

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

LÍVIA FALCÃO FERNANDES

**O SAL ESTRATIFICADO E SUA IMPORTÂNCIA NA MODELAGEM DE
VELOCIDADES PARA FINS DE MIGRAÇÃO SÍSMICA**

Niterói
2018

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

LÍVIA FALCÃO FERNANDES

**O SAL ESTRATIFICADO E SUA IMPORTÂNCIA NA MODELAGEM DE
VELOCIDADES PARA FINS DE MIGRAÇÃO SÍSMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.
Área de Concentração: Geologia e Geofísica.

Orientador: **Prof. D. Sc. Marco Antonio Cetale Santos**
Co-Orientador: **M. Sc. Alexandre Rodrigo Maul**

Niterói
2018

LÍVIA FALCÃO FERNANDES

**O SAL ESTRATIFICADO E SUA IMPORTÂNCIA NA MODELAGEM DE
VELOCIDADES PARA FINS DE MIGRAÇÃO SÍSMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.
Área de Concentração: Geologia e Geofísica.

Aprovada em 11 de Agosto de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. D. Sc. Marco Antonio Cetale Santos (Orientador)
Universidade Federal Fluminense

M. Sc. Alexandre Rodrigo Maul (Co-Orientador)
Petróleo Brasileiro S.A.

Prof. D. Sc. Luiz Alberto Santos
Universidade Federal Fluminense

Prof. D. Sc. Wagner Moreira Lupinacci
Universidade Federal Fluminense

D. Sc. Djalma Manoel Soares Filho
Petróleo Brasileiro S.A.

D. Sc. João Batista Teixeira Boechat
Petróleo Brasileiro S.A.

Niterói
2018

*Dedico este trabalho ao meu filho Ravi que,
ainda no meu ventre, acompanhou e
inspirou cada página deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, fonte de tudo o que rege a vida, meu mestre e guia.

Aos meus pais, que me deram a vida e todo o amor que me conduz nessa existência.

Ao meu marido, Claudio, meu companheiro de jornada, pelo carinho e cumplicidade incondicionais em todos os desafios e realizações da vida.

À minha amiga e irmã, Lisie, por seu exemplo e dedicação que sempre me inspiraram a seguir adiante, e ao meu cunhado, Glauco, pela amizade e boa vontade nas colaborações técnicas de todas as horas.

À Petrobras, através dos gerentes Paulo Johann e Carlos Bruhn, pela oportunidade e confiança no incentivo ao meu desenvolvimento profissional, por fornecerem todos os insumos necessários à execução deste projeto.

Ao co-orientador, Alexandre Maul, pela amizade e entusiasmo contagiante que inspiraram a realização deste trabalho, e por se dispor na tarefa de me conduzir e superar os obstáculos.

Ao orientador, Marco Cetale, pelas sugestões, discussões e apoio no decorrer do estudo, e ao Prof. Cleverson, por facilitar os caminhos na Universidade.

Ao consultor e amigo João Batista Boechat, por estar sempre disposto a ajudar e pelas preciosas contribuições técnicas que me abriram as portas e fizeram toda a diferença na realização deste trabalho.

Também ao grande mestre Djalma Soares, que com entusiasmo e boa vontade colaborou para a execução do projeto. Ao engenheiro André Bulcão, pela enorme contribuição técnica e prestatividade, e ao geofísico Bruno Dias, pelas sugestões e colaborações nos momentos necessários.

À Paradigm, pela disponibilização das ferramentas necessárias que delinearão a execução do projeto. Em especial, aos consultores Gerardo González e María González pela prontidão, paciência e boa vontade de sempre em ajudar.

Aos colegas Tatiana Oliveira, Eliane Born, Desiree Faria e Thiago Yamamoto, por facilitarem o acesso ao conhecimento e aos dados utilizados.

Aos amigos e colegas de trabalho, que muito contribuíram com sua amizade e conselhos valiosos durante essa jornada. Muito obrigada, Álvaro Favinha, Fernanda Gobatto, Evângela Alves, Rubens Monteiro, Daniel Oliveira, Talles Meneguim, Marta Gomez, Josenilda Lonardelli, e a todos os demais colegas que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste projeto.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota no oceano. Mas o oceano seria menor se lhe faltasse uma gota.”

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

Atualmente, existem muitas discussões a respeito da construção de um modelo de velocidades mais acurado para propósitos de migração sísmica. A incorporação de feições geológicas complexas nem sempre é uma tarefa simples de se realizar. No caso da sequência evaporítica da Bacia de Santos, embora os dados sísmicos e de poços revelem que a mesma encontra-se estratificada, tradicionalmente, os modelos de velocidades consideram-na como uma camada homogênea e isotrópica para fins de imageamento em profundidade. Este trabalho apresenta uma metodologia para a construção de modelos de velocidades sísmicas, considerando a alternância dos diferentes tipos de rochas presentes na seção evaporítica, que influenciam, diretamente, na definição e caracterização sísmica dos reservatórios da seção Pré-Sal. A técnica permite incorporar ao processo de imageamento sísmico a presença de estratos intra-sal, geralmente compostos por sais de alta velocidade (anidrita, gipsita e outros) e sais de baixa velocidade (taquidrita, carnalita, silvita e outros), intercalados na halita. Para a obtenção dos resultados, foi construído um modelo de velocidades baseado em dados reais da Bacia de Santos, ao qual foi adicionado um refletor plano abaixo das estruturas de sal, possibilitando a avaliação do imageamento com a presença das variações de velocidade da seção evaporítica. Utilizando um dado sísmico sintético 2D obtido a partir da velocidade modelada integrada a dados de poços, foram aplicadas as técnicas de migração em profundidade dos tipos Kirchhoff e RTM (*Reverse Time Migration*). Ambos os métodos as técnicas utilizaram dois modelos de velocidades distintos: um contendo as estratificações na sequência evaporítica, e outro considerando o sal tipicamente homogêneo, composto basicamente por halita, conforme tem sido, usualmente, aplicado na indústria do petróleo. As seções sísmicas resultantes revelaram um impacto positivo na utilização de um modelo inicial geologicamente mais refinado na seção evaporítica, para propósitos de migração sísmica em reservatórios do Pré-Sal, independente da técnica. Ainda assim, a migração RTM mostrou maior sensibilidade ao refinamento das velocidades no sal, tendo apresentado maior impacto no posicionamento em profundidade, assim como na continuidade e contorno dos refletores sísmicos na seção Pré-Sal.

Palavras-chave: sequência evaporítica, imageamento sísmico, Pré-Sal, caracterização sísmica de reservatórios.

ABSTRACT

Currently, there are many discussions about building a more accurate velocity model for seismic migration purposes. The incorporation of complex geological features is not always a simple task. In the case of the evaporitic sequence of Santos Basin, although the seismic and well data show that it is stratified, the velocity models traditionally consider it as a homogeneous and isotropic layer for depth imaging purposes. This work presents a method for velocity models building, considering the alternation of different types of rocks present in the evaporite section, which directly influence the definition and seismic characterization of the Pre-Salt reservoirs. The technique allows the incorporation of intrasalt strata, usually composed by high-velocity salts (anhydrite, gypsum and others) and low-velocity salts (tachydrate, carnalite, sylvite and others), inserted between halite. To obtain the results, a velocity model was built based on a real data of Santos Basin, to which a flat reflector was added below the salt structures, allowing the imaging evaluation with the presence of the velocity variations in the evaporitic section. Using a 2D synthetic seismic data, obtained from the modeled velocity integrated into well data, the depth migration techniques Kirchhoff and RTM (Reverse Time Migration) were applied. Both methods used two different velocity models: one containing the stratification in the evaporitic sequence, and other considering the salt layer as typically homogeneous, basically composed by halite, as has been commonly applied in the petroleum industry. The resulting seismic sections revealed a positive impact on the use of a geologically more refined initial model on seismic migration, independently of the technique employed. Nevertheless, the RTM method has shown more sensitivity to the salt velocity refinement, presenting more impact on the positioning in depth, as well as on the continuity and contour of the Pre-Salt seismic reflectors.

Keywords: evaporitic sequence, seismic imaging, Pre-Salt, seismic reservoir characterization.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Localização dos principais campos produtores da província Pré-Sal na Bacia de Santos. 19
- Figura 2: (A) Cross-section em 3D ilustrando os dados de entrada utilizados na execução do projeto: modelo de velocidade sísmica intervalar, dado de amplitude sísmica e dados de dez poços; (B) Cobertura sísmica em área e posicionamento dos poços.....20
- Figura 3: Carta Estratigráfica da Bacia de Santos. Fonte: Moreira *et al.* (2007).24
- Figura 4: Seção sísmica em profundidade destacando os principais pacotes de evaporitos: o fluxo no pacote basal de halitas criando estruturas dômicas, os espessamentos diferenciais nos pacotes de sais estratificados e as estruturas de fluxo no pacote superior de halita. As intercalações azuis e brancas marcam os grandes contrastes de impedância existentes nos pacotes de evaporitos estratificados. Fonte: Gamboa et al. (2008).26
- Figura 5: Quatro unidades intra-sal definidas a partir de dados de poços (A1, A2, A3, A4), na Fm. Ariri, Bacia de Santos, por Jackson et al. (2014). Observar o comportamento sísmico das quatro unidades intra-sal identificados tanto no dado sísmico real quanto no sismograma sintético (Jackson et al., 2015). O topo e a base do sal são definidos como refletores fortemente positivo e fortemente negativo, respectivamente (TS e BS).28
- Figura 6: Localização de um ponto difrator, identificado pelo ponto preto, usando os tempos de registro da correspondente difração. A partir de cada uma das posições de registro, traça-se um semicírculo, usando o valor de tempo obtido na mesma posição. O difrator é localizado no ponto em que os diversos semicírculos se interceptam (Rosa, 2010).....30
- Figura 7: Workflow proposto por Maul et al. (2016) in González et al. (2016) & Gobatto et al. (2016), sintetizando a proposta de integração multidisciplinar para a geração de um modelo geológico de velocidades sísmicas mais realista.....40
- Figura 8: Estudo estatístico das velocidades dos sais desenvolvido por Amaral et al. (2015). (A) Classificação dos sais a partir das velocidades adquiridas no perfil sônico. Observar a coerência entre as informações obtidas em perfil e a descrição das amostras de calha; (B) Comparação entre as proporções dos sais calculados a partir do perfil sônico e pela litologia interpretada durante a perfuração do poço, cujos resultados são agrupados em “sais de baixa velocidade”, “halita” e “sais de alta velocidade”; (C) Médias das velocidades instantâneas obtidas a partir da análise estatística dos poços para cada litologia encontrada no sal.41
- Figura 9: (A) Proporções de sais na seção evaporítica da área estudada (halita em cinza, sais de alta velocidade em vermelho e sais de baixa velocidade em verde). (B) Proporções dos tipos de sais, poço a poço (Yamamoto et al., 2016).....42

Figura 10: (A) Seção arbitrária exibindo a probabilidade de ocorrência para cada classe de evaporitos: anidritas, halitas, carnalitas e taquidritas. (B) Função densidade de probabilidade apresentando os cenários base, pessimista e otimista das velocidades sísmicas obtidas dos poços, também definidos por classes (Meneguim *et al.*, 2015).43

Figura 11: (A) Amplitude sísmica ilustrando a presença das estratificações na sequência evaporítica; (B) Modelo de velocidade sísmica considerando a seção evaporítica com velocidade aproximadamente constante; (C) Impedância acústica obtida da inversão sísmica realizada na seção evaporítica; e (D) Modelo de velocidade obtido a partir da resposta da inversão sísmica na sequência evaporítica, incluindo também o refinamento da velocidade da sequência de carbonatos do Albiano (Gobatto *et al.*, 2016).45

Figura 12: Migração pré-empilhamento em profundidade, (A) utilizando o modelo original de velocidades sísmicas da Figura 11b (sem estratificação na seção evaporítica), e (B) utilizando o modelo de velocidades com a inclusão da estratificação no sal, exposto na Figura 11d (Gobatto *et al.*, 2016). Observar a melhor definição dos refletores em destaque na base do sal com a utilização do modelo refinado de velocidades.45

Figura 13: Fluxo de trabalho proposto com o encadeamento das etapas que definirão os resultados do projeto.49

Figura 14: Preparação dos dados utilizados como entrada no projeto. (A) Redução em área dos dados sísmicos originais para otimização dos processos, contemplando a área dos dez poços; (B) velocidade sísmica intervalar sobreposta ao dado de amplitude sísmica com quatro horizontes mapeados; (C) histogramas das velocidades intervalares originais encontradas para cada sequência definida pelo mapeamento sísmico.51

Figura 15: (A) Perfil de velocidade instantânea (derivado do sônico), perfil litológico destacando os três principais grupos de sais, e refletores sísmicos extraídos na posição do poço B na sequência evaporítica; (B) Seção sísmica (crossline) em profundidade com perfil de velocidade instantânea (derivado do sônico) e perfil litológico destacando os três principais grupos de sais, ambos referentes ao poço J.52

Figura 16: (A) Distribuição em mapa dos dez poços do projeto, com gráficos de proporções dos tipos de sais, agrupados em sais de alta velocidade, halita e sais de baixa velocidade. (B) Histograma com a proporção total encontrada para cada grupo de sais nos dez poços do projeto. Os histogramas menores detalham esta distribuição poço a poço, obedecendo a mesma legenda.53

Figura 17: Esquema ilustrativo dos comportamentos dos espectros de amplitude e de fase resultantes dos operadores: (A) de diferenciação (Equação 10), que, ao multiplicar o seu espectro de amplitude pela frequência angular ω , aplica um maior ganho de amplitudes nas altas frequências em relação às baixas, rotacionando os componentes de frequência em -90° ; e (B) de integração (Equação 11), que privilegia as amplitudes nas baixas frequências ao dividir seu espectro de amplitude por ω , e rotaciona todos os componentes de frequência em $+90^\circ$55

Figura 18: Dado resultante do atributo diferenciação com rotação de fase em 180° (A) comparado ao dado de amplitude sísmica original (B), ambos com o perfil litológico de um dos poços (agrupado em sais de alta velocidade, halita e sais de baixa velocidade).
55

Figura 19: (A) Atributo de diferenciação com rotação de fase em 180° na sequência evaporítica (delimitada pelos horizontes Topo e Base do Sal), com *cut-off* na escala de cor ilustrando as amplitudes capturadas através do algoritmo utilizado. (B) Velocidade sísmica intervalar resultante.58

Figura 20: Dados e informações para a obtenção do modelo de densidade: (A) Perfis de poços velocidade da onda P (m/s) e densidade (g/cm³), filtrados a 20 Hz; (B) Relações empíricas extraídas das correlações entre perfis de poços (Vp X Rhob) para cada intervalo litológico, visando a geração do modelo de densidade como função do modelo de velocidade. A relação de Gardner et al. (1974) foi aplicada à camada “siliciclásticos do pós-sal” devido à ausência de perfis de poços nesta seção.....61

Figura 21: Modelo de densidade obtido como função do modelo de velocidade intervalar estratificado na seção evaporítica, utilizando relações velocidade X densidade extraídas dos poços. A curva preta apresenta o comportamento de um dos perfis Rhob (poço J) na sequência salina, filtrado a 20 Hz, utilizados na obtenção das relações empíricas empregadas no processo de geração do modelo de densidade.
62

Figura 22: (A) Modelo de densidade (em g/cm³) após o tratamento adicional. Observar as variações inseridas com base no comportamento da amplitude sísmica real normalizada, e a camada plano-paralela delgada, de alta densidade, representada pela linha marrom horizontal na base do modelo. (B) Modelo de impedância acústica (em m/s.g/cm³) oriundo da multiplicação entre a velocidade com sal estratificado (Figura 19b) e a densidade descrita em “A”, a ser utilizado no processo de modelagem acústica.64

Figura 23: Seção-tipo do dado sísmico real utilizada na geração do modelo sintético 2D.....65

Figura 24: Campo de velocidade sísmica intervalar: (A) sem a estratificação na sequência evaporítica, antes da suavização (modelo original com o sal homogêneo); (B) com a estratificação na sequência evaporítica, antes da suavização (resultante da modelagem com o sal estratificado); (C) apresentado em “A” após ser submetido ao processo de suavização do campo de vagarosidades; e (D) apresentado em “B” após ser submetido ao processo de suavização do campo de vagarosidades. Os modelos “C” e “D” foram utilizados como modelos iniciais durante a execução das migrações Kirchhoff e RTM.67

Figura 25: Seções sísmicas resultantes das migrações Kirchhoff pré-empilhamento, utilizando velocidades que consideram o sal homogêneo (A) e estratificado (B). Uma sequência de gathers migrados é exposta nas posições das linhas tracejadas “a”, “b” e “c”.68

Figura 26: Seções sísmicas resultantes das migrações RTM, utilizando velocidades que consideram o sal homogêneo (A) e estratificado (B). Uma sequência de gathers migrados é exposta nas posições das linhas tracejadas “a”, “b” e “c”.....69

Figura 27: Observação em detalhe das reflexões sísmicas situadas logo abaixo da Base do Sal, resultantes das migrações Kirchhoff que consideraram: (A) o sal homogêneo e (B) o sal estratificado. No aspecto comparativo, não foram observadas diferenças na focalização e contorno dos eventos da seção Pré-Sal.71

Figura 28: Observação em detalhe das reflexões sísmicas situadas logo abaixo da Base do Sal, resultantes das migrações RTM que consideraram: (A) o sal homogêneo e (B) o sal estratificado. No aspecto comparativo, observa-se uma melhor focalização e contorno dos eventos situados logo abaixo do sal, quando realizada a migração que contempla a presença das estratificações.71

Figura 29: Observação em detalhe do comportamento morfológico dos refletores sísmicos referentes à camada plano-paralela criada na base do sismograma sintético, resultantes das migrações Kirchhoff que consideraram: (A) o sal homogêneo e (B) o sal estratificado. Observar a curvatura da camada apresentada pela migração que considerou a velocidade com o sal homogêneo.....72

Figura 30: Observação em detalhe do comportamento morfológico dos refletores sísmicos referentes à camada plano-paralela criada na base do sismograma sintético, resultantes das migrações RTM que consideraram: (A) o sal homogêneo e (B) o sal estratificado. Observar a curvatura da camada apresentada pela migração que considerou a velocidade com o sal homogêneo.....73

Figura 31: Mapeamento sísmico da Base do Sal (em rosa) e do refletor fictício criado na base do modelo (em azul), referente às seções migradas pelo método Kirchhoff considerando o sal homogêneo (“A”) e estratificado (“B”)......74

Figura 32: Mapeamento sísmico da Base do Sal (em rosa) e do refletor fictício criado na base do modelo (em azul), referente às seções migradas pelo método RTM considerando o sal homogêneo (“A”) e estratificado (“B”)......74

Figura 33: (A) Seção sísmica migrada pelo método Kirchhoff utilizando o modelo de velocidade que considera o sal homogêneo, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (B) Seção sísmica migrada pelo método Kirchhoff utilizando o modelo de velocidade que considera o sal estratificado, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (C) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações Kirchhoff (sal homogêneo e estratificado) versus a profundidade, na posição dos mapeamentos realizados na Base do Sal. Em verde, o mapeamento do dado real é utilizado como referência; (D) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações Kirchhoff (sal homogêneo e estratificado) versus a profundidade, na posição dos mapeamentos realizados no refletor fictício. Em verde, a profundidade constante estabelecida originalmente para o refletor é utilizada como referência.75

Figura 34: (A) Seção sísmica migrada pelo método RTM utilizando o modelo de velocidade que considera o sal homogêneo, com o mapeamento dos horizontes Base

do Sal e refletor fictício; (B) Seção sísmica migrada pelo método RTM utilizando o modelo de velocidade que considera o sal estratificado, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (C) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações RTM (sal homogêneo e estratificado) versus a profundidade, na posição dos mapeamentos realizados na Base do Sal. Em verde, o mapeamento do dado real é utilizado como referência; (D) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações RTM (sal homogêneo e estratificado) versus a profundidade, na posição dos mapeamentos realizados no refletor fictício. Em verde, a profundidade constante estabelecida originalmente para o refletor é utilizada como referência. 76

Figura 35: (A) Seção sísmica migrada pelo método Kirchhoff utilizando o modelo de velocidade que considera o sal homogêneo, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (B) Seção sísmica migrada pelo método Kirchhoff utilizando o modelo de velocidade que considera o sal estratificado, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (C) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações Kirchhoff (sal homogêneo e estratificado) versus a amplitude sísmica normalizada, extraída na posição dos mapeamentos realizados na Base do Sal. Em verde, a amplitude obtida do mapeamento do dado real é utilizada como referência; (D) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações Kirchhoff (sal homogêneo e estratificado) versus a amplitude sísmica normalizada, na posição dos mapeamentos realizados no refletor fictício. 80

Figura 36: (A) Seção sísmica migrada pelo método RTM utilizando o modelo de velocidade que considera o sal homogêneo, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (B) Seção sísmica migrada pelo método RTM utilizando o modelo de velocidade que considera o sal estratificado, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (C) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações RTM (sal homogêneo e estratificado) versus a amplitude sísmica normalizada, extraída na posição dos mapeamentos realizados na Base do Sal. Em verde, a amplitude obtida do mapeamento do dado real é utilizada como referência; (D) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações RTM (sal homogêneo e estratificado) versus a amplitude sísmica normalizada, na posição dos mapeamentos realizados no refletor fictício. 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Compilação dos estudos de diversos autores sobre velocidade e densidade dos principais tipos de sais (Justen *et al.*, 2013).41

Tabela 2: Estatísticas da distribuição de velocidades na seção evaporítica (Yamamoto *et al.*, 2016).42

Tabela 3: Parâmetros utilizados na simulação da aquisição de dados sísmicos de superfície (*Streamer*).66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos.....	17
2	ASPECTOS GERAIS	19
2.1	Localização.....	19
2.2	Conjunto de Dados e Aplicativos Utilizados.....	19
2.3	Aspectos Geológicos.....	21
3	CONTEXTUALIZAÇÃO DA SEÇÃO EVAPORÍTICA	25
4	MIGRAÇÃO SÍSMICA E VELOCIDADE	29
4.1	Migração Kirchhoff.....	31
4.2	Migração Reversa no Tempo (RTM).....	35
5	CONSTRUÇÃO DE MODELO DE VELOCIDADES COM A INCLUSÃO DAS ESTRATIFICAÇÕES NO SAL	38
6	METODOLOGIA, APLICAÇÃO E RESULTADOS	47
6.1	Modelagem da Estratificação no Sal.....	50
6.2	Modelagem Sísmica Sintética.....	59
6.3	Migração Sísmica.....	66
7	ANÁLISE DOS RESULTADOS	70
8	CONCLUSÕES	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1 INTRODUÇÃO

Em ambientes de geologia complexa um dos grandes desafios da indústria do petróleo está na busca por alternativas que melhorem a qualidade dos dados sísmicos a serem interpretados. Este desafio se torna ainda maior quando se trata de alvos profundos e localizados abaixo desta complexidade geológica.

Yilmaz (2001) afirma que a qualidade da informação sísmica depende, principalmente, da parametrização da aquisição, das condições desta aquisição e das técnicas de processamento empregadas.

Os dados sísmicos vêm se tornando uma fonte de informação cada vez mais precisa. Esta evolução muito está relacionada com o avanço tecnológico que vem contribuindo para a melhoria na qualidade dos dados (Coelho & Suslick, 2005). Silva (2009) cita que “a busca por técnicas e metodologias que retirem dos dados sísmicos informações precisas das litologias e dos posicionamentos corretos dos refletores, e que apresentem melhorias na resolução da imagem em profundidade, tem sido o combustível das inovações tecnológicas em todas as etapas do processo exploratório, principalmente no que se refere a regiões com alta complexidade geológica”.

Dubrulle (2003) ressalta a importância do tratamento das informações de velocidades, visando honrar os dados de poços no sentido de obter a melhor imagem sísmica possível em termos de posicionamento vertical.

Desta forma, o conhecimento de metodologias de construção de modelos geológicos de velocidades sísmicas torna-se muito importante, uma vez que as variações das propriedades de rochas e a presença de estruturas complexas geram grandes erros na predição das profundidades. Tal abordagem permite gerar, com robustez, cenários de volumes de hidrocarbonetos, principalmente nas etapas de exploração e de desenvolvimento da produção.

Bulhões *et al.* (2014) e Bulhões *et al.* (2015) baseados na metodologia idealizada por Fetter *et al.* (2004) e explorada e adaptada por Maul *et al.* (2005) e revisões, mostram a importância de se pensar geologicamente na construção de modelos de velocidades regionais aplicados à Bacia de Campos, com ênfase em conceitos de geoestatística.

O conceito de modelagem geológica ou modelagem geoestatística de velocidade para o uso em processamentos sísmicos é bem exemplificado no trabalho de Sandjiv *et al.* (2003) e Sandjiv *et al.* (2004).

Robein (2003) indica que a informação de velocidade é a chave para se construir uma boa imagem sísmica, tanto em tempo quanto em profundidade, sendo necessário o conhecimento da área de estudo, informações de poços, etc., visando o processo de migração sísmica. Este mesmo autor apresenta em seu trabalho os mais diferentes tipos de velocidades existentes, bem como uma revisão dos métodos de imageamento sísmico, com ênfase na relação entre a imagem e a velocidade sísmica.

Bakulin *et al.* (2010) enfatizam a importância de se construir modelos de velocidades com forte compromisso geológico, visando aprimorar a qualidade da imagem. Tais modelos devem contemplar tanto parâmetros anisotrópicos, quanto de heterogeneidades e informações de poços, a fim de obter, também, maior fidelidade no posicionamento vertical. Este conceito é reforçado por Guo & Fagin (2002) quando afirmam que a tomografia por si só não é uma solução perfeita. Ela deve ser empregada para melhorar o refinamento de um bom modelo de velocidades inicial.

Este trabalho propõe a utilização de um método que integra informações sísmicas e de poços no refinamento do modelo de velocidades, visando agregar o máximo de informação geológica possível ao processo de migração sísmica em profundidade. Será avaliado o impacto de utilização de um modelo inicial de velocidades que contemple a complexa geologia proveniente da tectônica salífera, tanto relativa às estruturas geológicas em si, quanto à composição heterogênea da espessa seção evaporítica situada acima dos reservatórios do Pré-Sal na Bacia de Santos.

1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é investigar o comportamento das imagens sísmicas em profundidade quando são incluídas variações de velocidades na seção evaporítica da Bacia de Santos, provocadas pela presença das estratificações intra-sal. Desta forma, pretende-se avaliar o impacto nos resultados obtidos, cujo alvo está localizado na seção Pré-Sal, situada logo abaixo da seção evaporítica.

Para alcançar esta avaliação final, diversas etapas se fazem necessárias e podem ser consideradas como objetivos secundários neste trabalho, dentre as quais, podemos ressaltar:

- a) Definição de um modelo geológico incluindo as heterogeneidades observadas no dado sísmico real, com propriedades identificadas em dados de poços;
- b) Construção de um modelo geológico de velocidades sísmicas, contemplando a estratificação da sequência salina, baseado em dado sísmico real oriundo de processamentos anteriores, aliado a informações de poços;
- c) Modelagem sísmica sintética obtida a partir dos dados sísmicos reais e dados de poços, possibilitando a realização de testes de migração sísmica;
- d) Execução de algoritmos distintos de migração, considerando os diferentes modelos de velocidades – com e sem a estratificação na sequência evaporítica.

Este trabalho está estruturado em nove capítulos. Dando sequência à introdução do tema do projeto e definição dos objetivos apresentados neste primeiro capítulo, o segundo capítulo dedica-se a aspectos gerais associados ao contexto geológico regional, conjunto de dados disponíveis ao projeto e localização da área de estudos. O terceiro expõe em escala de maior detalhe a natureza estratigráfica, composição e heterogeneidades que caracterizam a seção evaporítica, objeto deste estudo. O quarto aborda a importância da velocidade no processo de migração sísmica e apresenta a fundamentação teórica necessária ao entendimento dos métodos de migração aplicados. O quinto apresenta o estado da arte da utilização de velocidades sísmicas com estratificação na seção evaporítica, com aplicação nas mais diversas etapas do fluxo de modelagem sísmica. O sexto descreve o fluxo de trabalho proposto e a metodologia utilizada para a construção do modelo de velocidades que contempla as estratificações internas do sal, geração do sismograma sintético e migração dos dados sísmicos. O sétimo apresenta os resultados finais dos procedimentos realizados, cujas discussões e análises comparativas entre as seções migradas pelos diferentes métodos utilizando velocidades distintas na porção evaporítica são apresentadas no oitavo capítulo. Por fim, o nono e último capítulo exhibe as considerações finais baseadas nos resultados obtidos, incluindo algumas recomendações para trabalhos futuros.

2 ASPECTOS GERAIS

2.1 Localização

A área de estudo se situa no pólo Pré-Sal da Bacia de Santos e é especialmente caracterizada pela presença de diápiros salinos, ora homogêneos, ora estratificados, situados acima dos reservatórios carbonáticos desta seção Pré-Sal. A seção evaporítica na Bacia de Santos, objeto deste estudo, possui significativas espessuras, podendo chegar a mais de 2000 m.

