Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Geologia

Isabella Lopes Antunes Rios

Arcabouço Sismoestratigráfico para a Megasequência Drifte no Cretáceo Superior em Águas Profundas da Sub-bacia de Mundaú, Bacia do Ceará

Rio de Janeiro
2016

Isabella Lopes Antunes Rios

Arcabouço Sismoestratigráfico para a Megasequência Drifte no Cretáceo Superior em Águas Profundas da Sub-bacia de Mundaú, Bacia do Ceará

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias.

Orientador: Prof. Dr. Webster Ueipass Mohriak

Co-orientador: Dr. Jorge de Jesus Picanço de Figueiredo

Rio de Janeiro

2016

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/CTC/C

R586 Rios, Isabella Lopes Antunes.
Arcabouço sismoestratigráfico para a megasequência drifte no cretáceo superior em águas profundas da Sub-bacia de Mundaú, Bacia do Ceará / Isabella Lopes Antunes Rios. – 2016.
111 f. : il.

Orientador: Webster Ueipass Mohriak
Co-Orientador: Jorge de Jesus Picanço de Figueiredo.
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.
Bibliografia.

1. Geologia estratigráfica – Cretáceo – Ceará, Bacia – Teses. 2. Geologia estrutural – Ceará – Teses. 3. Mundaú, Subbacia de (CE) — Teses. 4. Bacias sedimentares – Ceará - Teses. 5. Águas Profundas – Teses. I. Mohriak, Webster Ueipass, Orient. II. Figueiredo, Jorge de Jesus Picanço de, Co-orient.III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. III. Título.

CDU 551.435.28(813.1)

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

_____ _____

Assinatura Data

Isabella Lopes Antunes Rios

Arcabouço Sismoestratigráfico para a Megasequência Drifte no Cretáceo Superior em Águas Profundas da Sub-bacia de Mundaú, Bacia do Ceará

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias.

Aprovada em 30 de setembro de 2016.

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. Webster Ueipass Mohriak

Faculdade de Geologia – UERJ

_____

Dr. Jorge de Jesus Picanço de Figueiredo

PetroGeo Consultancy

_____

Prof. Dr. Egberto Pereira

Faculdade de Geologia – UERJ

_____

Dr. Andres Gordon

Consultor na AGC

Rio de Janeiro

2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo privilégio de ter concluído mais uma etapa profissional.

Agradeço ao meu esposo Aristóteles por me apoiar e estar sempre ao meu lado nas minhas decisões.

Agradeço ao Prof. Dr. Webster Ueipass Mohriak pela disponibilidade em ser meu orientador e pelas discussões ao logo do desenvolvimento do trabalho.

Agradeço ao Dr. Jorge de Jesus Picanço de Figueiredo primeiramente por aceitar ser meu co-orientador, e também pela paciência e ensinamentos que foram fundamentais para a conclusão desse trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Egberto Pereira pela leitura crítica e sugestões.

Agradeço a geóloga e amiga Tatiane Moura, pelas dúvidas solucionadas e por estar sempre disponível para me ouvir e incentivar.

As amigas do laboratório de Sismoestratigrafia da UERJ Gabriella Gouveia, Stephanie Wischer e Grabriela Salomão pelo afeto nas horas difíceis e generosidade em compartilhar os artigos.

Agradeço a ANP pela liberação dos dados solicitados para a realização dessa Dissertação.

Agradeço a Faculdade de Geologia da UERJ pela liberação do uso do *software* Petrel no Laboratório de Sismoestratigrafia.

RESUMO

RIOS, Isabella Lopes Antunes. *Arcabouço sismoestratigráfico para a Megasequência Drifte no Cretáceo Superior em águas profundas da Sub-bacia de Mundaú, Bacia do Ceará*. 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado em Análise de Bacias e Faixas Móveis) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2016.

A recente descoberta sub-comercial (poço 1-CES-158) de petróleo em águas profundas na Megasequência Transicional da Sub-bacia de Mundaú, Bacia do Ceará, indicou a presença de um sistema petrolífero nesta porção da bacia. Por outro lado, como mostrado em quatro poços (1-CES-112, 1-CES-159, 1-CES-158 e 1-CES-160) já perfurados em variadas posições na região de águas profundas, os arenitos da Megasequência Transicional não são bons reservatórios, pois em todos os casos mostraram-se delgados e intensamente intercalados por folhelhos. Possíveis reservatórios da Megasequência Rifte da bacia são de alto risco em água profundas por três motivos: (1) a sísmica existente não mostra claramente se há riftes nesta posição, dificultando o reconhecimento da megasequência; (2) os possíveis reservatórios areníticos da Megasequência Rifte estariam sob grande soterramento, comprometendo sua porosidade e permeabilidade; (3) essa mesma condição de soterramento teria atingido também a possível rocha geradora, posicionando-a na janela de geração de gás, o que implicaria em que o fluido das possíveis rochas reservatório seria gás, e não óleo, devido ao processo de *gas flush*. Assim, as expectativas exploratórias voltam-se para a Megasequência Drifte em águas profundas da Sub-bacia de Mundaú, em busca de turbiditos depositados na bacia profunda ou mesmo no talude, os quais poderiam confirmar-se como bons reservatórios. Esta nova fronteira, apesar do interesse econômico para a indústria petrolífera, coloca a necessidade de um conhecimento técnico-científico sobre a evolução tectono-sedimentar do intervalo Cretáceo Superior – Paleógeno da Megasequência Drifte. Este trabalho propõe-se a suprir esta lacuna, tendo como objetivo primeiro o estabelecimento do arcabouço sismoestratigráfico da seção sedimentar analisada, utilizando-se do conhecimento científico da Sismoestratigrafia e da Estratigrafia de Sequências e o conhecimento tecnológico dos *softwares* disponíveis para, a partir de dados de sísmica e poços identificar, em águas profundas, os principais limites de sequências marcados na carta estratigráfica da bacia a qual foi construída, principalmente, sobre dados das porções de águas rasas da mesma. Além das discordâncias que marcam esses limites, foi reconhecida mais uma discordância, de idade intrapaleoceno, não identificada na carta estratigráfica da bacia, mas, presente em outras bacias da Margem Equatorial Brasileira. Secundariamente, após o mapeamento das discordâncias individualizadas, este trabalho buscou identificar as possíveis rotas para fluxos turbidíticos e seus *settings* deposicionais. Apesar da limitação condicionada pela esparsa malha de linhas sísmicas 2D, buscou-se a identificação de sismofácies que pudessem caracterizar possíveis depósitos turbidíticos. Neste contexto, sugere-se que algumas sismofácies poderiam representar depósitos de lobos turbidíticos no talude.

Palavras-chave: Sub-bacia de Mundaú. Bacia do Ceará. Arcabouço sismoestratigráfico. Cretáceo. Megasequência Drifte. Águas profundas.

ABSTRACT

RIOS, Isabella Lopes Antunes. *Seismic-stratigraphic framework of the Upper Cretaceous Drift Megasequence in deep water of Mundaú Sub-basin, Ceará Basin.* 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado em Análise de Bacias e Faixas Móveis) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2016.

