

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

José Ricardo Gonçalves Magalhães

COMPARTIMENTAÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR DA BACIA DA PARAÍBA, A
PARTIR DA INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS POTENCIAIS E INTERPRETAÇÃO
SÍSMICA DE DADOS OFFSHORE

Recife/PE

2015

JOSÉ RICARDO GONÇALVES MAGALHÃES

COMPARTIMENTAÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR DA BACIA DA PARAÍBA, A
PARTIR DA INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS POTENCIAIS E INTERPRETAÇÃO
SÍSMICA DE DADOS OFFSHORE

Dissertação apresentada à Pós-Graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, orientada pelo Prof. Dr. Paulo de Barros Correia e co-orientada pelo Prof. Dr. David Lopes de Castro como preenchimento parcial dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Geociências, na área de concentração em Geoquímica, Geofísica e Evolução Crustal.

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Barros Correia

Co-orientador: Prof. Dr. David Lopes de Castro

Recife/PE

2015

Catálogo na fonte

Biblioteca Margareth Malta, CRB-4 / 1198

M188c Magalhães, José Ricardo Gonçalves.

Compartimentação tectono-sedimentar da Bacia da Paraíba, a partir da integração de métodos potenciais e interpretação sísmica de dados OFFSHORE / José Ricardo Gonçalves Magalhães . - Recife: O Autor, 2015.

86 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Barros Correia.

Coorientador: Prof. Dr. David Lopes de Castro.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.

Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2015. Inclui Referências e Apêndices.

1. Geociências. 2. Bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal. 4. Transição crosta continental-oceânica. 5. Margem continental do nordeste Brasileiro. 6. Rifte Atlântico. I. Correia, Paulo de Barros. (Orientador). II. Castro, David Lopes de. (Coorientador). III. Título.

UFPE

551 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-295

**COMPARTIMENTAÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR DA BACIA DA PARAÍBA,
A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS POTENCIAIS E
INTERPRETAÇÃO SÍSMICA DE DADOS OFFSHORE.**

José Ricardo Gonçalves Magalhães

APROVADO

Paulo de Barros Correia
30 de Julho de 2015

Vanessa Biondo Ribeiro
30 de Julho de 2015

Aderson Farias do Nascimento
30 de Julho de 2015

*DEDICO ESTA DISSERTAÇÃO AOS MEUS PAIS
(JOSÉ ADELMO E REJANE), MEUS IRMÃOS
(JOSÉ HUGO E JOSÉ PEDRO) E A MINHA
NAMORADA (MARÍLIA MARTINELLI)*

AGRADECIMENTOS

A ANP – Agência Nacional do Petróleo Gás e Biocombustíveis, pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos (PRH-26/ANP/UFPE). Ao Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) da ANP e ao Plano de Levantamento da Plataforma Continental (LEPLAC) pela concessão dos dados sísmicos utilizados na pesquisa.

Ao Prof. Dr. Paulo de Barros Correia, pela orientação, boas conversas e discussões, sempre muito proveitosas e fundamentais para meu aprendizado e para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Antonio Barbosa, pela orientação e dedicação, indispensáveis durante o andamento deste trabalho. Por sempre estar disposto a ajudar e a esclarecer dúvidas nas várias áreas da pesquisa em geociências, e por todos os momentos de conversas e descontração.

Ao Prof. Dr. Joaquim Alves da Motta, por todo o apoio encorajador nas áreas de gravimetria e magnetometria.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Geociências da UFPE (PPGEOC/UFPE) que me propuseram uma boa aprendizagem durante esses dois anos de mestrado.

Ao Prof. Dr. David Lopes de Castro, pela contribuição em minha co-orientação e pela parceria enriquecedora entre as "Geofísicas" da UFPE e da UFRN.

Aos companheiros do Laboratório de Sismoestratigrafia (SISMOS-UFPE) pelo apoio e convívio ao longo desses anos: Artur, Bruno Varela, Jefferson, Felipe Santana, Osvaldo, Tiago Miranda, Márcio Alencar, Hewerton e Nélia.

A todos os colegas do curso de geologia e da UFPE, entre eles, Aldir, Liêve, Rodrigo, Alisson, Flávio, Guilherme, Florentino, José Aciolly, Leandro (Chiquinho), Patrícia Celeste, Ricardo Pino e ao grande Wilker (Em memória). E a todos os quais me esqueci de mencionar.

A minha família, principalmente aos meus pais (Rejane e José Adelmo), por toda a dedicação, amor e motivação, e aos meus irmãos (José Hugo e José Pedro), pelas trocas de idéias e pelos bons momentos de descontração.

A minha namorada, Marília Martinelli, por todo o companheirismo, por estar ao meu lado e pelo nosso grande amor.

“Nasci num país de grandiosas proporções geológicas e miseráveis dimensões ideológicas. Esta lástima, porém, em nada fere minha apreciação por suas totais amplitudes.”

Helenilson Persi

RESUMO

Vários trabalhos têm tentado abordar a evolução das margens conjugadas do Atlântico, incluindo o nordeste do Brasil e o oeste da África. Entretanto, o avanço de pesquisas anteriores tem sido dificultado em razão da falta de dados na região marginal da porção oriental do nordeste do Brasil, principalmente na área inserida entre a Zona de Cisalhamento de Pernambuco e o Alto de Touros. Este fato tem imposto limitações ao desenvolvimento de modelos regionais sobre a evolução geotectônica e paleogeográfica desta região, assim como na correlação com sua contraparte na África. Nesta dissertação é apresentada uma investigação realizada com base em dados gravimétricos, magnéticos e sísmicos regionais. Os resultados mostraram que esta região representa um alto do embasamento com a orientação regional das principais estruturas tectônicas (ENE-WSW), ortogonais as estruturas desenvolvidas durante o processo de abertura das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal (NNE-SSW e NNW-SSE). Sobre o embasamento continental formou-se uma plataforma estreita com uma cobertura sedimentar pouco espessa (0,8-2,5 km) e uma quebra abrupta da plataforma, criando uma vasta zona de *bypass* através do talude. A análise de uma seção sísmica profunda revelou que a crosta continental afinada (crosta transicional) representa uma estreita zona e que o limite crosta continental-oceânica (COB) está localizado a aproximadamente 100 km a leste da atual linha de costa, na Bacia da Paraíba, e a 70 km, na Bacia da Plataforma de Natal. A modelagem geofísica, integrada com a interpretação sísmica, indica que esta região é caracterizada por um afinamento abrupto da crosta continental, com a consequente ascensão súbita da Moho. Também há evidências da existência de uma zona de crosta continental extremamente afinada, a qual foi interpretada como crosta proto-oceânica. Estes novos dados demonstram que esta área apresenta fortes similaridades com margens rifteadas não vulcânicas ou pobres em magma.

Palavras-chave: bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal, transição crosta continental-oceânica, margem continental do nordeste Brasileiro, rifte Atlântico.

ABSTRACT

Several studies have tried to address the evolution of the Atlantic conjugate margins, including Northeast Brazil and West Africa. However, past research advances has been hindered by a lack of data for the marginal region in the eastern portion of northeastern Brazil, extending from the Pernambuco Shear Zone to the Touros High. This situation has imposed serious limitations on the development of a regional view of the geotectonic and paleogeographic evolution of this area and on correlations with regional counterparts in Africa. Here, we present an investigation using regional gravimetric, magnetic and seismic data. The results show that this region represents a basement high with regional orientation of tectonic structures (ENE-WSW) orthogonal at structures developed during the open processes of the Paraíba and Natal Platform Basins (NNE-SSW and NNW-SSE). The continental basement forming a narrow platform with a thin sedimentary cover (0.8-2.5 km) and an abrupt shelf break, which created a large bypass zone towards the slope. The analysis of a deep seismic section revealed that thinned continental crust (transitional crust) occupies a narrow zone and that the continental-oceanic boundary (COB) is located approximately 100 km to the east of the present coastline, at Paraíba Basin, and 70 km, at Natal Platform Basin. Geophysical modeling integrated with interpretation of the seismic data suggests that this region is characterized by an abrupt thinning of continental crust, with an accompanying sudden rise of the Moho. There are also indications for the existence of a zone of extremely thinned continental crust, which was interpreted as proto-oceanic crust. Our findings suggest that the study area shows strong similarities to non-volcanic or magma-poor rifted margins.

Keywords: Paraíba and Natal Platform Basins, continental-oceanic transition, northeastern Brazilian continental margin, Atlantic rift.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa topográfico/batimétrico com a localização da área de pesquisa (Polígono vermelho) e dos blocos exploratórios arrematados nas rodadas de leilões da ANP (Polígonos azuis: 9ª rodada; Polígonos Laranjas: 11ª rodada). Linhas pretas: Zonas de cisalhamento, linha de costa e limites interestaduais; Linhas azuis: Limites das Bacias na área continental; ZCPE: Zona de Cisalhamento Pernambuco; ZCPA: Zona de Cisalhamento Patos; 1: Bacia de Alagoas; 2: Bacia de Pernambuco; 3: Bacia da Paraíba; 4: Bacia da Plataforma de Natal; 5: Platô de Touros; 6: Bacia Potiguar. 18

Figura 2: Fluxograma das atividades desenvolvidas para a realização desta dissertação. 21

Figura 3: Mapa das bacias marginais do nordeste oriental do Brasil, com destaque para os segmentos localizados entre a ZCPE e o Alto de Touros (Retângulo vermelho) (Modificada de Barbosa, 2007). A estimativa da COB é baseada nos mapas de Karner e Driscoll (1999) e Gomes (2005). 25

Figura 4: Mapa paleogeográfico da Plataforma Sul-Americana, mostrando a Província Borborema, áreas cratônicas, blocos continentais, e orógenos Neoproterozoicos e Cambrianos (Modificado de Araujo et al., 2013). Áreas cratônicas: AM = Amazônico; WA = Oeste Africano; SF = São Francisco; C = Congo; S = 'Metacrátton' do Saara. 26

Figura 5: Mapa simplificado da Província Borborema e seus domínios (Sul, Central e Norte), com a distribuição temporal e espacial de corpos granitóides (Modificado de Araujo et al., 2013). As bacias marginais estão posicionadas e é possível ver sua relação com a compartimentação estrutural da PB. 27