As reservas desta província distam cerca de 300 km na direção NW-SE do litoral dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro (Figura 1) e situam-se cerca de 5000 a 6000 m do nível do mar, com lâmina d'água de aproximadamente 2100 m. A área total da província do Pré-Sal na Bacia de Santos corresponde a, aproximadamente, 45 mil km².

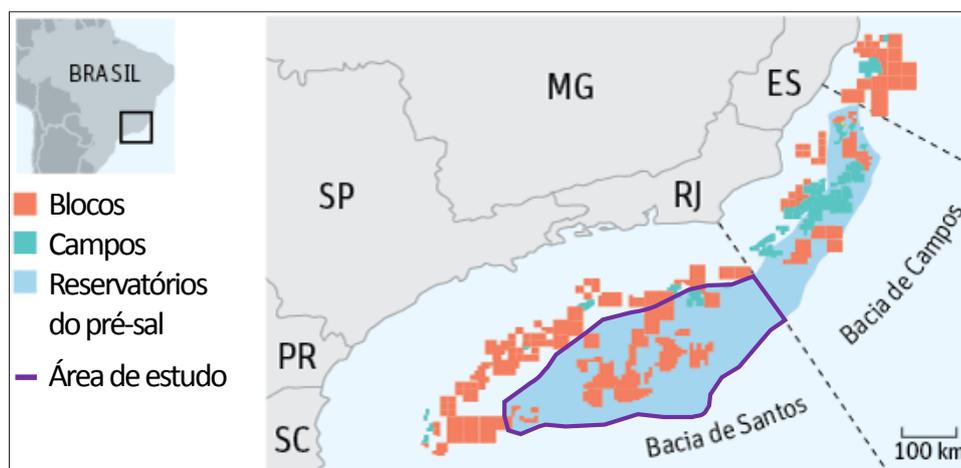


Figura 1: Localização dos principais campos produtores da província Pré-Sal na Bacia de Santos.

2.2 Conjunto de Dados e Aplicativos Utilizados

Para a execução do projeto, dados sísmicos e de poços adquiridos para reservatórios do Pré-Sal da Bacia de Santos foram autorizados pela ANP (Agência Nacional do Petróleo) e disponibilizados pela Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), segundo o ofício nº 855/2016/SDT.

O conjunto de dados sísmicos é composto por um volume sísmico (área de aproximadamente 700 km²), e o respectivo volume de velocidades sísmicas intervalares, oriundo do processamento sísmico PSDM (*Pre-Stack Depth Migration*), ambos fornecidos no domínio da profundidade (dimensão vertical total de 12 km).

Já o conjunto de dados 1D contemplou 10 poços existentes na mesma área, incluindo perfis litológicos, perfis elétricos (Caliper, Raios Gama, Resistividade, Sônico, Densidade, Neutrão, etc.) e dados direcionais. A distribuição em área dos volumes sísmicos e dos poços mencionados pode ser visualizada na Figura 2.

Para o desenvolvimento do projeto foi disponibilizado pela Paradigm® um pacote de licenças da plataforma EPOS 15®, do qual foram utilizados os seguintes aplicativos: SKUA-GOCAD™, GEODEPTH® e WELL LOG®. Algoritmos desenvolvidos internamente pela gerência de Geofísica do Centro de Pesquisas da Petrobras foram também utilizados, especificamente para a execução das etapas de modelagem acústica e migração reversa no tempo.

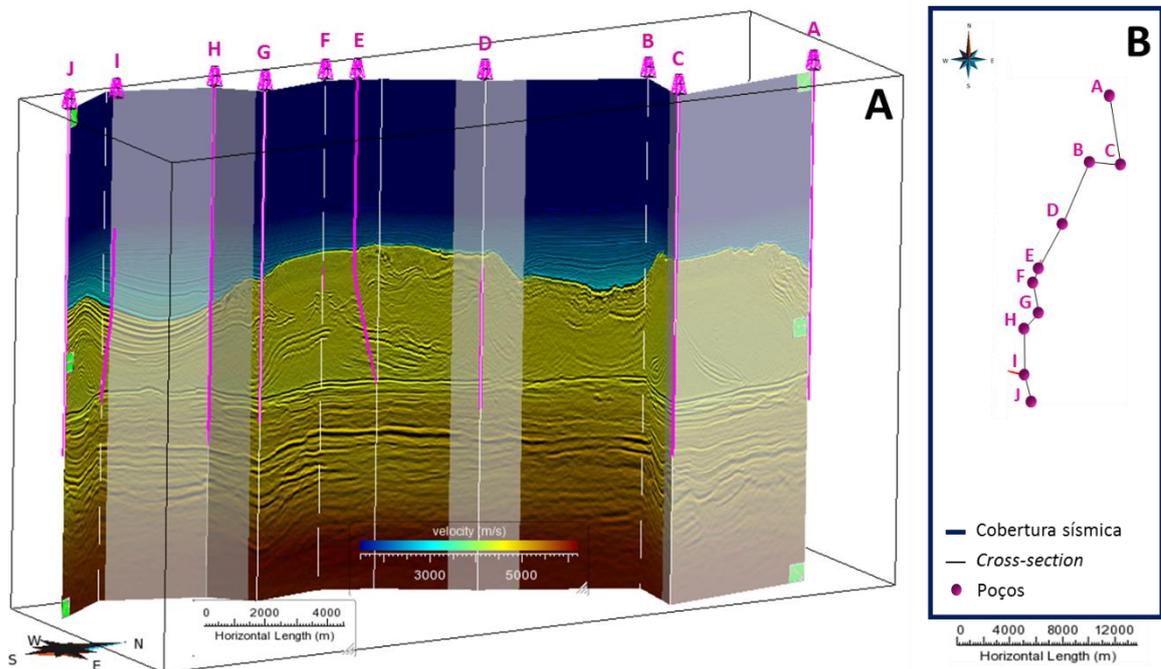


Figura 2: (A) Cross-section em 3D ilustrando os dados de entrada utilizados na execução do projeto: modelo de velocidade sísmica intervalar, dado de amplitude sísmica e dados de dez poços; (B) Cobertura sísmica em área e posicionamento dos poços.

2.3 Aspectos Geológicos

A formação da Bacia de Santos deu-se a partir de processos de rifteamento durante a separação do Gondwana, no Mesozóico. O arcabouço estratigráfico compreende três supersequências diferenciadas, que são denominadas de forma genérica pelas fases: Rifte, Transicional (Pós-Rifte) e Drifte (Moreira *et al.*, 2007). Inicialmente, a deposição de sedimentos ocorreu em ambiente flúvio-lacustre, passando por estágio de bacia evaporítica, evoluindo para bacia de margem passiva (Chang *et al.*, 2008). A carta estratigráfica da Figura 3 ilustra essa evolução.

Neste contexto, a evolução tectono-sedimentar da Bacia de Santos está intimamente conectada com a abertura do Oceano Atlântico Sul, iniciada no Cretáceo Inferior. Uma série de grabens e meio-grabens foi preenchida por sedimentação não-marinha (Fm. Piçarras e Fm. Itapema), por sua vez sobreposta por carbonatos marinhos rasos (Fm. Barra Velha) (Freitas, 2006; Davison *et al.*, 2012). Na seção Pré-Sal da Bacia de Santos são identificados reservatórios de idade Aptiana e Barremiana, originados em ambientes lacustres com influência marinha, constituídos por rochas carbonáticas (microbiolitos e coquinas), situados a cerca de 5000 a 6000 m abaixo do nível do mar, quase sempre sotopostos por espessa sequência de sal.

A fase rifte foi seguida pela fase transicional do Aptiano, representada pelos evaporitos, objeto deste estudo, definida como Formação Ariri. Acredita-se em uma aceleração acentuada da subsidência da bacia nesta área, concomitantemente à deposição dos evaporitos. Os evaporitos da Bacia de Santos ocorrem em superfície, desde a atual plataforma em cotas batimétricas da ordem de 50 m até a lâmina d'água de, aproximadamente, 3000 m. Estes foram depositados sobre uma proeminente discordância causada por um soerguimento regional após a fase rifte, cuja continuidade pode ser seguida ao longo de toda margem oriental brasileira. Do ponto de vista da evolução tectono-sedimentar da margem passiva do Atlântico Sul, os evaporitos estão localizados na zona de transição entre as fases *sage* e marinha, aberta quando a subsidência já é governada pelo regime flexural termal (Gamboa *et al.*, 2008).

Este extenso depósito evaporítico desenvolve-se desde a Bacia de Santos até a Bacia de Sergipe-Alagoas, no extremo norte. O comprimento total deste cinturão é da ordem de 1800 km e a sua porção sul, que possui mais de 700 km de largura, está

intimamente associada ao arcabouço estrutural do embasamento representado pelo Platô de São Paulo (Gamboa & Rabinowitz, 1984).

Conforme citado por Gamboa *et al.* (2008), a magnitude da espessura de sal formada *in situ* tem um significado geotectônico importante, porque indica que este período foi marcado por uma taxa de subsidência anormalmente alta, coincidente com o início da formação de crosta oceânica e a transição para a fase de subsidência termal. As camadas de halita em alguns locais se mobilizaram logo após a sua formação, criando espaço de acomodação para a deposição dos sais estratificados. A progradação de uma espessa cunha terrígena durante o Cretáceo Superior promoveu intensa deformação de todo o conjunto evaporítico.

De acordo com este mesmo autor, na parte central da bacia, o pacote evaporítico com espessura original em torno de 2000 m foi depositado em, aproximadamente, 500.000 anos e, apesar da deformação plástica intensa que se prolongou até o final do Cretáceo, sua estratificação cíclica original ficou preservada sobre uma extensa área. O principal componente desta sequência evaporítica é a halita, que constitui cerca de 80% dos sais presentes. A anidrita e os sais complexos, especialmente taquidrita e carnalita, intercalam-se com a halita, formando ciclos bem definidos, respondendo ao grau de aridez do ambiente. A deformação do sal começou muito precocemente com a camada basal de halita fluindo e criando espaços para o subsequente pacote estratificado com presença de anidrita. Posteriormente, todo o pacote evaporítico fluiu para o depocentro da bacia, em resposta à subsidência termal e ao avanço da frente de progradação clástica do Cretáceo Superior.

Uma subsidência termal e isostática foi direcionada ao centro do oceano embrionário provocando sua abertura e, durante o Albiano Inferior, em resposta à subsidência e à subida eustática do nível do mar, condições completamente marinhas foram estabelecidas e uma sucessão carbonática foi depositada (Fm. Itanhaem) (Freitas, 2006; Davison *et al.*, 2012). Com a progressiva abertura do Oceano Atlântico Sul, associada à produção de crosta oceânica, a plataforma carbonática rasa do Albiano foi rapidamente inundada no Cenomaniano (Dias-Brito, 1982, 1987). Do Cretáceo Superior ao Cenozóico Inferior, a bacia foi preenchida por uma sequência de arenitos e folhelhos de margem passiva. A subsidência ocorrida durante o Paleoceno e Eoceno criou espaço de acomodação para toda a sedimentação da planície aluvial no domínio marinho profundo (Moreira & Carminatti, 2004).

Desta forma, feições associadas às fases pré e pós-sal na Bacia de Santos apresentam estreita relação com os elementos estratigráficos e estruturais da sucessão evaporítica, os quais serão abordados na próxima seção.

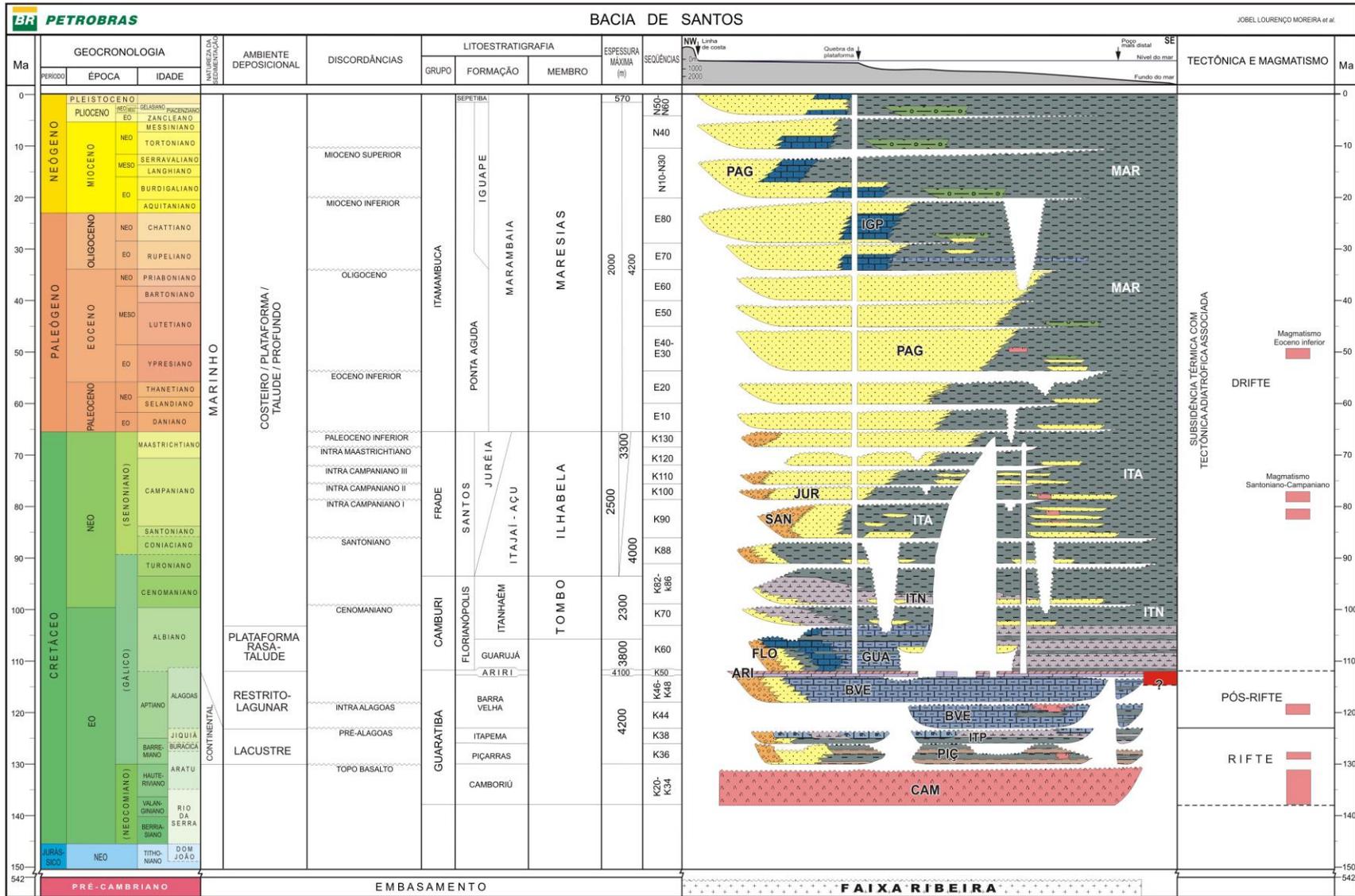


Figura 3: Carta Estratigráfica da Bacia de Santos. Fonte: Moreira et al. (2007).

3 CONTEXTUALIZAÇÃO DA SEÇÃO EVAPORÍTICA

Um enorme volume de evaporitos do Aptiano com grande variedade de estruturas salinas na Bacia de Santos desafia a qualidade da imagem sísmica nos reservatórios do Pré-Sal e define uma das principais motivações deste projeto.

Segundo Guerra & Underhill (2012), devido a baixa permeabilidade, baixa densidade, baixa resistência e alta condutividade termal, a presença do sal em uma bacia sedimentar influencia fortemente a prospecção de hidrocarboneto. O sal não é apenas uma rocha selante muito eficiente, mas também cria estruturas importantes de trapeamento no processo de migração do petróleo. A simples existência de uma pequena camada de sal numa bacia impacta todo o funcionamento do sistema petrolífero.

Na Bacia de Santos, espessos diápiros e cordilheiras de sal ocorrem no domínio marinho profundo. Até mesmo a plataforma contém almofadas de sal e diápiros de alguns quilômetros de altura (Cainelli & Mohriak, 1999).

A camada de sal se espessa da plataforma para a bacia e é estruturada basicamente por paredões alongados. Os mapas de isócoras indicam que as estruturas de sal podem atingir uma espessura de 8500 m e a sequência superior (pós-sal) alcança até 9600 m de sedimento. Muitos dos flancos de sal localizados na porção mais profunda da bacia estão intensamente deformados e demonstram um padrão interno de dobras de empurrão, que podem ser resultantes do fluxo lateral e mergulhante do sal ocorrido após a formação da sequência evaporítica original. A halocinese cria espaço para a deposição e carga sedimentar, a qual, por sua vez, impulsiona o movimento do sal. Ou seja, as depressões adjacentes aos domos salinos favorecem o acúmulo sedimentar, constituindo uma carga extra que induz o material dúctil a se movimentar em direção a áreas menos carregadas e a ascender naturalmente à sequência superior (Guerra & Underhill, 2012).

A seção evaporítica não é homogênea na Bacia de Santos. Ao contrário, diferentes padrões podem ser identificados no interior da cordilheira salina. O domínio estratificado consiste, possivelmente, de evaporitos de composições distintas intercalados, incluindo anidrita, taquidrita, carnalita, silvita e mesmo halita, enquanto o domínio basal “cego” reflete a presença de uma rocha mais

homogênea, possivelmente composta por halita pura (Demercian *et al.*, 1993; Freitas, 2006; Gamboa *et al.*, 2008).

Gamboa *et al.* (2008) definiram quatro sequências evaporíticas principais, da base para o topo: (1) um depósito composto predominantemente por halita, denominado “halita inferior”; (2) uma sucessão estratificada de anidrita, halita e sais complexos; (3) um outro pacote com predomínio de halita (“halita superior”) e; (4) um pacote superior também composto por sais estratificados, porém mais delgado (Figura 4). Estas sequências foram mapeadas por meio da sísmica ao longo do depocentro da bacia, e a sua composição foi reconhecida após a perfuração de poços pioneiros. A evolução dos ciclos desde a base até o topo denota sucessivas variações do nível de água dentro de um enorme mar alongado, até a progressiva depleção das salmouras, antecedendo à inundação definitiva da bacia, e o estabelecimento de condições de mar aberto no Albiano.

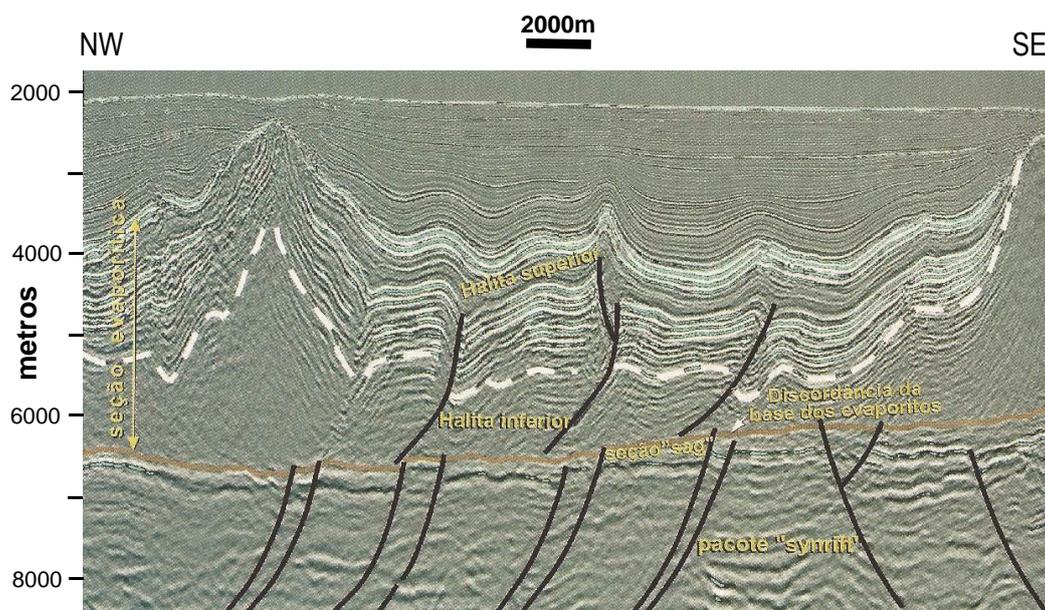


Figura 4: Seção sísmica em profundidade destacando os principais pacotes de evaporitos: o fluxo no pacote basal de halitas criando estruturas dômicas, os espessamentos diferenciais nos pacotes de sais estratificados e as estruturas de fluxo no pacote superior de halita. As intercalações azuis e brancas marcam os grandes contrastes de impedância existentes nos pacotes de evaporitos estratificados. Fonte: Gamboa *et al.* (2008).

Cobbold & Szatmari (1991), em seu trabalho pioneiro, mostraram a importância da interpretação sísmica e da modelagem numérica para fins investigativos da atividade halocinética na Bacia de Santos, resultando em modelos que explicam a gênese das estruturas salíferas e propõem dividir a bacia em províncias halocinéticas.

Guerra & Underhill (2012) utilizaram dados sísmicos e de poços a fim de melhor compreender a evolução estrutural evaporítica e produzir um modelo sobre os efeitos da halocinese no desenvolvimento de estilos estruturais, evolução da batimetria e controlar a dispersão sedimentar na Bacia de Santos. Sequências deposicionais delimitadas por inconformidades e/ou deslocamentos abruptos da fácies sísmica deposicional foram definidas e utilizadas para a construção da estrutura estratigráfica e correlações regionais. As correlações estratigráficas baseadas nos perfis raios gama, sônico, litológico e dados bioestratigráficos de poços foram utilizadas para guiar a interpretação das sequências de sal e pós-sal. Uma análise minuciosa do dado sísmico indica que a posição das estruturas halocinéticas não revelam nenhuma correlação referente às estruturas do Pré-Sal. Diápiros de sal se formam tanto sobre altos quanto em baixos estruturais da seção Pré-Sal da bacia. No entanto, o alto contraste lateral de velocidade desta interface pode provocar efeitos de *pull-up*, gerando falsas feições.

De acordo com Fiduk & Rowan (2012) e Jackson *et al.* (2014), dados de poços indicam que a sequência de sal na Bacia de Santos é composta predominantemente por halita (em geral, acima de 80%). Entretanto, a fim de definir a base percentual dos demais evaporitos (anidrita, carnalita, taquidrita), Jackson *et al.* (2015) dividiram a seção em quatro unidades (A1, A2, A3 e A4) por suas variadas densidades e padrões de refletividade (Figura 5), e observaram que unidades mais refletivas e estratificadas indicam maior ocorrência de sais de alta velocidade (anidrita, por exemplo) ou baixa velocidade (carnalita, por exemplo). A1 é considerada como sendo rica em halita (77-98%), pobremente refletiva, com baixa densidade e padrão sísmico caótico-fraco; já A2 possui alta refletividade, com fortes amplitudes sísmicas e alta densidade, devido à presença de anidrita intercalada a uma menor ocorrência de halita (67-86%); A3 é caracterizada por sua baixa refletividade, predominância de halita (69-94%) e densidade similar à de A1; e A4 é uma unidade fortemente refletiva, com menor proporção de halita (31-94%), indicando a ocorrência de evaporitos de baixa densidade (carnalita, por exemplo). Ao sul da bacia, poços localizados na parte central do Platô de São Paulo, em meio a um arranjo de diápiros com estruturas intra-sal complexas, indicam que as unidades mais refletivas e com maior ocorrência de sais de alta ou baixa velocidade são mais densas que a unidade

caracterizada pela predominância de halita. Por outro lado, a NW do Platô de São Paulo, onde os diápiros contém estruturas intra-sal relativamente simples, um dos poços indica que o sal possui densidade similar em geral, com unidades mais refletivas e estratificadas, apresentando-se ligeiramente menos densas que a unidade homogênea com predominância de halita.

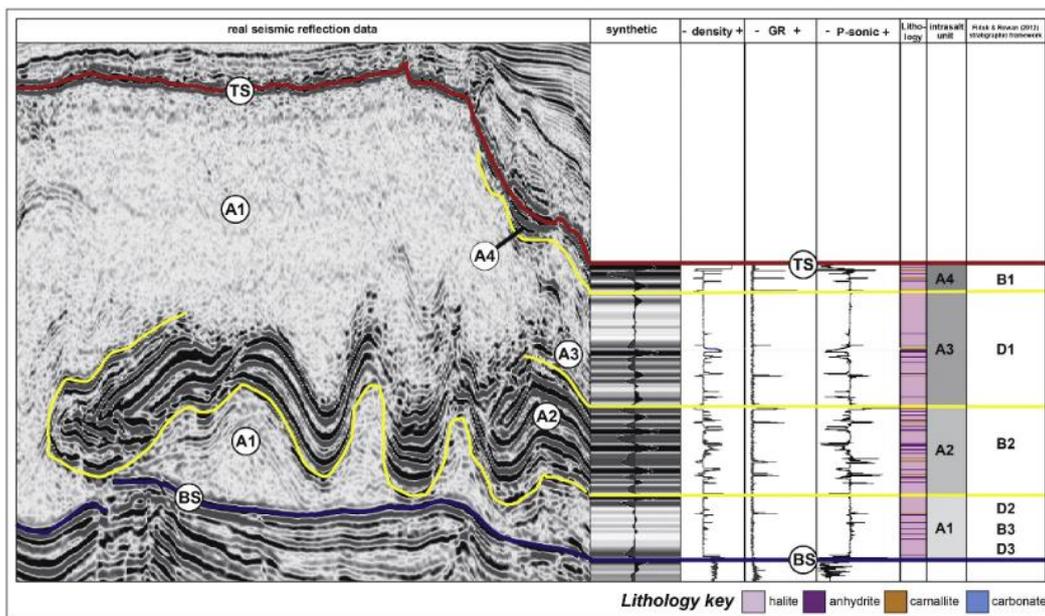


Figura 5: Quatro unidades intra-sal definidas a partir de dados de poços (A1, A2, A3, A4), na Fm. Ariri, Bacia de Santos, por Jackson *et al.* (2014). Observar o comportamento sísmico das quatro unidades intra-sal identificados tanto no dado sísmico real quanto no sismograma sintético (Jackson *et al.*, 2015). O topo e a base do sal são definidos como refletores fortemente positivo e fortemente negativo, respectivamente (TS e BS).

Devido às unidades intra-sal diferirem entre si em composição e propriedades acústicas, Davison *et al.* (2012), Fiduk & Rowan (2012), Jackson *et al.* (2014) e Jackson *et al.* (2015) propõem inclusive delimitar suas bordas por reflexões regionais mapeáveis, o que permite definir a estrutura interna de diversos diápiros.

Conforme observado, a sucessão estratigráfica que define as heterogeneidades da sequência evaporítica caracteriza reflexões sísmicas com alto contraste de impedância e comportamentos sísmicos bastante peculiares, tornando-se um potencial alvo de estudos de modelagem sísmica, os quais serão detalhados mais adiante.

4 MIGRAÇÃO SÍSMICA E VELOCIDADE

No processo de migração sísmica, refletores mergulhantes são movidos para a sua verdadeira posição em subsuperfície e difrações são colapsadas, aumentando a resolução espacial e produzindo melhores seções finais (Yilmaz, 2001). Seu propósito é reconstruir o mapa de refletividade da Terra a partir de dados sísmicos registrados em superfície, os quais representam a superposição de ondas sísmicas oriundas de todas as direções da subsuperfície (Gazdag & Sguazzero, 1984). Desse modo, a migração sísmica é caracterizada como um processo inverso, capaz de depropagar as ondas registradas, governadas pela equação da onda, para o refletor correspondente (De Faria, 1986).

Uma seção sísmica simplesmente empilhada representa uma imagem desfocada da subsuperfície. Neste contexto, o termo migração poderá ser utilizado como sinônimo de (re)construção (French, 1974).

Segundo Ritter (2011), os objetivos principais da migração são: o posicionamento correto dos refletores sísmicos em suas profundidades reais e, principalmente, a correspondência entre as amplitudes de reflexão e o coeficiente de reflexão em si. Este mesmo autor enfatiza que, no processo de migração, é muito importante o conhecimento do campo de velocidades da área que, muitas vezes, é estimado do próprio dado sísmico. A estimativa do campo de velocidades é feita através de métodos de inversão, como tomografia e FWI (*Full-Waveform Inversion*) que buscam o campo de velocidades que melhor corrige o efeito NMO (*Normal Moveout*) em um agrupamento CMP (*Common Mid Point*).

A migração sísmica é, provavelmente, a mais importante das etapas do processamento sísmico, sendo necessária principalmente em regiões com complexidade geológica, como as que apresentam: domos de sal, falhas, grandes inclinações, etc. A Figura 6 ilustra a migração de dados sísmicos em sua acepção geométrica, como um processo voltado para a localização de pontos difradores ou, nos termos do modelo do refletor explosivo, das posições em que a energia foi gerada (Rosa, 2010).