The recent discovery of a deep-water sub-commercial oilfield (well 1-CES-158) in the Transitional Sequence of the Mundaú Sub-basin, Ceará Basin, indicated the existence of a petroleum system in this portion of the basin. On the other hand, as shown in four wells (1-CES-112, 1-CES-159, 1-CES-158 and 1-CES-160) drilled in various positions in the deep-water region of the basin, the sandstones of the Transitional Sequence are not good reservoirs, since in all cases they occurs as thin layers interbedded with shales. Exploration of possible deep-water reservoirs in the Mundaú Sub-basin Rift Megasequence should be considered a high-risk operation for three reasons: (1) the available seismic lines do not show clearly whether there are rifts in that position, making it difficult to recognize the sequence; (2) the potential sandstone reservoirs of the Rift Megasequence would be under great burial, compromising their porosity and permeability; (3) the same burial condition would also have reached the possible source rock, positioning it in the gas generating window, which would imply that the fluid of the possible reservoir rocks would be gas, and not liquid hydrocarbons, due to the process of *gas flush*. Therefore, exploratory expectations turn to the Drift Megasequence in deep-water of Mundaú Sub-basin, seeking turbidites deposited in deep basin or even in the slope, which could confirm as good reservoirs. This new frontier, despite the economic interest of the Petroleum Industry, puts the need for technical and scientific knowledge of the tectonic and sedimentary evolution of the Upper Cretaceous to Paleogene Drift Megasequence. This work aims to fill this gap with the main objective of establishing the chronostratigraphic framework of the sedimentary section analyzed, using the scientific knowledge of Seismic Stratigraphy and Sequence Stratigraphy, and technological knowledge of the software available, to identify from seismic and wellbore data, in deep-water, the main sequence limits marked in the stratigraphic chart of the basin, which was built mainly on exploratory data from the shallow water region. In addition to the unconformities that mark these boundaries, it has been recognized an unconformity of intra-Paleocene age, not identified in the stratigraphic chart of the basin, but present in other basins of the Brazilian Equatorial Margin. Secondly, after the mapping of individual unconformities, this study aimed to identify possible routes for turbidite flows, and their depositional settings. Despite the limitations associated with sparse grid of 2D seismic lines used in the identification of seismic facies that could characterize possible turbidite deposits. In this context, it is suggested that some seismic facies could represent deposits of turbidite lobes in the slope.

Keywords: Mundaú Sub-basin. Ceará Basin. Sismostratigraphy Framework. Cretaceous. Drift Megasequence. Deep water.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo 17
Figura 2 – Localização das linhas sísmicas e poços utilizados na dissertação 18
Figura 3 – Painel de amarração do poço 1-CES-158 22
Figura 4 – Painel de amarração do poço 1-CES-160 22
Figura 5 – Painel de amarração do poço 1-CES-159 23
Figura 6 – Painel de amarração do poço 1-CES-111B 23
Figura 7 – Painel de amarração do poço 1-CES-112 24
Figura 8 – Atributos gerados para auxiliar na interpretação sísmica 25
Figura 9 – Evolução tectônica da margem equatorial da fase rifte à drifte 31
Figura 10 – Carta Estratigráfica da Bacia do Ceará mostrando os horizontes sísmicos mapeados 34
Figura 11 – Feições estruturais que limitam as sub-bacias da Bacia do Ceará 35
Figura 12 – Arcabouço estrutural esquemático da região da plataforma da Bacia do Ceará 36
Figura 13 – Modelo deposicional de complexo turbidítico 45
Figura 14 – Modelo deposicional de complexo turbidítico 46
Figura 15 – Modelo deposicional de complexo turbidítico 47
Figura 16 – Blocos-diagrama dos modelos deposicionais turbidíticos as três situações tectônicas e os quatros tipos de sistemas utilizados para classificar depósitos 49
Figura 17 – Modelo esquemático para representar um depósito turbidítico moderno em águas profundas 50
Figura 18 – Limites de estratos de sequências deposicionais 51
Figura 19 – Padrões de refletores e geometrias externas das sismosequências para interpretar o ambiente deposicional e litofácies no dado sísmico ... 52
Figura 20 – Interpretação do topo do embasamento na linha 0239-0265 55
Figura 21 – Mapa de anomalia *Bouguer* da área de estudo 56
Figura 22 – Proeminente feição encontrada na linha 0073-0024 58
Figura 23 – Mapa de anomalia *Bouguer* residual da área de estudo 59
Figura 24 – Mapa do horizonte sísmico do topo do embasamento 60

Figura 25 – Interpretação do topo da Megasequência Rifte na linha 0231-1102 62
Figura 26 – Interpretação do topo da Megasequência Rifte em águas profundas na linha 0231-1099 63
Figura 27 – Mapa do horizonte sísmico do topo da Megasequência Rifte 64
Figura 28 – Mapa de isópacas do intervalo da Megasequência Rifte 64
Figura 29 – Interpretação do topo da Megasequência Transgressiva na linha 0231-1098 66
Figura 30 – Mapa do horizonte sísmico do topo da Megasequência Transicional 67
Figura 31 – Mapa de isópacas do intervalo da Megasequência Transicional 67
Figura 32 – Amarração do poço 1-CES-112 com a linha 0222-0479 70
Figura 33 – Correlação da discordância encontrada na linha sísmica 0222-0479 com a curva de variação global do nível do mar 73
Figura 34 – Seção geológica: marcadores litoestratigráficos e cronoestratigráficos . 76
Figura 35 – Identificação de diferentes padrões de deposição sedimentar na Megasequência Drifte na linha 0222-0470 81
Figura 36 – Mapa de isópacas da Sequência Transgressiva 82
Figura 37 – Mapa de magnetometrias: zonas de fratura na Margem Equatorial Brasileira 83
Figura 38 – Interpretação do alto do embasamento corresponde ao prolongamento da Zona de Fratura Romanche na linha 0073-0032 84
Figura 39 – Mapa de isópacas da Sequência Regressiva 85
Figura 40 – Intervalos cronoestratigráficos de interesse na dissertação 87
Figura 41 – Áreas de *bypass* de sedimentos reconhecidas nas partes proximal e distal do talude 90
Figura 42 – Mapa da base de cada intervalo cronoestratigráfico de interesse indicam as zonas preferências de *bypass* 91
Figura 43 – Mapas de isópacas dos intervalos de interesse 94
Figura 44 – Expressão sísmica de possíveis turbiditos na linha sísmica 0231-1093 . 97
Figura 45 – Expressões sísmicas de possíveis turbiditos reconhecidas na linha sísmica 0231-1098 98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Perfis disponíveis de cada poço utilizado na pesquisa..... 18
Tabela 2 – Informações das linhas sísmicas utilizadas na pesquisa..... 19
Tabela 3 – Velocidades médias obtidas a partir da média aritmética das velocidades intervalares de cada intervalo nos cinco poços..... 28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEB	Margem Equatorial Brasileira
TWTT	Tempo de Trânsito Duplo
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AGP	Arquivo Geral de Poços
BGI	*Bureau Gravimétrique International*

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	14
1	**OBJETIVOS**	16
1.1	**Geral**	16
1.2	**Específicos**	16
2	**ÁREA DE ESTUDO**	17
3	**DADOS DISPONÍVEIS**	18
4	**METODOLOGIA**	20
5	**GEOLOGIA REGIONAL**	30
5.1	**Contexto Geotectônico Regional da Margem Equatorial Brasileira**	30
5.2	**Evolução Tectono-Sedimentar da Bacia do Ceará**	33
5.2.1	Megasequência Rifte ou Continental	35
5.2.2	Megasequência Trasicional ou Pós-rifte	37
5.2.3	Megasequência Drifte	39
5.3	**O Sistema Petrolífero da Sub-bacia de Mundaú**	42
6	**Depósitos turbidíticos**	44
6.1	**Fácies Sísmicas**	50
7	**APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**	53
7.1	**Análise Sísmica 2D**	53
7.1.1	Embasamento	53
7.1.2	Megasequência Rifte	60
7.1.3	Megasequência Transicional	65
7.1.4	Megasequência Drifte	68
7.2	**Arcabouço sismoestratigráfico do Cretáceo Superior na Megasequência Drifte em águas profundas**	86
7.2.1	Definição do arcabouço sismoestratigráfico através dos perfis de poços	86
7.2.2	Fontes do suprimento sedimentar	88
7.2.3	Geometria e espessura dos pacotes	92
7.2.4	Expressão sísmica dos turbiditos na área	95
	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	99
	REFERÊNCIAS	101