Figura 6: Arcabouço geológico-estrutural da PB com a distribuição dos principais terrenos e zonas de cisalhamento (modificado de Oliveira, 2008). 29

Figura 7: Mapa geológico-estrutural do Maciço São José do Campestre (modificado de Araújo et al., 2014). Zonas de cisalhamento: ZCPA = Patos, ZCRM = Remígio, ZCBR = Brejinho, ZCJC = João Câmara. As linhas pontilhadas marcam a extensão das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal. 31

Figura 8: Mapa de localização das placas Sul-Americana e Africana com a posição das principais bacias e zonas de fraturas (Adaptado de Granot e Dymment, 2015). As linhas pontilhadas (branca, amarela, preta e verde) e os números em branco representam os quatro estágios da propagação do rifte. Estas considerações foram propostas principalmente pela correlação dos trabalhos de Bueno (2004) e Caixeta et al. (2014). 32

Figura 9: Contorno estrutural do embasamento da faixa costeira das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal, produzidos a partir de 185 poços que alcançaram o embasamento (Barbosa et al., 2007). A) Mapa da profundidade do embasamento e B) Seções geológicas interpretadas a partir dos dados interpolados e da correlação estratigráfica dos poços. 33

Figura 10: Seção geológica ao longo da faixa costeira da área de estudo (bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal) e da Bacia de Pernambuco, com os principais compartimentos estruturais e coberturas sedimentares (Barbosa et al., 2007).	35
Figura 11: Carta estratigráfica da faixa costeira das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal (Modificada de Barbosa et al., 2007).....	37
Figura 12: A) Mapa de Elevação digital de terreno da margem continental do NE do Brasil com a localização da área de estudo (Polígono vermelho) e das duas linhas sísmicas L1 e L2 (Linhas azuis). B) Linha sísmica L1. C) Linha sísmica L2.	41
Figura 13: A) Mapa de anomalias Ar-Livre. B) Mapa de anomalias Bouguer. Linhas pretas: Zonas de cisalhamento e linha de costa. Polígonos transparentes: Contorno das bacias na região continental. Linhas brancas: Contornos batimétricos e localização das linhas sísmicas. Os números de 1 a 6 são as indicações das bacias sedimentares do NE oriental brasileiro (Consultar a Figura 1 para identificação dos nomes das bacias).....	44
Figura 14: A) Mapa de anomalias isostáticas residuais. B) Mapa de anomalias magnéticas de campo total. Para legenda, consultar a figura anterior.	45
Figura 15: Passo a passo para a filtragem dos dados gravimétricos e magnéticos.....	46
Figura 16: Representação gráfica do filtro gaussiano de separação regional-residual (Modificado de Geosoft, 2013).	47
Figura 17: Espectros de potência radial médio dos dados gravimétricos (A) (anomalias Bouguer - Painel superior) e magnéticos (B) (Campo magnético total - Painel inferior). As retas azuis, vermelhas e pretas marcam as aproximações para a segmentação dos números de onda menores (fontes profundas) e maiores (fontes rasas), respectivamente.....	48
Figura 18: Mapas de anomalias Bouguer regionais (A) e residuais (B). Para a legenda dos mapas, consultar a Figura 13.	49
Figura 19: Mapas de anomalias magnéticas regionais (A) e residuais (B). Para a legenda dos mapas, consultar a Figura 13.....	50
Figura 20: Mapas das derivadas verticais das anomalias Ar-livre (A) e do campo magnético total (B). Para a legenda dos mapas, consultar a Figura 13.	53
Figura 21: Mapas das derivadas verticais das anomalias Bouguer residuais (A) e isostáticas residuais (B). Para a legenda dos mapas, consultar a Figura 13.....	54
Figura 22: Mapa da amplitude do sinal analítico das anomalias magnéticas (A). Mapa do campo magnético total reduzido ao polo (B). Para a legenda dos mapas, consultar a Figura 13.	55

Figura 23: Esboço esquemático do modelo de compensação isostática de Airy-Heiskanen usado para estimar as profundidades da Moho. e - Topografia; d - Profundidade da descontinuidade de Mohorovicic; ds - Espessura crustal no nível do mar; pt - Densidade da crosta; dw - Batimetria; pw - Densidade da água do mar; $\Delta\rho$ - Contraste de densidade (Crosta-Manto Litosférico) ao longo da raiz isostática..... 57

Figura 24: Mapa de profundidades da Moho, obtidas a partir da aplicação do método de Airy-Heiskanen. Para a legenda dos mapas, consultar a Figura 13..... 58

Figura 25: Mapa de profundidades da Moho, obtidas a partir da inversão de dados gravimétricos por Oliveira (2008). O intervalo de contorno é de 500 m no continente e 1 km na região oceânica. Os pontos vermelhos na PB são estimativas de espessura da crosta, obtidas por processamento de dados telesísmicos (França et al., 2006). O ponto azul na PB é uma estimativa da espessura crustal baseada na interpretação sísmica de reflexão profunda (Matos, 1992)..... 58

Figura 26: Mapas de EDT (A) e de profundidades da Moho (B). O polígono branco representa a localização da área de pesquisa. Os setores crustais estão separados pelas linhas pontilhadas branca e amarela: A - Crosta Continental Pouco Deformada; B - Crosta Continental Afinada/Transicional; C - Crosta Oceânica. A linha amarela pontilhada marca a localização da COB. As linhas brancas cheias representam as posições das linhas sísmicas (L1 e L2). As linhas pretas tracejadas representam as zonas de fraturas. As linhas pretas contínuas marcam as zonas de cisalhamento na região continental e a linha de costa. O contorno preto fino marca o limite emerso das bacias na região continental. As linhas brancas finas marcam os contornos da batimetria (A) e das profundidades da Moho (B). Bacias sedimentares do Nordeste oriental do Brasil: 1 - Bacia de Alagoas; 2 - Bacia de Pernambuco; 3 - Bacia da Paraíba; 4 - Bacia da Plataforma de Natal; 5- Platô de Touros; 6 - Bacia Potiguar. 63

Figura 27: Mapas de anomalias gravimétricas Bouguer (A), Ar-livre (B) e de derivada vertical Ar-livre (C). Para a legenda, consultar a Figura 26. 64

Figura 28: Mapas magnéticos de Amplitude do sinal analítico (A), Campo magnético total (B) e de derivada vertical do Campo magnético total (C). Para a legenda, consultar a Figura 26. 68

Figura 29: Modelo geofísico integrado. Do topo para baixo: Perfil das anomalias Bouguer (total, regional e residual) com a localização dos setores crustais; Anomalia Ar-livre modelada; Modelo geológico interpretativo; Seção sísmica L1 interpretada. Os horizontes estratigráficos foram obtidos em Barbosa et al. (2008) e Lima Filho e Barbosa (2010). O retângulo azul pontilhado no perfil das anomalias Bouguer mostra a região de Crosta Continental Afinada/Transicional..... 69

Figura 30: Modelo geofísico integrado. Do topo para baixo: Perfil das anomalias Bouguer (total, regional e residual), com a localização dos setores crustais; Anomalia Ar-livre

modelada; Modelo geológico interpretativo; Seção sísmica L2 interpretada. Os horizontes estratigráficos foram obtidos por Barbosa et al. (2008) e Lima Filho e Barbosa (2010). O retângulo azul pontilhado no perfil das anomalias Bouguer mostra a região da Crosta Continental Afinada/Transicional..... 72

Figura 31: Domínios crustais da margem continental e da área oceânica adjacente das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal. A linha preta pontilhada marca o contato entre os domínios tectônicos da Província Borborema, não associados à tectônica rifte, e o setor A (Crosta Continental Pouco Deformada - Marrom). A linha branca pontilhada apresenta o limite da crosta continental pouco deformada. A linha azul clara pontilhada representa a posição da COB. A região localizada entre a crosta continental pouco deformada e a crosta oceânica (B) é composta pela crosta continental afinada/transicional (Verde claro) e pela crosta proto-oceânica (Verde escuro). A região com interrogações no setor B representa a área de crosta afinada/transicional na Bacia da Plataforma de Natal. Para a definição mais robusta desta região, precisa-se de informações sísmicas. O Setor C representa a área de crosta oceânica com ocorrências de montes submarinos e zonas de fraturas (linhas pretas tracejadas). Domínios da PB: DS - Domínio Sul; DC - Domínio Central; MSC: Maciço São José do Campestre. ZCCN - Zona de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste. 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição do banco de dados gravimétricos, magnéticos e de elevação digital de terreno obtidos para esta pesquisa.....	39
Tabela 2: Lista de filtros aplicados nos dados gravimétricos e magnéticos.	46
Tabela 3: Relação das unidades constituintes dos modelos geofísicos e as respectivas densidades utilizadas para a modelagem das curvas gravimétricas Ar-livre.	60

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	17
1.1 Apresentação e Localização.....	17
1.2 Justificativa da pesquisa.....	19
1.3 Objetivos do trabalho.....	19
1.3.1 Objetivos gerais	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
1.4 Metodologia	20
1.5 Estrutura da dissertação e guia de leitura.....	22
CAPÍTULO II - GEOLOGIA REGIONAL	24
2.1 Introdução	24
2.2 Província Borborema.....	24
2.3 Geologia do Embasamento das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal.....	27
2.3.1 Geologia dos terrenos Rio Capibaribe, Alto Moxotó e Alto Pajeú.....	28
2.3.1 Geologia do Maciço São José do Campestre.....	30
2.4 Bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal.....	30
2.4.1 Bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal no contexto geral da Evolução do Atlântico	30
2.4.2 Visão geral da compartimentação Tectono-Sedimentar das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal	32
2.4.3 Estratigrafia das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal.....	34
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 Introdução	38
3.2 Banco de dados.....	38
3.2.1 Dados gravimétricos e de elevação digital de terreno (EDT).....	38
3.2.2 Dados magnéticos	39
3.2.3 Dados sísmicos.....	39
3.3 Processamento dos dados - Interpolação	42
3.4 Processamento dos dados - Filtragem	42
3.5 Cálculo das profundidades da Moho com base em dados topográficos/batimétricos	56
CAPÍTULO IV - RESULTADOS OBTIDOS	59
4.1 Introdução	59
4.2 Fluxograma de Interpretação.....	59

4.3 Domínios crustais e Configuração estrutural.....	60
SETOR A (Crosta Continental Pouco Deformada)	61
SETOR B (Crosta Continental Afinada/Transicional).....	65
SETOR C (Crosta Oceânica)	70
CAPÍTULO V - DISCUSSÕES	73
5.1 Introdução	73
5.2 Herança tectônica do embasamento	73
5.3 Configuração tectono-estrutural e tipo de margem rifteada	74
5.4 Distribuição dos domínios crustais e potencial exploratório	74
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES.....	77
REFERÊNCIAS	79

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação e Localização

Esta dissertação apresenta um conjunto de informações geofísicas e geológicas regionais acerca do trecho da margem continental brasileira que abrange as bacias da Paraíba (BPB) e da Plataforma de Natal (BPN) (Figura 1). O desenvolvimento desta pesquisa teve como alvo principal a avaliação da arquitetura e do estilo estrutural dos blocos crustais que compõem esta região do Atlântico Sul. Para isto, foram abordados aspectos da interpretação e modelagem de dados sísmicos e de campos potenciais regionais.