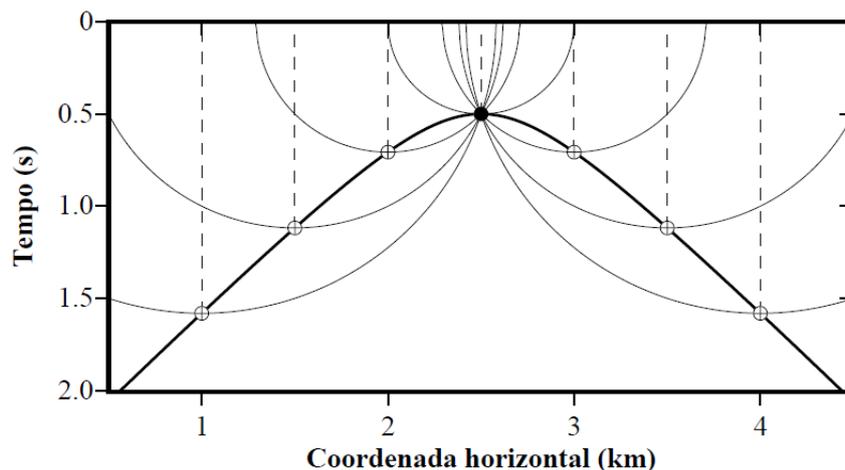


Figura 6: Localização de um ponto difrator, identificado pelo ponto preto, usando os tempos de registro da correspondente difração. A partir de cada uma das posições de registro, traça-se um semicírculo, usando o valor de tempo obtido na mesma posição. O difrator é localizado no ponto em que os diversos semicírculos se interceptam (Rosa, 2010).

A migração em tempo não requer um campo de velocidades verdadeiramente relacionado à geologia e pode ser usada em meios geológicos pouco complexos, ou seja, com pouca variação lateral de velocidade. Ela se utiliza de um modelo de velocidades RMS (*root-mean-square*), aplicado à correção NMO e empilhamento, que pode ser convertido para intervalar por meio da formulação de Dix (1955). Essas velocidades podem assumir, por exemplo, valores incoerentes com a geologia local. O objetivo da migração em tempo é construir uma imagem sísmica, e não um campo de velocidades geologicamente válido. Em oposição, a migração em profundidade procura utilizar um modelo de velocidade intervalar condizente com o acamamento da Terra (Gray *et al.*, 2001).

Para a migração em profundidade, a construção do modelo de velocidade é inerentemente mais complexa. Porém, de posse de um campo de velocidades mais preciso, a migração em profundidade pode posicionar, de maneira mais acurada, os elementos estruturais. Dessa forma, a migração em profundidade mostra-se mais ambiciosa que a em tempo (Gray *et al.*, 2001). Entretanto, traz consigo, também, um maior custo computacional.

Cardoso (2010) afirma que técnicas de migração que não sejam em profundidade, para áreas de complexas estruturas geológicas, não são adequadas, sendo a migração em profundidade mandatória.

A aplicação da migração é, atualmente, etapa obrigatória do fluxograma de processamento sísmico. Para tanto, seções com estruturas complexas, altos mergulhos e fortes variações laterais de velocidades devem ser migradas para sua correta interpretação. Contudo, variações no modelo de velocidades e na refletividade das estruturas abaixo da superfície podem criar falsas estruturas após a migração nas seções finais (French, 1974).

Assim, a evolução dos diferentes algoritmos de migração requer, cada vez mais, que os modelos de velocidades sejam construídos seguindo o máximo rigor geológico possível. A depender do método utilizado, é importante que o modelo de velocidades apresente detalhes das estruturas geológicas.

Existem diversos métodos de migração que diferem entre si pela técnica implementada. Exemplos citados por De Faria (1986) são a integral de Kirchhoff (French, 1975; Schneider, 1978), a migração no domínio F-K (Stolt, 1978), *phase shift plus interpolation* (PSPI) (Gazdag & Sguazzero, 1984) e a migração reversa no tempo (Loewenthal & Mufti, 1983; Baysal *et al.*, 1983). Neste projeto serão aplicadas migrações pré-empilhamento 2D em profundidade utilizando as técnicas do tipo Kirchhoff e migração reversa no tempo (ou RTM), as quais serão descritas a seguir em maior detalhe.

4.1 Migração Kirchhoff

Os algoritmos do tipo Kirchhoff são baseados na teoria das funções de *Green* e utilizam a solução integral da equação da onda, representando matematicamente o princípio de Huygens, no qual cada ponto de uma frente de onda dá origem a uma nova frente de onda (Schneider, 1978). Os conceitos envolvidos na integral de Kirchhoff apresentam uma gama de aplicações, particularmente no que diz respeito ao entendimento intuitivo da propagação de ondas. A migração Kirchhoff é muito versátil e é difícil apontar uma deficiência que impeça sua aplicação generalizada (Rosa, 2010).

Neste contexto, não há necessidade de um prévio conhecimento das reflexões. Apenas deve-se ter um campo de velocidade que represente,

razoavelmente, a distribuição espacial das velocidades na subsuperfície para o cálculo das curvas de difração.

As migrações Kirchhoff podem ser em tempo (baseadas apenas nos tempos duplos de reflexão) ou em profundidade (fundadas em modelos de velocidade intervalar que fornecem a posição dos refletores em unidades de comprimento).

Outra classificação se refere aos tipos de dados de entrada, os quais podem ser: seções empilhadas de afastamento nulo ou painéis de dados pré-empilhados organizados em tiros, receptores ou afastamentos comuns. A migração de dados empilhados de afastamento nulo é chamada migração pós-empilhamento, enquanto que a migração de dados organizados em painéis de tiros, receptores ou afastamentos comuns, é denominada migração pré-empilhamento.

Assim, o dado migrado pode ser expresso através de duas configurações distintas tendo por base a equação de Kirchhoff que, na forma discretizada, é expressa por (Yilmaz, 2001):

$$P_f \left(x_0, z = \frac{vt_0}{2}, t_D = 0 \right) = \frac{\Delta x}{2\pi} \sum_x \left[\frac{\cos \theta}{0\sqrt{v_m r}} \rho(t) * P_i(x, z = 0, t_D) \right] , \quad (1)$$

onde P_f é o dado migrado localizado na subsuperfície (x_0, z) , P_i refere-se ao dado inicial não migrado organizado em afastamento nulo medido na superfície $(x_0, z = 0)$, t_D é o tempo de trânsito para um evento de difração em um meio homogêneo de $v_m(x_0, t_0)$, t_0 é o tempo de trânsito para afastamento nulo, v_m é a velocidade de migração, $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + z^2}$ se refere à distância entre o ponto inicial (na superfície) e o ponto final (na subsuperfície), $\rho(t_D)$ representa o filtro, que corresponde à derivada temporal do dado medido e $\cos \theta$ indica o fator de obliquidade. O asterisco representa a convolução de $\rho(t_D)$ com o dado inicial P_i .

A Equação 1 é, normalmente, utilizada para a migração Kirchhoff pós-empilhamento. Para este caso, parte-se do pressuposto que a seção empilhada se assemelha, aproximadamente, à seção de afastamento nulo. A curva de difração associada a um ponto em subsuperfície é dada pelo dobro dos tempos de trânsito ao longo dos segmentos de reta que unem o ponto em questão e a

pontos na superfície de registro que correspondem a pares fonte-receptor com afastamento nulo.

Isto não é válido para meios com forte variação lateral de velocidade. Para suaves variações laterais de velocidade, a curva de tempo de difração pode ser aproximada por uma hipérbole nas vizinhanças do ápice da curva. Assim, a curva hiperbólica de tempo de trânsito ao longo da qual os dados sísmicos na seção não-migrada são empilhados é dada por (Yilmaz, 2001):

$$t_D(x) = \sqrt{\frac{t_0^2}{4} + \frac{(x-x_0)^2}{v_m^2(x_0, t_0)}}, \quad (2)$$

sendo x a coordenada de afastamento, t_D o tempo de trânsito duplo, (x_0, t_0) um ponto na seção migrada a ser construída e $v_m(x_0, t_0)$ a velocidade de migração em tempo.

A migração Kirchhoff pré-empilhamento em tempo é uma extensão da migração pós-empilhamento. Entretanto, na abordagem pré-empilhamento, vários afastamentos devem ser tratados, ao invés de apenas um. Assim sendo, admitindo um meio homogêneo com velocidade v , a aproximação da curva de tempo de difração total, considerando F uma fonte da qual o campo de ondas seja emitido e atinja um ponto espalhador E em subsuperfície referente a um ponto (x_0, t_0) na seção migrada até o receptor R , é expressa por:

$$t_D(x_0, t_0, x_F, x_R) = \sqrt{\frac{t_0^2}{4} + \frac{(x_0-x_F)^2}{v_m^2(x_0, t_0)}} + \sqrt{\frac{t_0^2}{4} + \frac{(x_0-x_R)^2}{v_m^2(x_0, t_0)}}, \quad (3)$$

sendo x_F a posição da fonte e x_R a posição do receptor.

Reescrevendo a Equação 3 em termos da coordenada de ponto-médio $x_m = (x_F + x_R)/2$ e do meio-afastamento $h = (x_R - x_F)/2$, obtém-se a equação, por Biondi (2006), expressa por:

$$t_D(x_0, x_m, h, v_m) = \sqrt{\frac{t_0^2}{4} + \frac{(x_0-x_m+h)^2}{v_m^2(x_0, t_0)}} + \sqrt{\frac{t_0^2}{4} + \frac{(x_0-x_m-h)^2}{v_m^2(x_0, t_0)}}, \quad (4)$$

sendo x_0 a posição de escape do raio-imagem definido por Hubral (1977) e t_0 o tempo de trânsito duplo ao longo deste raio.

Observa-se, então, que a Equação 1 tem a mesma forma para a migração pré-empilhamento, mudando apenas a entrada da equação de tempo de trânsito, dada agora pela Equação 4.

A Equação 1 representa a imagem migrada em tempo de uma seção sísmica que pode ser tanto pós quanto pré-empilhada, a depender da equação de tempo de trânsito utilizada. O que determina a Equação 1 ser em tempo ou em profundidade é o tipo de distribuição de velocidades utilizada para delinear a curva de tempo de difração, uma vez que esta é governada pelo campo de velocidades. Conforme descrito por Rosa (2010), para a imagem migrada em profundidade, a computação dos tempos de trânsito leva em consideração a Lei de Snell e o modelo de velocidades intervalares definido em função da profundidade e das coordenadas horizontais. Em outras palavras, os tempos de trânsito não são estimados com algum tipo de velocidade média, como ocorre na migração em tempo.

A Equação 3 pode ser entendida como o truncamento da série de Taylor para o quadrado do tempo de trânsito em torno do ponto x_0 na superfície, onde o raio que liga E e x_0 é o raio imagem. Desta forma, dependendo da velocidade em subsuperfície para o caso bidimensional, a velocidade de migração v_m e o tempo de trânsito podem ocorrer nas seguintes formas: no caso de velocidade constante, a aproximação hiperbólica da Equação 3 é exata, o raio imagem é vertical e as v_m coincidem com as velocidades sísmicas; no caso da velocidade variando com a profundidade, a aproximação do tempo de trânsito na Equação 3 é o resultado do truncamento da série de Taylor de um ponto avaliado em x_0 . Assim sendo, as v_m dependem somente do tempo e correspondem às velocidades quadráticas médias:

$$v_m(t_0) = \sqrt{\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} v^2(z(t)) dt} . \quad (5)$$

Neste caso a fórmula de Dix (1955) é exata. Quando a velocidade em subsuperfície é arbitrária, a equação do tempo de trânsito é o resultado do truncamento da série de Taylor, onde o campo de velocidade $v_m(x_0, t_0)$ é a velocidade de migração.

No presente trabalho será aplicada ao dado sísmico 2D a migração Kirchhoff pré-empilhamento em profundidade. Qualquer que seja o tipo de migração, esta se baseia em um modelo de velocidade da subsuperfície. Deste modo, não há necessidade de um prévio conhecimento das reflexões, apenas deve-se ter um campo de velocidade que represente razoavelmente a distribuição espacial das velocidades na subsuperfície para o cálculo das curvas de difração.

4.2 Migração Reversa no Tempo (RTM)

Em ambientes de geologia complexa, cada vez mais se tem utilizado a migração reversa no tempo (em inglês RTM – *reverse time migration*), por ser um algoritmo que utiliza a equação completa da onda sem a aproximação de *Born*, não apresentando, assim, limitação quanto à complexidade estrutural (mergulhos de camadas, variações laterais de velocidades). A migração RTM, que surgiu no início da década de 80 (Baysal *et al.*, 1983; Whitmore, 1983; Levin, 1984), é reconhecida por fornecer excelentes resultados, mas com custo computacional elevado.

Apesar do “preço” que se paga para realizar a migração RTM, esta é muito indicada quando se trata de modelos geológicos complexos, como, por exemplo, modelos que possuem flancos de sal ou modelos com bruscas variações laterais de velocidades. A forma complexa dos domos salinos faz com que os raios incidentes sejam refletidos de modo irregular, prejudicando a recuperação destas informações nas técnicas convencionais de migração. A maior utilização da migração RTM nos últimos anos está diretamente associada a esses fatores prejudiciais na geração de boas imagens sísmicas.

Segundo Vigh & Starr (2008), o sucesso da aplicação da técnica RTM depende da resolução do modelo de velocidades adotado no processo de migração.

Os algoritmos de migração RTM são baseados no método das diferenças finitas, que calcula a solução aproximada da equação da onda. Os algoritmos de modelagem e migração RTM são similares, diferenciando-se apenas, pelo uso da condição de imagem na migração (Bulcão, 2004).

De acordo com Bording *et al.* (1997), uma condição de imagem indica a presença de um refletor em uma determinada posição em profundidade, onde ocorre a coincidência entre os tempos de trânsito do campo de ondas propagado a partir da fonte sísmica e do campo de ondas depropagado, prescrevendo-se o dado sísmico registrado nos respectivos receptores.

Essa técnica de migração consiste na propagação do campo de ondas registrado nos sismogramas no sentido inverso do tempo, ou seja, do tempo final até o tempo inicial do registro sísmico. Como o campo de ondas é registrado por diversos receptores em superfície, na depropagação a energia presente nos sismogramas é injetada exatamente na posição dos receptores sísmicos. Desta forma, os receptores atuam como fontes pontuais nesta depropagação.

A migração reversa no tempo extrapola os dados sísmicos sobre as coordenadas espaciais em tempo reverso. Na RTM, a seção CMP (ou a seção do refletor explosivo) é considerada como condição de contorno na superfície e são computados os instantâneos ("*snapshots*") $p(x, z, t = constante)$. Os cálculos são feitos na direção negativa do tempo começando com as amostras registradas no último instante de registro e prosseguindo até o tempo $t = 0$ para obter $p(x, z, t = 0)$ que, de acordo com o modelo do refletor explosivo, é a seção migrada.

Diversas versões da equação acústica da onda podem ser empregadas na migração RTM. Uma das possibilidades é utilizar a versão bidimensional (a versão tridimensional pode ser facilmente obtida acrescentando a dependência em y) e assumir densidade constante:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} p(x, z, t) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} p(x, z, t) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p(x, z, t) = 0 . \quad (6)$$

Rearrmando e explicitando a derivada segunda em relação ao tempo:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} p(x, z, t) = v^2 \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} p(x, z, t) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} p(x, z, t) \right] . \quad (7)$$

Introduzindo diferenças finitas de segunda ordem:

$$p(x, z, t + \Delta t) - 2p(x, z, t) + p(x, z, t - \Delta t) = v^2 \Delta t^2 \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} p(x, z, t) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} p(x, z, t) \right], \quad (8)$$

ou

$$p(x, z, t - \Delta t) = 2p(x, z, t) - p(x, z, t + \Delta t) + v^2 \Delta t^2 \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} p(x, z, t) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} p(x, z, t) \right]. \quad (9)$$

Conhecendo o campo de ondas $p(x, z, t)$ em dois instantes consecutivos (T) e ($T + \Delta t$) é possível calcular $p(x, z, t = T - \Delta t)$ e retroceder até $p(x, z, t = 0)$.

As derivadas espaciais podem ser calculadas também por diferenças finitas ou no espaço de Fourier.

Apesar de requerer uma alta demanda computacional, esta técnica é reconhecida como a forma mais precisa de efetuar a migração sísmica. Trabalhando nas coordenadas espaciais, não há qualquer restrição ao campo de velocidades.

Além disso, permite migrar refletores com qualquer inclinação, pelo fato de utilizar a equação da onda acústica. Esta característica, aliada à propagação inversa ao longo do tempo, em vez de profundidade, torna possível tratar de forma adequada eventos complexos como as ondas prismáticas e as reflexões geradas por ondas mergulhantes ascendentes, em interfaces caracterizadas por ângulo de mergulho maior do que 90 graus (Whitmore, 1983; McMechan, 1983; Baysal *et al.*, 1983).

Essas características justificam a eficiência do método em áreas com geologia complexa, a exemplo daquelas afetadas por tectônica salífera, sendo considerada a técnica mais adequada à proposta deste projeto.

5 CONSTRUÇÃO DE MODELO DE VELOCIDADES COM A INCLUSÃO DAS ESTRATIFICAÇÕES NO SAL

Ultimamente, a obtenção de modelos de velocidades mais acurados tem sido suportada por avançados algoritmos de inversão (tomografia de alta resolução e FWI, por exemplo), por uma melhor descrição da subsuperfície (anisotropia) e pelo uso de algoritmos robustos de imageamento (RTM, por exemplo). A evolução das técnicas de imageamento sísmico tem demandado uma acurácia cada vez maior na construção de modelos de velocidades que representem verdadeiramente a complexidade geológica.

A tomografia sísmica tornou-se, atualmente, a principal ferramenta de construção de modelos de velocidades, estando presente no dia-a-dia do fluxo de processamento sísmico. No entanto, otimizar a tecnologia de construção de modelos que representem as heterogeneidades e anisotropias continua sendo um tema desafiador.

A principal motivação para a aplicação da metodologia aqui proposta veio da análise das velocidades dos poços do Pré-Sal da Bacia de Santos, que indicam alta variação litológica na seção evaporítica, devido à alternância entre os diversos tipos de sais amostrados que caracterizam as estratificações.

Como veremos ao longo do trabalho, a seção evaporítica não se trata de uma camada homogênea com velocidade sísmica aproximadamente constante, como tem sido usualmente representada pela indústria. A relevância de sua complexidade geológica e variações litológicas para a construção da imagem sísmica deve ser incorporada com critério aos modelos de velocidades, seja para fins de conversão tempo-profundidade, inversões sísmicas, estudos de iluminação, análises geomecânicas ou, como propõe este trabalho, para fins de migração sísmica.

Assim, para sanar essa necessidade, surgiu como alternativa utilizar a própria resposta sísmica para a inclusão de estratificações nos modelos de velocidades, dentro da seção evaporítica que se sobrepõe aos reservatórios do Pré-Sal da Bacia de Santos (Maul *et al.*, 2015 e Jardim *et al.*, 2015).

O método tem sido apresentado por diversos autores (Maul *et al.*, 2015; Jardim *et al.*, 2015; Amaral *et al.*, 2015; Meneguim *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2015; Gobatto *et al.*, 2016; González *et al.*, 2016; Meneguim *et al.*, 2016;

Yamamoto *et al.*, 2016; Falcão *et al.*, 2016; González *et al.*, 2017) como um meio de aprimorar as mais diversas aplicações, tais como: estudo de iluminação, inversão sísmica, classificação de fácies, processamento sísmico, posicionamento em profundidade, estudos geomecânicos e incertezas geofísicas de reservatórios. Estes autores sugerem formas variadas de tratamento da velocidade, dentre outras propriedades, utilizando a resposta sísmica como condicionante à representação das estratificações da sequência evaporítica da Bacia de Santos.

O *workflow* implementado por Maul *et al.* (2016) (*in* González *et al.*, 2016 & Gobatto *et al.*, 2016) (Figura 7) propõe a geração de uma informação mais confiável a respeito da seção evaporítica, a ser utilizada para os diversos fins mencionados. Vale ressaltar que a abrangência do método permite a integração de variados fluxos de trabalho, apresentando uma abordagem multidisciplinar desenvolvida para a construção de modelos geológicos de velocidades sísmicas.

A possibilidade de distribuição das propriedades de forma volumétrica a partir do modelo de velocidades com o sal estratificado mostra a importância da incorporação das estratificações inclusive para estudos geomecânicos de reservatórios do Pré-Sal, conforme sugerido por Oliveira *et al.* (2015).

No presente trabalho não serão consideradas as etapas de inversão sísmica e de análises de incertezas, e estes poderão ser objetos de estudos posteriores.

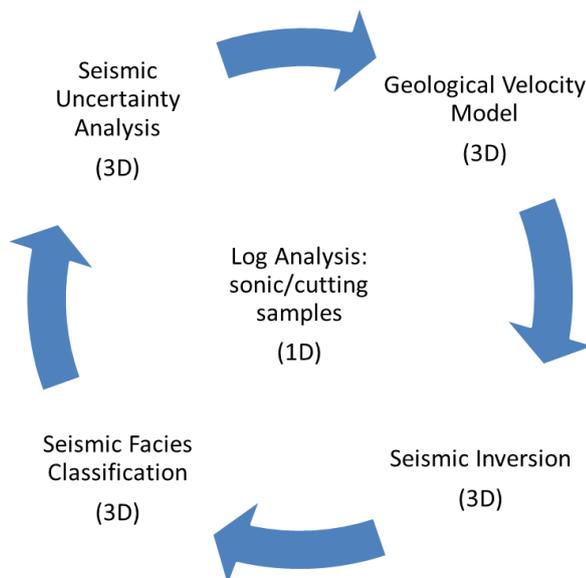


Figura 7: *Workflow* proposto por Maul *et al.* (2016) in González *et al.* (2016) & Gobatto *et al.* (2016), sintetizando a proposta de integração multidisciplinar para a geração de um modelo geológico de velocidades sísmicas mais realista.

A resposta sísmica, aliada ao estudo de perfis de poços, gera a possibilidade de identificar, com maior acurácia, as variações de velocidades dentro da seção evaporítica. Entretanto, a escassez deste tipo de dado é bastante comum, devido à baixa disponibilidade de poços perfilados nesta seção. Mesmo em projetos com maior densidade de poços, estes são espaçados e, não necessariamente, representam o todo de uma determinada área.

Visando complementar as informações não existentes em perfilagens de poços e baseando-se no trabalho de Justen *et al.* (2013), onde foram compilados resultados de alguns pesquisadores (Crain, 2001; Mavko *et al.*, 2003; Mohriak *et al.*, 2008) sobre as velocidades dos principais sais (Tabela 1), Amaral *et al.* (2015) definiram limites mínimos e máximos de velocidade para cada tipo de sal utilizando informações de 18 poços perfurados em uma área de 200 km² na Bacia de Santos.

Estes autores propuseram a utilização das informações provenientes das descrições litológicas durante a perfuração de poços (PAG – Perfil de Acompanhamento Geológico) para a identificação e determinação das proporções dos diferentes sais, além da utilização dos perfis sônicos, muitas vezes incompletos. A boa concordância entre as respostas dos perfis sônicos com as litologias interpretadas nas amostras de calha permitiu a análise da

velocidade para cada tipo de sal, resultando em um estudo estatístico das velocidades instantâneas derivadas do sônico, a fim de encontrar as proporções dos diversos evaporitos. Os valores das velocidades instantâneas para cada sal foram agrupados com base no perfil litológico e, a partir da sua distribuição média, definiu-se um valor de velocidade representativo para cada tipo de sal, como apresentado na Figura 8.

Tabela 1: Compilação dos estudos de diversos autores sobre velocidade e densidade dos principais tipos de sais (Justen *et al.*, 2013).

	Crain, 2001		Mavko, et al., 2003		Mohriak, et al., 2008	
	Vp (m/s)	ρ (g/cm ³)	Vp (m/s)	ρ (g/cm ³)	Vp (m/s)	ρ (g/cm ³)
Taquidrita	3313	1,66	-	-	-	-
Carnalita	3858	1,57	-	-	3908	1,57
Silvita	4119	1,87	3858	1,99	4119	1,86
Halita	4549	2,04	4549	2,16	4549	2,03
Gipsita	5751	2,35	5751	2,35	5806	2,35
Anidrita	6096	2,98	5976	2,98	6096	2,98

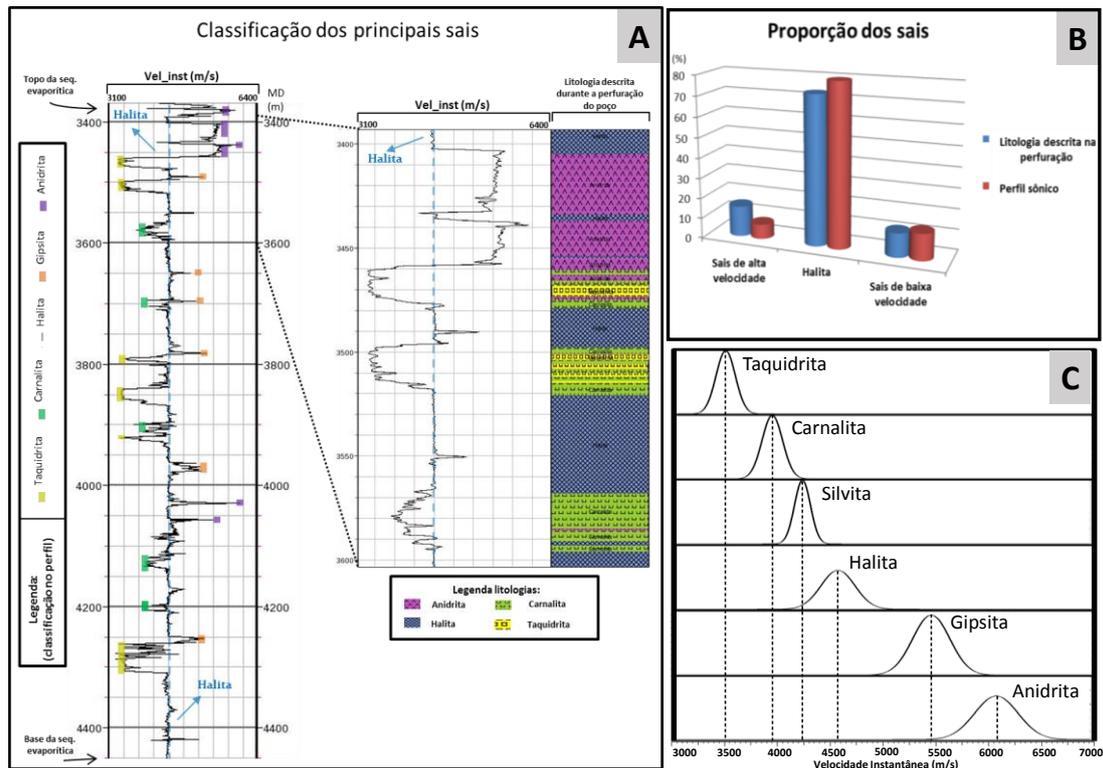


Figura 8: Estudo estatístico das velocidades dos sais desenvolvido por Amaral *et al.* (2015). (A) Classificação dos sais a partir das velocidades adquiridas no perfil sônico. Observar a coerência entre as informações obtidas em perfil e a descrição das amostras de calha; (B) Comparação entre as proporções dos sais calculados a partir do perfil sônico e pela litologia interpretada durante a perfuração do poço, cujos resultados são agrupados em “sais de baixa velocidade”, “halita” e “sais de alta velocidade”; (C) Médias das velocidades instantâneas obtidas a partir da análise estatística dos poços para cada litologia encontrada no sal.

Yamamoto *et al.* (2016), utilizando dados de 19 poços em uma outra área de, aproximadamente, 230 km² também na Bacia de Santos, realizou uma análise estatística precisa das ocorrências dos sais e velocidades de cada litotipo existente na seção evaporítica. Cerca de 90% do total da sequência estudada resultou em halita (Figura 9a). Contudo, essa proporção varia poço a poço (Figura 9b). Nota-se que em nenhum deles a proporção somada dos sais de alta e baixa velocidade supera os 20%. A Tabela 2 mostra a distribuição estatística dos valores de velocidades encontrados para cada litotipo, sendo que a média das velocidades de todos os poços ficou em torno de 4570 m/s.

