s, por fim, os SBV detém densidade média de 1635 kg/m<sup>3</sup> e velocidade cisalhante média de 2250 m/s. Considerando todos os sais, foram estimados os valores de 2555 m/s para a velocidade cisalhante média e 2155 kg/m<sup>3</sup> para a densidade média. Os valores obtidos neste trabalho estão condizentes com a bibliografias consultadas.

Um aspecto comum nos perfis elétricos adquiridos no intervalo de ocorrência da Formação Ariri é a ausência de curvas de densidade e do sônico

cisalhante. Para este estudo, houve a necessidade de completar essas informações que eram ausentes no intervalo do sal. As estimativas para a velocidade cisalhante e a densidade a partir da velocidade compressional, resultaram em valores próximos aos constatados por medidas levantadas nos poços onde estas informações estavam presentes. Também foram estimadas velocidades cisalhantes utilizando a relação de CASTAGNA *et al.* (1985) e a densidade a partir de GARDNER *et al.* (1974). Foi verificado um alto erro entre os valores obtidos pelas relações e os medidos por poços, isto deve-se ao fato dessas relações terem sido estabelecidas para sedimentos siliciclásticos.

O volume sísmico na região de estudo apresentava feições complexas associadas a tectônica do sal, onde foram reconhecidas três estruturas: um domo salino na porção central, uma camada menos espessa associadas a minibacias originadas pela deposição dos carbonatos do Albiano e um anticlinal, mais ao sul.

Foram identificadas quatro fácies sísmica. A primeira foi denominada de fácies sísmica estratificada, que se caracteriza por intercalações de refletores na sísmica. A segunda fácies sísmica foi a homogênea e ocorre em regiões onde não se observa reflexões sísmicas. A terceira fácies sísmica foi a caótica, a mesma ocorre em zonas onde as reflexões originadas pelos contrastes de impedância acústica dos diferentes sais apresentam as mais diversas geometrias. Por fim, a última fácies sísmica foi denominada de oculta, e que foi representada pela ausência de reflexão na sísmica, porém, em poços foram constatadas a presença de intercalações de sais com espessura abaixo do limite de resolução da sísmica.

Quatro ciclos salinos foram mapeados baseado nos conceitos apresentados por GAMBOA *et al.* (2008). O primeiro ciclo, situado na base da seção evaporítica, foi caracterizado por uma espessa anidrita basal e uma grande ocorrência de halita. O segundo ciclo foi composto por intercalações de anidrita, halita e sais de potássio (K) e magnésio (Mg). O terceiro ciclo foi formado por uma camada predominantemente composta por halita, porém com menor espessura em relação ao constatado para o primeiro ciclo. Por fim, o quarto ciclo foi representado por um pacote menos espesso de halita e por uma anidrita bem contígua no topo. Estudos em relação a ciclicidade da deposição dos sais não

são tarefas simples a se realizar, pois o registro das fácies para um determinado ciclo pode estar incompleto, devido a condições ambientais pretéritas ou a disponibilidade de íons para a precipitação dos sais. Outro fator que pode influenciar na preservação dos ciclos salinos são possíveis mudanças na disposição das camadas dos sais e/ou obliteração dessas sequências em decorrência da halocinese de bacias evaporíticas.

A amarração dos poços na sísmica foi realizada nas dez locações utilizadas no trabalho. Os coeficientes de correlação possuem alta variação decorrentes das zonas onde os poços foram perfurados. Poços localizados em regiões com reflexões presentes na sísmica resultaram em altas correlações, enquanto nas porções sem reflexões este fator foi baixo. Após a amarração poço-sísmica foram aplicados filtros corta alta de 60 Hz, 30 Hz e 4 Hz e se analisou o comportamento das velocidades compressionais nas curvas filtradas. Foi constatado uma diminuição dos desvios padrão médios à medida que frequência de corte era menor. As curvas de fácies foram reamostradas a 0,004 s de forma que estas informações fossem compatíveis com a escala de amostragem da sísmica.

Os volumes de impedância acústica se apresentaram de forma condizentes com as informações da sísmica e aos sais constatados pelos perfis dos poços. Os baixos valores de impedância acústica são relativos aos SBV, os altos valores aos SAV e os valores intermediários à halita. O quarto ciclo salino apresentou os maiores valores de impedância acústica, enquanto o segundo ciclo exibiu os menores. Outro aspecto importante foi que apesar do uso de diferentes modelos iniciais como entrada na inversão, os resultados foram relativamente próximos. A partir desta constatação foi possível afirmar que a frequência de corte exerce um maior impacto no processo da inversão do que a forma da abordagem utilizada durante a construção do modelo de baixa.