APÊNDICE A – Mapas em profundidade da base de cada intervalo cronoestratigráfico de interesse 106
APÊNDICE B – Combinação de linhas sísmicas que mostra a erosão dos horizontes da base do Albiano e do Albocenomaniano no lado leste da área de estudo 107
APÊNDICE C – Amarração do poço 1-CES-160 com a linha 0222-0475 e o poço encontra-se a 1000 metros de distância da linha sísmica 108
APÊNDICE D – Amarração do poço 1-CES-111B com a linha 0073-0037 e o poço encontra-se a 50 metros de distância da linha sísmica 109
APÊNDICE E – Amarração do poço 1-CES-159 com a linha 0231-1100 e o poço encontra-se a 1200 metros de distância da linha sísmica 110
APÊNDICE F – Amarração do poço 1-CES-158 com a linha 0073-0025 e o poço encontra-se a 50 metros de distância da linha sísmica 111

INTRODUÇÃO

Por muitos anos, o interesse das empresas exploradoras de petróleo esteve focado na região Sudeste do país, gerando um maior volume de pesquisas geológicas e geofísicas nessa área. É incomparável a densidade de estudos das bacias da região Sudeste (bacias de Campos, Santos e Espírito Santo), em relação àquelas da Margem Equatorial Brasileira (MEB), em especial à Bacia do Ceará.

Em 2012, a descoberta sub-comercial de uma acumulação de petróleo em águas profundas na Sub-bacia de Mundaú com o poço exploratório 1-CES-158 levou ao aumento de interesse na Bacia do Ceará. Nesse poço os alvos foram os depósitos de arenitos interpretados como flúvio-deltaicos da Fm. Paracuru (Megasequência Transicional, Aptiano médio – Albiano inferior). A Megasequência Drifte (Fm. Ubarana), como mostrada pelo poço 1-CES-0158-CE, apresenta um alto volume de material arenoso proveniente da plataforma, que configura uma potencial fonte para possíveis depósitos turbidíticos em águas profundas. Sabe-se que esse tipo de depósito desempenha um papel importante na exploração de petróleo em bacias localizadas nas margens sudeste e leste brasileira, onde estão localizados os campos gigantes de petróleo, notadamente na Bacia de Campos (SOUZA CRUZ et al., 1987; CARMINATTI e SCARTON, 1991; PERES, 1993; BRUHN e WALKER, 1995; MACHADO et al., 2004). A eventual descoberta de um novo *play* exploratório na Megasequência Drifte da Bacia do Ceará, nos moldes dos recém-descobertos turbiditos de assoalho de bacia em águas profundas na Bacia de Sergipe-Alagoas (acumulações de Farfan, Barra e Moita Bonita – HAESER, 2015), certamente abriria uma nova fronteira exploratória. Em águas profundas, os reservatórios da Megasequência Transicional, amostrados em quatro poços (1-CES-112, 1-CES-158, 1-CES-159 e 1-CES-160) e os da Megasequência Rifte, amostrados em um poço (1-CES-158) não apresentaram boas características de espessura, porosidade e permeabilidade. Os possíveis reservatórios da Megasequência Drifte interpretados como depósitos turbidíticos nunca foram testados por nenhum dos cinco poços perfurados em águas profundas.

O presente trabalho propõe-se, primeiramente, estabelecer um arcabouço sismoestratigráfico da seção sedimentar analisada e com isso discretizar em águas

profundas suas principais discordâncias/limites de sequências sedimentares. A geração de mapas de contorno estrutural em tempo de trânsito duplo (TWTT, sigla em inglês para *Two-Way Travel Time*) das discordâncias/limites de sequências permitiu a identificação das rotas para fluxos turbidíticos e seus *settings* deposicionais contribuindo para o entendimento do contexto do sistema deposicional de depósitos turbidíticos (rota de transporte, depocentros, tipos de sedimentos) em águas profundas da Sub-bacia de Mundaú, com foco no intervalo do Cretáceo Superior da porção drifte. Os horizontes sísmicos interpretados como discordâncias/limites de sequências foram correlacionados às informações cronoestratigráficas oriundas de poços para o estabelecimento de suas idades. Se os mapas de contorno estrutural das discordâncias/limites de sequências serviram para identificar a possíveis rotas dos fluxos turbidíticos, os mapas de isópacas mostraram possíveis área preferenciais de deposição de turbiditos.

1 **OBJETIVOS**

1.1 **Geral**

O presente trabalho tem como objetivo o estabelecimento de um arcabouço sismoestratigráfico para a seção do Cretáceo Superior na fase drifte em águas profundas da Sub-bacia de Mundaú, Bacia do Ceará, contribuindo para o conhecimento de sua evolução tectono-sedimentar e, dentro deste contexto, o entendimento do *timing* e do *loci* deposicional de siliciclásticos grossos (turbiditos), os quais podem configurar-se como bons reservatórios para hidrocarbonetos.

1.2 **Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

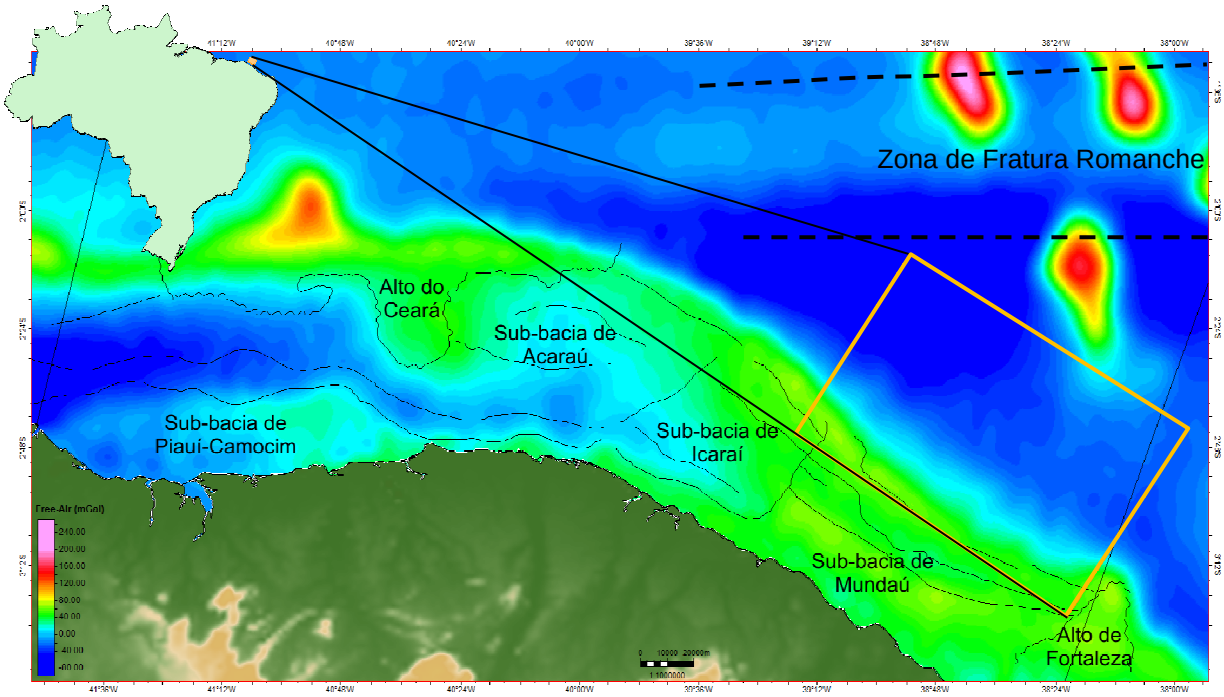
a) integração dos dados de poços com os dados de sísmica para a definição das idades dos horizontes mapeados;
b) mapeamento de horizontes sísmicos definidos e caracterizados como discordâncias;
c) geração de mapas dos horizontes sísmicos mapeados e definidos como discordâncias;
d) geração de mapas de isópacas;
e) interpretação das possíveis rotas de fluxos turbidíticos e seus *settings* deposicionais.