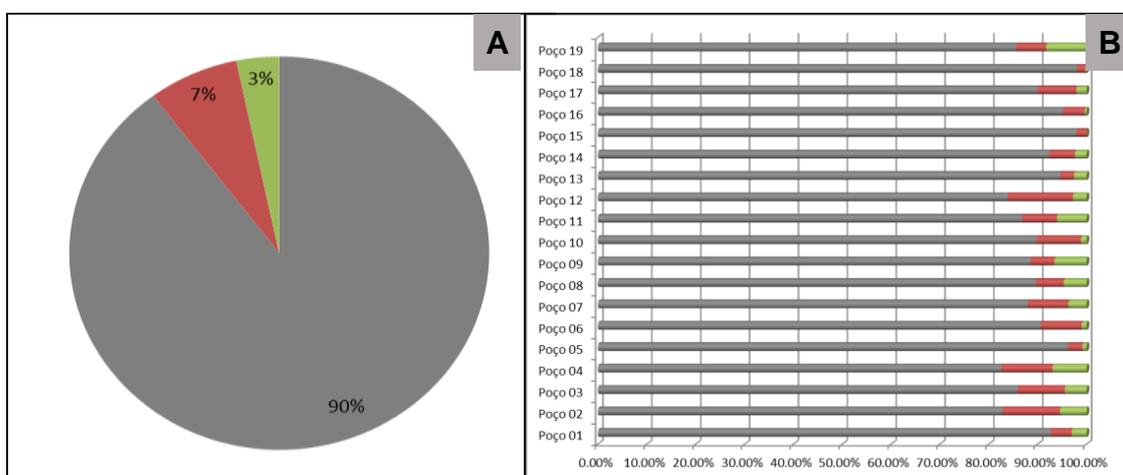


Figura 9: (A) Proporções de sais na seção evaporítica da área estudada (halita em cinza, sais de alta velocidade em vermelho e sais de baixa velocidade em verde). (B) Proporções dos tipos de sais, poço a poço (Yamamoto *et al.*, 2016).

Tabela 2: Estatísticas da distribuição de velocidades na seção evaporítica (Yamamoto *et al.*, 2016).

	Sal	Halita	Sais_Alta	Sais_Baixa
Nº Amostras	263.299,00	222.979,00	33.432,00	6.888,00
Mínimo	1.574,67	2.859,69	2.846,15	3.308,63
25º Percentil	4.479,12	4.478,52	4.526,52	4.035,82
Mediana	4.535,87	4.531,00	4.791,37	4.285,47
75º Percentil	4.619,61	4.607,19	5.276,91	4.479,17
Máximo	7.056,32	6.718,69	7.056,32	5.776,75
Média	4.572,57	4.583,06	4.897,18	4.286,32
Desvio Padrão	451,00	281,34	553,28	307,34

Meneguim *et al.* (2015) apresentam valores compatíveis com os autores acima citados para alguns sais em comum e, utilizando estudos de classificação de fácies a partir de respostas de impedância acústica numa abordagem probabilística, definiram a probabilidade de ocorrência de cada classe de evaporitos (halita, anidrita, carnalita e taquidrita) numa porção da Bacia de Santos (Figura 10a). Estes mesmos autores propuseram uma análise de incertezas ao apresentar valores médios, mínimos e máximos de velocidade sísmica intervalar obtida dos poços, constituindo cenários base, otimistas e pessimistas para cada uma das quatro classes definidas (Figura 10b).

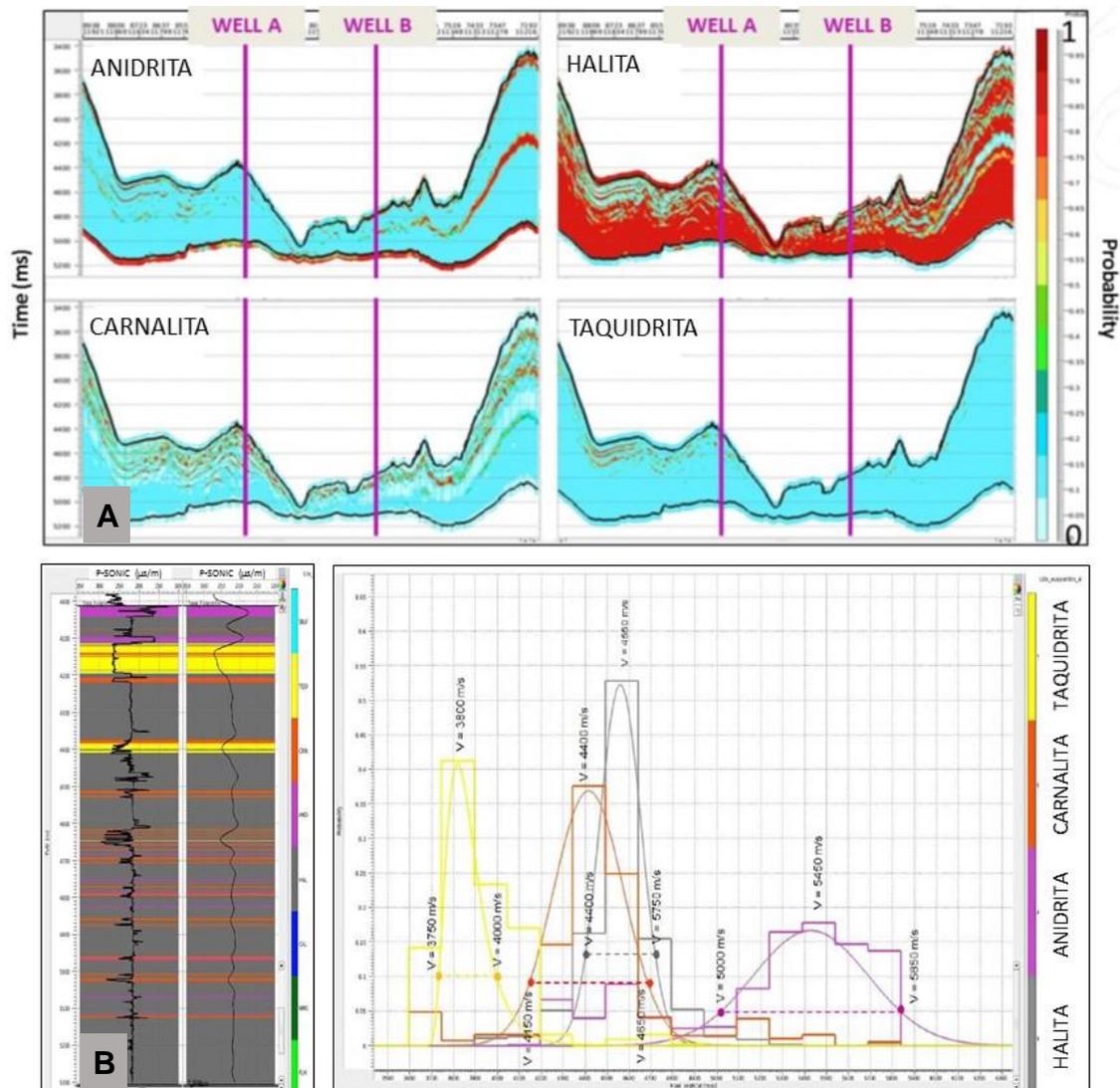


Figura 10: (A) Seção arbitrária exibindo a probabilidade de ocorrência para cada classe de evaporitos: anidritas, halitas, carnalitas e taquidritas. (B) Função densidade de probabilidade apresentando os cenários base, pessimista e otimista das velocidades sísmicas obtidas dos poços, também definidos por classes (Meneguim *et al.*, 2015).

Seguindo esta mesma abordagem prática, Gobatto *et al.* (2016) agruparam os sais em “sais de alta densidade”, “halita” e “sais de baixa densidade”, separando-os por valores distintos de impedância acústica. Após realizar uma inversão acústica na seção evaporítica, foi possível obter com acurácia a distribuição espacial das heterogeneidades do sal, conforme mostra a Figura 11. Neste trabalho, os estudos objetivaram, também, o refinamento da velocidade intervalar na sequência de carbonatos do Albiano, localizada logo acima da sequência de sal. Desta forma, utilizando o modelo de velocidades final apresentado na Figura 11d, foi possível melhorar o posicionamento dos *gathers* no topo do sal durante o fluxo de processamento sísmico. A Figura 12 mostra a diferença observada entre os *gathers* migrados com e sem a utilização do modelo de velocidades refinado em ambas as sequências. Os resultados apresentam refletores mais horizontalizados, com melhor qualidade na representação da geologia, sugerindo ser um bom modelo a ser utilizado como condicionante em processos tomográficos.

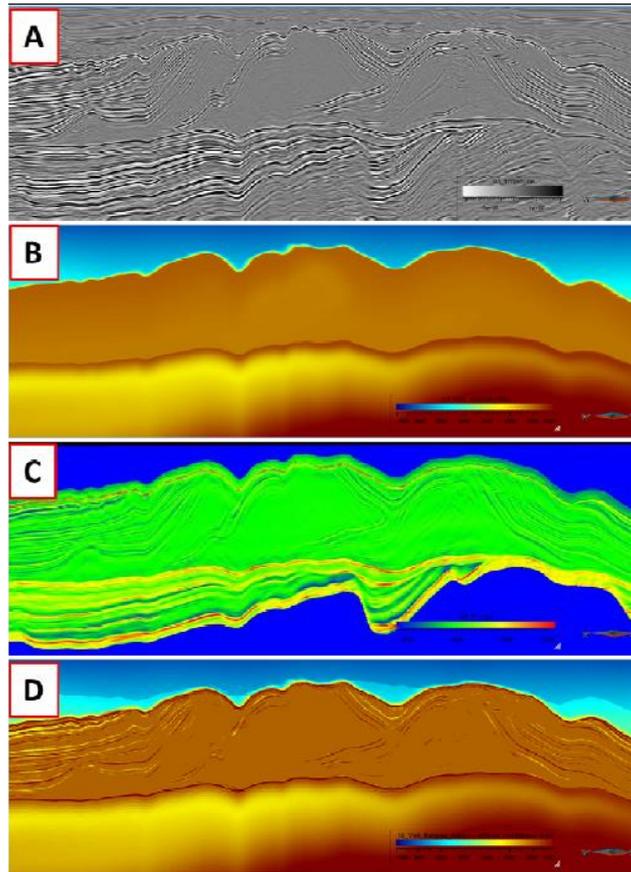


Figura 11: (A) Amplitude sísmica ilustrando a presença das estratificações na sequência evaporítica; (B) Modelo de velocidade sísmica considerando a seção evaporítica com velocidade aproximadamente constante; (C) Impedância acústica obtida da inversão sísmica realizada na seção evaporítica; e (D) Modelo de velocidade obtido a partir da resposta da inversão sísmica na sequência evaporítica, incluindo também o refinamento da velocidade da sequência de carbonatos do Albiano (Gobatto *et al.*, 2016).

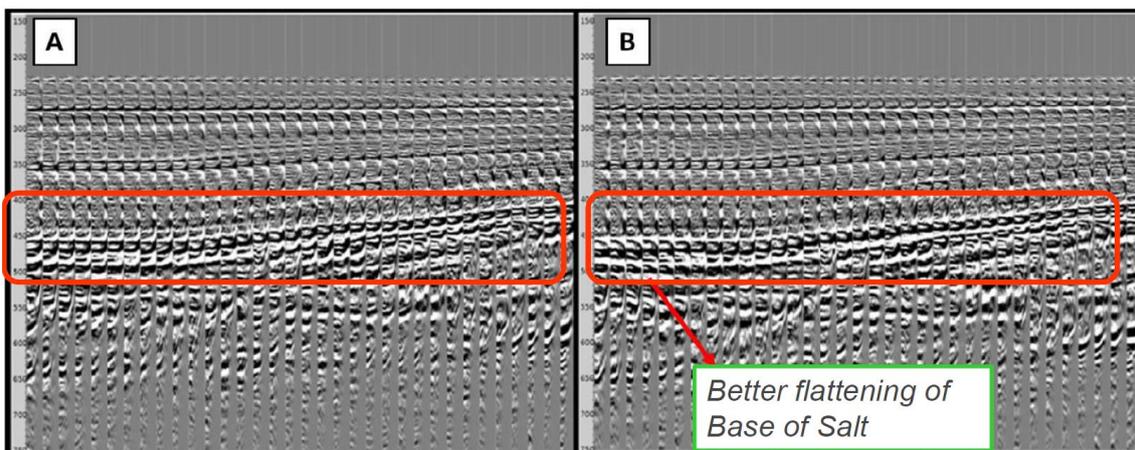


Figura 12: Migração pré-empilhamento em profundidade, (A) utilizando o modelo original de velocidades sísmicas da Figura 11b (sem estratificação na seção evaporítica), e (B) utilizando o modelo de velocidades com a inclusão da estratificação no sal, exposto na Figura 11d (Gobatto *et al.*, 2016). Observar a melhor definição dos refletores em destaque na base do sal com a utilização do modelo refinado de velocidades.

Conforme exposto, a metodologia busca retornar respostas consideradas mais geológicas em termos de velocidades, especialmente no que se refere à representação das estratificações da sequência evaporítica, muitas vezes negligenciada pela indústria nos processos de imageamento sísmico. Este tipo de refinamento apresenta indicações expressivas de adequação da velocidade intervalar às principais interfaces geológicas e tem gerado ganhos significativos em todas as fases de utilização da velocidade sísmica.

6 METODOLOGIA, APLICAÇÃO E RESULTADOS

Conforme introduzido nos capítulos anteriores, o método que será descrito adiante permite incorporar ao processo de imageamento sísmico a presença de estratos intra-sal, geralmente compostos por intercalações de halita, sais de alta velocidade (anidrita e gipsita, por exemplo) e sais de baixa velocidade (taquidrita, carnalita e silvita) – que tenham espessuras significativas para estarem resolvidas segundo critérios de resolução sísmica.

Neste contexto, utilizando um dado sísmico sintético 2D obtido a partir de uma seção de um dado real já migrado em profundidade, serão apresentados resultados das migrações em profundidade PSDM dos tipos Kirchhoff e RTM, considerando modelos iniciais de velocidades que contemplem a variação litológica internamente presente na sequência evaporítica. Os resultados serão comparados a modelos obtidos pelos mesmos métodos (algoritmos) de migração, porém com velocidades que consideram o sal tipicamente homogêneo, composto basicamente por halita (velocidade em torno de 4500 m/s), como tem sido, usualmente, aplicado na indústria do petróleo.

O fluxograma da Figura 13 apresenta o encadeamento das etapas que definirão os resultados deste projeto.

Como ponto de partida para que o modelo de velocidade sísmica intervalar contemple as estratificações presentes na sequência evaporítica, foi necessária uma abordagem geológica utilizando dados de interpretação sísmica e incorporando resultados de poços para a representação das estratificações. Primeiramente, foi realizado o mapeamento sísmico das principais sequências que caracterizam os contrastes de velocidades intervalares. Em seguida foi feito um estudo estatístico dos dados 1D utilizando os perfis de poços disponíveis e descrições de amostras de calha, a fim de melhor quantificar os percentuais das litologias descritas na seção evaporítica.

Após verificar a compatibilidade existente entre os resultados obtidos dos poços e o comportamento da amplitude sísmica real no posicionamento dos estratos da sequência evaporítica, uma abordagem geológica foi imposta ao modelo de velocidade sísmica 3D, utilizando dados de interpretação sísmica, atributo sísmico e incorporando os resultados de perfis de poços mencionados, conforme exposto inicialmente por Maul *et al.* (2015), Jardim *et al.* (2015),

Meneguim *et al.* (2015) & Oliveira *et al.* (2015). O método permite a extrapolação das velocidades intervalares dentro da seção evaporítica obedecendo apenas a resposta do atributo proveniente da amplitude sísmica que, por sua vez, foi derivada da litologia existente na área de estudo. Para a obtenção da velocidade intervalar estratificada, de acordo com os autores mencionados, um atributo sísmico que defina com clareza a presença dos estratos deve ser combinado com a velocidade sísmica intervalar, a fim de identificar a posição das estratificações a serem consideradas. Desta forma, com base no estudo dos poços, atribui-se um valor apropriado para a velocidade na posição das estratificações, em correspondência com um critério de amplitude estabelecido.

Para possibilitar a execução das demais etapas do projeto foi gerado um modelo sísmico sintético. Utilizando a velocidade modelada com a inclusão das variações na seção evaporítica e os dados de perfis de poços, foi possível obter um modelo de densidade. De posse desses dados, uma modelagem sísmica acústica com densidade variável foi processada, a fim de gerar os dados sísmicos sintéticos. Vale ressaltar que a geometria de aquisição empregada foi equivalente a um 2D *Streamer* de uma seção do volume de dados sísmicos reais.

Após a obtenção dos dados sísmicos sintéticos, finalmente, foram executados os testes de migração sísmica, objetivo principal deste trabalho, utilizando modelos iniciais de velocidades distintos na sequência evaporítica, para fins comparativos. Os resultados obtidos para cada uma das etapas descritas, bem como as seções sísmicas resultantes de cada um dos métodos de migração citados serão expostos a seguir.

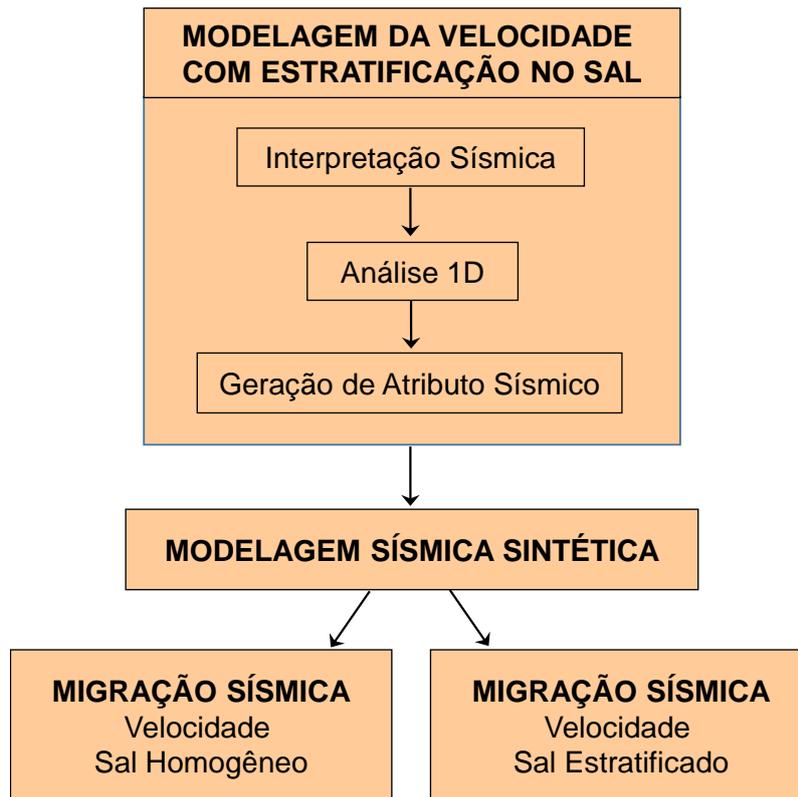


Figura 13: Fluxo de trabalho proposto com o encadeamento das etapas que definirão os resultados do projeto.

6.1 Modelagem da Estratificação no Sal

Para a construção de um modelo geológico de velocidades sísmicas intervalares, utiliza-se como entrada dados de velocidade sísmica, amplitude sísmica e perfis de poços, a fim de extrair informações como atributos sísmicos, análise estatística da litologia nos poços, informações de velocidades associadas a cada tipo de rocha, entre outras. Tais dados possuem papel preponderante e tornam-se úteis para um posicionamento mais realista, nos modelos de velocidades, dos diversos tipos de evaporitos presentes no interior da seção evaporítica.

Interpretação Sísmica

De posse do dado sísmico inicial e do respectivo modelo de velocidades oriundo do processamento sísmico originalmente realizado, é possível definir as principais sequências que caracterizam os contrastes de velocidade sísmica utilizando dados de interpretação sísmica.

Para dar início à execução do projeto, quatro refletores foram mapeados no dado sísmico em profundidade, por apresentarem contrastes significantes de velocidade intervalar, servindo, posteriormente, como base para a construção do modelo geológico utilizado na geração da imagem sísmica: Fundo do Mar, Topo do Albiano, Topo do Sal e Base do Sal.

Os volumes sísmicos (amplitude e velocidade intervalar) foram reamostrados de 18.75 x 18.75 x 6 m para uma malha regular com espaçamento de 10 m, a fim de regularizar a malha adequando-a aos algoritmos a serem utilizados na modelagem. Visando a otimização do esforço computacional, estes mesmos volumes foram reduzidos, restringindo-se à área dos poços (de 45 x 15 x 12 km para 27.3 x 10 x 8.5 km). A Figura 14 apresenta o redimensionamento em mapa dos dados sísmicos, o modelo de velocidade sísmica intervalar sobreposto ao dado de amplitude sísmica após o redimensionamento, os horizontes sísmicos mapeados, e a distribuição de frequências das velocidades intervalares obtidas da tomografia sísmica do dado original encontradas para cada sequência delimitada pelo mapeamento sísmico.

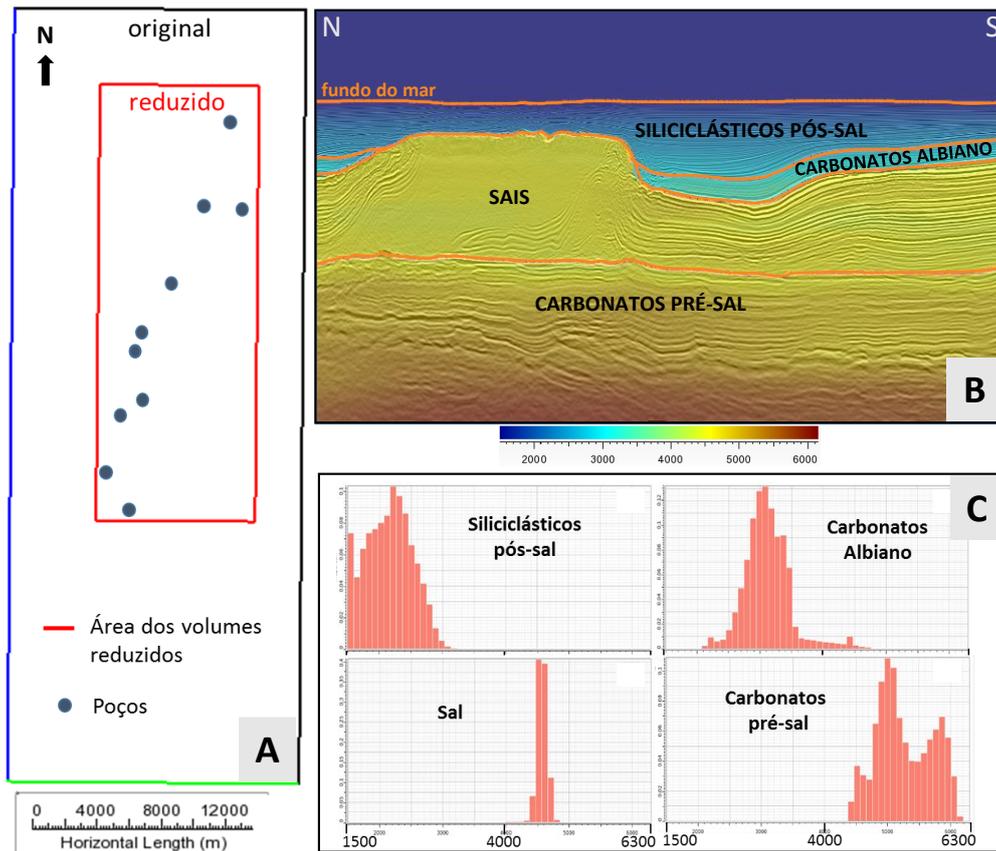


Figura 14: Preparação dos dados utilizados como entrada no projeto. (A) Redução em área dos dados sísmicos originais para otimização dos processos, contemplando a área dos dez poços; (B) velocidade sísmica intervalar sobreposta ao dado de amplitude sísmica com quatro horizontes mapeados; (C) histogramas das velocidades intervalares originais encontradas para cada sequência definida pelo mapeamento sísmico.

Análise 1D – Proporções dos Sais na Seção Evaporítica

Como ponto de partida para a investigação da natureza estratigráfica dos sais, foi realizada uma análise 1D da seção evaporítica, utilizando os perfis de poços disponíveis e descrições de amostras de calha, de acordo com o proposto por Amaral *et al.* (2015). Tais dados possuem papel preponderante e tornam-se úteis para um posicionamento mais realista nos modelos de velocidades dos diversos tipos de evaporitos presentes no interior da sequência evaporítica. Esta etapa representa os estudos iniciais das estratificações da sequência de sal, onde os poços são apresentados na área de interesse, considerando a proporção litológica dos tipos de sais para cada um dos poços interpretados. Havendo a disponibilidade de dados de perfis sônicos, este estudo possibilita, ainda, uma análise estatística da distribuição dos valores de velocidade

adequados a cada litotipo encontrado. Tais resultados servem como auxiliares na validação de qualquer análise de incertezas sísmicas para estudos de reservatórios, no que diz respeito ao posicionamento em profundidade.

O primeiro passo para a análise 1D é garantir um bom ajuste entre os perfis de poços (em alta e baixa frequência) e as descrições das amostras de calha expressas através de perfil litológico. As Figura 15 e Figura 16 ilustram os resultados dos estudos iniciais dos sais, onde os poços são apresentados na área de estudo, considerando a proporção litológica dos litotipos, agrupados em sais de alta velocidade (anidrita), halita e sais de baixa velocidade (taquidrita, carnalita, silvita), para cada um dos poços interpretados. A Figura 15 ilustra a correspondência de comportamentos apresentada entre os dados 1D e 3D diante das estratificações em questão. A Figura 16 exhibe a distribuição estatística dos diferentes grupos de sais encontrados nos dez poços do projeto. Tais resultados servem como auxiliares na validação de qualquer análise de incertezas sísmicas para estudos de reservatórios, no que diz respeito ao posicionamento em profundidade.

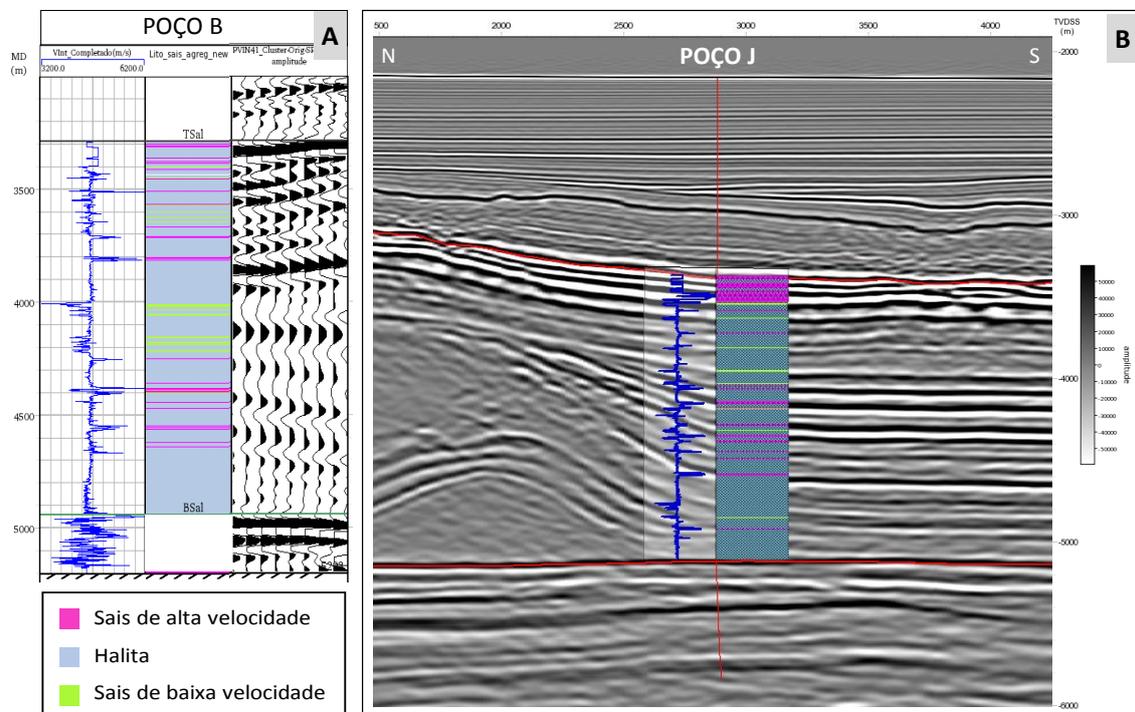


Figura 15: (A) Perfil de velocidade instantânea (derivado do sônico), perfil litológico destacando os três principais grupos de sais, e refletores sísmicos extraídos na posição do poço B na sequência evaporítica; (B) Seção sísmica (*crossline*) em profundidade com perfil de velocidade instantânea (derivado do sônico) e perfil litológico destacando os três principais grupos de sais, ambos referentes ao poço J.