Os resultados provenientes da inversão acústica retornaram informações mais confiáveis para a caracterização da seção evaporítica do que, simplesmente, utilizar a informação de amplitude do dado sísmico.

Os estudos realizados podem ser aplicados a diversas áreas envolvidas na exploração e produção de hidrocarbonatos. Os volumes de impedância acústica podem ser utilizados na etapa de construção de modelos de

velocidades para estudos de iluminação sísmica, que por sua vez são utilizados na parametrização de aquisições sísmicas. Os resultados das inversões também podem ser usados como modelos iniciais nas atualizações de velocidades em técnicas como tomografia de tempo de trânsito ou mesmo para o FWI (*full waveform inversion*), fornecendo melhores modelos para a etapa de migração sísmica. Outro tipo de estudos que os volumes de impedâncias podem auxiliar é quanto a análise de incertezas relacionadas ao posicionamento de eventos, sejam verticais (profundidade) ou horizontais (deslocamento laterais em função de variações laterais de velocidades em ambientes de geologia complexa).

Os resultados de inversão sísmica, atualmente, estão sendo muito utilizados na modelagem geomecânica, permitindo melhores decisões em termos de taxas de produção e de injeção dos reservatórios sem grandes riscos para a rocha capeadora (o sal no caso dos reservatórios carbonáticos da Formação Barra Velha). Volumes de impedâncias também podem ser usados em estudos de otimização da trajetória de poços, visando um balanceando melhor dos parâmetros de perfuração e de fluidos, diminuindo assim os riscos de paradas operacionais para combater perdas de fluidos e necessidade de liberação de colunas de perfuração que possam ficar aprisionadas pelo comportamento plástico da maioria dos sais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANP. AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/arquivos/publicacoes/boletins-anp/producao/2019-08-boletim.pdf>. Acesso em: 06 de out. de 2019.
- AKI, K.; RICHARDS, P. **Quantitative Seismology**. Second Edition. [s.l.] University Science Books, U.S., 2002.
- AMARAL, P.; MAUL, A.; FALCÃO, L.; CRUZ, N.; GONZALEZ, M.; GONZALEZ, G. **Estudo Estatístico da Velocidade dos Sais na Camada Evaporítica na Bacia de Santos**. International Congress of the Brazilian Geophysical Society. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2015
- AVSETH, P.; MUKERJI, T.; MAVKO, G. **Quantitative Seismic Interpretation: Applying Rock Physics Tools to Reduce Interpretation Risk**, v. 9780521816, p. 1–391, 2005.
- BARROS, P.; FONSECA, J.; TEIXEIRA, L.; MAUL, A.; YAMAMOTO, T.; MENEGUIM, T.; GONZALEZ, M. **Salt Heterogeneities Characterization in Pre-salt Santos Basin Fields**. Offshore Technology Conference - Brasil. **Anais...** Rio de Janeiro: OTC, 2017.
- BIANCO, E. **Rock physics cheatsheet**. 2011. Disponível em: <https://agilescientific.com/blog/2011/3/7/rock-physics-cheatsheet.html>. Acesso em: 07 de jul. de 2019.
- BIANCO, E. **Wedge Model 25Hz**. 2019. Disponível em: [http://subsurfwiki.org/mediawiki/index.php?title=File:Wedge\\_Model\\_25Hz.png&page=1#file](http://subsurfwiki.org/mediawiki/index.php?title=File:Wedge_Model_25Hz.png&page=1#file). Acesso em: 14 de abr. de 2019
- BOSCH, M.; MUKERJI, T.; GONZALEZ, F. **Seismic inversion for reservoir properties combining statistical rock physics and geostatistics: A review**. *Geophysics*, v. 75, n. 5, p. 75A165-75A176, 2010.
- BROWN, R.; WRIGHT, M.; BURKART, D.; ABRIEL, L.; MCBEATH, G. **Tuning Effects, Lithological Effects and Depositional Effects in the Seismic Response of Gas Reservoirs**. *Geophysical Prospecting*, v. 34, n. 5, p. 623–647, 1986.
- BRUTHANS, J.; FILIPPI, M.; ASADI, N.; ZARE, M.; SLECHTA, S.; CHURACKOVA, Z. **Surficial deposits on salt diapirs (Zagros Mountains and Persian Gulf Platform, Iran): Characterization, evolution, erosion and the influence on landscape morphology**. *Geomorphology*, v. 107, n. 3–4, p. 195–209, 2009.
- CASTAGNA, P.; BATZLE, M.; EASTWOOD, R. **Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks**. *Geophysics*, v. 50, n. 4, p. 571–581, 1985.
- CHANG, H.; KOWSMANN, R.; FIGUEIREDO, A.; BENDER, A. **Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview**. *Tectonophysics*, v. 213, n. 1–2, p. 97–138, 1992.