Embora haja várias publicações de caráter regional e exploratório sobre a Bacia do Ceará (COSTA et al., 1990; BELTRAMI et al., 1994; MORAIS NETO et al., 2003; PESSOA NETO, 2004; CONDÉ et al., 2007), não há nenhuma publicação acadêmica específica sobre o assunto. Neste contexto, esse trabalho tem a relevância de ter um caráter inédito.

2 **ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo do presente trabalho (Figura 01) está localizada na Sub-bacia de Mundaú, que juntamente com as sub-bacias de Icaraí, Acaraú e Piauí-Camocim, compõem a Bacia do Ceará. A Sub-bacia de Mundaú é uma bacia *offshore* que apresenta uma área de aproximadamente 16.000 Km^2, e está localizada na plataforma continental da margem equatorial brasileira, aproximadamente entre os paralelos 2º e 3º Sul e os meridianos 38º e 39º Oeste. O limite sudeste da Sub-bacia de Mundaú com a Bacia Potiguar é dado pelo Alto de Fortaleza e a oeste com a Sub-bacia de Icaraí esse limite é dado por uma importante inflexão da falha de borda, no prolongamento nordeste da falha de Forquilha (COSTA et al., 1990). Seu limite ao sul é dado pela faixa de afloramento do embasamento cristalino, enquanto seu limite ao norte é dado pelo ramo sul da Zona de Fratura Romanche.

Figura 1 – Localização da área de estudo

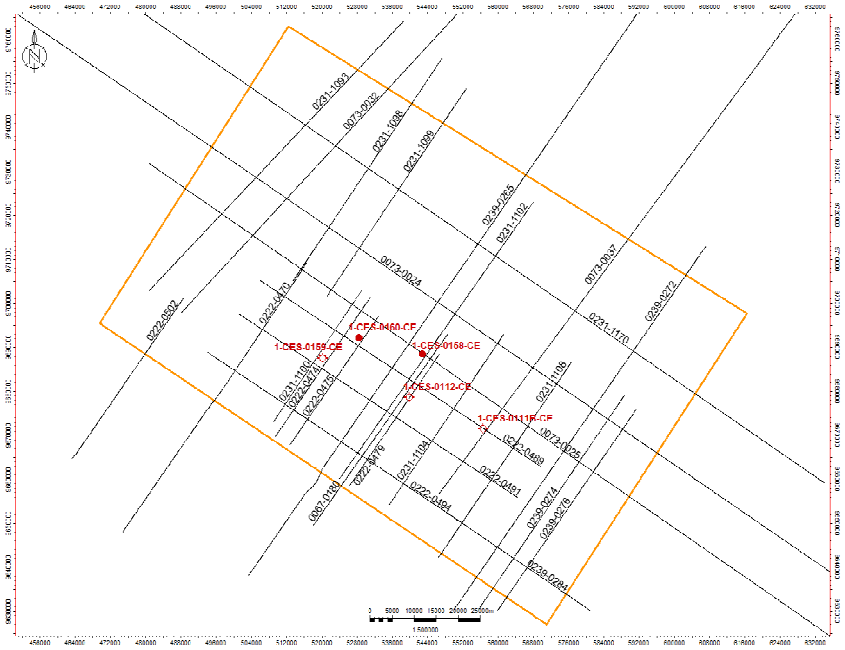


Legenda: O retângulo laranja indica a localização da área de estudo e se observa a presença da Zona de Fratura Romanche próxima a área, como podemos ver no dado de gravimetria *Free-Air* disponibilizado no site http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi. As cores quentes indicam altos gravimétricos e as cores frias baixos gravimétricos.
Fonte: A autora, 2016.

3 **DADOS DISPONÍVEIS**

Os dados utilizados para a realização desse trabalho foram cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que disponibilizou dados de 05 poços e 26 linhas sísmicas 2D migradas em tempo (Figura 02).

Figura 02 – Localização das linhas sísmicas e poços utilizados na dissertação



Fonte: A autora, 2016.

Os dados de poços consistiram de perfis compostos, litologia (dados AGP – Arquivo Geral de Poços), *checkshots*, *Vertical Seismic Profile (VSP's)* e dados geofísicos de perfilagem das curvas de raios gama (GR e SGRC), resistividade profunda (ILD, LLD e SEDP), sônico (DT, DTC e DTCO), densidade (RHOB e RHOZ) e porosidade neutrão (NPHI e TNPL), no formato LAS e DLIS. Nem todos os poços apresentavam todas as curvas descritas e em alguns deles as curvas estavam incompletas (Tabela 1).

Tabela 1 – Perfis disponíveis de cada poço utilizado na pesquisa

Poço	Tipo	Resultado	Perfis Disponíveis
1-CES-159	Exploratório	Seco com indícios de gás	Raios gama, Sônico, Resistividade, Densidade e Neutrão
1-CES-160	Exploratório	Portador de óleo	Raios gama, Sônico, Resistividade, Densidade e Neutrão
1-CES-158	Exploratório	Descobridor de nova jazida com óleo	Raios gama, Sônico, Resistividade, Densidade e Neutrão
1-CES-112	Exploratório	Seco sem indícios de petróleo	Raios gama, Sônico, Resistividade, Densidade e Neutrão
1-CES-111B	Exploratório	Seco sem indícios de petróleo	Raios gama, Resistividade, Densidade e Neutrão

Fonte: A autora, 2016.

As 26 linhas sísmicas 2D migradas em tempo apresentam uma extensão linear total de 1.628 Km e são provenientes de dois levantamentos distintos (R0003_GRAND_NORTH e 0222_CEARA_6B). Dessas linhas sísmicas, sete são seções *strike* de direção SE-NW e 19 são seções *dip* de direção SW-NE (Tabela 2).

Tabela 2 – Informações das linhas sísmicas utilizadas na pesquisa

Linha	Direção	Levantamento	Processamento	Ano	Datum
0239-0284	Strike	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0222-0494	Strike	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0222-0491	Strike	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0222-0489	Strike	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0073-0025	Strike	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0073-0024	Strike	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0231-1170	Strike	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0239-0276	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0239-0274	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0239-0272	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0231-1108	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0073-0037	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0231-1104	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0222-0479	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0067-0180	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0231-1102	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0239-0265	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0222-0475	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0222-0474	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0231-1100	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0231-1099	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0222-0470	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0231-1098	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0222-0502	Dip	0222_CEARA_6B	MIG_FIN	2009	WGS 84
0073-0032	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84
0231-1093	Dip	R0003_GRAND_NORTH	MIG_FIN	2009	WGS 84

Fonte: A autora, 2016.