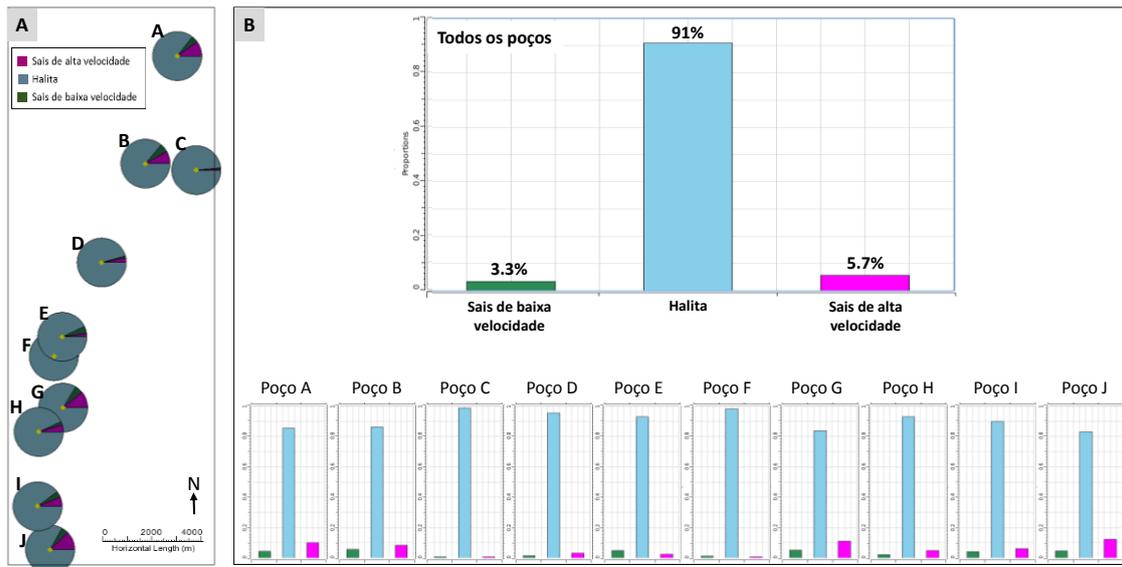


Figura 16: (A) Distribuição em mapa dos dez poços do projeto, com gráficos de proporções dos tipos de sais, agrupados em sais de alta velocidade, halita e sais de baixa velocidade. (B) Histograma com a proporção total encontrada para cada grupo de sais nos dez poços do projeto. Os histogramas menores detalham esta distribuição poço a poço, obedecendo a mesma legenda.

Geração de Atributo Sísmico

Maul *et al.* (2015), Meneguim *et al.* (2015), González *et al.* (2015), Gobatto *et al.* (2016), Falcão *et al.* (2016) e González *et al.* (2016), entre outros autores, tomaram como base o uso de atributos sísmicos como a amplitude sísmica propriamente dita, a impedância acústica relativa, a impedância absoluta e a análise de fácies sísmicas, para a construção de um modelo geológico de velocidades sísmicas na seção evaporítica de diversos campos da Bacia de Santos.

Inicialmente, neste trabalho, foi gerado o atributo de integração, por se tratar de uma operação que define as propriedades de camada. Este atributo, por realçar as baixas frequências, favorece a melhor definição de feições de grandes comprimentos de onda. Porém, o dado resultante da integração das amplitudes sísmicas apresentou um forte ruído, que não foi suficientemente atenuado por um filtro *debiis* (remoção de média móvel), o que dificultaria o processo de condicionamento da velocidade intra-sal em função do atributo, inviabilizando sua aplicação com o método.

Como alternativa, o atributo sísmico utilizado para a ponderação das estratificações na sequência evaporítica foi a diferenciação com rotação de fase em 180°, conforme apresentado por Seifert *et al.* (2017). A amplitude resultante deste atributo fornece uma informação mais acurada em termos de posicionamento dos estratos, garantindo a continuidade lateral dos refletores, tendo em vista de que também se trata de uma propriedade de camada, e não de interface, conforme a amplitude sísmica propriamente dita.

Para cada traço, esta operação descreve a diferença entre a amplitude das amostras anterior e posterior, dividida pelo intervalo de tempo. A diferenciação aplicada à amplitude sísmica pode ser descrita, no domínio da frequência, através de dois operadores: um no espectro de amplitude e outro no espectro de fase (Figura 17). Isto implica em aplicar um maior ganho nas altas frequências em relação às baixas frequências, quando se trata do espectro de amplitude. O operador que atua no espectro de fase rotaciona todos os componentes de frequência em -90°.

Desta forma, considerando $s(t)$ o traço sísmico no domínio do tempo e $S(f)$ o correspondente no domínio da frequência, as Equações 10 e 11 representam uma das formas de expressar as operações de derivação e integração, respectivamente, aplicadas ao sinal sísmico.

De acordo com o teorema da derivada, derivar uma função com relação ao tempo equivale, no domínio da frequência, a multiplicar o seu espectro de amplitude pela frequência angular ω e subtrair 90° do seu espectro de fase, conforme a equação a seguir:

$$\frac{ds(t)}{dt} \Leftrightarrow 2\pi f S(f) e^{(-i\frac{\pi}{2})} , \quad (10)$$

onde $\omega = 2\pi f$.

Já o teorema da integral indica que integrar uma função no domínio do tempo equivale, no domínio da frequência, a dividir seu espectro de amplitude por ω e somar 90° ao seu espectro de fase, conforme apresenta a seguinte equação:

$$\int_{-\infty}^t s(t) dt \Leftrightarrow \frac{S(f)}{2\pi f} e^{(i\frac{\pi}{2})} . \quad (11)$$

Neste caso, a rotação de fase adicional em $+180^\circ$ aplicada ao dado resultante da derivação objetivou alcançar o mesmo espectro de fase do processo de integração ($+90^\circ$), considerada uma operação oposta à diferenciação. Os resultados destas operações podem ser verificados na Figura 18.

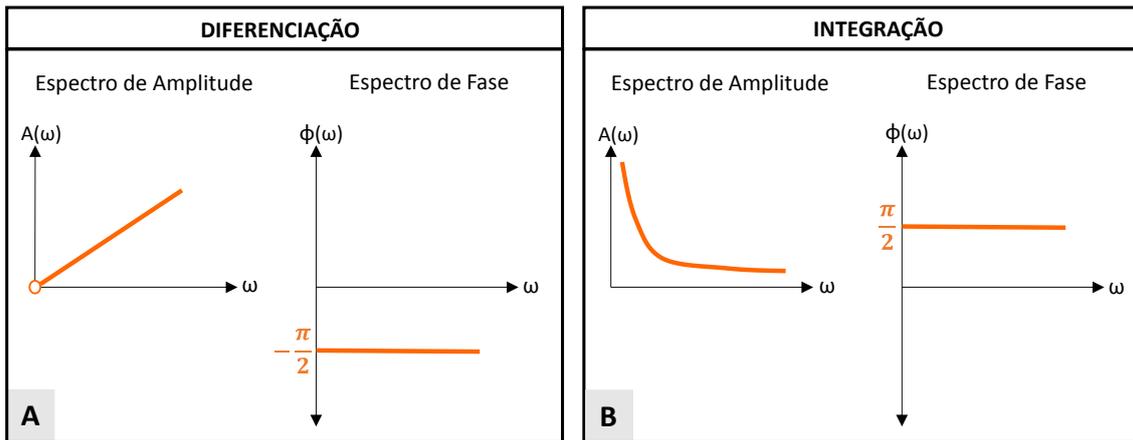


Figura 17: Esquema ilustrativo dos comportamentos dos espectros de amplitude e de fase resultantes dos operadores: (A) de diferenciação (Equação 10), que, ao multiplicar o seu espectro de amplitude pela frequência angular ω , aplica um maior ganho de amplitudes nas altas frequências em relação às baixas, rotacionando os componentes de frequência em -90° ; e (B) de integração (Equação 11), que privilegia as amplitudes nas baixas frequências ao dividir seu espectro de amplitude por ω , e rotaciona todos os componentes de frequência em $+90^\circ$.

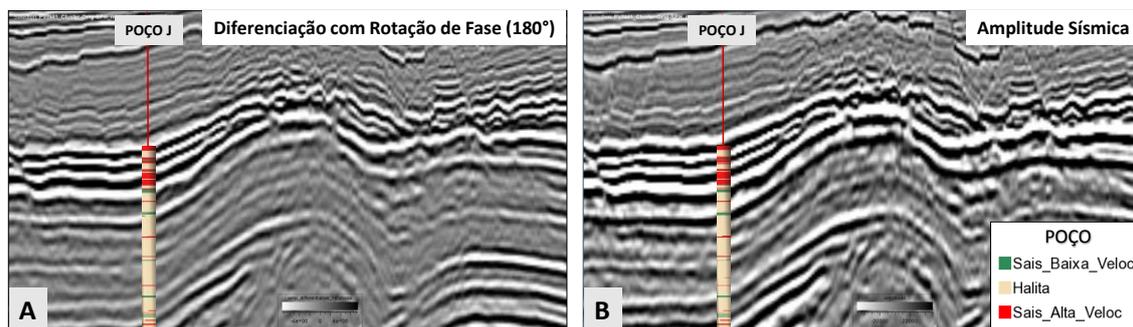


Figura 18: Dado resultante do atributo diferenciação com rotação de fase em 180° (A) comparado ao dado de amplitude sísmica original (B), ambos com o perfil litológico de um dos poços (agrupado em sais de alta velocidade, halita e sais de baixa velocidade).

Ao observar ambos os dados, é fácil identificar a presença de fortes amplitudes (positivas e negativas), distribuídas de forma errática dentro da sequência evaporítica, predominantemente composta por halita.

De acordo com as análises dos poços, as reflexões positivas estão associadas majoritariamente à presença de anidrita. Neste caso, desconsidera-se sismicamente a presença de sais de baixa velocidade (carnalita, taquidrita, silvita, etc.), tendo em vista a baixa espessura das laminações associada ao baixo contraste de velocidade que essas rochas apresentam em relação à halita. No caso das reflexões negativas, podemos associá-las à passagem da anidrita para a halita ou à presença de lobos laterais das fortes reflexões positivas.

Neste contexto, vale considerar que a presença de lobos laterais das fortes reflexões podem ser caracterizados, de forma equivocada, como reflexões geradas pela variação litológica em si. Portanto, deve-se ter em mente que nem todas as reflexões positivas ou negativas serão indicativas da frequência de alternância dos estratos.

É importante atentar, também, para o limite de resolução imposto pelo método sísmico, dado que em geral as ocorrências destas rochas, ditas anômalas em termos de velocidades, raramente são maiores do que poucas dezenas de metros. Neste caso, considerando a baixa ocorrência dos sais de baixa velocidade (3,3%), bem como sua baixíssima espessura observada nos dados de poços, tais intercalações não serão contempladas neste modelo. A seguir serão descritos os passos para a inclusão dos sais de alta velocidade (5,7%), mantendo a halita (91%) como *background* na seção evaporítica.

Construção da Velocidade Intervalar Estratificada na Sequência Evaporítica

Com os cuidados acima observados e de posse do atributo sísmico a ser utilizado no condicionamento da distribuição dos estratos, é possível manipular a velocidade, levando em consideração os valores de amplitude no atributo, caracterizados como respostas dos respectivos evaporitos. O algoritmo foi operado somente no intervalo correspondente à sequência salina, delimitado

pelos horizontes Topo e Base do Sal, através de calculadora para dados volumétricos disponibilizada no aplicativo SKUA-GOCAD™ (Paradigm®).

A sintaxe dos comandos executados, exclusivamente, para inserir no modelo os valores associados aos sais de alta velocidade presentes na camada de sal, utiliza como entrada a velocidade tomográfica oriunda do processamento original do dado (*velocidade_inicial*) e o resultado obtido do atributo sísmico calculado (*amplitude_atributo*), conforme descrito a seguir:

<i>SE amplitude_atributo</i> > determinado valor alto e positivo <i>velocidade_final</i> = <i>velocidade_inicial</i> * incremento	} SAIS DE ALTA VELOCIDADE
<i>SENÃO</i> <i>velocidade_final</i> = <i>velocidade_halita</i>	} BACKGROUND REPRESENTATIVO DA HALITA

Neste caso, considerando os valores do modelo de velocidade inicial (*velocidade_inicial*) como sendo tipicamente referentes à velocidade aproximada da halita (4500 m/s), teremos como resposta para o condicional “SE” (*velocidade_final*) algo em torno de 5200 m/s (velocidade aproximada da anidrita e gipsita) ao utilizar um incremento da ordem de 20%, mantendo o restante (comando “SENÃO”) como a velocidade representativa da halita, aqui definido como *background*.

Importante, neste contexto, considerar a manutenção da média vertical da velocidade intervalar da camada, visto que, embora a velocidade inicial não representasse a definição dos estratos intra-sal, sua função no processamento sísmico anteriormente realizado foi posicionar corretamente os refletores, garantindo um bom imageamento e continuidade lateral, além de honrar as informações de poços em termos de posicionamento vertical. Desta forma, considerando ter inserido ao modelo apenas laminações de alta velocidade, após a realização de testes, o valor de velocidade considerado para a halita (*velocidade_halita*) que melhor compensou a presença das altas velocidades dos estratos e manteve a média vertical de comportamento da velocidade original foi de 4460 m/s.

Vale ressaltar que os valores utilizados em *amplitude_atributo* devem ser adaptados de acordo com o valor absoluto do atributo utilizado como

condicionante para a identificação da presença dos diferentes sais. Neste caso, numa escala de -7×10^6 a 7×10^6 do atributo utilizado, foi considerado o valor de 5×10^6 como *cut-off* para a caracterização dos estratos (Figura 19a).

Após a execução dos comandos citados, foi necessária uma etapa de suavização do modelo de velocidades, visando um caráter mais contínuo das informações geradas. Tal procedimento foi realizado utilizando um filtro de média móvel com aplicação de pesos distintos nas três direções, ou seja, peso de 1 amostra para as direções X e Y e peso nulo na direção vertical Z, a fim de não descaracterizar qualquer definição das interfaces geológicas representadas pelas velocidades intervalares.

A Figura 19b mostra como o modelo resultante apresenta respostas consideradas mais geológicas em termos de velocidades intervalares, mostrando-se bastante útil como “condições de contorno” na construção dos modelos de velocidades visando qualquer aplicação, incluindo os modelos iniciais para as etapas de migrações finais.

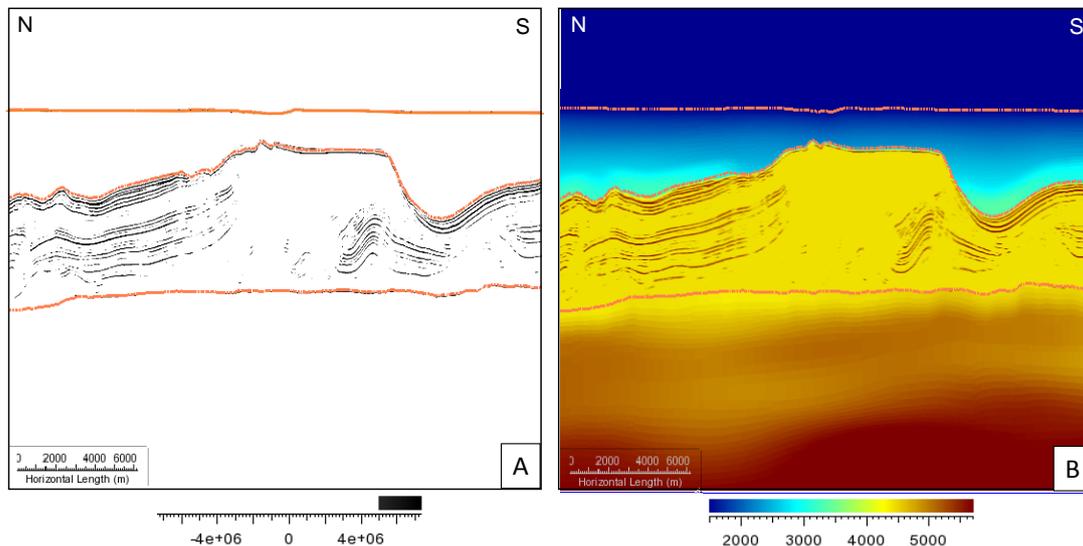


Figura 19: (A) Atributo de diferenciação com rotação de fase em 180° na sequência evaporítica (delimitada pelos horizontes Topo e Base do Sal), com *cut-off* na escala de cor ilustrando as amplitudes capturadas através do algoritmo utilizado. (B) Velocidade sísmica intervalar resultante.

6.2 Modelagem Sísmica Sintética

Um modelo sísmico sintético 2D foi gerado a partir da velocidade intervalar estratificada na seção evaporítica do dado real, a fim de adequar os dados aos testes de migração sísmica propostos. Para a estimativa da informação de impedância acústica necessária à construção do modelo sísmico sintético, um modelo de densidade foi gerado como função do modelo de velocidade intervalar estratificada, utilizando relações empíricas obtidas de perfis de poços (velocidade X densidade) para cada uma das quatro principais camadas do modelo. Deste modo, a mesma geologia imposta ao modelo de velocidade sísmica intervalar deve ser garantida ao volume de densidade, tanto em relação à posição dos contrastes litológicos, quanto aos próprios valores a serem atribuídos em si.

Modelo de Densidade

A geração do modelo de densidade envolveu a velocidade sísmica intervalar modelada com a estratificação na camada evaporítica e perfis de poços filtrados a 20 Hz. As relações “Velocidade da onda P (m/s) X Densidade (g/cm^3)” dos 10 poços disponíveis ao projeto foram extraídas a partir dos perfis sônico (DT) e densidade (R_{hob}). Tais relações foram extraídas individualmente em quatro principais intervalos litológicos do modelo e aplicadas ao volume de velocidade sísmica intervalar. São eles: (1) rochas siliciclásticas do pós-sal, (2) carbonatos do pós-sal (Albiano), (3) sal e (4) carbonatos do Pré-Sal (Aptiano).

Devido à ausência de dados de poços, no intervalo referente às “rochas siliciclásticas do pós-sal”, foi utilizada a equação empírica obtida por Gardner *et al.* (1974) de forma genérica (Equação 12), que relaciona velocidade da onda compressional (V_p) à densidade (R_{hob}) para diversos tipos de rochas sedimentares *in-situ*.

$$R_{hob} = 1.741 V_p^{0.25} , \quad (12)$$

onde V_p está em km/s e R_{hob} em g/cm^3 .

A fim de representar os carbonatos da seção pós-sal, foi utilizada uma relação quadrática entre os dados de V_p e R_{hob} , extraídos dos perfis de poços. Tanto para a sequência evaporítica, quanto para os carbonatos da seção Pré-Sal, foram aplicadas relações lineares encontradas nos dados de poços para cada camada. Vale ressaltar que a presença da argila magnésiana presente em algumas porções da seção Pré-Sal e identificada nos poços não foi considerada na definição da equação referente a esta sequência.

As relações $V_p \times R_{hob}$ extraídas dos poços, individualmente, para cada camada, bem como os resultados do volume de densidade obtidos a partir da velocidade estratificada na sequência evaporítica, são apresentados na Figura 20.

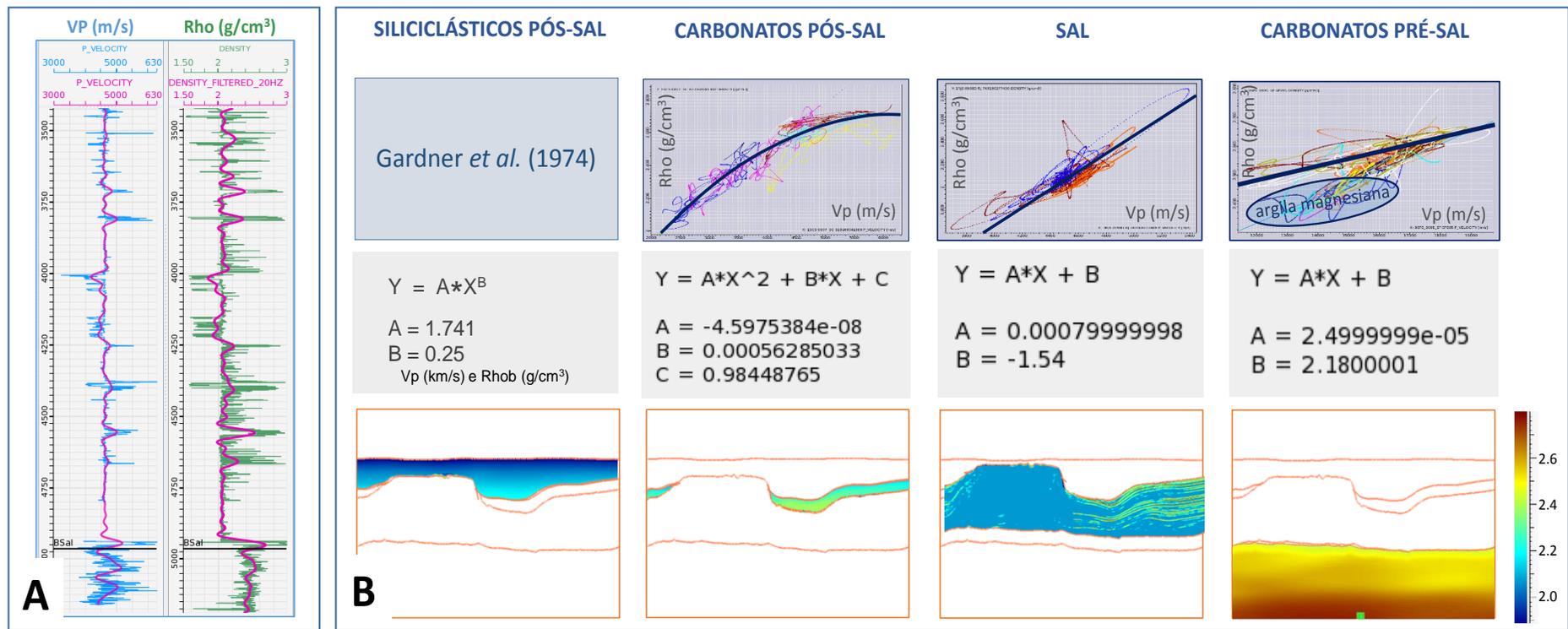


Figura 20: Dados e informações para a obtenção do modelo de densidade: (A) Perfis de poços velocidade da onda P (m/s) e densidade (g/cm³), filtrados a 20 Hz; (B) Relações empíricas extraídas das correlações entre perfis de poços (Vp X Rhob) para cada intervalo litológico, visando a geração do modelo de densidade como função do modelo de velocidade. A relação de Gardner *et al.* (1974) foi aplicada à camada "siliciclásticos do pós-sal" devido à ausência de perfis de poços nesta seção.

Deste modo, a geologia imposta ao modelo de velocidade sísmica intervalar deve ser garantida ao volume de densidade, tanto em relação à posição dos contrastes litológicos, quanto aos próprios valores a serem atribuídos em si.

Propiciando uma avaliação qualitativa, a Figura 21 apresenta o modelo de densidade resultante na posição de um dos poços, onde o comportamento da curva Rhob mostra-se compatível com o posicionamento dos estratos presentes no modelo de densidade. Vale ressaltar que, embora balizada por relações oriundas de dados de poços, o processo de construção do modelo e posicionamento dos estratos não utilizou como entrada os perfis de poços.

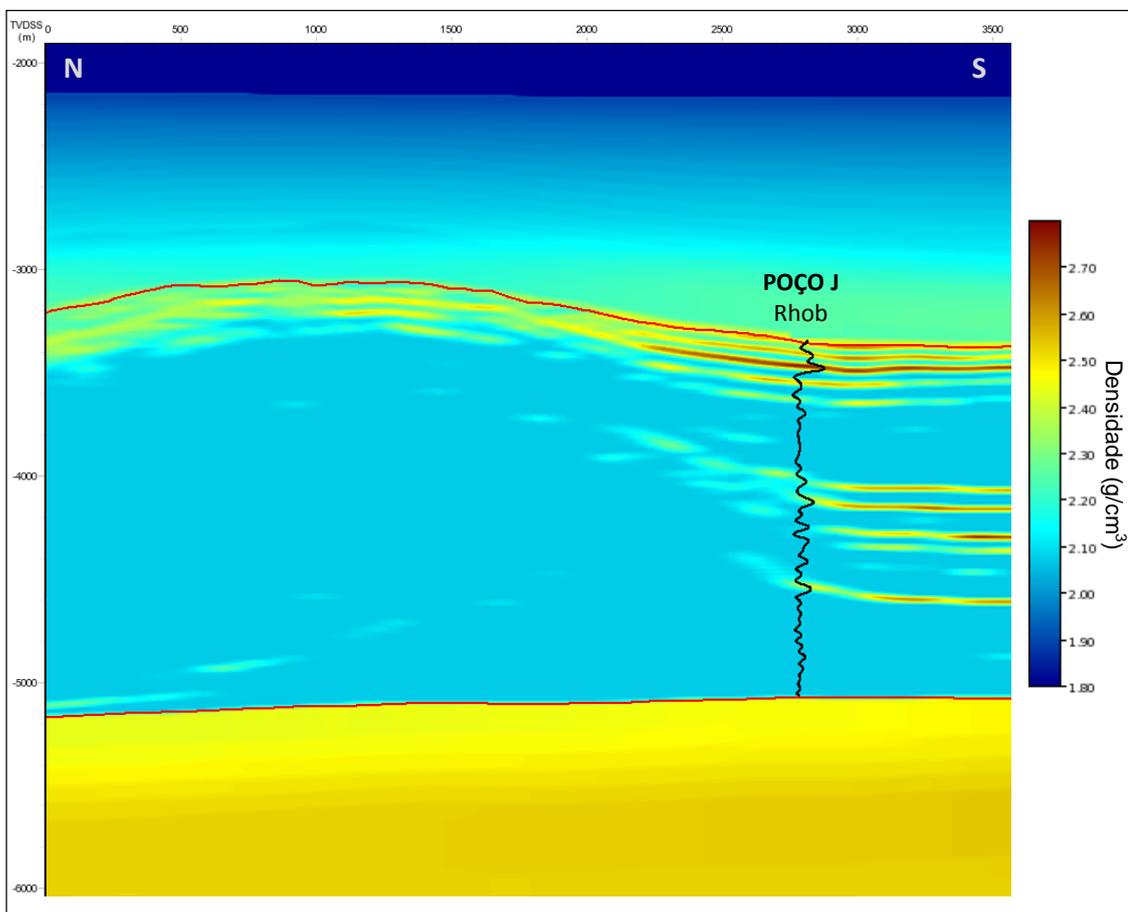


Figura 21: Modelo de densidade obtido como função do modelo de velocidade intervalar estratificado na seção evaporítica, utilizando relações velocidade X densidade extraídas dos poços. A curva preta apresenta o comportamento de um dos perfis Rhob (poço J) na sequência salina, filtrado a 20 Hz, utilizados na obtenção das relações empíricas empregadas no processo de geração do modelo de densidade.

Na parte inferior do modelo de densidade, uma camada plana, delgada e de densidade constante foi criada como forma de auxiliar o controle de qualidade da geometria dos eventos sísmicos da modelagem resultante e contribuir com a comparação dos resultados das seções migradas, frente à utilização dos diferentes campos de velocidades.

Um tratamento adicional incluiu, ainda, a soma da informação da amplitude sísmica normalizada do dado real ao modelo de densidade, especificamente nas sequências pré e pós-sal, a fim de melhor caracterizar os refletores sísmicos no dado sintético resultante do processo de modelagem acústica com densidade variável.

Finalmente, de posse dos modelos de velocidade intervalar (Figura 19b) e de densidade (Figura 21), ambos modelados com a presença da estratificação no sal, foi possível gerar o modelo 3D de impedância acústica, obtido a partir da multiplicação entre ambos, a ser utilizado no processo de modelagem. Os resultados do modelo de densidade e da impedância acústica resultante são apresentados na Figura 22.