- COOKE, D.; SCHNEIDER, W. **Generalized linear inversion of reflection seismic data**. *Geophysics*, v. 48, n. 6, p. 665–676, 2002.
- CORNELIUS, S.; CASTAGNA, J. **Variation in salt-body interval velocities in the deepwater Gulf of Mexico: Keathley Canyon and Walker Ridge areas**. *Interpretation*, v. 6, n. 1, p. T15–T27, 2018.
- COSTA, A.; POIATE, E.; AMARAL, C.; PEREIRA, A.; MARTHA, L.; GATTASS, M.; ROEHL, D. **Geomechanics applied to the well design through salt layers in Brazil: A history of success**. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, n. 203119, p. 165–168, 2011.
- CRAIN, E. **Crain Petrophysical Handbook**. Disponível em: <<https://www.spec2000.net/>>. Acesso em: 1 jan. 2019.
- DAVISON, I.; ANDERSON, L.; NUTTALL, P. **Salt deposition, loading and gravity drainage in the Campos and Santos salt basins**. Geological Society, London, Special Publications, v. 363, n. 1, p. 159–174, 2012.
- DE PAOLA, N.; FAULKNER, D.; COLLETTINI, C. **Brittle versus ductile deformation as the main control on the transport properties of low-porosity anhydrite rocks**. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 114, n. 6, 2009.
- DEMMELE, J. **On condition numbers and the distance to the nearest ill-posed problem**. *Numerische Mathematik*, v. 51, n. 3, p. 251–289, 1987.
- DIAS, J. **Tectônica, estratigrafia e sedimentação no Andar Aptiano da margem leste brasileira**. *Boletim Geociências Petrobras*, v. 13, n. 1, p. 7–25, 2004.
- DIAS, R.; FONSECA, J.; BULCAO, A.; DIAS, B.; TEIXEIRA, L.; MAUL, A.; BORGES, F. **Salt Stratification and Least Square Migration to Improve Pre-Salt Reservoir Images: Santos Basin, Brazilian Offshore Example**. Second EAGE/PESGB Workshop on Velocities, *Anais...* London: European Association of Geoscientists & Engineers, 2019.
- EVANS, B. **A Handbook for Seismic Data Acquisition in Exploration**. Tulsa, United Kingdom: SEG, 1997.
- FALCAO, L.; MAUL, A.; GOBATTO, F.; GONZALEZ, G.; GONZALEZ, M. **Results of Incorporating the Stratigraphy Within the Evaporitic Sequence Into the Velocity Field for Reservoir Characterization**. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 34, n. September, p. 2–11, 2016.
- FALCAO, L. **O Sal Estratificado e sua Importância na Modelagem de Velocidades para Fins de Migração Sísmica**. [s.l.] Universidade Federal Fluminense, 2017.
- 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.
- FONSECA, J.; TEIXEIRA, L.; MAUL, A.; BARROS, P.; BORGES, F.; BOECHAT, J.; GONZALEZ, M. **Modelling Geological Layers Into New Velocity Models For Seismic Migration Process - A Brazilian Pre-Salt Case**. First EAGE/PESGB Workshop on Velocities. *Anais...* London: European Association of Geoscientists & Engineers, 2018.