Os dados de gravimetria utilizados para a confecção de mapas de anomalia *Bouguer* e anomalia *Bouguer* residual cobriram toda a área de estudo e foram provenientes do modelo WGW2012 desenvolvido pelo *Bureau Gravimétrique International* (BGI) disponíveis no site http://bgi.omp.obs-mip.fr/ (BALMINO et al., 2011).

4 **METODOLOGIA**

Inicialmente, a metodologia aplicada no desenvolvimento da pesquisa consistiu na pesquisa bibliográfica sobre a geologia regional da Bacia do Ceará, apresentando enfoque local na Sub-bacia de Mundaú e nos principais sistemas petrolíferos de águas profundas da bacia.

O fluxo de trabalho computacional desenvolvido através do *software* Petrel, da empresa *Schlumberger*, compreendeu as etapas básicas de correlação de poços, amarração poço X sísmica, interpretação sísmica, geração de mapas estruturais em tempo, conversão tempo X profundidade e geração de mapas de isópacas. Com o intuito de obter resultados finais mais precisos, foi executada uma série de etapas que proporcionaram melhorias na qualidade dos dados utilizados. Essas etapas serão descritas a seguir.

Análise de *Mis-tie*

Uma vez que as linhas sísmicas utilizadas no desenvolvimento do projeto foram obtidas em dois levantamentos distintos, isso gerou seções com diferença de tempo, podendo ser notadas quando as intersecções entre essas linhas são avaliadas. Diferentes parâmetros de deconvolução, filtros de frequência, velocidades de empilhamento e valores de correções NMO (*normal moveout*) também variaram em cada levantamento, gerando diferenças que refletiram nas intersecções entre as linhas sísmicas de diferentes levantamentos.

A *correção de Mis-tie permite* que problemas na geração de mapas de contorno estrutural sejam minimizados, tal como erros de fechamento nos pontos de intersecção das linhas sísmicas. Antes da interpretação dos horizontes sísmicos, foi realizada a análise de *Mis-tie* utilizando correção variável vertical no intervalo de 0 a -9000 ms, intervalo que compreende o dado sísmico de interesse em todas as linhas, ao invés de correção constante. A correção variável permite que a sísmica seja ajustada com valores diferentes para cada traço, baseada na correção computada em cada ponto de cruzamento. Já a correção constante aplica o mesmo valor proveniente da média ponderada de todos os pontos de interseção envolvidos a todas as linhas sísmicas. Esse último método gerou valores de correção muito mais altos do que o método variável. Além da correção vertical, também foi aplicada

a correção de ganho sísmico, com intuito de equalizar as amplitudes das linhas 2D proveniente dos diferentes levantamentos.

Digitalização de Curvas

Para a etapa de amarração poço X sísmica, foi necessária a digitalização da curva de sônico do poço 1-CES-111B, que foi disponibilizada pela ANP somente como imagem no perfil composto. A digitalização foi realizada através do *software* Techlog, da empresa *Schlumberger*, a partir da imagem em jpeg da curva.

Amarração Poço X Sísmica

O objetivo da amarração da informação do poço com a imagem sísmica é estabelecer relação entre as interfaces geológicas e as reflexões sísmicas que se deseja interpretar. Para que essa etapa seja executada é necessário que os poços apresentem dados que possibilitassem a relação tempo sísmico e profundidade. Estes dados são obtidos com a execução do *checkshot* (*WST – Well Seismic Time*) e/ou arquivo *VSP* (*Vertical Seismic Profile*). Com estes dados é montada uma tabela tempo x profundidade, a qual é o *input* básico para o software que gera a conversão da profundidade do poço em tempo sísmico para que o mesmo possa ser correlacionado com a sísmica.

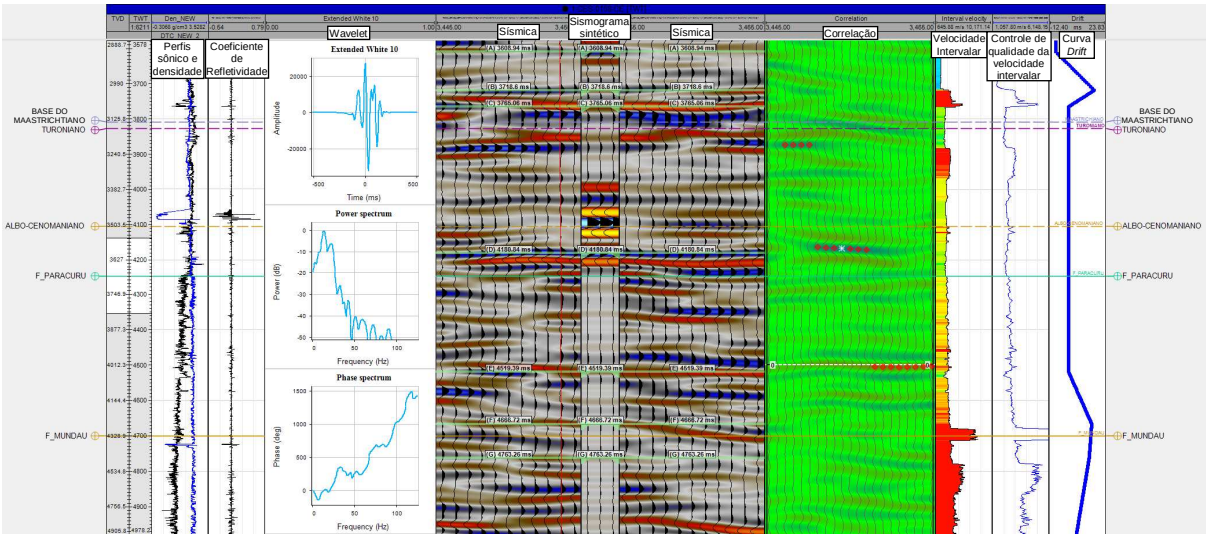
Outras informações necessárias para a correlação do poço à sísmica são obtidas dos perfis sônico e densidade. Destes dois perfis são estimadas as impedâncias acústicas e os coeficientes de reflexão utilizados na construção do sismograma sintético gerado para o poço, o qual será comparado com o sismograma do dado sísmico no ponto onde a localização do poço é projetada na linha sísmica.

A amarração poço X sísmica foi realizada nos 05 poços disponibilizados pela ANP (Figuras 03, 04, 05, 06 e 07). Inicialmente foi gerada a curva de *drift* para a calibração do perfil sônico. A curva de drift representa a diferença entre a curva em tempo (*checkshot* ou *VSP*) e o perfil sônico. Essa nova curva gerada foi utilizada na amarração do poço X sísmica e na construção do sismograma sintético. A partir da linha sísmica mais próxima ao poço e das curvas de sônico e densidade, foi gerada a *wavelet* utilizada na convolução com o coeficiente de refletividade. A extração da *wavelet* ao redor do poço permite maior correlação com o dado sísmico. O algoritmo utilizado para a extração da *wavelet* foi o *Extended Roy White*, onde houve a

determinação da fase dominante e o deslocamento em tempo ideal entre a refletividade das curvas dos poços e a amplitude sísmica.