A caracterização de domínios crustais (Crosta Continental Pouco Deformada, Crosta Continental Afinada/Transicional e Crosta oceânica) e do estilo estrutural de segmentos que compõem margens rifteadas é um aspecto importantíssimo para ser estudado tanto do ponto de vista acadêmico, quanto aplicado na indústria do petróleo e gás. No primeiro caso, o comportamento reológico e o contexto tectono-estrutural podem ser analisados. No segundo, quando se estima as transições crustais de uma bacia sedimentar, diretamente está se falando a respeito da área de abrangência de seu potencial exploratório. Ou seja, quanto mais distante for o limite entre a Crosta Continental Afinada/Transicional e a Crosta Oceânica (COB), mais ampla será a área a ser explorada.

Esta dissertação faz parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Geociências, pelo Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGEOC) do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

A construção desta dissertação teve o suporte financeiro do Programa de Recursos Humanos (PRH-26) da Agência Nacional do Petróleo, Gás & Biocombustíveis (ANP). O autor também recebe auxílio desde outubro/2013 até agosto/2015 do projeto de pesquisa "Investigação e Integração de Novos Parâmetros aos Métodos Geofísicos de Estudos de Sistemas Petrolíferos em Áreas de Novas Fronteiras", coordenado pelo Prof. Dr. José Antônio Barbosa.

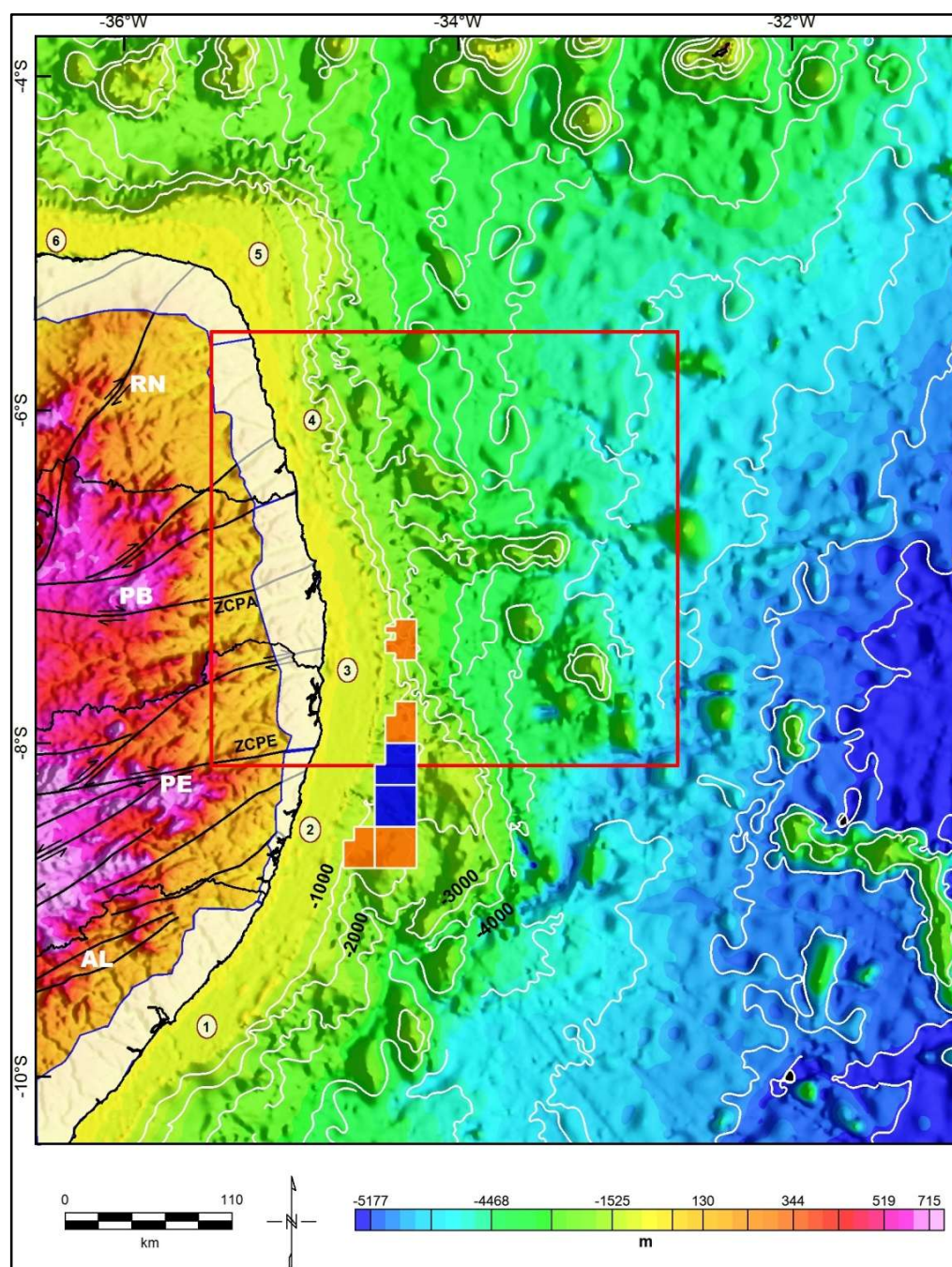


Figura 1: Mapa topográfico/batimétrico com a localização da área de pesquisa (Polígono vermelho) e dos blocos exploratórios arrematados nas rodadas de leilões da ANP (Polígonos azuis: 9ª rodada; Polígonos Laranjas: 11ª rodada). Linhas pretas: Zonas de cisalhamento, linha de costa e limites interestaduais; Linhas azuis: Limites das Bacias na área continental; ZCPE: Zona de Cisalhamento Pernambuco; ZCPA: Zona de Cisalhamento Patos; 1: Bacia de Alagoas; 2: Bacia de Pernambuco; 3: Bacia da Paraíba; 4: Bacia da Plataforma de Natal; 5: Platô de Touros; 6: Bacia Potiguar.

1.2 Justificativa da pesquisa

As bacias de Pernambuco, Paraíba e da Plataforma de Natal, provavelmente, representam ainda as bacias marginais brasileiras menos estudadas. Esta ausência de trabalhos abrange as características mais básicas e importantes para o esforço exploratório, tais como bioestratigrafia, geofísica e história evolutiva. Além disso, ainda são muitas as lacunas em relação ao conhecimento sobre a separação dos continentes, Africano e Sul-Americano nesta faixa.

O presente trabalho tem por finalidade realizar um estudo do comportamento crustal da BPB e da BPN, incluindo as porções emersa e submersa. O objetivo maior deste estudo visa fornecer uma contribuição ao conhecimento geral destas áreas, permitindo assim, aumentar a compreensão da evolução geológica com implicações em relação ao seu potencial petrolífero.

A importância desta pesquisa encontra justificativa na necessidade de prosseguir com o esforço de obter uma melhor compreensão a respeito da natureza geológica da BPB e da BPN. O presente estudo trará melhor base de decisão para o interesse econômico que tem aumentado especialmente nas bacias de Pernambuco e da Paraíba, devido aos blocos exploratórios que foram arrematados nas rodadas 9 e 11 (Figura 1). Com isso, uma melhor interpretação dos compartimentos tectono-estruturais poderá ser utilizada para integrar ao conhecimento regional da área e permitir uma melhor compreensão do processo de abertura do Atlântico Sul.

1.3 Objetivos do trabalho

1.3.1 Objetivos gerais

O objetivo geral engloba a integração de dados geológicos e geofísicos regionais para a obtenção de um melhor entendimento dos domínios crustais e do estilo estrutural, desenvolvidos a partir do processo de abertura do Atlântico Sul. Esta integração compreendeu principalmente o processamento e interpretação de dados de campos potenciais, topográficos/batimétricos e sísmicos.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos, abrangem os seguintes produtos:

- i. Mapeamento dos domínios crustais (Crosta Continental Pouco Deformada, Crosta Continental Afinada/Transicional e Crosta oceânica), a partir de suas características gravimétricas e magnéticas;
- ii. Estimativa da interface Crosta/Manto Litosférico (Descontinuidade de Mohorovicic), utilizando o método de Airy-Heiskanen;
- iii. Interpretação sismoestratigráfica sob a ótica de transição crustal e estilo estrutural;
- iv. Modelagem gravimétrica 2D, integrando todas as informações acima, para a estimativa da COB e avaliação dos domínios crustais.

1.4 Metodologia

Os métodos que foram empregados na elaboração desta dissertação podem ser visualizados no fluxograma da Figura 2.

i. Levantamento Bibliográfico: As pesquisas bibliográficas foram conduzidas para a maior consolidação dos conhecimentos nas temáticas relacionadas com os principais objetivos do trabalho. Sendo assim, os assuntos em que esta pesquisa mais se dedicou foram acerca da arquitetura de domínios crustais em margens passivas, estilos estruturais em margens rifteadas, evolução tectônica do Atlântico, interpretação e modelagem de dados gravimétricos, magnéticos e sísmicos, e estimativa de transições crustais.

ii. Compilação do banco de dados:

a) Dados gravimétricos e topográficos/batimétricos: Os dados gravimétricos regionais são provenientes do Modelo Geopotencial Terrestre (**EGM 2008**), disponibilizado pela Agência Nacional de Inteligência Geoespacial (NGA) (Pavlis et al., 2008). Com a compilação desses dados, os mapas de Gravidade do Mundo (WGM) mostram um conjunto de anomalias de alta resolução computadas em escala regional, a partir de modelos de elevação digital de terreno (**ETOPO 1**) e do campo de gravidade terrestre (**EGM2008**).

b) Dados magnéticos: As informações magnéticas regionais foram obtidas a partir do projeto **EMAG2**, que representa um avanço das informações contidas no projeto **WDMAM**. As fontes dos dados do projeto **EMAG2** são provenientes de informações aéreas, marítimas e por satélites (Maus et al., 2009). Os dados magnéticos foram ajustados

para uma altitude de 4 km e o produto final apresenta um conjunto de dados do campo magnético terrestre com uma resolução de 2'x2' de arco.

c) Dados sísmicos: Os dados sísmicos utilizados neste trabalho foram provenientes do Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC) e do Banco de Dados de Exploração e Produção da Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (BDEP-ANP). Ambas as linhas sísmicas apresentam características regionais e foram usadas como base da construção dos modelos geofísicos 2D.