- FOSSSEN, H. **Geologia Estrutural**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2012.
- FREITAS, J. **Ciclos Depositionais Evaporíticos da Bacia de Santos: uma Análise Cicloestratigráfica a Partir de Dados de Dois Poços e de Traços da Sísmica**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- GAMBÔA, L.; MACHADO, M.; SILVEIRA, D.; FREITAS, J.; SILVA, S. **Evaporitos Estratificados no Atlântico Sul: Interpretação sísmica e controle tectono-estratigráfico na Bacia de Santos**. In: Sal Geologia e Tectônica Exemplos nas Bacias Brasileira. Primeira E ed. [s.l.: s.n.]. p. 18, 2008
- GARDNER, G.; GARDNER, L.; GREGORY, A. **Formation Velocity and Density - The Diagnostic Basics for Stratigraphic Traps**. Geophysical, v. 39, n. 6, p. 770–780, 1974.
- GOBATTO, F.; MAUL, A.; FALCAO, L.; TEIXEIRA, L.; BOECHAT, J.; GONZALEZ, G. **Refining velocity model within the salt section in Santos Basin: an innovative workflow to include the existing stratification and its considerations**. SEG International Exposition and 87th Annual Meeting. **Anais...**: Dallas: Society of Exploration Geophysicists, 2016.
- GONZALEZ, M.; GOBATTO, F.; MAUL, A.; FALCAO, L.; GONZALEZ, G.; OLIVEIRA, L.; MENEGUIM, T.; AMARAL, P. **Proposed Workflow to Incorporate Stratification within Salt Section Using Velocity and Seismic Attributes Proposed Workflow to Incorporate Stratification within**. Third EAGE/ SBGF Workshop 2016. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2016
- HARRAZ, H. 2015. **Evaporite Salt Deposits**. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/hzharraz/topic-6-evaporite-salt-deposits>. Acesso em 26 de mai. de 2019.
- HEIDARI, M.; NIKOLINAKOU, M.; HUDEC, M.; FLEMINGS, P. **Geomechanical analysis of a welding salt layer and its effects on adjacent sediments**. Tectonophysics, v. 683, n. July, p. 172–181, 2016.
- HUDEC, M.; JACKSON, M. **Terra infirma: Understanding salt tectonics**. Earth-Science Reviews, v. 82, n. 1–2, p. 1–28, 2007.
- JARDIM, F.; MAUL, A.; FALCAO, L.; GONZALEZ, G. **Estimating amplitude uncertainties through illumination studies for a pre-salt reservoir**. International Congress of the Brazilian Geophysical Society. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2015.
- JONES, I.; DAVISON, I. **Seismic imaging in and around salt bodies**. Interpretation, v. 2, p. 01-20, 2014.
- JUSTEN, J. **Análise das propriedades elásticas de rochas e minerais evaporíticos**. [s.l.] Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2014.
- KALLWEIT, R.; WOOD, L. **The limits of resolution of zero-phase wavelets**. Geophysics, v. 47, n. 7, p. 1035–1046, 1982.

- KARNER, G.; GAMBÔA, L. **Timing and origin of the South Atlantic pre-salt sag basins and their capping evaporites**. Geological Society, London, Special Publications, v. 285, n. 1, p. 15–35, 2007.
- LANCASTER, S.; WHITCOMBE, D. **Fast-track ‘ coloured ’ inversion**. SEG Technical Program Expanded Abstracts. **Anais**. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2000
- LANDROØ, M.; PUIGDEFABREGAS, C.; ARNTSEN, B. **Anisotropy in the salt outcrop at Cardona, Catalonia - Implications for seismic imaging**. First Break, v. 29, n. 8, p. 41–45, 2011.
- LATIMER, R.; DAVIDSON, R.; VAN RIEL, P. **An interpreter’s guide to understanding and working with seismic-derived acoustic impedance data**. The Leading Edge, v. 19, n. 3, p. 242–256, 2000.
- LIANG, W.; YANG, C.; ZHAO, Y.; DUSSEAUULT, M.; LIU, J. **Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 44, n. 3, p. 400–411, 2007.
- LINDSETH, R. **Synthetic sonic logs - a process for stratigraphic interpretation**. Geophysics, v. 44, n. 1, p. 3–26, 1979.
- MAUL, A.; SANTOS, M.; SILVA, C. **Few Considerations, Warnings and Benefits for the E&P Industry When Incorporating Stratifications Inside Salt Sections**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 36, n. 4, p. 1, 2018a.
- MAUL, A.; CETALE, M.; GUIZAN, C.; FONSECA, J.; GONZALEZ, M.; TEIXEIRA, L.; YAMAMOTO, T.; BORGES, F.; PONTES, R. **Geological Characterization of Evaporitic Sections and its Impacts on Seismic Images: Santos Basin, Offshore Brazil**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 37, n. April, p. 1–14, 2018b.
- MAUL, A.; JARDIM, F.; FALCAO, L.; GONZALEZ, G. **Observing Amplitude Uncertainties for a Pre-salt Reservoirs Using Illumination Study (Hit-maps)**. International Congress of the Brazilian Geophysical Society. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2015.
- MAVKO, G.; MUKERJI, T.; DVORKIN, J. **The Rock Physics Handbook, Second Edition**. [s.l.] Cambridge University Press, 2009.
- MCCLOUGHLIN, S. **The breakup history of Gondwana and its impact on pre-Cenozoic floristic provincialism**. Australian Journal of Botany, v. 49, n. 3, p. 271–300, 2001.
- MENEGUIM, T.; MENDES, S.; MAUL, A.; FALCAO, L.; GONZALEZ, M.; GONZALEZ, G. **Combining seismic facies analysis and well Information to guide new interval velocity models for a Pre-Salt study, Santos Basin, Brazil**. International Congress of the Brazilian Geophysical Society. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2015
- MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S. **Sal Geologia e Tectônica - Exemplos nas Bacias Brasileiras**. 1. ed. São Paulo: Beca Edições, 2008.