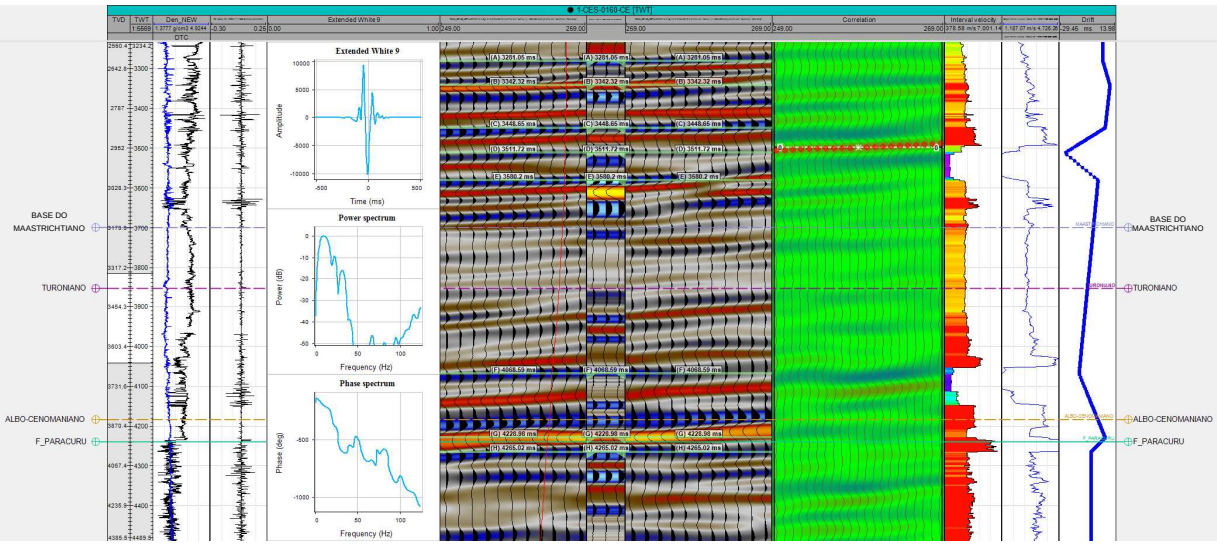
O poço que apresentou o melhor resultado na amarração, isto é, a maior precisão, foi o 1-CES-112 e, por isso, o mesmo foi usado como guia para o mapeamento dos horizontes que foram definidos no item de interpretação sísmica.

Figura 03 – Painel de amarração do poço 1-CES-158



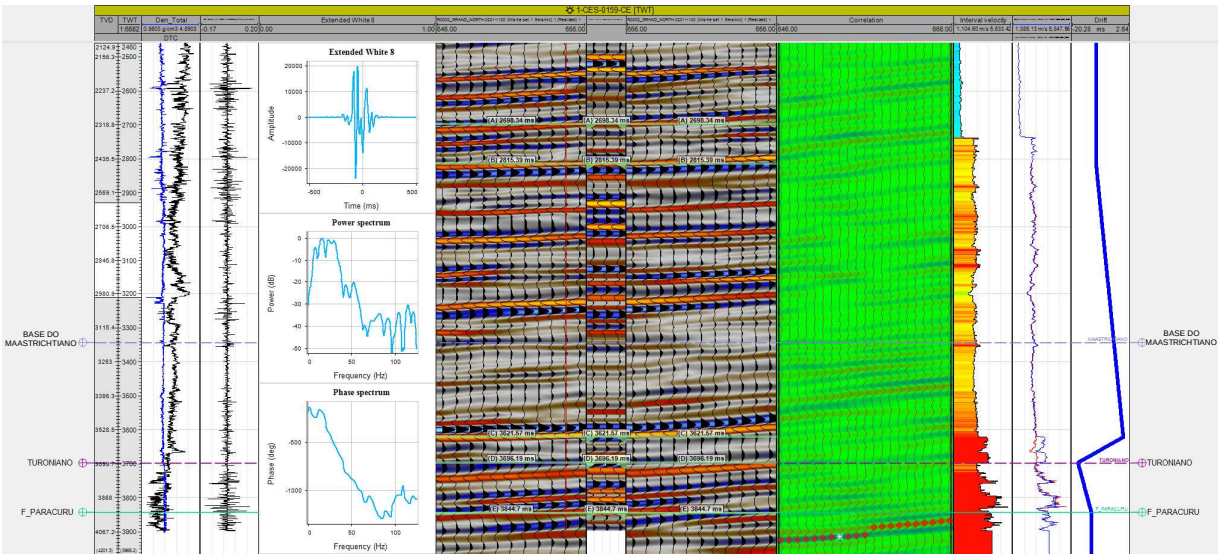
Legenda: O poço encontra-se a 50 metros de distância da linha sísmica.
Fonte: A autora, 2016.

Figura 04 – Painel de amarração do poço 1-CES-160



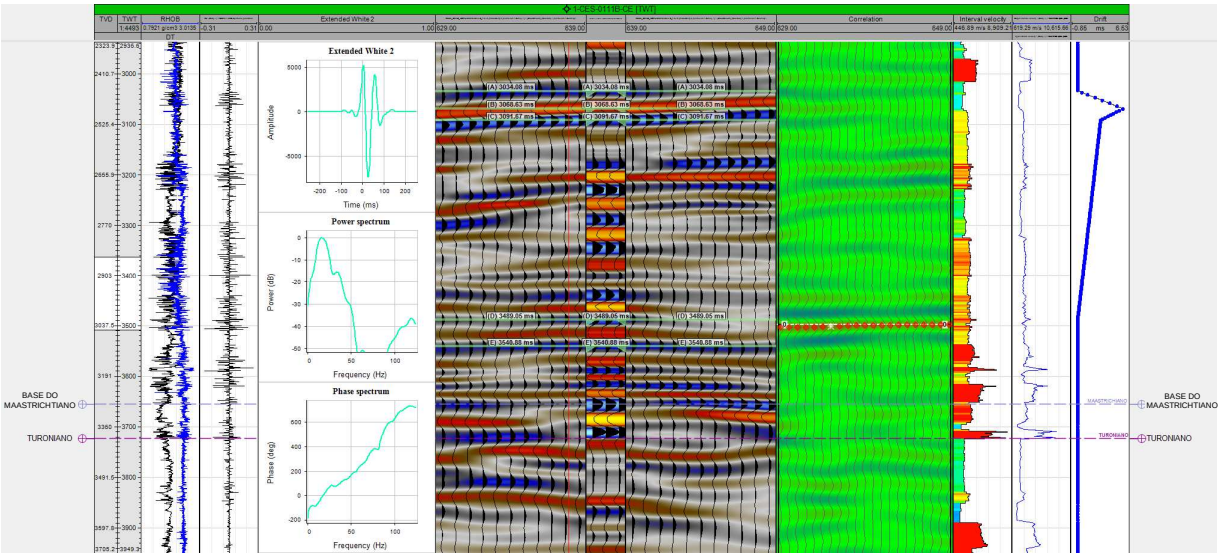
Legenda: O poço encontra-se a 1000 metros de distância da linha sísmica.
Fonte: A autora, 2016