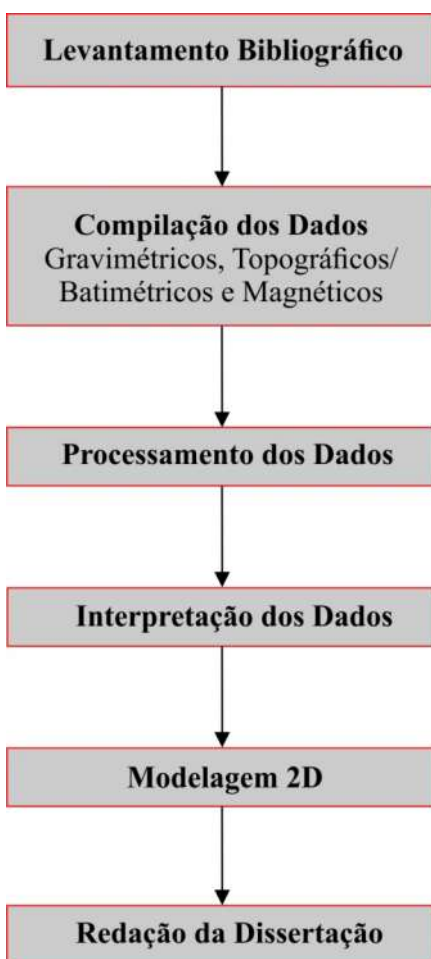


Figura 2: Fluxograma das atividades desenvolvidas para a realização desta dissertação.

iii. Processamento dos dados gravimétricos, magnéticos e topográficos/batimétricos: Para o processamento digital, inicialmente os dados de campos potenciais e topográficos/batimétricos foram interpolados pelo método de mínima curvatura. Nos dados gravimétricos e magnéticos, também foram aplicados alguns filtros no domínio do número

de onda. Os dados topográficos/batimétricos foram alvo da aplicação das rotinas computacionais para a obtenção da profundidade da Moho, a partir do modelo de Airy-Heiskanen. Todo o processamento digital dos dados foi realizado no *software* Oasis Montaj (versão 8.2, Geosoft).

iv. Interpretação dos dados: Na interpretação dos dados sísmicos, gravimétricos e magnéticos, buscou-se, principalmente, a análise e distinção dos domínios crustais. Este exercício se deu através da correlação entre as estimativas das profundidades da Moho, da espessura crustal e de suas respectivas assinaturas sísmicas e de campos potenciais.

v. Modelagem gravimétrica 2D: A modelagem gravimétrica 2D foi efetuada nos dados de anomalias Ar-Livre, por meio do ajuste de blocos com densidades inferidas para a área de pesquisa a partir de informações compiladas da literatura. Os modelos gravimétricos foram elaborados ao longo da localização das linhas sísmicas e construídos com base na interpretação sismoestratigráfica das principais unidades crustais e feições estruturais. Os parâmetros dos modelos gravimétricos são as profundidades da Moho, a espessura sedimentar, obtida pela conversão Tempo x Profundidade dos dados sísmicos, e as densidades dos blocos crustais. Com isso, curvas gravimétricas teóricas foram ajustadas às anomalias observadas. A modelagem gravimétrica 2D foi realizada no menu GM-SYS 2D do *software* Oasis Montaj (versão 8.2, Geosoft).

viii. Redação da Dissertação: O resultado de todo o trabalho que foi sintetizado acima está expresso neste texto, compondo assim, o documento de registro final desta dissertação.

1.5 Estrutura da dissertação e guia de leitura

Esta dissertação foi elaborada em 6 capítulos. Com isso, abaixo segue uma descrição sumarizada a respeito de cada um deles.

Capítulo I: Traz os aspectos introdutórios ao tema da pesquisa. Essas informações contêm a localização da área, apresentação da proposta da pesquisa, e os objetivos e técnicas empregadas.

Capítulo II: Apresenta uma revisão acerca da geologia regional, onde a área de pesquisa está inserida. Isso envolveu uma descrição geológica da área no contexto da evolução geotectônica do Atlântico sul, uma avaliação em escala regional sobre o

embasamento pré-cambriano e as respectivas estruturas tectônicas, e a abordagem das unidades geológicas que compõem as bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal.

Capítulo III: Este capítulo descreve a compilação dos dados geofísicos e topográficos/batimétricos, além das técnicas de processamento e os parâmetros envolvidos na transformação dos dados gravimétricos, magnéticos e topográficos/batimétricos.

Capítulo IV: São apresentados os resultados obtidos pela interpretação e modelagem integrada dos dados, sob a ótica de transições crustais e arquitetura estrutural.

Capítulo V: Aborda as discussões a respeito dos controles estruturais e tectônicos regionais exercidos pelo embasamento na formação das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal. Além desses, este capítulo apresenta a configuração estrutural e definição da margem rifteada, a distribuição dos domínios crustais e o respectivo potencial exploratório da área de pesquisa.

Capítulo VI: Apresenta as conclusões da dissertação oferecendo uma nova visão a respeito dos tipos crustais e do estilo estrutural da margem continental que as bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal estão inseridas.

CAPÍTULO II - GEOLOGIA REGIONAL

2.1 Introdução

O trecho da margem continental brasileira, compreendida entre os platôs de Pernambuco e de Touros (Figura 3), corresponde à porção do continente Sul-Americano que representou o último elo de ligação com o continente africano. Isto provavelmente se deu durante a fase mais tardia da evolução do Rifte Atlântico, há aproximadamente 105-100 milhões de anos (Caixeta et al., 2014; Granot e Dymant, 2015). A abertura do Oceano Atlântico Sul se iniciou no Jurássico superior, mas se desenvolveu plenamente durante o Cretáceo. A BPB e a BPN repousam de forma discordante sobre o embasamento pré-cambriano, pertencente aos domínios ou sub-províncias Central e Norte da Província Borborema (PB), respectivamente. Este é o cenário geológico e tectônico regional no qual se desenvolveu o presente trabalho.

2.2 Província Borborema

Esta província foi definida inicialmente por Almeida et al. (1977) como sendo um domínio geológico-estrutural localizado no nordeste oriental do Brasil, limitado a sul pelo Cráton São Francisco, a oeste pela Bacia do Parnaíba e a norte e leste pelas bacias marginais. Recentemente, a partir dos trabalhos de De Castro et al. (2013, 2014) e Araujo et al. (2013), o limite oeste da PB seria o Bloco do Parnaíba, que representaria uma extensão do Cráton Amazônico-Oeste Africano (Figura 4). A configuração tectônica da PB foi inicialmente descrita como um conjunto de maciços e sistemas de dobramentos estruturados durante a Orogênese Brasileira (em torno de 0,6 Ga) no final do Neoproterozoico (Brito Neves, 1975; Almeida et al., 1976). Com a evolução das pesquisas, a PB passou a ser interpretada como o resultado da ocorrência e superposição de mais de uma orogênese ao longo do tempo, e sua complexidade tectônica foi atribuída à aglutinação de terrenos alóctones, separados por extensas zonas de cisalhamento (Jardim de Sá et al., 1992; Jardim de Sá, 1994; Santos, 1996; Santos et al., 2000). Entretanto, alguns pesquisadores defendem a existência apenas de faixas dobradas ensiálicas, cujos sedimentos neoproterozoicos, depositados sobre um embasamento Arqueano a Paleoproterozoico foram deformados e metamorfisados na Orogênese Brasileira (Neves, 2003; Neves et al., 2006).