- MOREIRA, J.; MADEIRA, C.; GIL, J.; MACHADO, M. **Superseqüência Pós-Rifte**. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15, n. 2, p. 531–549, 2007.
- MUBARAK, M.; DERKS, J.; FUCHS, T.; HANTSCHHEL, T.; KAUERAUF, A.; NEUMAIER, M.; SCHENK, O.; SWIENTEK, O.; TESSEN, N.; WELTE, D.; WYGRALA, B. **Basin and petroleum system modeling**. Oilfield Review, v. 21, n. 2, p. 14–29, 2009.
- MUNSON, D. **Constitutive model of creep in rock salt applied to underground room closure**. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, v. 34, n. 2, p. 233–247, 1997.
- O'DOHERTY, R.; ANSTEY, N. **Reflections on Amplitudes**. Geophysical Prospecting, v. 19, n. 3, p. 430–458, 1971.
- OLDENBURG, D. W.; SCHEUER, T.; LEVY, S. **Recovery of the acoustic impedance from reflection seismograms**. Geophysics, v. 48, n. 10, p. 1318–1337, 1983.
- RICKER, N. **Further developments in the wavelet theory of seismogram structure**. Bulletin of the Seismological Society of America, v. 33, p. 197–248, 1943.
- RICKER, N. **Wavelet Functions and Their Polynomials**. Geophysics, v. 9, n. 3, p. 314–323, 1944.
- RODRIGUEZ, C.; JACKSON, C.; ROTEVATN, A.; BELL, R.; FRANCIS, M. **Dual tectonic-climatic controls on salt giant deposition in the Santos Basin, offshore Brazil**. GEOSPHERE, v. 14, n. 1, p. 1–28, 2018.
- RUSSELL, B. **Introduction to Seismic Inversion Methods**. 1. ed. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 1988.
- RUSSELL, B.; HAMPSON, D. **Comparison of poststack seismic inversion methods**. Society of Exploration Geophysicists Conference. **Anais**. Houston: Society of Exploration Geophysics, 1999
- SAYERS, C.; SCHUTJENS, P. **An introduction to reservoir geomechanics**. Leading Edge, v. 26, n. 5, p. 597–601, 2007.
- SCHON, J. **Propriedades Físicas das Rochas Aplicadas à Engenharia: Fundamentos teóricos e práticos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, v. 1, 2016.
- SENSENY, P.; HANSEN, F.; RUSSEL, J.; CARTER, N.; HANDIN, J. **Mechanical behaviour of rock salt: Phenomenology and micromechanisms**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and, v. 29, n. 4, p. 363–378, 1992.
- SONNENFELD, P. **Brines and evaporites**. Academic Press. v. 1, 1984
- STOREY, B. **The role of mantle plumes in continental breakup: Case histories from Gondwanaland**. Nature, 1995.
- TARANTOLA, A. **Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation**. Second Edi ed. Paris, France: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2005.