Figura 05 – Painel de amarração do poço 1-CES-159



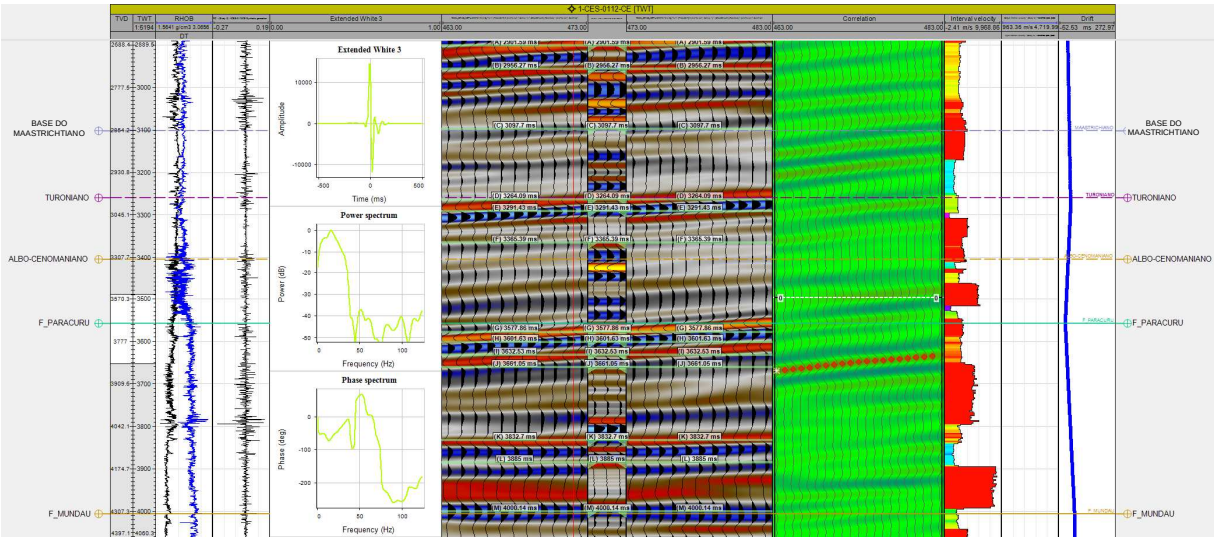
Legenda: O poço encontra-se a 1200 metros de distância da linha sísmica.
Fonte: A autora, 2016.

Figura 06 – Painel de amarração do poço 1-CES-111B



Legenda: O poço encontra-se a 50 metros de distância da linha sísmica.
Fonte: A autora, 2016.

Figura 07 – Painel de amarração do poço 1-CES-112



Legenda: O poço encontra-se a 200 metros de distância da linha sísmica.
Fonte: A autora, 2016.

Condicionamento do Dado Sísmico

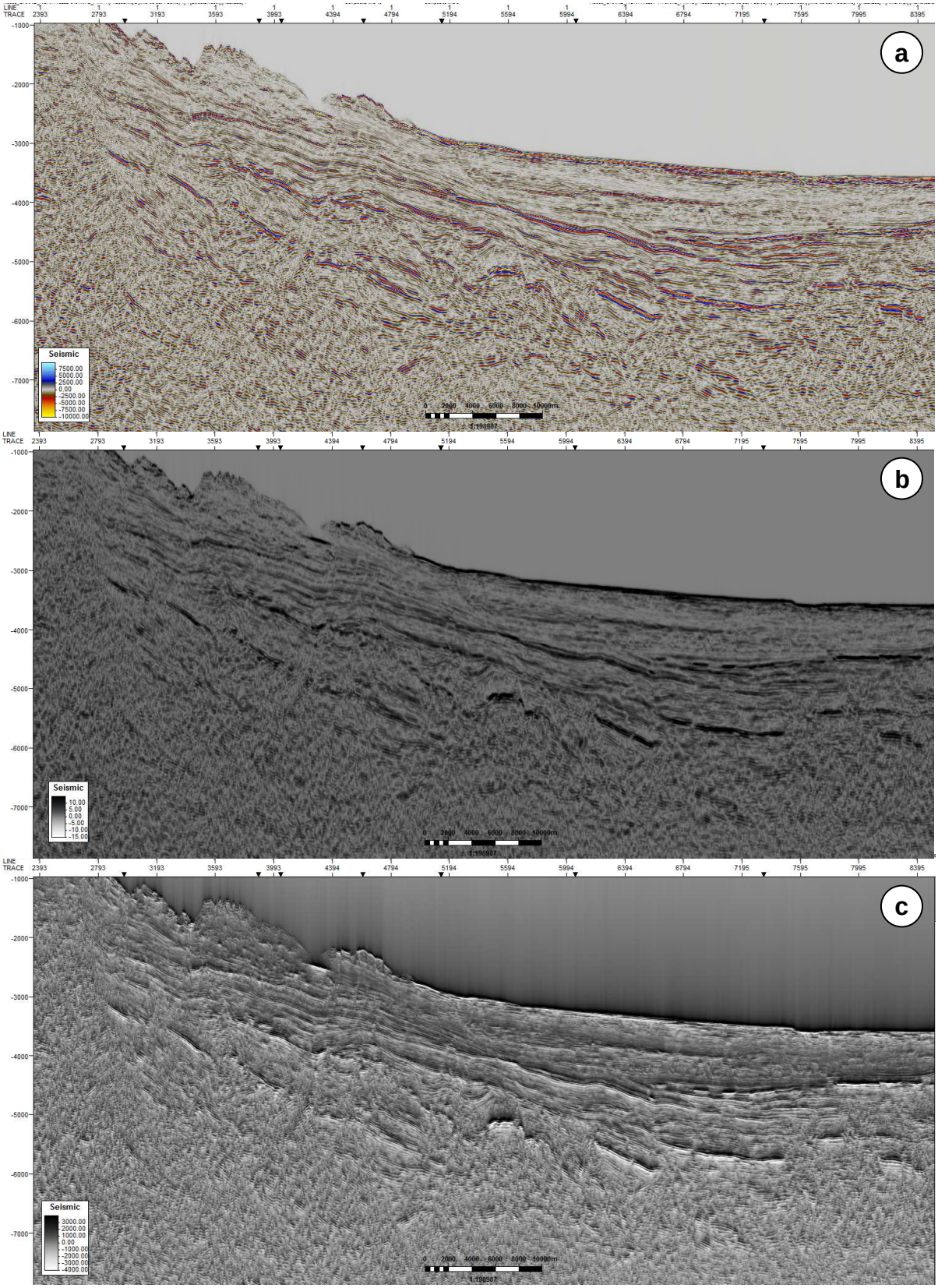
Foram aplicados aos dados sísmicos diferentes filtros (Figura 08) com a finalidade de melhorar sua qualidade e, consequentemente, proporcionar maior confiança no mapeamento dos horizontes.

O primeiro deles foi o *Structural Smooth*, de caráter estrutural, utilizado para remover ruídos causados pelo processamento e melhorar a continuidade dos refletores sísmicos; as falhas se mantêm preservadas.

Após a remoção dos ruídos, foi aplicado um filtro de caráter estratigráfico (*Reflection Intensity*) para melhor delineamento das características de amplitude. Porém, como as frequências originais são mantidas, é possível a identificação das descontinuidades.

A Técnica Volume de Amplitudes (TecVA) foi também aplicada nas linhas sísmicas com o intuito de ressaltar a variação lateral de sismofácies tanto na horizontal como na vertical e as descontinuidades contidas no dado original. O fluxo de trabalho para se obter o TecVA no *software* Petrel inicia com a geração da média *RMS* (*Root Mean Square*) que calcula a raiz quadrada da média das amostras selecionadas em uma janela sísmica, seguida da remoção da tendência do dado sísmico gerado pela deconvolução e finaliza com a transformada inversa de Hilbert (rotação de fase de -90º).

Figura 08 – Atributos gerados para auxiliar na interpretação sísmica



Legenda: (a) – linha sísmica com atributo *structural smooth*; (b) – linha sísmica com atributo *Reflection Intensity*; (c) – linha sísmica com atributo *TecVA*.
Fonte: A autora, 2016.

Interpretação Sísmica

Após a execução das etapas descritas acima, foi realizado o mapeamento dos horizontes sísmicos nas linhas 2D previamente definidas e após a correlação entre poço e sísmica foram definidos os seguintes topos: embasamento, Megasequência Rifte (corresponde ao topo da Fm. Mundaú (CONDÉ et al., 2007)), Megasequência Transicional (corresponde ao topo da Fm. Paracuru (CONDÉ et al., 2007)) e Megasequência Drifte (corresponde ao topo da Fm. Ubarana - fundo do mar (CONDÉ et al., 2007)). Buscou-se também mapear, nas linhas sísmicas, as discordâncias (limites de sequências, segundo Posamentier e Allen, 1999) dentro do Cretáceo na fase drifte, que posteriormente foram utilizadas para definir o arcabouço sismoestratigráfico para esse intervalo.