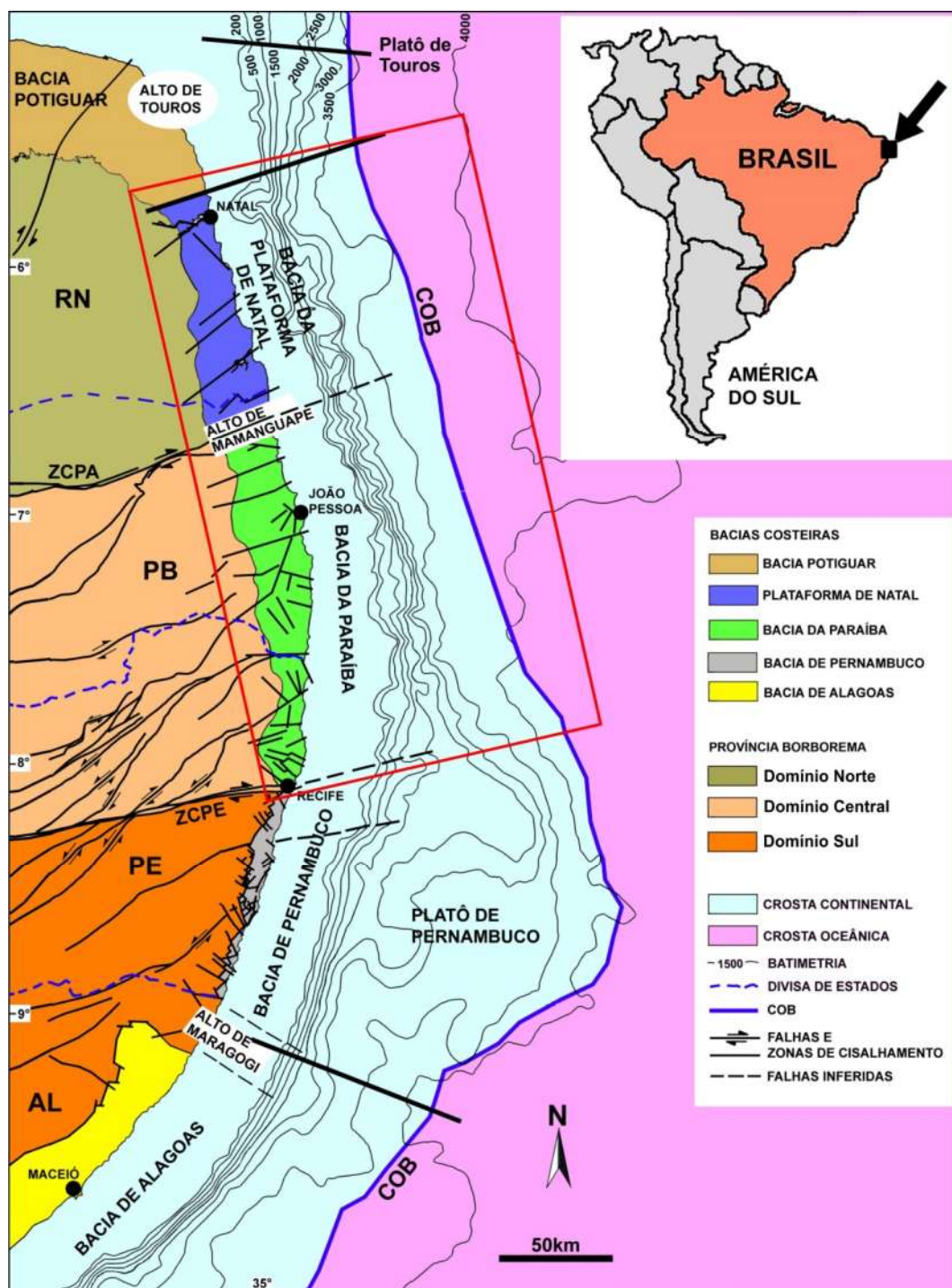


Figura 3: Mapa das bacias marginais do nordeste oriental do Brasil, com destaque para os segmentos localizados entre a ZCPE e o Alto de Touros (Retângulo vermelho) (Modificada de Barbosa, 2007). A estimativa da COB é baseada nos mapas de Karner e Driscoll (1999) e Gomes (2005).

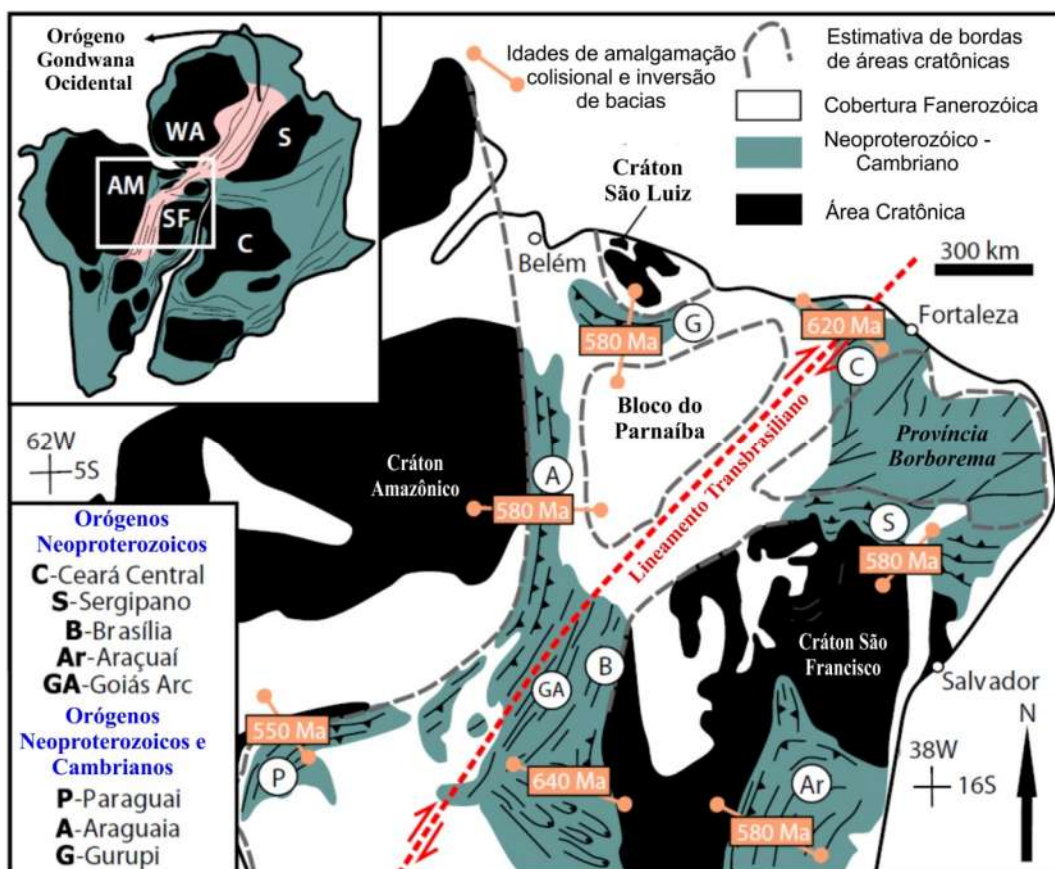


Figura 4: Mapa paleogeográfico da Plataforma Sul-Americana, mostrando a Província Borborema, áreas cratônicas, blocos continentais, e orógenos Neoproterozoicos e Cambrianos (Modificado de Araujo et al., 2013). Áreas cratônicas: AM = Amazônico; WA = Oeste Africano; SF = São Francisco; C = Congo; S = 'Metacráton' do Saara.

Por sua vez, Araujo et al. (2013) propuseram que a evolução da PB estaria condicionada a um mecanismo de extrusão tectônica, resultante da interferência de dois importantes eventos colisionais durante o Neoproterozoico (620-570 Ma). Independente da maneira de como a província evoluiu, suas unidades litoestratigráficas consistem de um embasamento Arqueano a Paleoproterozoico, composto por blocos gnáissico-migmatíticos. Além desses, a PB abrange várias faixas de dobramentos compostas por sequências metassedimentares e metavulcanossedimentares e por um expressivo volume de intrusões graníticas, datadas do Neoproterozoico (Brito Neves et al., 2000; Van Schmus et al., 2003; Neves et al., 2012). O arcabouço tectono-estrutural da PB apresenta uma série de zonas de cisalhamento de escala crustal que representam extensas ramificações a partir do sistema de cisalhamento Transbrasiliano (Araujo et al., 2013). Entre essas zonas de cisalhamento, destacam-se a de Pernambuco e Patos, que são responsáveis por dividir a PB em três grandes domínios ou sub-províncias: Sul, Central e Norte (Figura 5).

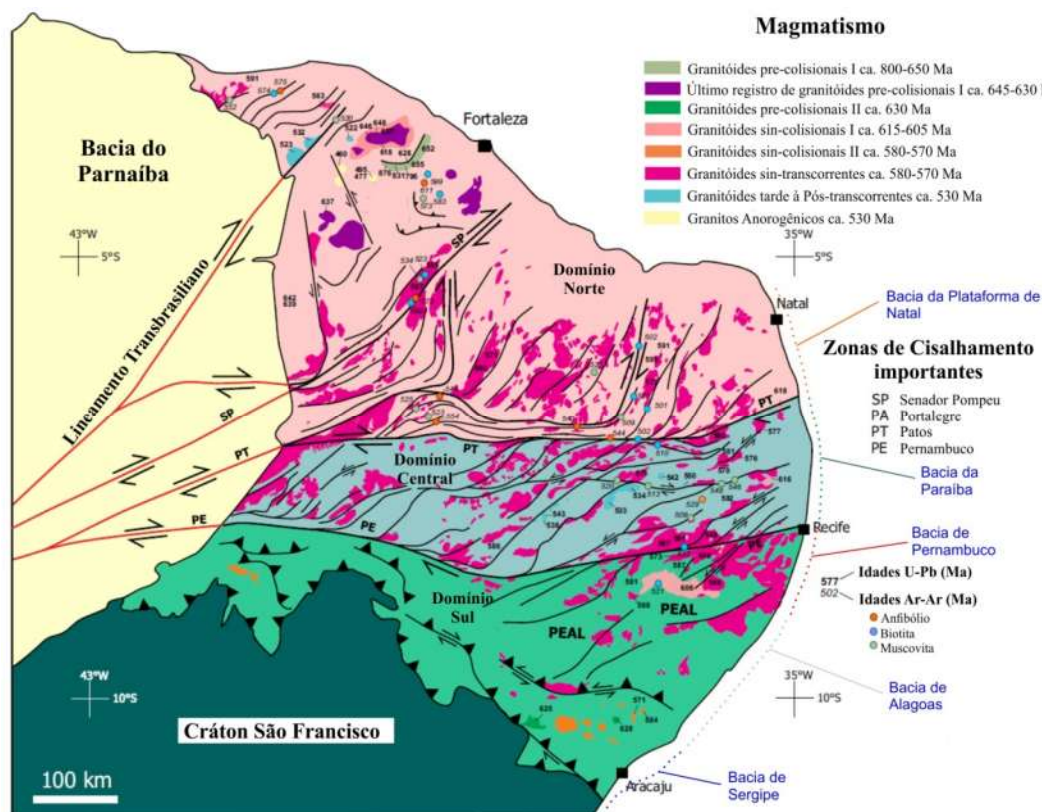


Figura 5: Mapa simplificado da Província Borborema e seus domínios (Sul, Central e Norte), com a distribuição temporal e espacial de corpos granitóides (Modificado de Araújo et al., 2013). As bacias marginais estão posicionadas e é possível ver sua relação com a compartimentação estrutural da PB.

Após a amalgamação do Gondwana e com a PB estruturada, esta passou a ser retrabalhada a partir do Paleozoico com a implementação de riftes intracontinentais (De Castro et al., 2013, 2014) e a formação da Sinéclise do Parnaíba. No Mesozoico, ocorreu a fragmentação do Pangeia, levando a consequente formação do Atlântico, com o desenvolvimento de riftes interiores e a evolução da margem continental brasileira (Asmus, 1984; Matos, 1992). Após a separação entre a América do Sul e a África, dois importantes eventos marcaram o Cenozoico: O vulcanismo Macau (Sial, 1976; Almeida et al., 1988; Mizusaki et al., 2002; Souza et al., 2004) e o soerguimento do Planalto da Borborema (Ab'Saber, 1953; Mabesoone e Castro, 1975; Castro e Mabesoone, 1980; Oliveira e Medeiros, 2012; Lima et al., 2015).