- TEIXEIRA, L.; GOBATTO, F.; MAUL, A.; CRUZ, N.; LAQUINI, J.; GONÇALVES, C. **Rock Physics and Seismic Inversion to identify stratification within salt section supporting velocity, facies modeling and geomechanical analysis**. 15 International Congress of the Brazilian Geophysical Society. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2017.
- TEIXEIRA, L.; LUPINACCI, W. **Elastic properties of rock salt in the Santos Basin : Relations and spatial predictions**. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 180, n. January, p. 215–230, 2019.
- THOMSEN, L. **Weak elastic anisotropy**. Geophysics, v. 51, n. 10, p. 1954–1966, 1986.
- TORÍBIO, T.; QUEIROZ, L.; TEIXEIRA, L.; YAMAMOTO, T.; MENEGUIM, T.; LEONARDI, O.; CORTEZ, M.; TARYN, M.; MOLITERNO, A.; MAUL, A.; TARTARINI, A.; FONSECA, J.; MAUL, A. **Characterizing Evaporitic Section and Geomechanical Properties Using Seismic Inversion, a Case Study for Santos Basin**. International Congress of the Brazilian Geophysical Society. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2017.
- WARREN, J. **Evaporite sedimentology: its importance in hydrocarbon accumulation**. 1. ed. New Jersey: [s.n.]. v. 1, 1989
- WEIJERMARS, R.; JACKSON, M.; VENDEVILLE, B. **Rheological and tectonic modeling of salt provinces**. Tectonophysics, v. 217, n. 1–2, p. 143–174, 1993.
- WHITE, R.; MCKENZIE, D. **Magmatism at rift zones: The generation of volcanic continental margins and flood basalts**. Journal of Geophysical Research, v. 94, n. B6, p. 7685, 1989.
- WIDESS, M. **How thin is a thin beds?** Geophysics, v. 38, n. 6, p. 1176–1180, 1973.
- YAMAMOTO, T.; MAUL, A.; BORN, E.; GOBATTO, F.; TARYN, M.; GONZALEZ, M. **Incorporação de Estratificações Salíferas na Modelagem de Velocidade de uma Jazida da Bacia de Santos**. VII Simpósio Brasileiro de Geofísica. **Anais**. Ouro Preto: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2016.
- YAMAMOTO, T.; MAUL, A.; LUPINACCI, W. **Analysis of Velocities , Density and Seismic Facies of Aripuanã Formation – Santos Basin** . International Congress of the Brazilian Geophysical Society. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2019.
- YAN, F.; HAN, D.; YAO, Q.; CHEN, X. **Seismic velocities of halite salt: Anisotropy, heterogeneity, dispersion, temperature, and pressure effects**. Geophysics, v. 81, n. 4, p. D293–D301, 2016.
- YILMAZ, O. **Seismic Data Analysis (Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data)**. Second Edition. [s.l.] Society of Exploration Geophysicists, 2001.
- ZOEPPRITZ, K. **Erdbebenwellen vii. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen**. Mathematisch-Physikalische Klasse, v. 19, p. 66–84, 1919.

## Apêndice A

Neste estudo, o dado sísmico e todos os estudos inerente ao mesmo se encontram no domínio do tempo, enquanto que os perfis estão em profundidade. Os poços podem ser convertidos para o domínio do tempo através da utilização de pares tempo/profundidade obtidos nos *checkshots* ou por intermédio da amarração de poços na sísmica. O processo de amarração consiste em ajustar as refletividades dos poços aos refletores presentes na sísmica, neste procedimento, são utilizadas informações de perfis complementados apresentados no Capítulo 5.1 e alguns traços ao redor das locações (Figura 51).

Não haviam disponíveis informações de *checkshots* nos poços e, portanto, estes tiveram que ser amarrados, diretamente na sísmica, utilizando-se como primeira aproximação a integração da curva do perfil sônica, devidamente transformada da propriedade de vagarosidade para velocidade instantânea. Carregadas as curvas e sísmica, calculou-se a refletividade do poço utilizando a propriedade velocidade compressional e a densidade. *Wavelets* do tipo Ricker com comprimento de 0,104 s foram utilizadas na convolução com a refletividade para calcular o sintético do poço utilizado na amarração.

A base da Formação Ariri foi o ponto inicial de amarração para todos os poços. A partir deste par inicial tempo/profundidade, o programa calculou automaticamente a conversão tempo-profundidade através do uso da velocidade compressional instantânea, passando assim o poço para o domínio do tempo. Com o traço sísmico sintético em tempo, são feitos ajustes no posicionamento entre as reflexões na sísmica e os contrastes de impedância do poço. Nesta etapa, tenta-se evitar fortes estiramentos (*stretch/squeeze*) entre o tempo da sísmica e o do poço (tempo de deriva – *time drift*). Como controle de qualidade da amarração dos poços, foram utilizados além do tempo de deriva comentado anteriormente a correlação entre os traços sintético e a curva real.