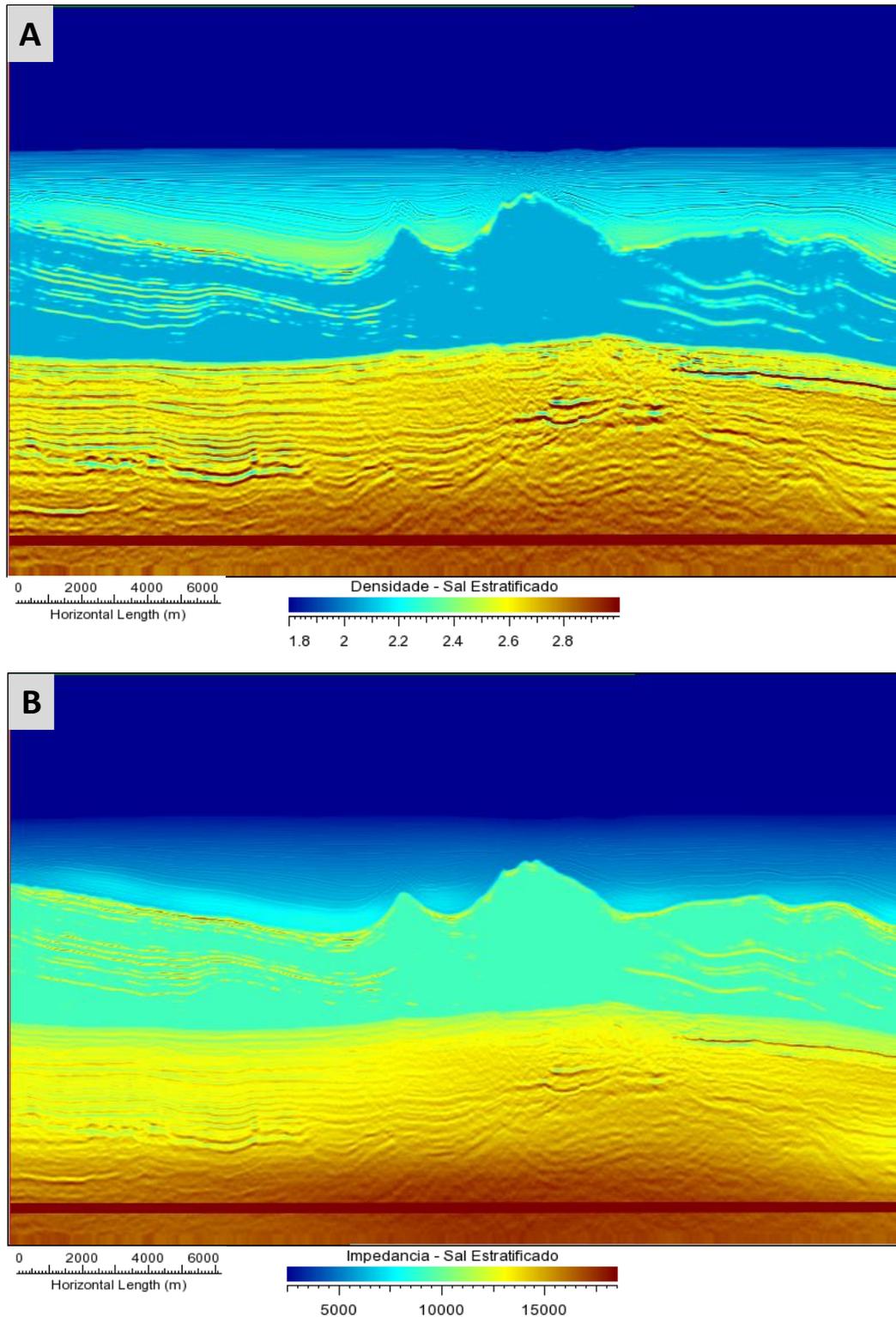


Figura 22: (A) Modelo de densidade (em g/cm^3) após o tratamento adicional. Observar as variações inseridas com base no comportamento da amplitude sísmica real normalizada, e a camada plano-paralela delgada, de alta densidade, representada pela linha marrom horizontal na base do modelo. (B) Modelo de impedância acústica (em m/s.g/cm^3) oriundo da multiplicação entre a velocidade com sal estratificado (Figura 19b) e a densidade descrita em "A", a ser utilizado no processo de modelagem acústica.

Modelagem Acústica

A aquisição de dados sísmicos pode ser devidamente simulada pelo processo de modelagem, ou seja, a fonte sísmica, a propagação do campo de ondas em subsuperfície, as reflexões nas interfaces entre as camadas e o registro da energia que retorna à superfície com a utilização de receptores são simulados. A modelagem pode ser implementada com a utilização de operadores acústicos ou elásticos.

O modelo acústico aplicado a este trabalho é regido pela equação escalar da onda e descreve apenas a propagação das ondas compressoriais (ondas primárias), assumindo que o meio possui densidade constante e é fluido, não havendo componentes cisalhantes (Bulcão, 2004).

Neste contexto, um levantamento sísmico 2D *Streamer* foi simulado, baseado em uma *crossline* do volume sísmico real, com extensão de levantamento de, aproximadamente, 27 km, conforme mostra a Figura 23. Os principais parâmetros da geometria de aquisição utilizada encontram-se na Tabela 3. As informações de velocidade e densidade, assim como a geologia imposta para a construção do modelo, foram extraídas do dado sísmico real, conforme resultados descritos nas etapas anteriores, sempre destacando a presença das estratificações no sal. A modelagem foi realizada sem múltipla de superfície e sem *ghosts* da fonte e receptores, utilizando um algoritmo desenvolvido internamente na gerência de Geofísica do Centro de Pesquisas da Petrobras.

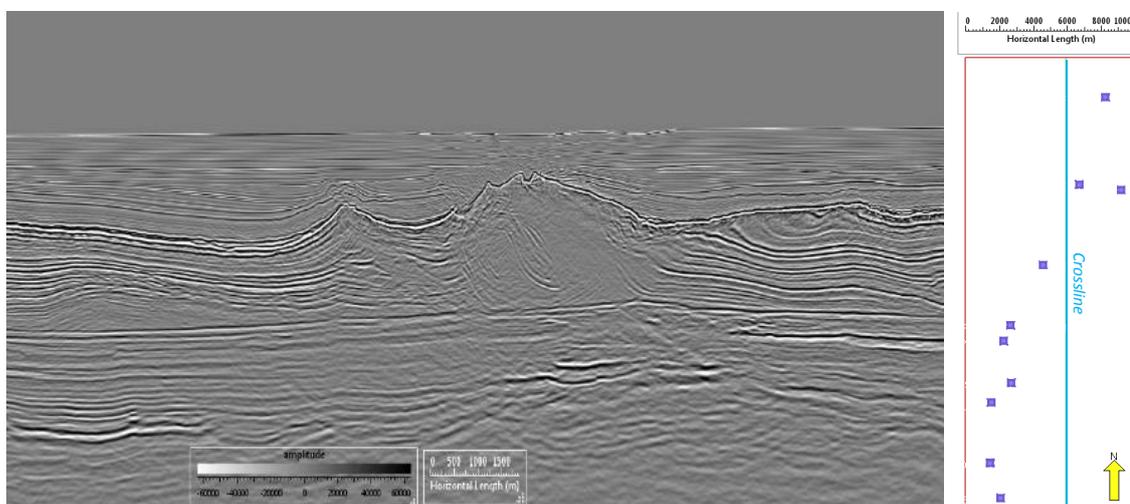


Figura 23: Seção-tipo do dado sísmico real utilizada na geração do modelo sintético 2D.

Tabela 3: Parâmetros utilizados na simulação da aquisição de dados sísmicos de superfície (*Streamer*).

Aquisição Sísmica Streamer	
número total de receptores	240
intervalo de receptor	25 metros
<i>offset</i> mínimo	25 metros
<i>offset</i> máximo	6000 metros
profundidade dos receptores	6 metros
número de amostras	2001
intervalo de amostragem	4 ms
frequência de corte da fonte	45.0 Hz
fonte	Ricker
profundidade da fonte	10 metros

6.3 Migração Sísmica

Finalmente, após a modelagem, os algoritmos de migração pré-empilhamento foram executados, utilizando modelos com versões distintas de velocidades na porção evaporítica. Conforme mencionado anteriormente, dois tipos de migração sísmica foram executados, por se tratarem de técnicas comumente utilizadas na indústria do petróleo: migração Kirchhoff e migração RTM.

As seções migradas constituem um dos principais objetivos deste projeto, cuja análise dos resultados será realizada no próximo capítulo. Em ambos os casos, as seções foram empilhadas após a aplicação da migração pré-empilhamento em profundidade.

O algoritmo de migração RTM foi desenvolvido internamente pela gerência de Geofísica do Centro de Pesquisas da Petrobras. Já a migração Kirchhoff foi executada utilizando o aplicativo GEODEPTH®, da Paradigm®. Para produzi-las, foram empregados os mesmos campos de velocidades provenientes do processo de suavização da vagarosidade, apresentados na Figura 24 – um com e outro sem a inclusão das estratificações intra-sal. Percebe-se que, mesmo após a suavização, o

modelo com o sal estratificado preservou as características locais nas distribuições de velocidades.

Deste processo resultaram quatro seções migradas, duas oriundas da migração Kirchhoff e duas da migração RTM (utilizando os mesmos campos de velocidades suavizados para a migração Kirchhoff), objetivando a comparação dos resultados.

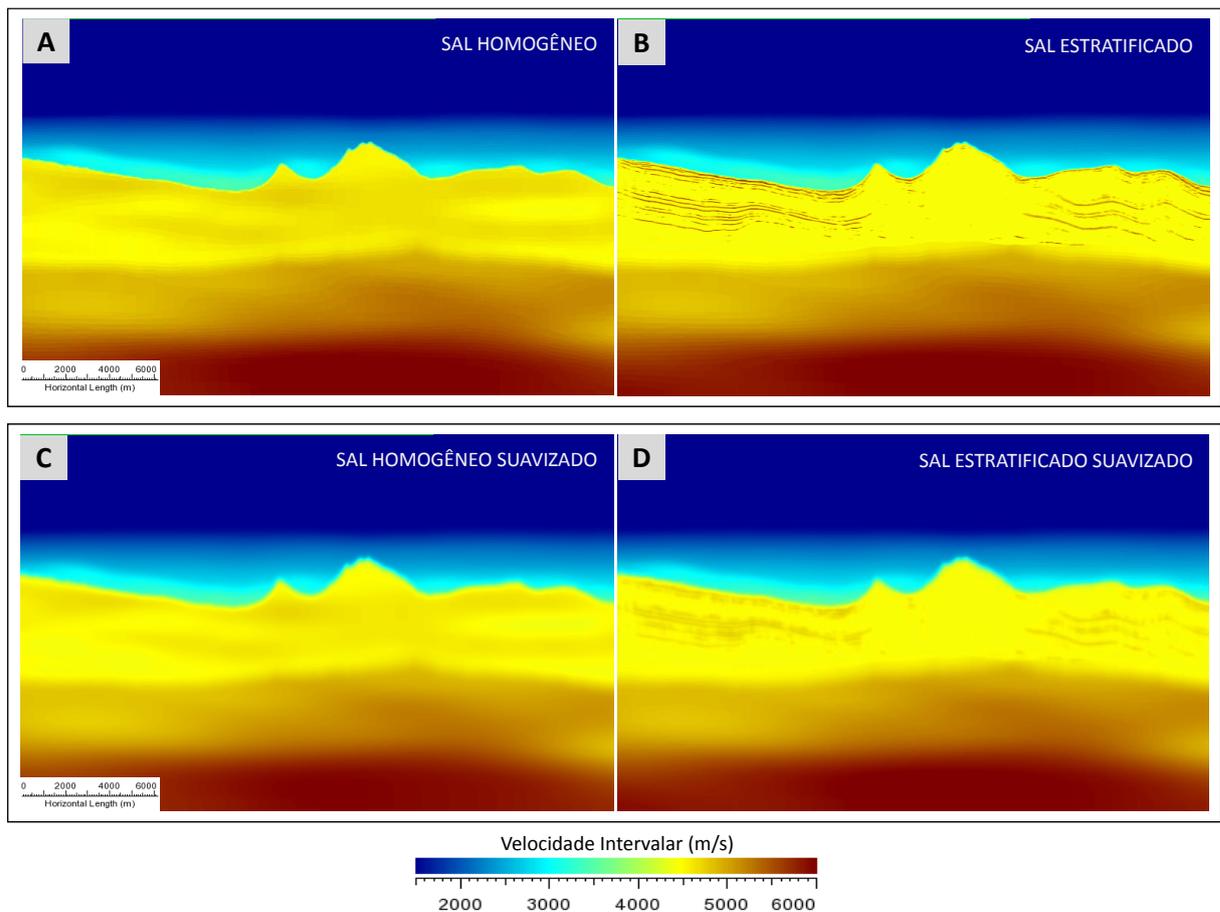


Figura 24: Campo de velocidade sísmica intervalar: (A) sem a estratificação na sequência evaporítica, antes da suavização (modelo original com o sal homogêneo); (B) com a estratificação na sequência evaporítica, antes da suavização (resultante da modelagem com o sal estratificado); (C) apresentado em “A” após ser submetido ao processo de suavização do campo de vagarosidades; e (D) apresentado em “B” após ser submetido ao processo de suavização do campo de vagarosidades. Os modelos “C” e “D” foram utilizados como modelos iniciais durante a execução das migrações Kirchhoff e RTM.

Os algoritmos de migração foram, então, aplicados a cada uma das seções de afastamento comum e, da soma de todas elas, resultou a seção migrada final.

As Figura 25 e Figura 26 apresentam os resultados das seções sísmicas empilhadas, bem como uma sequência de *gathers* resultantes das duas migrações

Kirchhoff e das duas RTM empregadas neste trabalho, respectivamente, estando prontas para a análise a ser realizada no próximo capítulo. Para produzi-las, foram empregados os campos de velocidade suavizados da Figura 24c e 24d. Ambas as técnicas apontam para uma boa definição dos refletores em todas as linhas sísmicas processadas.

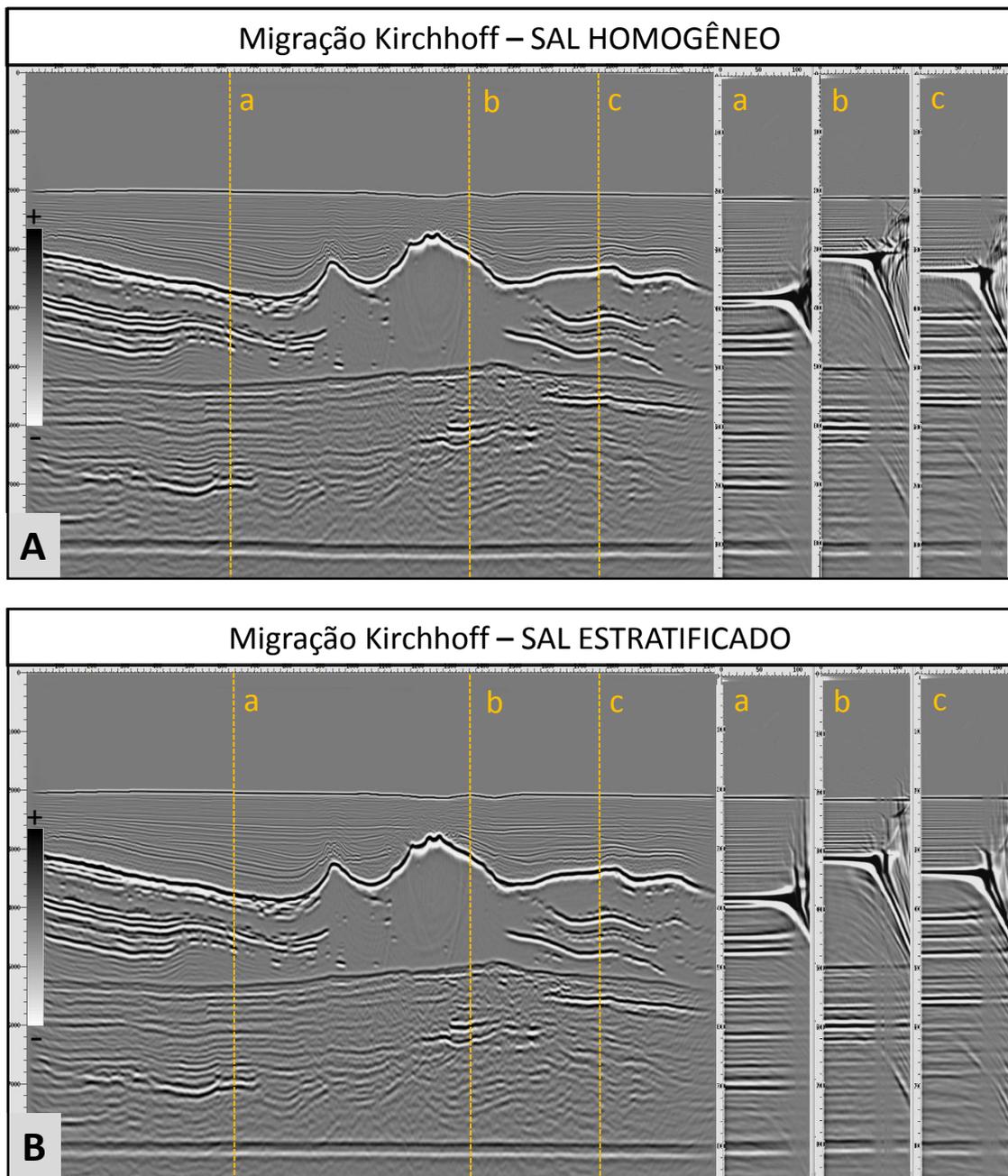


Figura 25: Seções sísmicas resultantes das migrações Kirchhoff pré-empilhamento, utilizando velocidades que consideram o sal homogêneo (A) e estratificado (B). Uma sequência de *gathers* migrados é exposta nas posições das linhas tracejadas “a”, “b” e “c”.

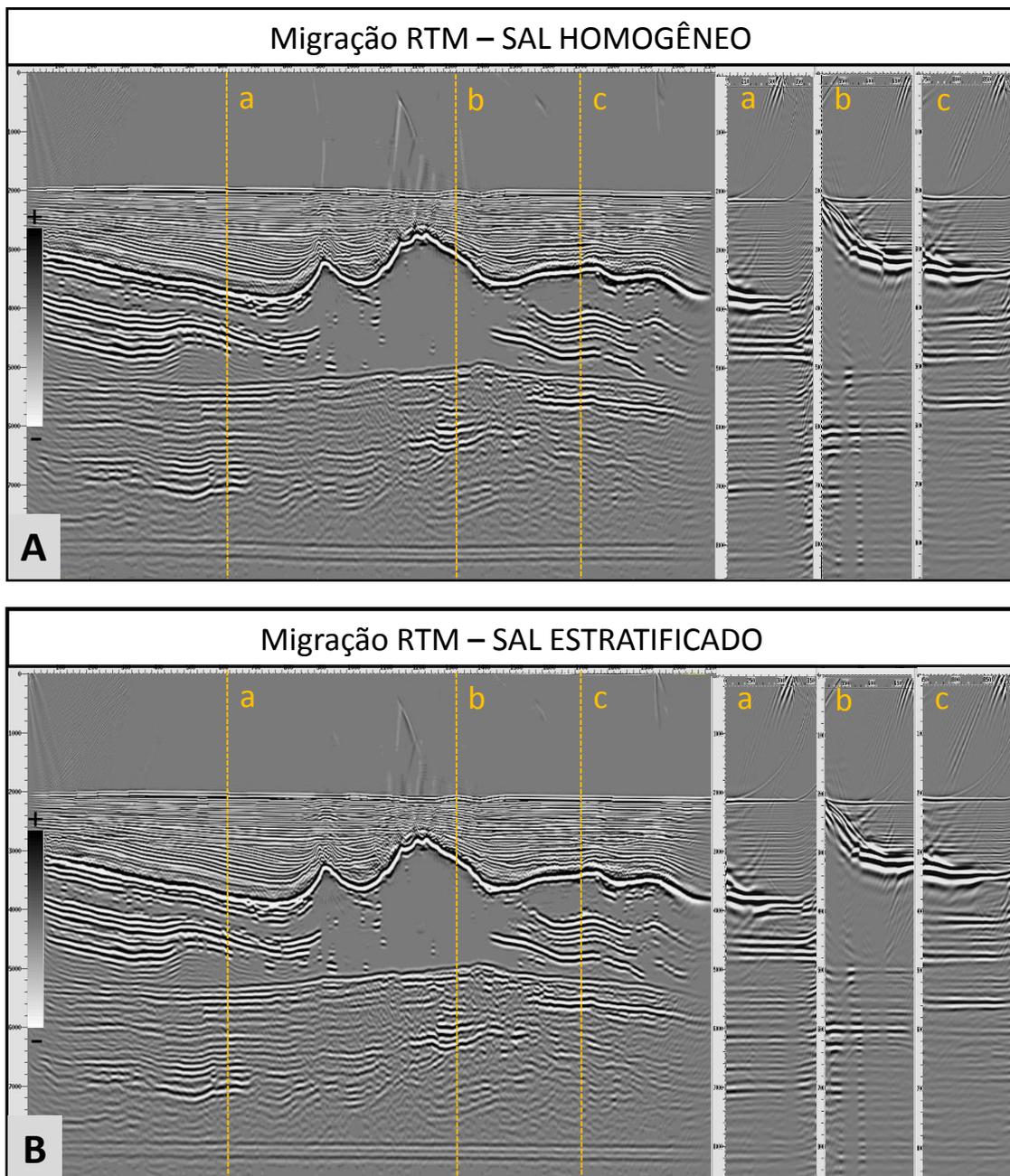


Figura 26: Seções sísmicas resultantes das migrações RTM, utilizando velocidades que consideram o sal homogêneo (A) e estratificado (B). Uma sequência de *gathers* migrados é exposta nas posições das linhas tracejadas “a”, “b” e “c”.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Um grande problema enfrentado pelos principais métodos de migração está relacionado à escolha do modelo de velocidades a ser utilizado. O resultado de qualquer migração depende da exatidão das velocidades escolhidas.

As análises das quatro seções migradas neste estudo se ativeram à avaliação qualitativa da definição das superfícies de reflexão situadas abaixo da sequência evaporítica, e posterior análise quantitativa em termos de variações no posicionamento em profundidade e no comportamento da amplitude sísmica, tomando como base os refletores referentes à Base do Sal e ao topo da camada plano paralela criada na base do modelo sintético (aqui denominado “refletor fictício”). A finalidade destas investigações é avaliar o impacto na qualidade do produto derivado das migrações realizadas com e sem a inclusão das estratificações na sequência evaporítica, bem como a sensibilidade de cada método de migração empregado frente à utilização de um modelo inicial de velocidades mais refinado.

Em relação ao comportamento dos *gathers* migrados por ambas as técnicas, não são esperadas variações nos efeitos de *move-out* para o dado em questão. As Figuras 25 e 26 apresentam o bom alinhamento dos refletores na seção Pré-Sal para ambos os métodos e modelos iniciais, tendo em vista que a própria velocidade considerada como “sal homogêneo” já havia sofrido um processo tomográfico anterior. Neste caso, os principais efeitos previstos na utilização das diferentes velocidades aplicadas em técnicas distintas de migração referem-se ao posicionamento em profundidade e, possivelmente, à qualidade da imagem e continuidade lateral dos refletores.

No que diz respeito ao impacto na representação dos eventos sísmicos na região Pré-Sal, uma melhoria na focalização e contorno dos eventos sísmicos situados logo abaixo da Base do Sal pode ser observada na seção migrada que considerou a velocidade estratificada na seção evaporítica, utilizando a técnica RTM (Figura 28). Já a técnica de migração Kirchhoff não apresentou as mesmas diferenças na definição e continuidade dos refletores da seção Pré-Sal derivadas da presença ou não das estratificações do sal, como pode ser observado na Figura 27.

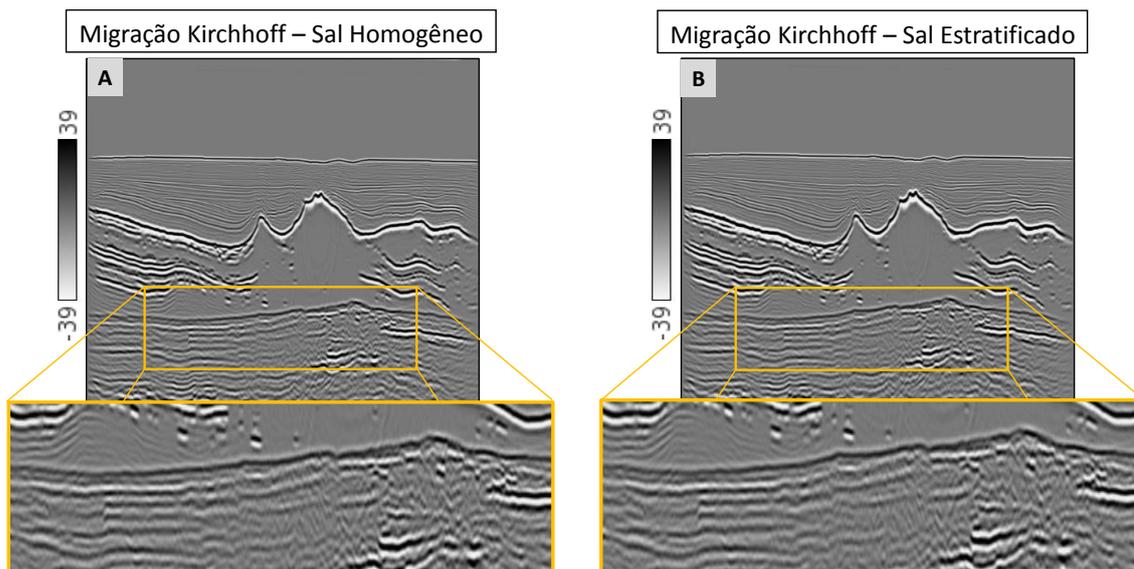


Figura 27: Observação em detalhe das reflexões sísmicas situadas logo abaixo da Base do Sal, resultantes das migrações Kirchhoff que consideraram: (A) o sal homogêneo e (B) o sal estratificado. No aspecto comparativo, não foram observadas diferenças na focalização e contorno dos eventos da seção Pré-Sal.

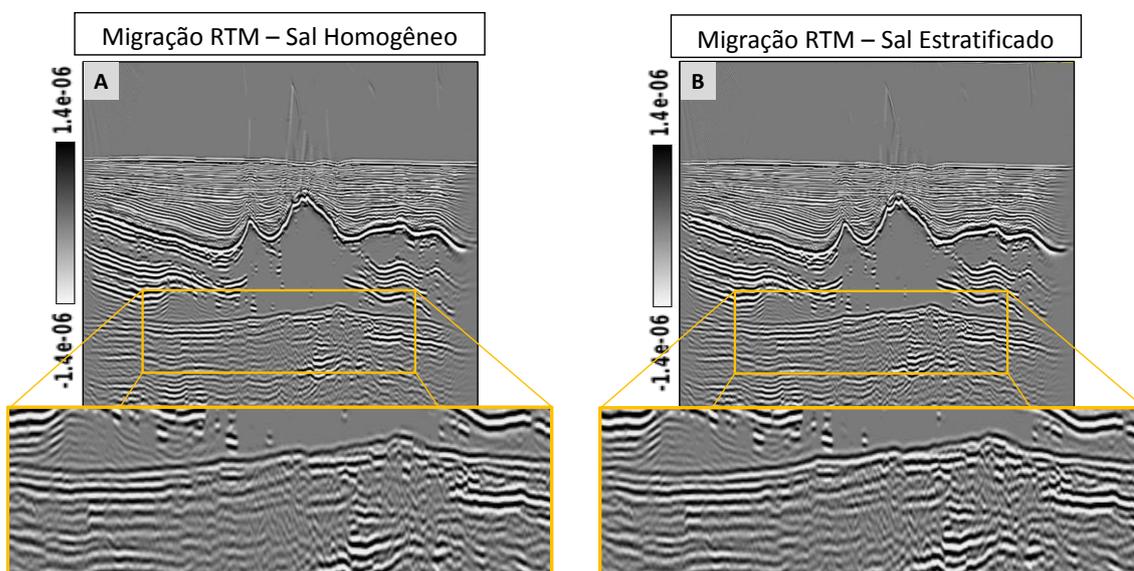


Figura 28: Observação em detalhe das reflexões sísmicas situadas logo abaixo da Base do Sal, resultantes das migrações RTM que consideraram: (A) o sal homogêneo e (B) o sal estratificado. No aspecto comparativo, observa-se uma melhor focalização e contorno dos eventos situados logo abaixo do sal, quando realizada a migração que contempla a presença das estratificações.

É interessante notar que, de maneira geral, os resultados das migrações se equivalem. Entretanto, embora distantes cerca de 2700 m da base da seção evaporítica, os refletores fictícios referentes à camada plano-paralela criada na porção inferior do modelo apresentam uma leve curvatura em todas as seções migradas que utilizaram a velocidade com o sal homogêneo. As Figura 29 e 30 destacam com maior clareza esta observação. O mesmo não ocorre ao utilizar a velocidade com o sal estratificado, por se tratar da mesma velocidade empregada na geração do sismograma sintético propriamente dito.

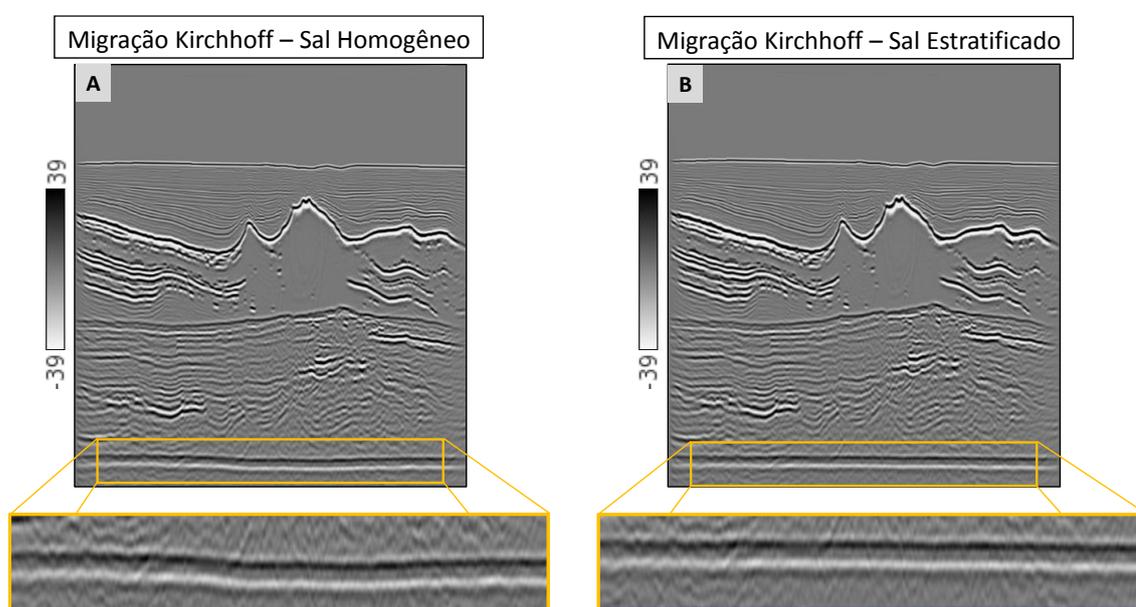


Figura 29: Observação em detalhe do comportamento morfológico dos refletores sísmicos referentes à camada plano-paralela criada na base do sismograma sintético, resultantes das migrações Kirchhoff que consideraram: (A) o sal homogêneo e (B) o sal estratificado. Observar a curvatura da camada apresentada pela migração que considerou a velocidade com o sal homogêneo.