2.3 Geologia do Embasamento das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal

O embasamento da margem continental inserida entre a zona de cisalhamento Pernambuco e o Platô de Touros é composto por unidades dos domínios Central e Norte

(Figura 5). No caso da Bacia da Paraíba, seu embasamento engloba as porções mais orientais do Domínio Central, e este é dividido de sul para norte pelos terrenos Rio Capibaribe, Alto Moxotó e Alto Pajeú (Figura 6). O embasamento da Bacia da Plataforma de Natal é composto pelo bloco crustal do Maciço São José do Campestre, inserido no Domínio Norte (Figura 6). Do ponto de vista estrutural, o Domínio Central apresenta uma geometria em pares conjugados de zonas de cisalhamento de alto ângulo, dispostas nas direções E-W e NE-SW, apresentando cinemáticas dextral e sinistral, respectivamente (Neves et al., 2012; Araujo et al., 2013) (Figura 6). Já o Domínio Norte encontra-se fortemente balizado pelas zonas de cisalhamento de alto ângulo NNE-SSW, ramificadas a partir da zona de cisalhamento Patos e com cinemática dextral (Figura 6) (Araujo et al., 2013).

2.3.1 Geologia dos terrenos Rio Capibaribe, Alto Moxotó e Alto Pajeú

O Terreno Rio Capibaribe encontra-se limitado com o Domínio Sul e com o Terreno Alto Moxotó pelas zonas de cisalhamento Pernambuco e Congo-Cruzeiro do Nordeste, respectivamente (Figura 6). A geologia deste compartimento é definida como uma faixa de dobramentos composta por sequências metassedimentares principalmente de idade Neoproterozoica, além de intrusões graníticas relacionadas com a Orogênese Brasileira. O embasamento deste terreno é dominado por ortognaisses bandados de composição diorítica a granodiorítica com idades entre 2.12, 1.97 e 1.5 Ga (Sá et al., 2002; Neves et al., 2006).

O Terreno Alto Moxotó (Figura 6) corresponde a uma lasca do embasamento gnáissico-migmatítico Paleoproterozoico que foi retrabalhado no Neoproterozoico e unidades supracrustais metassedimentares e metavulcanossedimentares (Brito Neves et al., 2000). As unidades supracrustais fazem parte dos complexos Sertânia e Caroalina, apresentando xistos e paragnaisses, com menor ocorrência de marga, quartzito e rochas cálcio-silicáticas.

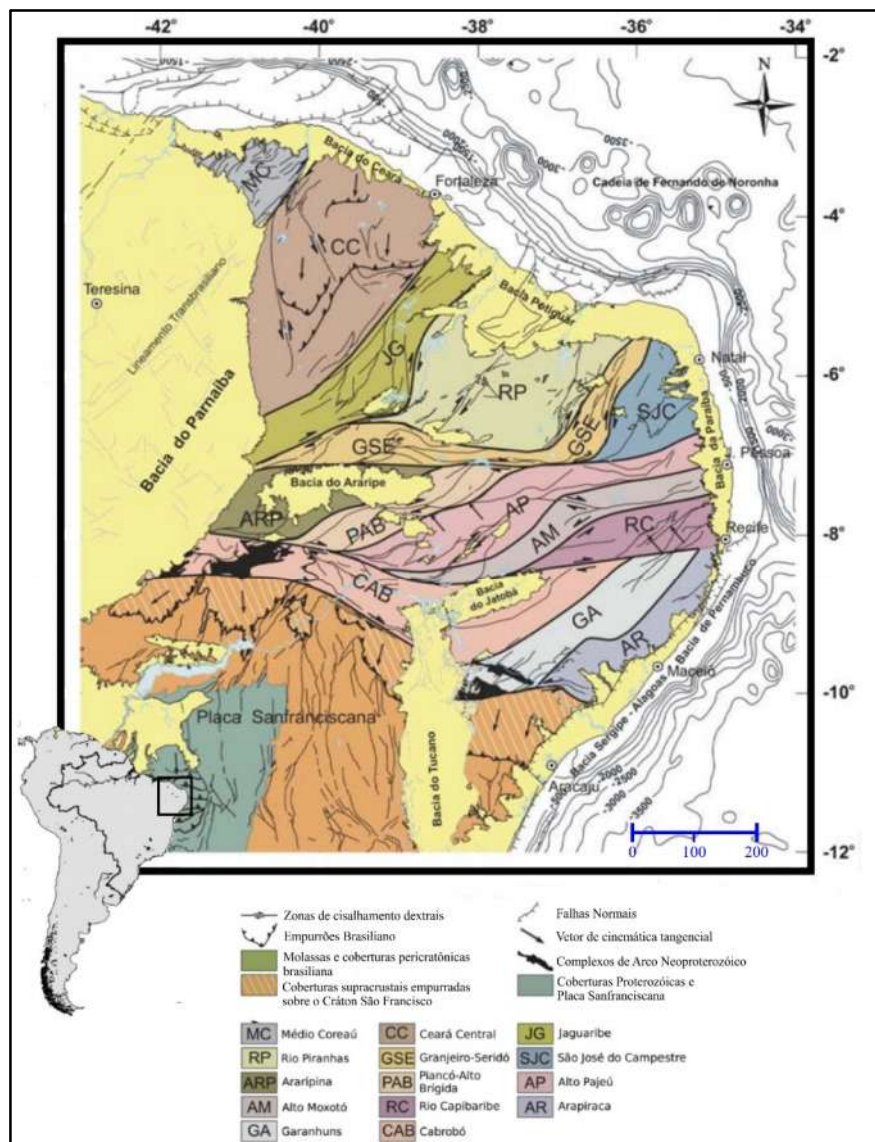


Figura 6: Arcabouço geológico-estrutural da PB com a distribuição dos principais terrenos e zonas de cisalhamento (modificado de Oliveira, 2008).

O Terreno Alto Pajeú está limitado a sul e a norte pelo Terreno Alto Moxóto e o Maciço São José do Campestre, pela *Nappe* Serra de Jabitacá e pela zona de cisalhamento Patos, respectivamente (Figura 6). Neste terreno há uma predominância de sequências orogênicas tipo Cariris Velhos (Complexos Salgueiro-Riacho Gravatá e São Caetano), com a presença de rochas metassedimentares intercaladas com porções metavulcânicas e metavulcanossedimentares (Bittar, 1998; Santos et al., 2002). Além desses, a presença de um volumoso magmatismo granítico sin-colisional são representados pela suíte Recanto/Riacho do Forno.

2.3.1 Geologia do Maciço São José do Campestre

Este maciço está limitado a oeste e a sul pelas zonas de cisalhamento Picuí-João Câmara e Patos (Figuras 6 e 7). Sua geologia é composta por ortognaisses Arqueanos tipo tonalito-trondhjemitó-granodiorito (TTG) e associações do tipo *greenstone belt*, que foram formados durante vários e complexos eventos acrescionários, que datam desde 3,45 até 2,69 Ga (Dantas et al., 2004, 2013). Este núcleo Arqueano é bordejado por terrenos gnáissicos cálcio-alcálinos Paleoproterozoicos (2,15 - 2,25 Ga) e encontra-se recoberto por coberturas metassedimentares do Grupo Seridó e intrudidos por corpos graníticos, alojados por zonas de cisalhamento, que foram datados com cerca 575 Ma.

2.4 Bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal

2.4.1 Bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal no contexto geral da Evolução do Atlântico

A propagação da deformação do rifte Atlântico Sul ocorreu de sul para norte em um processo diacrônico (Bueno, 2004) (Figura 8). Este avanço da deformação se deu provavelmente em quatro estágios, a partir do modelo de rifte propagante: 1) o primeiro *breakup* aconteceu em torno de 132 Ma, com a produção das primeiras gerações de *seaward dipping reflectors* (SDRs) (Bueno, 2004), entre as bacias de São Jorge e Pelotas (Figura 8); 2) avançando para norte, o segundo *breakup* se deu a aproximadamente 126 Ma e abrange até a região da Bacia de Santos (Bueno, 2004) (Figura 8); 3) o terceiro estágio avançou a partir do Platô de São Paulo e alcançou as regiões das bacias do Jacuípe e de Sergipe, no Aptiano Superior, em torno de 112 Ma (Bueno, 2004) (Figura 8); 4) provavelmente, o último estágio do *breakup* do Atlântico ocorreu entre 105 e 98Ma, englobando as regiões das bacias de Alagoas, Pernambuco, Paraíba e Plataforma de Natal (Caixeta et al., 2014; Heine e Brune, 2014; Granot e Dymant, 2015) (Figura 8). Heine e Brune (2014) avaliaram aspectos temporais e geodinâmicos da propagação do rifte Atlântico, a partir da análise cinemática de placas tectônicas e modelagem numérica. Eles propuseram que o afinamento crustal do último elo de ligação (bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal na porção da placa sul-americana) entre os continentes sul-americano e africano estaria condicionado por um forte incremento de velocidades na separação da placa sul-americana. Entretanto, a partir da Bacia de Pernambuco até a Bacia da Plataforma de Natal, devido à falta de dados sísmicos profundos e de poços na parte

offshore, a forma como os fenômenos tectônicos e magmáticos se desenvolveram ainda são muito pouco conhecidos.