As *wavelets* do tipo Ricker não são operadores ideais para o processo de inversão sísmica e, algumas vezes, até mesmo para amarração. Em virtude disso foram estimadas *wavelets* do tipo determinísticas. Neste processo, o programa estima um operador que minimize a diferença entre os coeficientes de reflexão dos poços com os traços sísmicos ao redor dos mesmos. Estas *wavelets*

foram calculadas dentro de uma janela temporal de 0,360 s (horizontes azuis no painel dos sintéticos, Figura 51), com 0,104 s de comprimento e fase zero.

## Apêndice B

No aplicativo escolhido para a realização da inversão, a parametrização é dada por uma série de fatores que podem ou não atuar, conjuntamente, no resultado. Cada parâmetro influencia de um modo os termos de *misfit* da função objetivo. Os principais parâmetros da inversão do aplicativo Jason® são: *contrast misfit P-Impedance uncertainty*, *seismic misfit signal to noise ratio*, *wavelet scale factor* e *merge cutoff frequency*. Há outros parâmetros que podem ser alterados, contudo estes apresentaram um baixo impacto no resultado final e por isso não serão mencionados neste apêndice. A Tabela 17 ilustra os principais parâmetros da inversão, a qual termo da função objetivo impacta e o efeito sobre o resultado da inversão.

Tabela 17: Parâmetros de inversão.

Parâmetros do software	Função de <i>misfit</i> impactada	Controle de Qualidade	Efeito na inversão
<i>Contrast misfit P-Impedance uncertainty</i>	<i>Misfit</i> do contraste	Correlação poço e pseudocurva da inversão, desvio padrão normalizado do poço e <i>misfits</i> combinados	Baixos valores levam a soluções mais esparsas. Quanto menor o valor, mais peso é dado ao termo de contraste e mais suave é a solução
<i>Seismic misfit signal to noise ratio</i>	<i>Misfit</i> da sísmica	Razão sinal/ruído, esparsidade	Controla o resíduo entre sintético e a sísmica. Quanto maior o valor, mais peso é dado a sísmica e menor é o resíduo.
<i>Wavelet scale factor</i>	<i>Misfit</i> da sísmica	Razão sinal/ruído, correlação poço e pseudocurva da inversão, esparsidade	Valores pequenos tendem a deixar a impedância resultante mais variável e vice versa. O ideal é estar próximo a 1.
<i>Merge cutoff frequency</i>	<i>Misfit</i> da tendência	Esparsidade, <i>misfits</i> combinados	Normalmente se utiliza baixos valores para completar a baixa frequência ausente na sísmica. Quanto maior o valor, mais informação do modelo inicial entra no resultado da inversão

O próprio aplicativo produz gráficos nos quais é possível realizar controles de qualidade em relação aos efeitos dos parâmetros no processo de inversão (Figura 69). O primeiro gráfico (Figura 69.A) ilustra a razão sinal-ruído da sísmica, indicando que quanto maior o valor, melhor é a qualidade do sinal. O segundo gráfico (Figura 69.B) apresenta a correlação entre a impedância acústica do poço com a pseudocurva gerada na inversão de alguns traços sísmicos. Neste caso, quanto mais próximo de 1 mais ajustado o resultado da inversão está com o dado do poço. O terceiro gráfico (Figura 69.C) apresenta o desvio padrão da impedância acústica da pseudocurva pelo desvio padrão da impedância acústica do poço. Neste gráfico é medido o erro de valores da inversão em relação ao dado de poço e quanto mais próximo de 1 melhor o resultado. O quarto gráfico (Figura 69.D) ilustra a esparsidade. Assim, quanto menor o valor de esparsidade melhor é o resultado da inversão. Por fim, é

ilustrado o diagrama dos *misfits* combinados (Figura 69.E), que devem ser reduzidos ao máximo. Contudo, é impossível minimizar todas as funções simultaneamente. Os controles de qualidade sobre estes parâmetros podem ser realizados separadamente ou em conjunto. No segundo caso são gerados mapas de qualidades ao invés dos gráficos aqui apresentados.