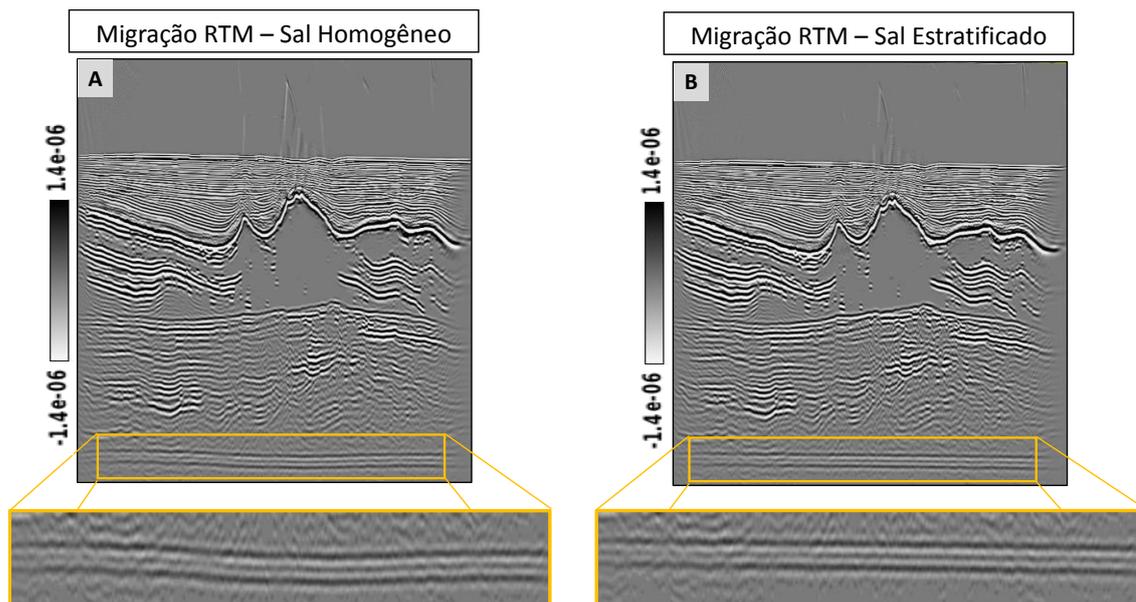


Figura 30: Observação em detalhe do comportamento morfológico dos refletores sísmicos referentes à camada plano-paralela criada na base do sismograma sintético, resultantes das migrações RTM que consideraram: (A) o sal homogêneo e (B) o sal estratificado. Observar a curvatura da camada apresentada pela migração que considerou a velocidade com o sal homogêneo.

Neste contexto, ao comparar o comportamento dos refletores Base do Sal (Figura 27 e 28) e fictício (Figura 29 e 30), resultantes de ambas as técnicas de migração, é possível notar a melhoria na recuperação da frequência das seções migradas pela técnica RTM em relação à Kirchhoff.

Baseando-se nas diferenças acima destacadas e dando sequência a análise quantitativa proposta, o mapeamento dos horizontes sísmicos referentes à Base do Sal e ao refletor fictício foi realizado para cada uma das seções resultantes das migrações Kirchhoff e RTM (Figura 31 e 32). Os horizontes sísmicos propiciam a quantificação das diferenças em profundidade observadas entre as seções migradas com a velocidade estratificada no sal e a que não incluiu a estratificação, além de permitir a avaliação do comportamento da amplitude sísmica em cada refletor, enriquecendo a análise.

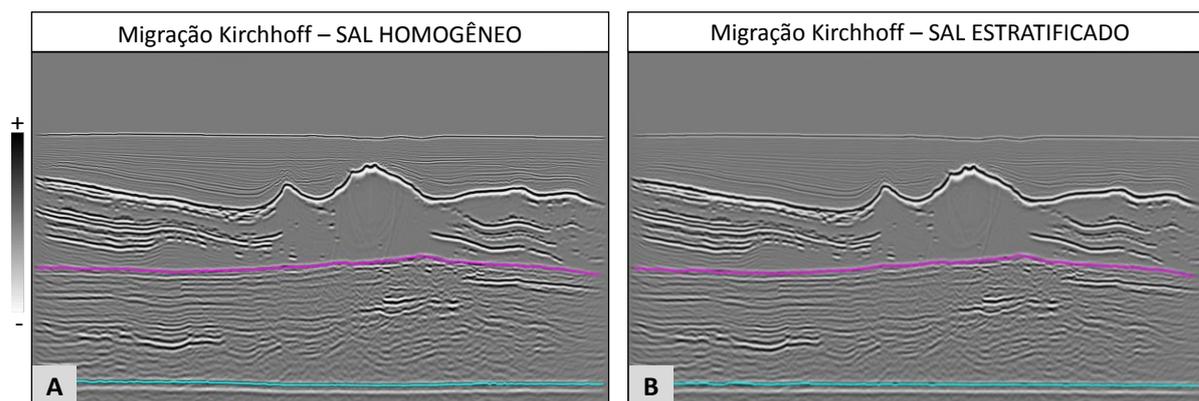


Figura 31: Mapeamento sísmico da Base do Sal (em rosa) e do refletor fictício criado na base do modelo (em azul), referente às seções migradas pelo método Kirchhoff considerando o sal homogêneo (“A”) e estratificado (“B”).

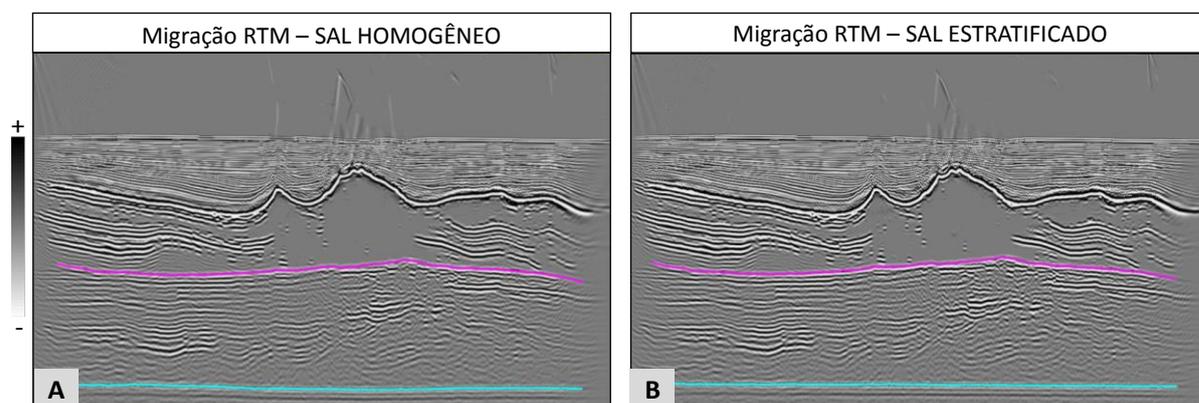


Figura 32: Mapeamento sísmico da Base do Sal (em rosa) e do refletor fictício criado na base do modelo (em azul), referente às seções migradas pelo método RTM considerando o sal homogêneo (“A”) e estratificado (“B”).

As imagens mostram que a forma geral dos refletores foi mantida. No entanto, suas posições no espaço ficam suscetíveis a pequenas variações quando submetidas a diferentes velocidades de migração.

As Figura 33 e 34 destacam as diferenças na dimensão vertical “z” dos horizontes mapeados em cada seção migrada, através de gráficos que relacionam o comprimento das seções na direção “x” *versus* a profundidade, extraídos dos mapeamentos das seções oriundas das migrações Kirchhoff e RTM, respectivamente.

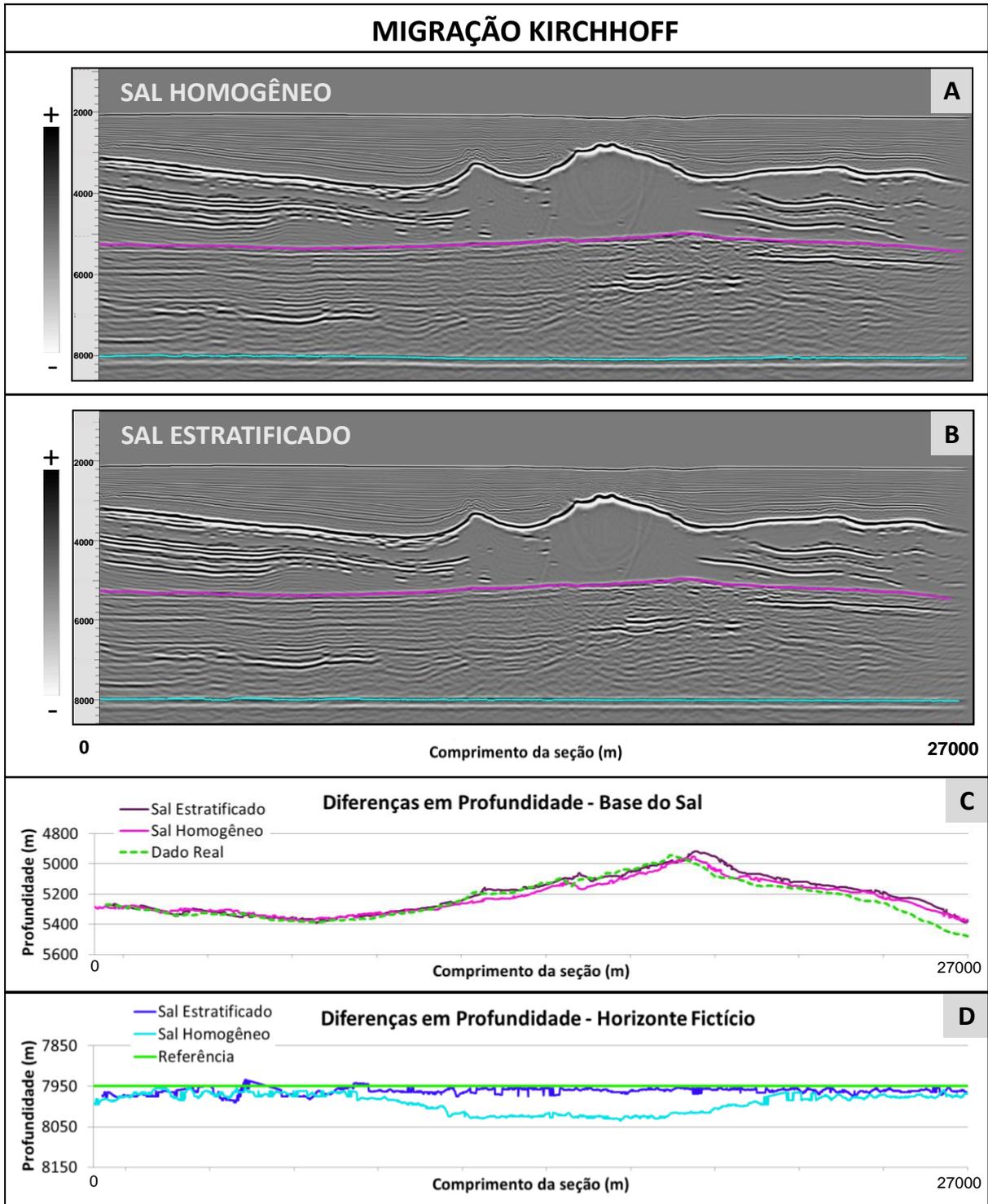


Figura 33: (A) Seção sísmica migrada pelo método Kirchhoff utilizando o modelo de velocidade que considera o sal homogêneo, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (B) Seção sísmica migrada pelo método Kirchhoff utilizando o modelo de velocidade que considera o sal estratificado, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (C) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações Kirchhoff (sal homogêneo e estratificado) *versus* a profundidade, na posição dos mapeamentos realizados na Base do Sal. Em verde, o mapeamento do dado real é utilizado como referência; (D) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações Kirchhoff (sal homogêneo e estratificado) *versus* a profundidade, na posição dos mapeamentos realizados no refletor fictício. Em verde, a profundidade constante estabelecida originalmente para o refletor é utilizada como referência.

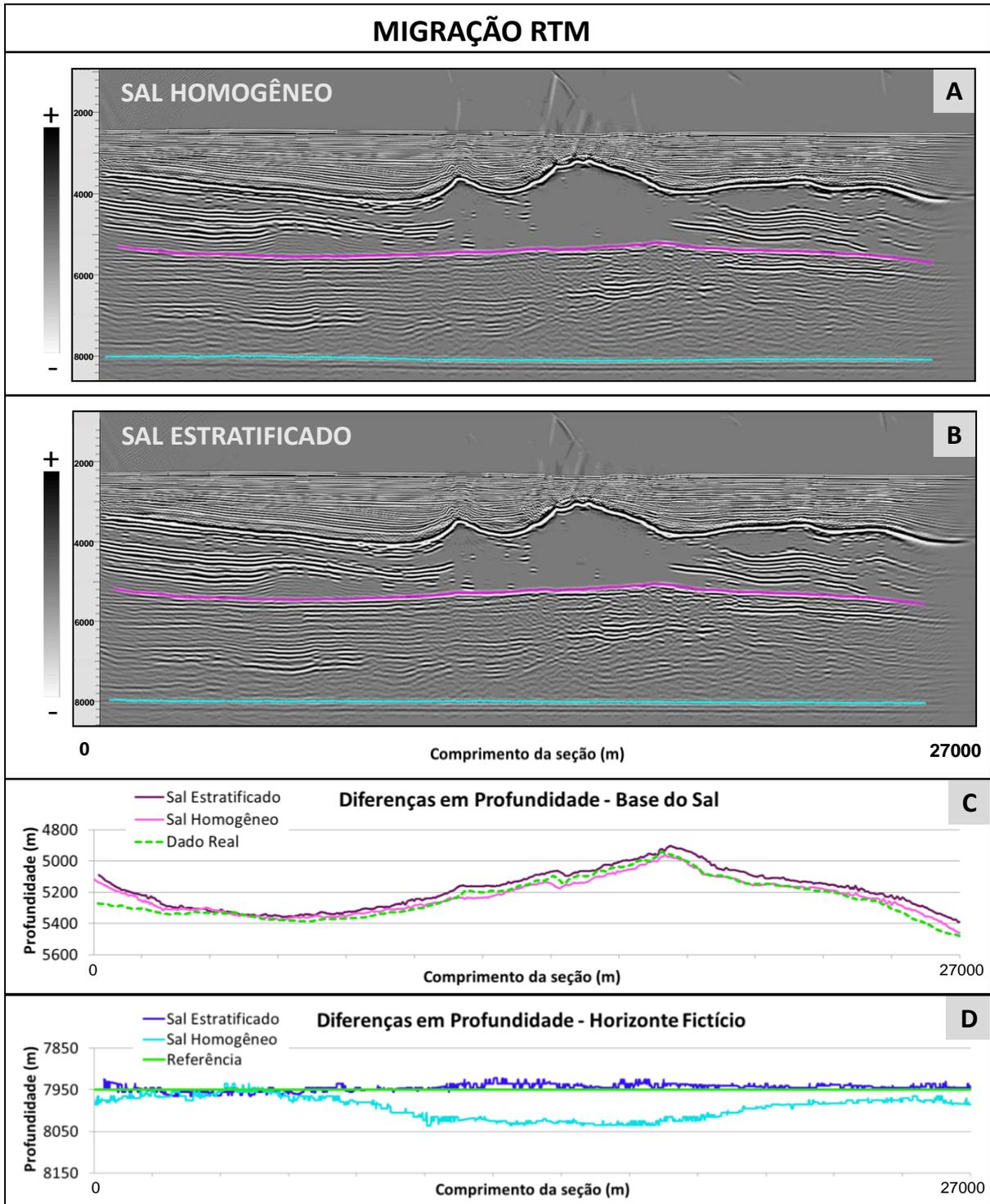


Figura 34: (A) Seção sísmica migrada pelo método RTM utilizando o modelo de velocidade que considera o sal homogêneo, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (B) Seção sísmica migrada pelo método RTM utilizando o modelo de velocidade que considera o sal estratificado, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (C) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações RTM (sal homogêneo e estratificado) *versus* a profundidade, na posição dos mapeamentos realizados na Base do Sal. Em verde, o mapeamento do dado real é utilizado como referência; (D) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações RTM (sal homogêneo e estratificado) *versus* a profundidade, na posição dos mapeamentos realizados no refletor fictício. Em verde, a profundidade constante estabelecida originalmente para o refletor é utilizada como referência.

Ambas as imagens (Figura 33 e 34) revelam a tendência a um aumento da profundidade dos refletores gerados através do modelo com o sal estratificado, em todas as seções migradas, o que se justifica pela inclusão apenas dos sais de alta velocidade no modelo estratificado, não tendo sido contempladas as finas laminações dos sais de baixa velocidade. Neste ponto, vale lembrar que as estratificações inseridas ao modelo de velocidade foram originadas a partir de atributos instantâneos oriundos da amplitude sísmica, que por sua vez, em função do modelo convolucional, dificulta a identificação dos sais de baixa velocidade por critérios de resolução, conforme ressaltado pela bibliografia apresentada nos capítulos anteriores.

No que diz respeito à quantificação das diferenças em profundidade dos refletores obtidos pelo método Kirchhoff utilizando os diferentes modelos de velocidades, os gráficos da Figura 33 revelam variações de até 104 metros para a Base do Sal, e até 75 metros para o refletor fictício. Esta mesma análise foi realizada para os refletores resultantes da técnica RTM (Figura 34), cujas diferenças em profundidade alcançaram um máximo de 108 metros na Base do Sal e de 110 metros no refletor fictício. Tal constatação sugere o estabelecimento de cenários para estudos de incertezas, contemplando posicionamentos em profundidade.

As linhas verdes presentes nos gráficos das Figura 33 e 34 apresentam-se como uma referência, que correspondem às profundidades do horizonte Base do Sal referente ao dado sísmico real, e à profundidade (constante, neste caso) do refletor fictício original criado a partir do modelo de impedância acústica. As variações na Base do Sal de cada um dos modelos gerados pela migração Kirchhoff em relação ao dado real alcançaram 116 m para o dado que considerou o sal homogêneo e 139 m para o dado que considerou o sal estratificado. Já as diferenças entre a Base do Sal do dado real e dos modelos gerados pela migração RTM chegaram a 145 m na migração que considerou o sal homogêneo, e a 183 m na que considerou o sal estratificado. Esta mesma análise realizada para o refletor fictício em sua profundidade original, em relação à técnica de migração Kirchhoff, apresentou diferenças de até 85 m para o dado que considerou o sal homogêneo e de até 40 m para o dado que considerou o sal estratificado. Com a técnica de migração RTM, este mesmo refletor alcançou variações de 87 m para o dado que considerou o sal homogêneo e de 28 m para o dado que considerou o sal estratificado.

De acordo com os valores acima mencionados, no que diz respeito às flutuações em profundidade na Base do Sal, embora tenha sido observado efeito de borda, ambas as técnicas de migração (Kirchhoff e RTM) apresentaram maiores diferenças em relação ao dado real quando utilizado o modelo que considera o sal estratificado, tendo a técnica RTM se apresentado mais sensível neste aspecto. Este resultado já era esperado, uma vez que o dado real utilizado como referência foi gerado a partir do modelo de velocidades obtido da tomografia sísmica, resultando em velocidades tipicamente relacionadas à halita (de 4500 a 4700 m/s), que por sua vez, correspondem, neste estudo, ao modelo de velocidades denominado como “sal homogêneo” utilizado nos processos de migração descritos.

Já na comparação das diferenças na Base do Sal entre as migrações obtidas pelos diferentes modelos de velocidades (sal homogêneo e sal estratificado), os dois métodos de migração apresentaram variações similares em profundidade, tendo a migração RTM indicado diferenças ligeiramente mais expressivas.

É interessante notar que as maiores flutuações em profundidade dos refletores fictícios, independente da técnica adotada, se posicionam mais profundamente na direção das regiões abaixo do sal onde não existem estratificações aparentes. Este fato pode estar relacionado, dentre outros, a dois aspectos muito discutidos pelos trabalhos consultados: a presença de estratificações sub-sísmicas ou em ângulo tal que não permite a construção das mesmas pelos processos de iluminação ou mesmo de migração; ou a possível existência de sais de baixa velocidade misturados à halita, o que faria com que, na média, o valor da velocidade intervalar correta fosse um pouco menor do que a que foi considerada, implicando, diretamente, num posicionamento pouco mais acima do que foi obtido no caso do refletor fictício. Entretanto, este assunto não foi diretamente tratado neste trabalho, cabendo a investigações futuras esta análise.

As oscilações no refletor fictício demonstraram, ainda, maiores variações em relação a profundidade original, denominada como “referência”, ao utilizar o modelo que considera o sal homogêneo, tendo a técnica RTM novamente se apresentado mais sensível neste aspecto. Conforme destacado anteriormente (Figura 29 e 30), a curvatura apresentada neste refletor ao utilizar o sal homogêneo em ambas as técnicas de migração se deve ao fato de que trata-se de uma velocidade distinta daquela empregada na geração do sismograma sintético. Neste contexto, pode-se

entender a velocidade que considera o sal estratificado como a velocidade “correta”, ou seja, a que melhor representou a geometria sísmica plana característica da natureza deste refletor.

No que se refere às diferenças em profundidade obtidas na utilização dos diferentes modelos de velocidades, o algoritmo de migração RTM apresentou variações mais expressivas no refletor fictício quando comparado à técnica de migração Kirchhoff.

Desta forma, comportamentos similares foram observados nas flutuações de ambos os horizontes analisados pelas diferentes técnicas e migração, apontando a maior sensibilidade do algoritmo RTM no posicionamento em profundidade quando comparado ao algoritmo Kirchhoff. Tal sensibilidade relaciona-se, também, à utilização dos diferentes modelos de velocidades, tendo os resultados obtidos pela migração RTM apresentado maiores variações entre si do que os obtidos pela migração Kirchhoff.

Vale ressaltar, ainda, que a discrepância das diferenças observadas entre os modelos com sal homogêneo e estratificado, considerando as flutuações obtidas entre os horizontes mapeados e os horizontes considerados como referência (“dado real” na Base do Sal e “referência” no refletor fictício), foi maior no refletor fictício do que na Base do Sal. Isto denota o efeito cumulativo da influência da velocidade definida na seção evaporítica com a profundidade dos eventos que se situam abaixo dela. Em outras palavras, quanto mais profundo o evento na seção Pré-Sal, maior será o impacto das velocidades do sal no que se refere ao seu posicionamento em profundidade.

Em uma outra abordagem, a fim de melhor avaliar as diferenças observadas na amplitude sísmica das seções migradas resultantes, as Figura 35 e 36 destacam as variações de amplitude obtidas com a utilização das diferentes velocidades de migração para as técnicas Kirchhoff e RTM, respectivamente, através de gráficos extraindo a amplitude sísmica normalizada nas posições dos mapeamentos realizados na Base do Sal e no refletor fictício situado na base do modelo.

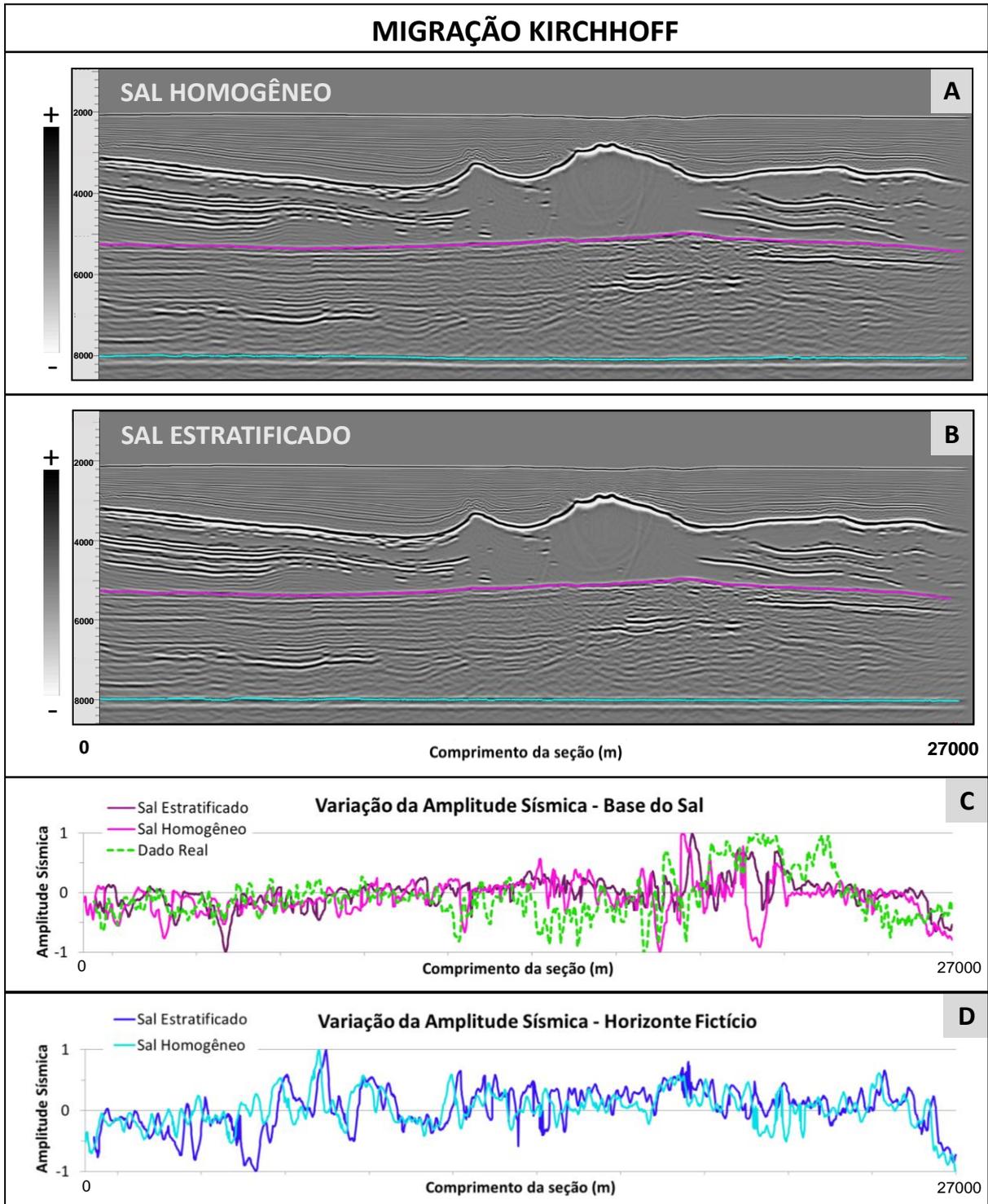


Figura 35: (A) Seção sísmica migrada pelo método Kirchhoff utilizando o modelo de velocidade que considera o sal homogêneo, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (B) Seção sísmica migrada pelo método Kirchhoff utilizando o modelo de velocidade que considera o sal estratificado, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (C) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações Kirchhoff (sal homogêneo e estratificado) *versus* a amplitude sísmica normalizada, extraída na posição dos mapeamentos realizados na Base do Sal. Em verde, a amplitude obtida do mapeamento do dado real é utilizada como referência; (D) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações Kirchhoff (sal homogêneo e estratificado) *versus* a amplitude sísmica normalizada, na posição dos mapeamentos realizados no refletor fictício.