Os mapas de contorno estrutural em tempo duplo (TWT) de todos os horizontes mapeados foram interpolados utilizando o método de mínima curvatura e células de 1000x1000 metros. Esses mapas tiveram como objetivo gerar a topografia da superfície relacionada a cada horizonte mapeado identificando altos e baixos topográficos. Os mapas das discordâncias tiveram como objetivo interpretar as possíveis rotas tomadas pelos fluxos gravitacionais turbidíticos que teriam levado sedimentos grossos (possíveis reservatórios para hidrocarbonetos) da fonte na plataforma até os *settings* deposicionais em águas profundas.

Em consonância com o objetivo do trabalho, que não envolveu estudo estrutural da bacia, somente as falhas geradas na fase rifte foram interpretadas. Essa escolha é devido ao fato de que essas falhas tiveram um papel importante na tectônica sinsedimentar, tendo diversas delas permanecido ativas ainda na fase transicional, vindo a definir a fisiografia da bacia na fase drifte.

Correlação de Poços

A correlação de poços foi necessária para uma melhor compreensão do arcabouço litoestratigráfico da bacia e do arcabouço sismoestratigráfico do Cretáceo Superior na seção drifte. O objetivo dessa etapa foi correlacionar nos poços em águas profundas, os marcadores litoestratigráficos do topo da Megasequência Rifte (Fm. Mundaú) e topo da Megasequência Transicional (Fm. Paracuru), e definir as idades das discordâncias mapeadas, na etapa de interpretação sísmica, dentro do Cretáceo Superior na fase drifte. O topo do embasamento não foi correlacionado

como um marcador litoestratigráfico, uma vez que não foi atingido por nenhum dos poços.

Os dados utilizados para correlacionar os poços com as discordâncias mapeadas foram os perfis de raios gama, sônico e densidade. Todas essas curvas estavam nos cinco poços disponíveis para estudo. A partir dessa análise foram encontradas para as discordâncias as idades da base do Albiano, do Albocenomaniano, do Turoniano e da base do Maastrichtiano, todas já apontadas por Condé et al. (2007). Foi também reconhecida uma quinta discordância, não citada na bibliografia, a qual, no presente trabalho foi identificada como sendo de idade intrapaleoceno (veja discussão no tópico 7.1.4, do capítulo 7).

Modelo de Velocidade para Conversão Tempo X Profundidade

Uma vez que as linhas sísmicas são obtidas em tempo, os mapas de contorno estrutural também são originalmente interpretados e gerados em tempo. Assim, sua conversão para mapas em profundidade é necessária para obter mapas de espessura em profundidade que são usados para calcular as espessuras dos depósitos. A conversão tempo X profundidade tem como ponto de partida a fórmula clássica

$$D = \Delta t \times v_m \qquad (1)$$

onde D é a distância percorrida, Δt é o tempo gasto no percurso e v_m é a velocidade média desenvolvida.

A primeira superfície a ser convertida é aquela que representa o fundo do mar. Para esse procedimento, a equação 1 é ajustada para

$$P_{fm} = t_{fm} \times v_a / 2000 \qquad (2)$$

onde P_{fm} é a posição do fundo do mar em profundidade, t_{fm} é a posição da superfície do fundo do mar gridada em tempo, e v_a é a velocidade média da onda sísmica na lâmina d'água (1500 m/s). Como o dado sísmico é obtido em tempo de trânsito duplo (*TWTT*, sigla em inglês para *Two-Way Travel Time*), por refletir o tempo de caminhamento da onda desde a fonte de emissão até encontrar um

determinado horizonte e retornar ao hidrofone, e, além disso, ele é apresentado em milissegundos (ms), é necessário dividir o produto t_{fm} X v_a por 2000.

Para as superfícies subsequentes ao fundo do mar é necessário subtrair a posição da superfície do fundo do mar, em tempo, da posição daquela que será convertida, também em tempo, e acrescentar a posição da superfície do fundo do mar em profundidade. Esse artifício é necessário para tirar o efeito da superfície do fundo do mar sobre aquela que está sendo convertida. Assim tem-se

$$P_n = \Delta t \times v_n /2000 + P_{fm} \quad (3)$$

onde Pn é a posição da enésima superfície em profundidade, Δt é a posição dessa superfície em tempo menos a posição da superfície do fundo do mar também em tempo, v_n é a velocidade média da onda sísmica no intervalo que antecede a superfície n, e P_{fm} é a posição da superfície do fundo do mar em profundidade.

As velocidades médias da onda sísmica para cada intervalo que foi convertido foram obtidas a partir da velocidade intervalar de cada intervalo dos cinco poços disponíveis para o estudo como podemos ver na Tabela 3.

Tabela 3 – Velocidades médias obtidas a partir da média aritmética das velocidades intervalares de cada intervalo nos cinco poços

Intervalo	Velocidade Média (m/s)
nível do mar - fundo do mar	1500
fundo do mar - intra-Paleoceno	2331,16
intra-Paleoceno - base do Maastrichtiano	2746,59
base do Maastrichtiano - Turoniano	2877,57
Turoniano - Albiano/Cenomaniano	2916,54
Albiano/Cenomaniano - base do Albiano	2993,44
base do Albiano - topo do rifte	3556,9
topo do rifte - embasamento	4200

Fonte: A autora, 2016.

Mapas de Isópacas

Os mapas de isópacas foram gerados a partir dos mapas do horizonte sísmico em profundidade e auxiliaram no entendimento da distribuição sedimentar em cada intervalo de tempo especificado. A análise dos espessamentos e adelgaçamentos destes mapas é reveladora sobre os possíveis *settings* deposicionais de turbiditos. Nas regiões mais distais da bacia, o alcance das erosões submarinas é quase nulo para moldar a topografia através de cortes profundos e o substrato deposicional que corresponde a uma sedimentação hemipelágica e,

portanto, regionalmente homogênea. Desse modo, o espessamento abrupto de um determinado intervalo pode ser explicado pela ocorrência de deposição eventual e episódica devida a fluxos gravitacionais.

Mapa de Anomalia *Bouguer*

Os dados de gravimetria para análise de anomalia *Bouguer* foram gerados pelo *Bureau Gravimétrique International* (BGI) e baixados do site http://bgi.omp.obs-mip.fr/.

Os dados originais são pontuais e foram interpolados no *software* Oasis Montaj, utilizando como método de interpolação a Mínima Curvatura, com células de tamanho 250 x 250 metros.

Mapa de Anomalia *Bouguer* Residual

Para a geração do mapa de anomalia *Bouguer* residual foi computado, primeiramente, um mapa da componente regional a partir do mapa de anomalia *Bouguer* gerado anteriormente, utilizando um filtro de continuação para cima de 25 km. O resultado final foi obtido a partir da subtração dos valores do mapa da componente regional pelos valores do mapa de anomalia *Bouguer*.

Mapa de Magnetometria

Para uma melhor compreensão das estruturas na área de estudo foi utilizada uma imagem de anomalia magnética disponível no link http://gisservices.datadoors.net/i3_ArcGIS/rest/services/c037615c-4de6-47cf-92d3-6a321ab68a46/MapServer. Essa imagem pode ser acessada diretamente pelo *software* Petrel.