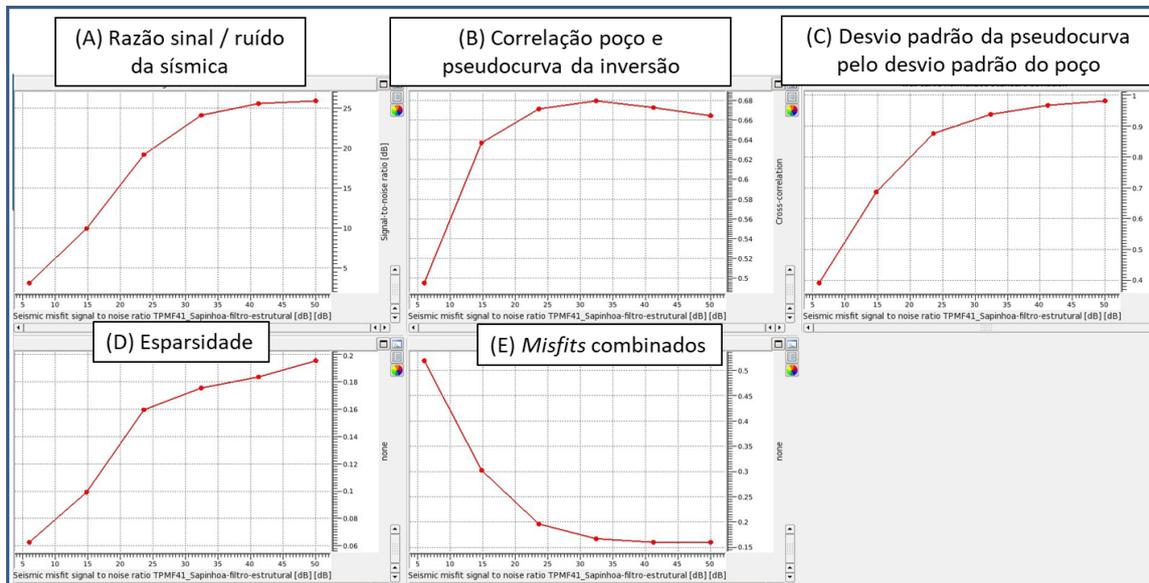


Figura 69: Gráficos gerados durante o controle de qualidade para o parâmetro *seismic misfit signal to noise ratio*. A) Razão sinal/ruído da sísmica; B) Correlação poço e pseudocurva da inversão; C) Desvio padrão da pseudocurva pelo desvio padrão do poço; D) Esparsidade; E) *Misfits* combinados. Por esses gráficos é possível verificar que, para valores mais alto de *seismic misfit signal to noise ratio* há um aumento da razão sinal/ruído, correlação dos poços e os misfits combinados são minimizados ao ponto em que os valores se estabilizam em um patamar. Contudo, há um aumento da esparsidade o que configura uma deteriorização no termo de contraste da função objetivo.

As funções de *misfit* da sísmica e de contraste não podem ser minimizados simultaneamente uma vez que, para se obter um resíduo baixo, é necessárias impedâncias relativamente bem detalhadas (em frequência similar à da sísmica), o que não atende ao critério de um resultado esparsa, pois neste caso as impedâncias devem estar suavizadas. Caso o conhecimento geológico da área seja muito confiável, é possível atribuir um maior peso ao modelo inicial e alcançar resultados compatíveis ao observado pela sísmica. Caso contrário, o ideal é filtrar este volume na frequência equivalente às informações do dado sísmico.

Foram realizadas três inversões, uma para cada modelo inicial. Os parâmetros utilizados nos processos foram ajustados de forma a ficarem próximos uns dos outros. De uma forma geral, foi atribuído um maior peso a sísmica, minimizando-se mais o termo *misfit* da sísmica em relação aos demais. O modelo inicial entrou com uma frequência de corte em 4 Hz na inversão (conforme Figura 57). Assim, as informações geológicas foram bem suavizadas no processo, com exceção do modelo inicial calculado a partir do volume de velocidades oriundo do processo tomográfico, que por sua vez já atendia ao padrão de suavização necessário ao processo em si. Quanto à função esparsidade foram realizadas parametrizações de modo que este termo fosse minimizado o máximo possível, respeitando assim o maior peso atribuído a sísmica. Infelizmente, em decorrência disso a solução foi pouco esparsa. Os resultados das inversões são ilustrados nas Figuras 61 a 63.