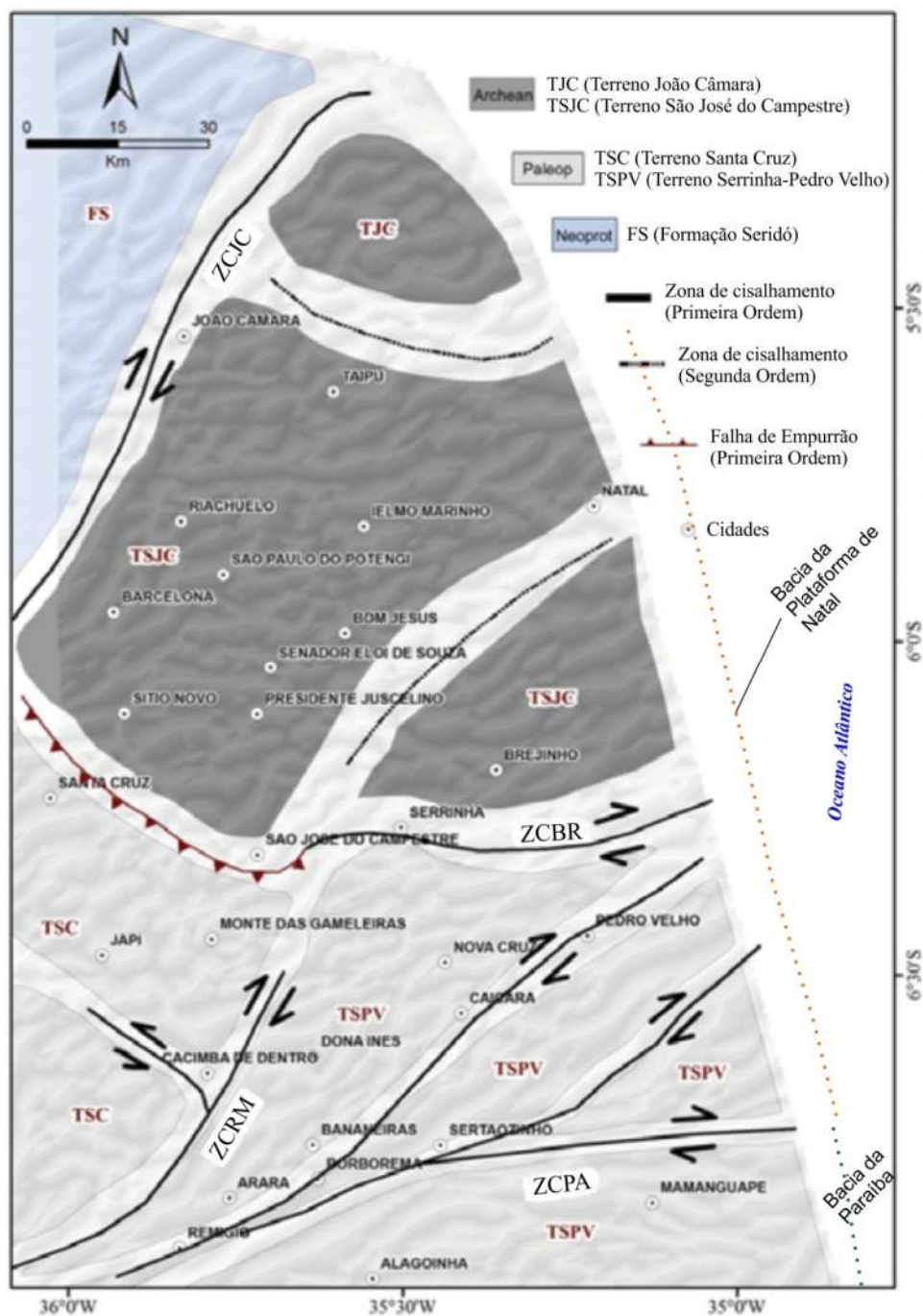


Figura 7: Mapa geológico-estrutural do Maciço São José do Campestre (modificado de Araújo et al., 2014). Zonas de cisalhamento: ZCPA = Patos, ZCRM = Remígio, ZCBR = Brejinho, ZCJC = João Câmara. As linhas pontilhadas marcam a extensão das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal.

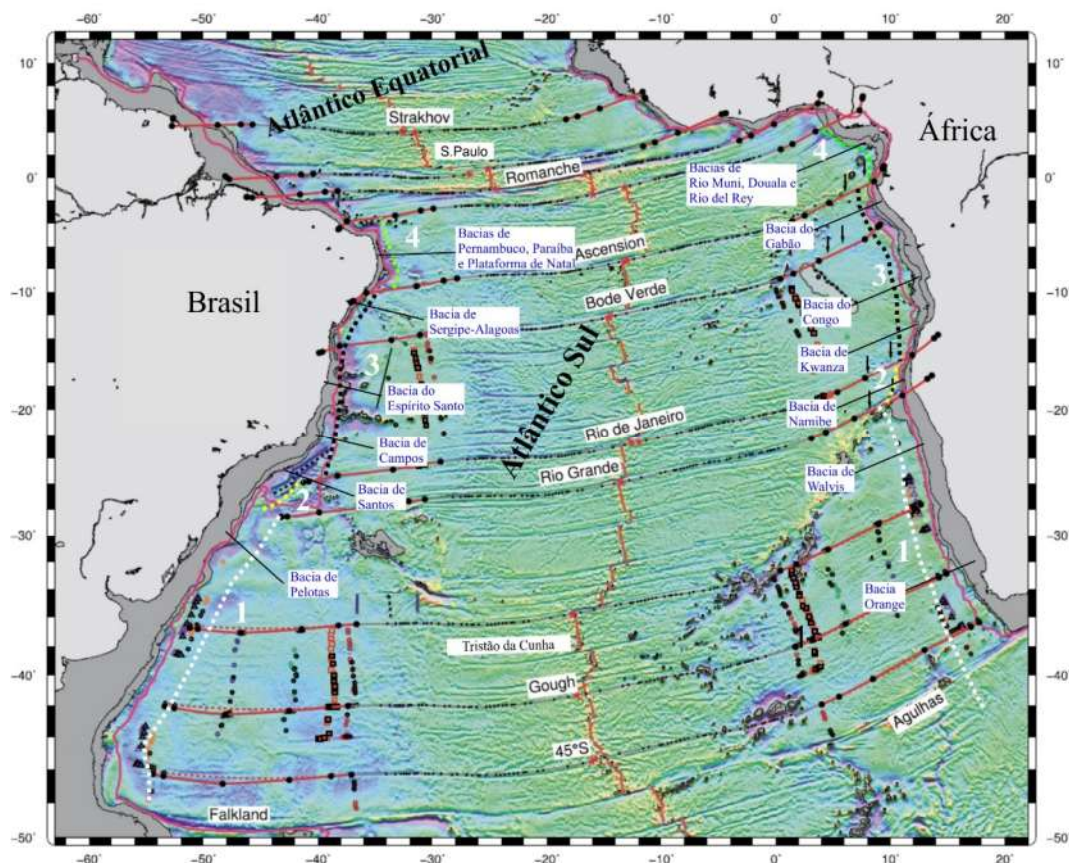


Figura 8: Mapa de localização das placas Sul-Americana e Africana com a posição das principais bacias e zonas de fraturas (Adaptado de Granot e Dymant, 2015). As linhas pontilhadas (branca, amarela, preta e verde) e os números em branco representam os quatro estágios da propagação do rifte. Estas considerações foram propostas principalmente pela correlação dos trabalhos de Bueno (2004) e Caixeta et al. (2014).

2.4.2 Visão geral da compartimentação Tectono-Sedimentar das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal

A herança tectônica do embasamento, os fenômenos térmicos e as possíveis diferenças nas taxas de afinamento e estiramento crustal das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal, provavelmente, causaram marcantes diferenças em seus estilos tectônicos quando comparados com a Bacia de Pernambuco (Barbosa e Lima Filho, 2006; Barbosa et al., 2008). As bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal apresentam-se com padrões tectônicos similares, marcada por uma região plataformal estreita com pouca cobertura sedimentar, por uma quebra abrupta da plataforma continental, além de pouca ou quase ausência de rochas magmáticas (Barbosa e Lima Filho, 2006; Barbosa et al., 2008). Por sua vez, a Bacia de Pernambuco apresenta uma bacia interna, separada da bacia

oceânica por uma charneira alongada, um platô formado sobre crosta continental afinada e com espessa cobertura sedimentar, além de uma significativa contribuição magmática (Oliveira, 2013).

A partir da análise de uma série de poços, é possível avaliar o comportamento estrutural das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal na faixa costeira (Figuras 9 e 10). A ZCPE apresenta-se como uma região de fronteira importantíssima que segmentou os setores a sul (Bacia de Pernambuco) e a norte (bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal) (Figura 10).