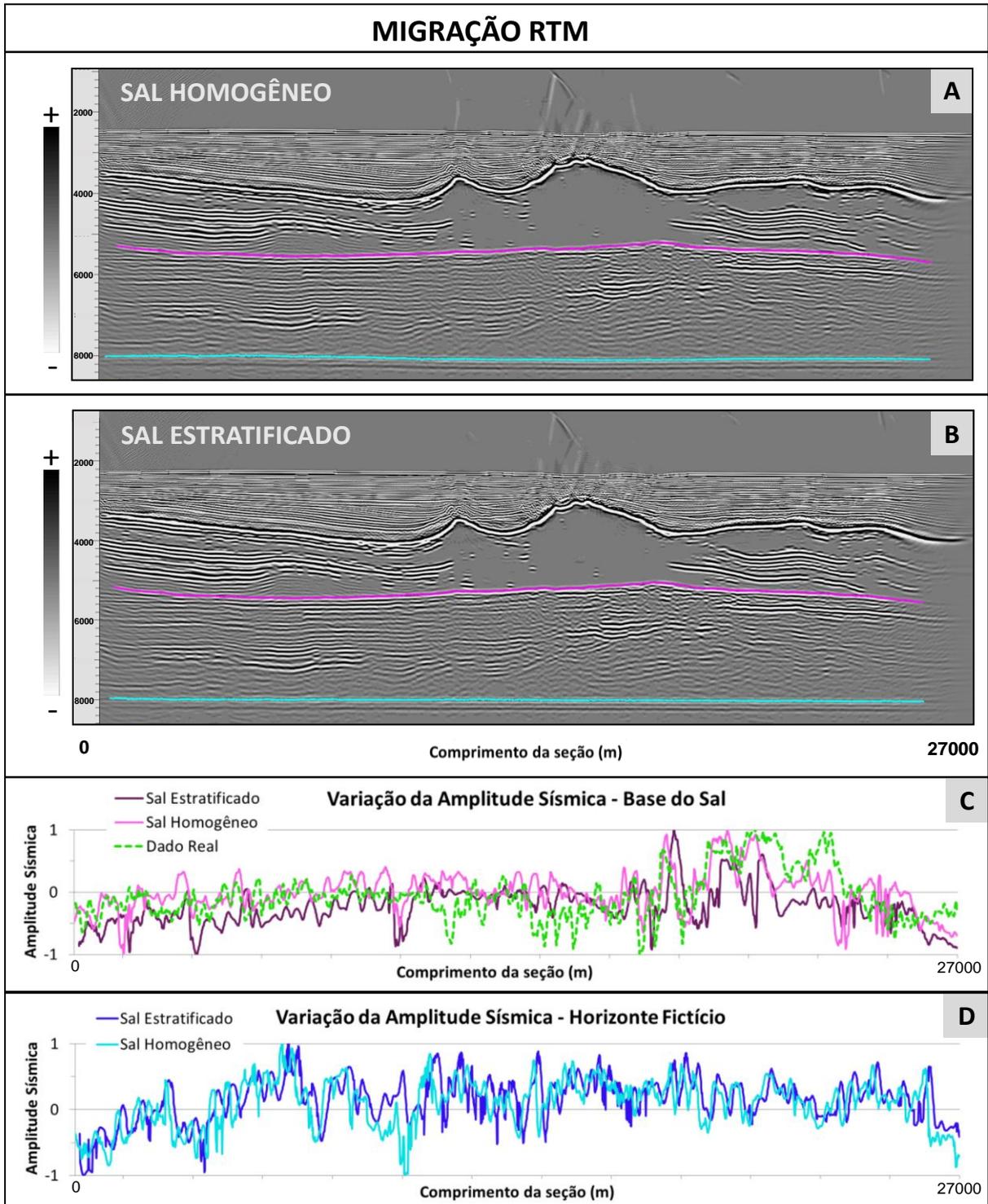


Figura 36: (A) Seção sísmica migrada pelo método RTM utilizando o modelo de velocidade que considera o sal homogêneo, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (B) Seção sísmica migrada pelo método RTM utilizando o modelo de velocidade que considera o sal estratificado, com o mapeamento dos horizontes Base do Sal e refletor fictício; (C) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações RTM (sal homogêneo e estratificado) *versus* a amplitude sísmica normalizada, extraída na posição dos mapeamentos realizados na Base do Sal. Em verde, a amplitude obtida do mapeamento do dado real é utilizada como referência; (D) Gráfico obtido da relação entre o comprimento das seções sísmicas resultantes das migrações RTM (sal homogêneo e estratificado) *versus* a amplitude sísmica normalizada, na posição dos mapeamentos realizados no refletor fictício.

Ao comparar as imagens, é possível observar uma maior oscilação nos valores de amplitude sísmica na Base do Sal ao se utilizar a técnica RTM quando comparada à técnica Kirchhoff. A melhoria na definição dos refletores pode ser mais claramente observada no gráfico referente à Base do Sal, onde as amplitudes resultantes da migração RTM que considera o sal estratificado tendem a se distanciar mais do *zero-crossing*, revelando maior nitidez na imagem sísmica em relação àquela que considera o sal homogêneo (Figura 36c).

Já as amplitudes da Base do Sal extraídas das seções migradas pela técnica Kirchhoff (Figura 35c) não apresentaram diferenças significativas na utilização dos diferentes modelos de velocidade.

Do mesmo modo, as amplitudes capturadas no refletor fictício apresentaram comportamentos similares, não revelando uma sensibilidade expressiva na utilização das diferentes velocidades no sal (Figura 35d e Figura 36d).

Finalmente, diante das constatações expostas, nota-se que, em ambos os métodos de migração, variações nas velocidades empregadas podem causar, principalmente, distorções no posicionamento das superfícies de reflexão. Diferenças consideráveis (da ordem de 100 m) foram constatadas entre os refletores, quando migrados por diferentes modelos iniciais de velocidades, independente da técnica de migração utilizada. Isto reforça a relevância do rigor geológico na definição do modelo de velocidades iniciais para quaisquer métodos de migração empregados.

Entretanto, a técnica RTM sugere uma maior sensibilidade a erros de velocidades, tendo apresentado maior impacto nas diferenças em profundidade das seções resultantes (Figura 34), além de uma melhor focalização e contorno dos eventos da seção Pré-Sal (Figura 28 e 36c), quando comparada à técnica Kirchhoff. A utilização do refletor fictício como controle de qualidade final revelou que a migração RTM associada ao modelo de velocidades com o sal estratificado foi a que apresentou maior acurácia em relação à profundidade original constante utilizada como referência (Figura 34d).

Tais resultados confirmam que a utilização de modelos mais realistas caracterizados por bruscas variações laterais de velocidades, como o modelo com o sal estratificado desenvolvido neste estudo, é especialmente adequada ao caso da técnica de migração RTM, principalmente quando se trata de áreas com geologia complexa, como no caso da presença da seção evaporítica na Bacia de Santos.

8 CONCLUSÕES

De modo geral, a incorporação de feições geológicas complexas nos modelos de velocidades nem sempre é uma tarefa simples de se realizar. No caso da seção evaporítica da Bacia de Santos, embora os dados sísmicos e de poços mostrem que a mesma possui estratificações internas, tradicionalmente, os modelos de velocidades consideram-na como uma camada relativamente homogênea e isotrópica para fins de imageamento, tanto em tempo como em profundidade.

Segundo Bunting (2014), a aplicação de modelos anisotrópicos para a seção evaporítica da Bacia de Santos não seria relevante, pois a contribuição mineralógica de evaporitos mais ou menos densos que a halita (anidrita e carnalita, respectivamente, por exemplo) não influenciariam muito na velocidade intervalar média desta camada por apresentarem percentual volumétrico baixo, quando comparado com a halita. Desta forma, as heterogeneidades da sequência evaporítica poderiam ser representadas por abordagens mais simplistas, desde que retornem respostas mais representativas da imagem sísmica.

A metodologia aqui apresentada para a construção de modelos de velocidades mostrou-se eficaz na representação dos estratos presentes na sequência salina, tendo sido capaz de descrever, mais precisamente, a distribuição das velocidades intervalares que, sustentadas por análises de dados de poços, forneceram maior robustez aos resultados dos métodos de migração pré-empilhamento em profundidade.

Conforme citado ao longo do trabalho, a metodologia de incorporação das estratificações vem sendo adaptada por diversos autores, que utilizam variados atributos sísmicos na extrapolação das velocidades intervalares (pseudo-impedância, impedância acústica, amplitude sísmica, atributos instantâneos, fácies sísmicas, etc). O atributo de diferenciação (primeira derivada), adicionado à rotação de fase em 180° utilizado neste estudo mostrou-se eficaz, gerando resultados confiáveis na definição das estratificações, tanto em relação ao posicionamento dos estratos em si, à melhoria da resolução ou, ainda, quanto aos próprios valores de velocidade atribuídos, balizados por dados de poços. A qualidade do dado resultante refletiu-se, também, no modelo de densidade obtido a partir da velocidade com o sal estratificado, cujo comportamento das heterogeneidades apresentou similar concordância com perfis de

poços, possibilitando a geração de sismogramas sintéticos robustos e bastante realistas na representação da complexa geologia existente na área de estudo.

De maneira geral, as seções migradas por ambas as técnicas de migração e utilizando os modelos de velocidades propostos geraram imagens de boa qualidade e apresentaram coerência com as informações geológicas da região. Entretanto, em maior detalhe, os resultados mostraram que o impacto da utilização de um modelo inicial geologicamente mais refinado na migração sísmica independe da técnica.

Ainda assim, dentre os diferentes métodos de migração aplicados, dada a sua robustez e maior adequação às bruscas variações laterais de velocidade impostas pela complexa geologia salífera, a técnica RTM mostrou-se mais sensível ao refinamento da velocidade no sal, tendo apresentado maior impacto no posicionamento em profundidade, assim como na continuidade e contorno dos refletores sísmicos da seção Pré-Sal.

Vale ressaltar que a utilização do modelo de velocidades suavizado na execução da técnica RTM objetivou aplicar o mesmo modelo gerado para a realização da técnica Kirchhoff, o qual resultou da suavização do modelo de vagarosidades. Desta forma, sugere-se que a aplicação do modelo de velocidades com o sal estratificado sem suavização pela técnica RTM pode gerar resultados ainda mais refinados.

O mapeamento dos horizontes sísmicos realizados nas seções migradas possibilitaram uma avaliação detalhada das possíveis influências que as diferentes velocidades da seção evaporítica exercem na representação em profundidade dos eventos sísmicos dos reservatórios da seção Pré-Sal.

O horizonte fictício criado na base do sismograma sintético serviu como controle de qualidade, principalmente na avaliação do impacto promovido nas flutuações em profundidade ao se utilizar uma velocidade na seção evaporítica distinta daquela que gerou o próprio modelo. No entanto, recomenda-se, em investigações futuras, o reposicionamento do refletor em uma profundidade menor da que foi estabelecida, possibilitando fornecer resultados ainda mais condizentes com a influência sofrida por reservatórios do Pré-Sal e dando maior robustez à análise.

Embora tenham sido obtidos resultados expressivos em termos de posicionamento em profundidade nas seções migradas, vale ressaltar que ambos os modelos de velocidades utilizados como *input* nas migrações reproduziam

profundidades idênticas no posicionamento dos horizontes referentes à Base do Sal. As flutuações em profundidade analisadas referiram-se, apenas, aos processos de migração utilizados, não tendo sido contemplada a etapa de conversão tempo-profundidade utilizando o “novo” modelo de velocidades (sal estratificado). Com esta observação, é recomendável realizar a fase preliminar do fluxo de trabalho proposto (equivalente à construção do modelo de velocidades estratificado) no domínio do tempo. Uma posterior conversão tempo-profundidade através do modelo de velocidades com o sal estratificado forneceria uma acurácia ainda maior na representação da influência que essas velocidades exercem nas respostas sísmicas em profundidade.

Uma sugestão para trabalhos futuros seria investigar, através da presença de uma superfície plana de reflexão sísmica na seção Pré-Sal (conforme o refletor fictício apresentado neste trabalho), as flutuações em profundidade observadas no refletor e sua relação com as velocidades atribuídas às porções estratificadas e não-estratificadas da seção evaporítica.

Todavia, as oscilações em profundidade na seção Pré-Sal verificadas, neste estudo, em função dos variados cenários de velocidades sísmicas no sal, possuem relevância considerável nas estimativas de reservas, podendo impactar diretamente no cálculo de volume de óleo *in place* (VOIP), o que sempre se apresenta de forma bastante crítica para os reservatórios da seção Pré-Sal (principalmente nas fases iniciais dos projetos de desenvolvimento da produção, onde existem escassas informações de poços para calibrar os modelos, gerando a necessidade de se trabalhar com cenários mais abrangentes).

Outra sugestão de trabalho futuro seria aplicar a técnica de migração RTM de forma iterativa, o que poderá gerar ganhos significativos ao se utilizar o modelo de velocidades com o sal estratificado na geração de fontes secundárias. Imprimir recursividade ao método possibilitará a obtenção de resultados ainda melhores.

Vale ressaltar, ainda, que a possibilidade de distribuição das propriedades, volumetricamente, a partir do modelo de velocidades com o sal estratificado revela a importância da incorporação das estratificações também para estimativas de propriedades geomecânicas para a produção dos reservatórios da seção Pré-Sal, análises de incertezas e estudos de inversão sísmica podendo, inclusive, ser utilizado como “condições de contorno” para novos processos tomográficos durante as etapas

de construção/atualização dos modelos de velocidades, visando suas migrações finais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, P.J., MAUL, A., FALCÃO, L., GONZÁLEZ, M. & GONZÁLEZ, G., 2015. (14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 2015) – Rio de Janeiro – RJ.
- BAKULIN, A., LIU, Y & ZDRAVEVA, O., 2010. Building Geologically Plausible Anisotropic Depth Models Using Borehole Data and Horizon Guided Interpolation. Society of Exploration Geophysicists. Annual Meeting, Denver-CO, USA
- BAYSAL, E., KOSLOFF, D.D. & SHERWOOD, J.W.C., 1983. Reverse Time-Migration. *Geophysics*, v. 48, pp. 1514-1524.
- BIONDI, B. L. 2006. 3D Seismic Imaging. Society of Exploration Geophysicists. Series: Investigations in Geophysics.
- BORDING, R.P., LINES, L.R., LINES, L.R., 1997. Seismic Modeling and Imaging with the Complete Wave Equation, Course Notes Series, n. 8, Society of Exploration Geophysicists, Oklahoma, USA.
- BULCÃO, A., 2004. Modelagem e Migração Reversa no Tempo empregando operadores elásticos e acústicos. Tese (Doutorado) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- BULHÕES, F.C., AMORIM, G.A.S., BRUNO, V.L.V.R., FERREIRA, G.D., PEREIRA, E.S. & CASTRO, R.F., 2014. Fluxo para Construção do Modelo de Velocidade Regional da Bacia de Campos. VI Simpósio Brasileiro de Geofísica. Porto Alegre – RS.
- BULHÕES, F.C., LYRIO, J.C.S.O., AMORIM, G.A.S., FERREIRA, G.D., PEREIRA, E.S., CASTRO, R.F. & FORMENTO, C.D.M.R. 2015. Geostatistical 3D Density Modeling: Integrating Seismic Velocity and Well Logs. 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 3-6 August 2015: pp. 272-277. doi: 10.1190/sbgf2015-054
- BUNTING, T. 2014. Evaluation of Salt Anisotropy in the Santos Basin, offshore Brazil. International Workshop on Seismic Anisotropy, 16 IWSA. Natal, Brasil.
- CAINELLI, C. & MOHRIAK, W. U. 1999. Some remarks on the evolution of sedimentary basins along the eastern Brazilian continental margin. *Episodes*, 22, 206–216.
- CARDOSO, C.G., 2010. Migration-Velocity Analysis Using Image-Space Generalized Wavefields, Ph.D. Dissertation, Stanford University, USA.
- CHANG, H. K.; ASSINE, M. L.; CORRÊA, F. S.; TINEN, J. T.; VIDAL, A. C.; KOIKE, L. 2008. Sistemas Petrolíferos e Modelos de Acumulação de Hidrocarbonetos na Bacia de Santos. *Revista Brasileira de Geociências*, 38 (suplemento), 2008, pp. 29-46.
- COBBOLD, P.R. & SZATMARI, P. 1991. Radial gravitational gliding on passive margins. *Tectonophysics*, 188, 249–289.
- COELHO, A.A. & SUSLICK, S.B., 2005. Um Indicador do Valor da Informação Sísmica em Projetos de Exploração de Petróleo. 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.

- CRAIN, E.R., 2001. Crain's Petrophysical Handbook. (<http://www.spec2000.net>)
- DAVISON, I., ANDERSON, L., NUTTALL, P., 2012. Salt deposition, loading and gravity drainage in the Campos and Santos salt basin. In: Alsop, G.I., Archer, S.G., Hartley, A.J., Grant, N.T., Hodgkinson, R. (Eds.), Salt Tectonics, Sediments and Prospectivity, Geological Society of London Special Publications, vol. 363, pp. 159e174.
- DE FARIA, E.L., 1986. Migração antes do empilhamento utilizando propagação reversa no tempo. Dissertação de Mestrado, CPGG - Universidade Federal da Bahia. Salvador – BA.
- DEMERCIAN, L. S., SZATMARI, P. & COBBOLD, P. R. 1993. Style and pattern of salt diapirs due to thin-skinned gravitational gliding, Campos and Santos basins, offshore Brazil. *Tectonophysics*, 228, 393–433.
- DIAS-BRITO, D. 1982. Evolução paleoecológica da Bacia de Campos durante a deposição dos calcilitos, margas e folhelhos da Formação Macaé. *Boletim Técnico da Petrobras*, 25, 84–97.
- DIAS-BRITO, D. 1987. A Bacia de Campos no Mesocretáceo: uma contribuição à paleoceanografia do Atlântico Sul primitivo. *Revista Brasileira de Geociências*, 17, 162–167.
- DIX, C.H., 1955. Seismic Velocities from Surface Measurements. *Geophysics*, 20, 68-86.
- DUBRULE, O., 2003. Geostatistics for Seismic Data Integration in Earth Models. DISC SEG-EAGE Distinguished Short Course Series. No 6.
- FALCÃO, L., MAUL, A., GOBATTO, F., GONZÁLEZ, G. & GONZÁLEZ, M., 2016. Results of Stratification Incorporation within Evaporitic Section: Combining Velocities and Seismic Attributes. *RBGf – Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 34(3).
- FETTER, M., DALTRO, D., LAFFERRIERE, F. & SOUZA JR., O. G., 2004. Filtragem de Velocidades Intervalares Através de Krigagem Fatorial. SIMGEF (Simpósio de Geofísica da Petrobras). Aracajú – SE.
- FIDUK, J.C., ROWAN, M.G., 2012. Analysis of folding and deformation within layered evaporites in Blocks BM-S-8 & -9, Santos Basin, Brazil. In: Alsop, G.I., Archer, S.G., Hartley, A.J., Grant, N.T., Hodgkinson, R. (Eds.), Salt Tectonics, Sediments and Prospectivity, Geological Society of London Special Publications, vol. 363, pp. 471e487.
- FREITAS, J. T. R. 2006. Ciclos deposicionais evaporíticos da Bacia de Santos: uma análise cicloestratigráfica a partir de dados de 2 poços e de traços de sísmica. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- FRENCH, W.S. 1974. Two-dimensional and three-dimensional migration of model-experiment reflection profiles. *Geophysics*, 39: 265-277.
- FRENCH, W.S. 1975. Computer migration of oblique seismic reflection profiles. *Geophysics*, 40: 961-980.

- GAMBOA, L. A. P.; MACHADO, M. A. P; SILVEIRA, D. P.; FREITAS, J. T. R., SILVA, S. R. P. 2008. Evaporitos estratificados no Atlântico Sul. In: Mohriak, W., Szatmari, P. e Anjos, S. M. C. (eds). Sal- Geologia e Tectônica: exemplos de bacias brasileiras. Petrobras, p. 340-359.
- GAMBOA, L. A. P. & RABINOWITZ, P. D. 1984. The evolution of the Rio Grande Rise in the Southwest Atlantic Ocean. *Marine Geology*, 58: 35-58.
- GARDNER, G.; GARDNER, L.; GREGORY, A., 1974. Formation velocity and density the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, v. 39, p. 770.
- GAZDAG, J. & SGUAZZERO, P., 1984. Migration of seismic data by phase shift plus interpolation. *Geophysics*, v. 49, p. 124-131.
- GAZDAG, J. & SGUAZZERO, P., 1984. Migration of Seismic Data. *Proceedings of the IEEE*, v. 72, p. 1302-1315.
- GOBATTO, F., MAUL, A., FALCÃO, L., TEIXEIRA, L., BOECHAT, J.B., GONZÁLEZ, M. & GONZÁLEZ, G., 2016. Refining Velocity Model within the Salt Section in Santos Basin: an Innovative Workflow to include the Existing Stratification and its Considerations. (Society of Exploration Geophysicist – 2016) – Dallas, TX.
- GONZÁLEZ, M., GOBATTO, F., MAUL, A., FALCÃO, L., GONZÁLEZ, G., OLIVEIRA, L., MENEGUIM, T. & AMARAL, P.J., 2016. Proposed Workflow to Incorporate Stratification within Salt Section using Velocity and Seismic Attributes. Third EAGE/SBGf Workshop on Quantitative Seismic Interpretation of Lacustrine Carbonates. Rio de Janeiro – RJ.
- GONZÁLEZ, G., MAUL, A., JARDIM, F., FALCÃO, L., GOBATTO, F. & GONZÁLEZ, M., 2017. Estimando Incertidumbres Sobre la Amplitud Sísmica para un Yacimiento del Presal A Través de Mapas de Iluminación (Mapas de Hit). *Geociencias Aplicadas Latinoamericanas* (pre-print).
- GRAY, S. H., ETGEN, J., DELLINGER, J. & WHITMORE, D. 2001. Seismic migration problems and solutions. *GEOPHYSICS*, 66(5), 1622-1640. doi: 10.1190/1.1487107
- GUERRA, M.C.M., UNDERHILL, J.R., 2012. Role of halokinesis in controlling structural styles and sediment dispersal in the Santos Basin, offshore Brazil. In: Alsop, G.I., Archer, S.G., Hartley, A.J., Grant, N.T., Hodgkinson, R. (Eds.), *Salt Tectonics, Sediments and Prospectivity*, Geological Society of London Special Publications, vol. 363, pp. 159e174.
- GUO, N. & FAGIN, S., 2002. Becoming Effective Velocity-Model Builders and Depth Imagers, Part 2 – The Basics of Velocity-Model Building, Examples and Discussions. *The Leading Edge*, 21(12), 1210-1216. doi: 10.1190/1.1536136
- HUBRAL, P. 1977. Some ray theoretical aspects. *Geophysical Prospecting*, v. 25, n. 4, p. 738–745.
- JACKSON, C.A.-L., JACKSON, M.P.A., HUDEC, M.R., RODRIGUEZ, C.R., 2014. Internal structure, kinematics, and growth of a salt wall: insights from 3D seismic reflection data. *Geology* 42, 307e310.
- JACKSON, C.A.-L., JACKSON, M.P.A., HUDEC, M.R., RODRIGUEZ, C.R., 2015. Enigmatic Structures Within Salt Walls of the Santos Basin – Part 1: Geometry

- and Kinematics from 3D Seismic Reflection and Well Data. *Journal of Structural Geology*, 75 (2015) 135-162.
- JARDIM, F., MAUL, A., FALCÃO, L., & GONZÁLEZ, G., 2015. Estimating Amplitude Uncertainties through Illumination Studies for a Pre-Salt Reservoir. (14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society) – Rio de Janeiro – RJ.
- JUSTEN, J. C. R., VARGAS, E. A., ALVES, I. & SOUZA, A. L. S., 2013 – Análise das propriedades elásticas de rochas e minerais evaporíticos. 13th International Congress of Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil, 2013.
- LEVIN, S. 1984. Principle of Reverse-Time Migration. *Geophysics*, v.49, pp. 581- 583.
- LOEWENTHAL, D. & MUFTI, J.R., 1983. Reversed time migration in spatial frequency domain. *Geophysics*, v.48, p. 627- 635.
- MAUL, A., FEILHABER, M. & GONÇALVES, P.A., 2005. Modelagem Geológica de Velocidades Sísmicas Utilizando o GoCad. (Apostila Interna Petrobras).
- MAUL, A., JARDIM, F., FALCÃO, L. & GONZÁLEZ, G., 2015. Observing Amplitude Uncertainties for a Pre-Salt Reservoir Using Illumination Study (Hit-Maps). (77th EAGE Conference & Exhibition 2015) – Madrid, Espanha.
- MAUL, A., L. FALCÃO, F. GOBATO, V. NOVELLINO, F. JARDIM, L. OLIVEIRA, T. MENEGUIM, P. J. AMARAL, F. BORGES, L. TEIXEIRA, R. C. MONTEIRO, G. GONZÁLEZ & M. GONZÁLEZ, 2016. Incorporação de estratificações dentro da seção evaporítica utilizando velocidades e atributos sísmicos: IGP-152, Informe Geofísico da Petrobras – Publicação Interna.
- MAVKO, G; MUKERJI, T. E DVORKIN, J. 2003. *The Rock Physics Handbook: tools for seismic analysis of porous media*. Cambridge University Press. 522p.
- MCMECHAN, G.A. 1983. Migration by Extrapolation of Time-Dependent Boundary Values. *Geophysical Prospecting*, 31,413-420.
- MENEGUIM, T., MENDES, S.C., MAUL, A., FALCÃO, L., GONZÁLEZ, M. & GONZÁLEZ, G., 2015. Combining Seismic Facies Analysis and Well Information to Guide New Interval Velocity Models for a Pre-Salt Study, Santos Basin, Brazil. (14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 2015) – Rio de Janeiro – RJ.
- MENEGUIM, T., MENDES, S.C., MAUL, A., FALCÃO, L. & GONZÁLEZ, M., 2016. Refinamento do Modelo de Reservatórios a partir da Caracterização das Estratificações Salíferas Baseada em Atributos Sísmicos, Polo Pré-Sal da Bacia de Santos. (48º Congresso Brasileiro de Geologia). Porto Alegre – RS.
- MOHRIAK, W.U., NEMCOK, M., ENCISO, G., 2008. South Atlantic divergent margin evolution: rift-border uplift and salt tectonics in the basins of SE Brazil. In: Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., Brito Neves, B.B., de Wit, M.J. (Eds.), *West Gondwana Pre-Cenozoic Correlations across the South Atlantic Region*, Geological Society of London Special Publications, vol. 294, pp. 365e398.
- MOREIRA, J. L. P. & CARMINATTI, M. 2004. Sistemas deposicionais de talude e de bacia no Eoceno da bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 12, 73–87.

- MOREIRA, J. L. P., MADEIRA, C. V., GIL, J. A., MACHADO, A. P. M. 2007. Bacia de Santos. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 531-549.
- OLIVEIRA, L.C., FALCÃO, L., MAUL, A., ROSSETO, J.A., GONZÁLEZ, M. & GONZÁLEZ, G., 2015. Geological Velocity Approach in Order to Obtain a Detailed Velocity Model for the Evaporitic Section, Santos Basin. (14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 2015) – Rio de Janeiro – RJ.
- RITTER, G.L.S., 2011. Migração e Modelagem de Dados Sísmicos de Ondas Planas por Feixes Gaussianos. Tese de Doutorado, 110p. COPPE/UFRJ – Engenharia Civil). Rio de Janeiro – RJ – Brasil.
- ROBEIN, E., 2003. Velocities, Time-Imaging and Depth-Imaging in Reflection Seismic. Principles and Methods. EAGE Publications.
- ROSA, A. L. R. 2010. Análise do Sinal Sísmico. Sociedade Brasileira de Geofísica.
- SANDJIVY, L., LERON, A., TORRES, O., FRANCE AND FATHI, B., 2003. Improving Time Migration Velocity Fields Using Geostatistics. 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 2015 – Rio de Janeiro – RJ.
- SANDJIVY, L., LERON, A. & BOUDON, S., 2004. The Reservoir Qualification of Seismic Data Using Geostatistics. 66th EAGE Conference & Exhibition 2004 – Paris, France.
- SCHNEIDER, W. A. 1978. Integral formulation for migration in two and three dimensions, Geophysics, 43(1), 49-76.
- SEIFERT, I., PENNA, R., MAUL, A. & GONZÁLEZ, M. 2017. Accurate Velocity Model Refinement through the use of Acoustic Impedance for Evaporite Seismic Facies differentiation of Pre-Salt Reservoir Prospects in Santos Basin. 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 2017 – Rio de Janeiro – RJ.
- SILVA, J.J., 2009. Migração Reversa no Tempo na Determinação das Amplitudes de Reflexão em Função do Ângulo de Incidência. Tese de Doutorado, 194p. COPPE/UFRJ – Engenharia Civil). Rio de Janeiro – RJ – Brasil.
- STOLT, R.H., 1978. Migration by Fourier Transform. Geophysics, 43, 23-48.
- VIGH, D. & STARR, E.W., 2008. 3D Pre-Stack Plane-Wave, Full-Waveform Inversion, Geophysics, Vol. 73, No. 5 (September-October, 2008).
- WHITMORE, N.D., 1983. Iterative Depth Migration by Backward Time Propagation, Expanded Abstracts, SEG (Society of Exploration Geophysicists).
- YAMAMOTO, T., MAUL, A., BORN, E., GOBATTO, F., CAMPOS, M.T. & GONZÁLEZ, M., 2016. Incorporação de Estratificações Salíferas Através do Modelo de Velocidade em um Projeto da Bacia de Santos (VII Simpósio Brasileiro de Geofísica – 2016). Ouro Preto – MG.
- YILMAZ, O., 2001. Seismic Data Analysis (Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data. Volumes I and II, 2nd Edition – SEG (Society of Exploration Geophysicists).