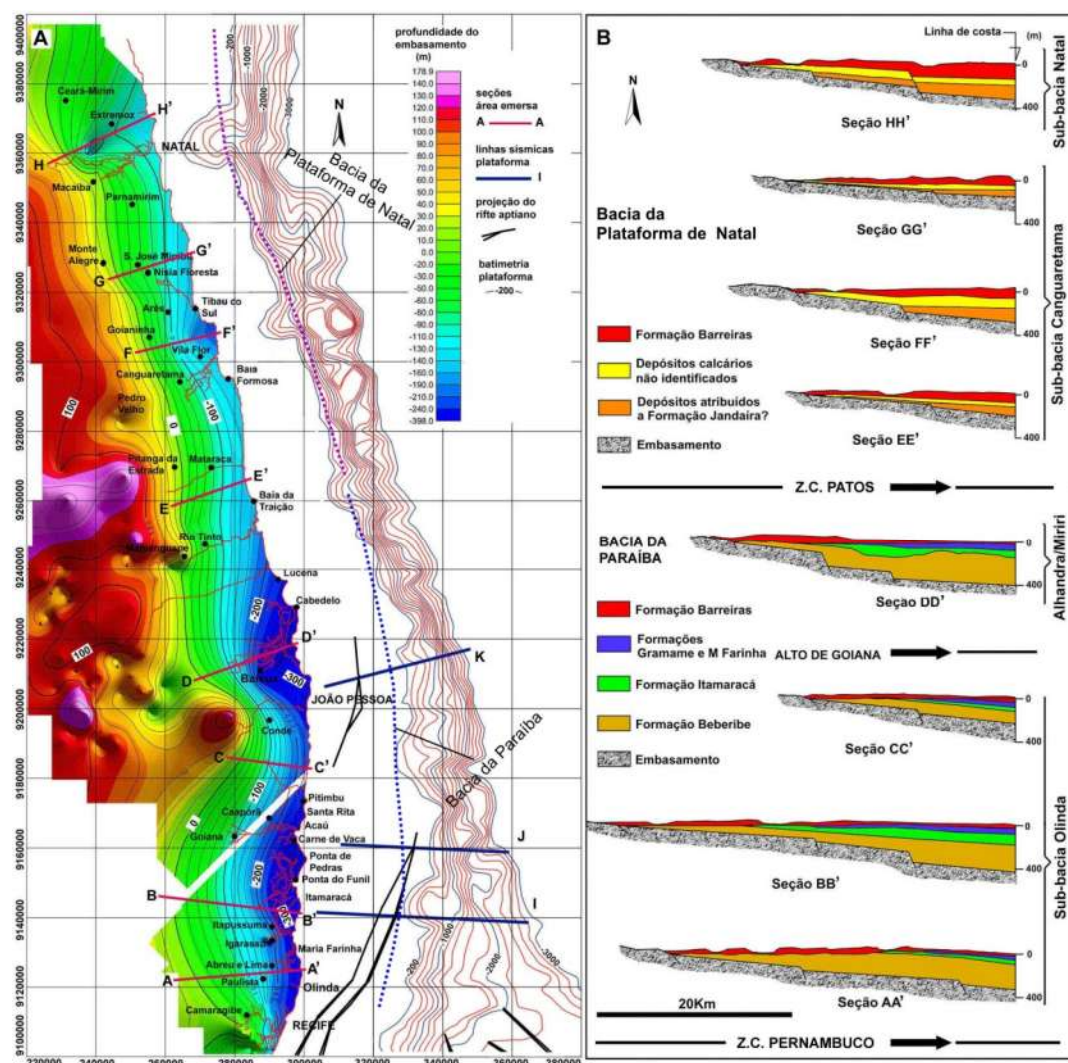


Figura 9: Contorno estrutural do embasamento da faixa costeira das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal, produzidos a partir de 185 poços que alcançaram o embasamento (Barbosa et al., 2007). A) Mapa da profundidade do embasamento e B) Seções geológicas interpretadas a partir dos dados interpolados e da correlação estratigráfica dos poços.

Na Bacia da Paraíba, o embasamento apresenta profundidades máximas em torno de 400 m e fica mais raso em direção à Bacia da plataforma de Natal (em torno de 200 m) (Figura 9). Em contrapartida, na região da Bacia de Pernambuco, o poço 2CP-01-PE alcançou a profundidade de quase 3 km e não atingiu o embasamento. Do ponto de vista tectono-estratigráfico, os embasamentos da BPB e da BPN permaneceram altos durante o Aptiano e o Albiano (Barbosa e Lima Filho, 2006), e esta configuração provavelmente causou a ausência de depósitos dessas idades na faixa costeira dessas bacias.

A partir da análise estrutural, em termos geométricos e cinemáticos, na região da faixa costeira das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal existem três padrões estruturais relacionados com a propagação do rifte (Barbosa e Lima Filho, 2006): 1) lineamentos E-W e NE-SW associados com as zonas de cisalhamento do embasamento e com falhas de transferência, que provavelmente estão relacionadas com a evolução do rifte, a partir da reativação das estruturas do embasamento; 2) falhas normais e de transferência possivelmente geradas durante o rifteamento, com direção NW-SE; e 3) menos abundante, as falhas e fraturas de direção N-S. Ao longo de exposições de coberturas carbonáticas do Maastrichtiano e do Paleoceno (Fase Drifte) é possível observar fraturas distensionais NW-SE, preenchidas por calcita. Essas estruturas poderiam estar relacionadas a reativações tardias de estruturas do embasamento como proposto por Bezerra et al. (2014). Na região *offshore*, a compreensão sobre o estilo estrutural e a forma como os compartimentos tectono-sedimentares evoluíram, ainda permanecem em aberto, e esta dissertação tentará elucidar as primeiras características regionais acerca desta porção.

2.4.3 Estratigrafia das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal

A falta de poços estratigráficos tem dificultado bastante a compreensão da evolução estratigráfica dessas bacias. O único poço exploratório está localizado na região da Ilha de Itamaracá (2 IST-1-PE) e atingiu o embasamento da Bacia da Paraíba a cerca de 400 metros (Figuras 9 e 10). Além desse, outros poços utilizados para investigação hidrogeológica fazem parte do acervo de dados utilizados para o conhecimento da estratigrafia da BPB e da BPN (Barbosa e Lima Filho, 2006).

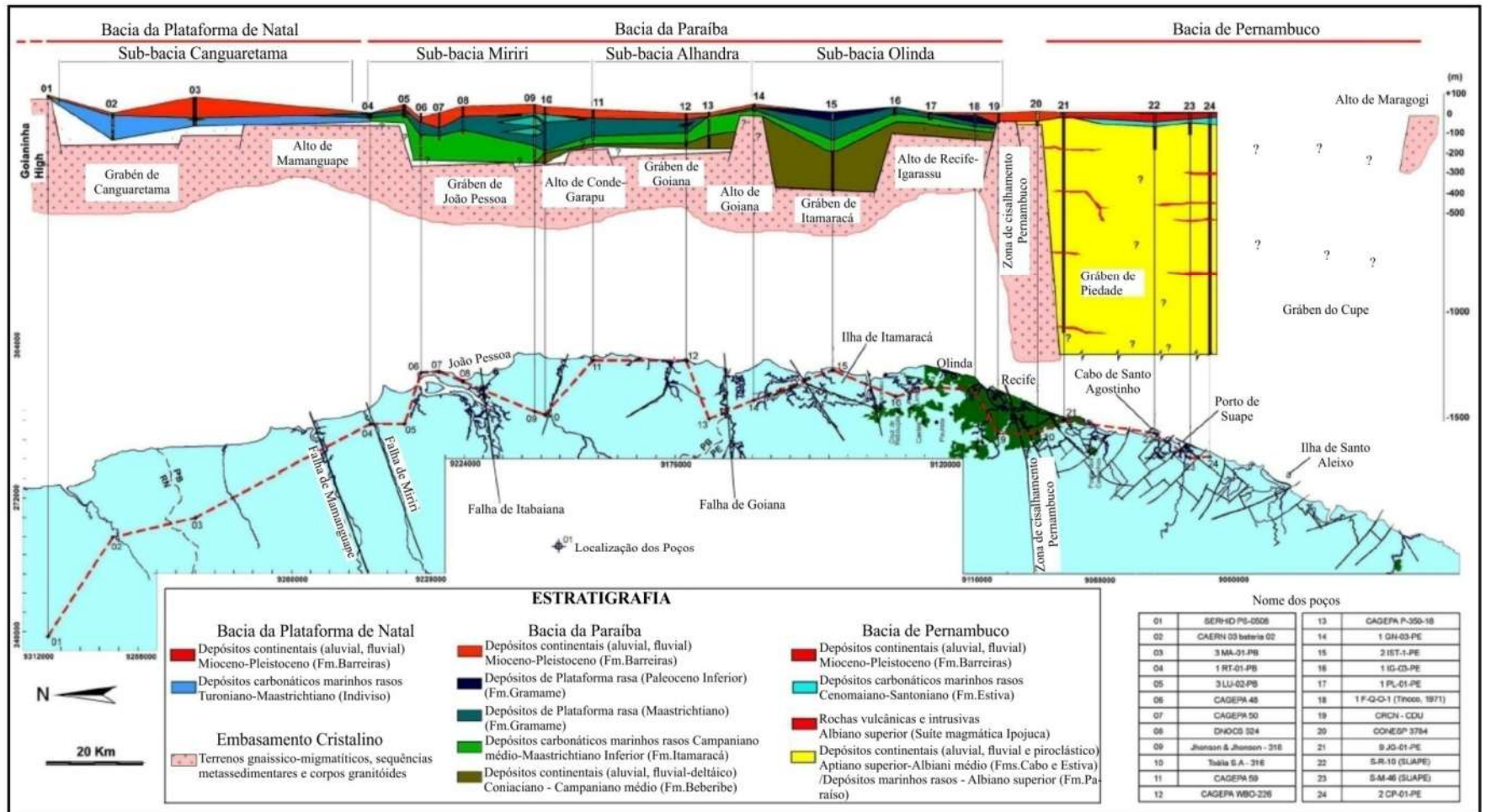


Figura 10: Seção geológica ao longo da faixa costeira da área de estudo (bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal) e da Bacia de Pernambuco, com os principais compartimentos estruturais e coberturas sedimentares (Barbosa et al., 2007).

Com relação à Bacia da Paraíba, esta se divide na faixa costeira pelas sub-bacias Olinda e Alhandra-Miriri (Figuras 9, 10 e 11). A cobertura sedimentar basal desses compartimentos é marcada pela Formação Beberibe (Figuras 9b, 10 e 11), que apresenta arenitos grossos, depositados em sistemas aluvial e fluvial. Pelo fato dos dados bioestratigráficos desta formação serem escassos, as estimativas de primeira ordem marcam as idades entre o Turoniano e o Santoniano. Os depósitos transicionais (arenitos calcíferos) da Formação Itamaracá (Campaniano - Eo-Maastrichtiano) (Figuras 9b, 10 e 11) marcam um estágio de transgressão marinha da bacia. Sendo que a porção superior desta formação é marcada por uma ampla camada de fosfato, que é explotada desde a década de 1970. A Formação Gramame (Figuras 9b, 10 e 11) é composta por margas, calcários margosos e calcários e datam do Maastrichtiano. Esses depósitos marcam a estabilização das condições marinhas associadas a rampa carbonática rasa. Os depósitos da Formação Maria Farinha (Figuras 9b, 10 e 11) datam do Daniano e encontram-se sobrepostos a Formação Gramame. Os depósitos que compõem esta formação são carbonatos margosos e carbonatos arenosos, provavelmente associados a sistemas recifal e lagunal. A formação mais superior, completando a coluna sedimentar desta Bacia, é composta pela Formação Barreiras (Figuras 9b, 10 e 11), formada a partir do Mioceno e Pleistoceno. Várias bacias marginais do Brasil receberam sua deposição a partir de sistemas aluvial, fluvial e deltaico (Rosseti e Góes, 2009).

Na faixa costeira, a Bacia da Plataforma de Natal é subdividida pelas sub-bacias de Canguaretama e Natal (Figuras 9, 10 e 11). A sua coluna sedimentar é dominada por arenitos calcíferos, calcários arenosos e margas (Barbosa et al., 2007). O preenchimento sedimentar ocorreu relacionado a uma plataforma muito estreita e influenciada por influxo de material siliciclástico em uma restrita rampa rasa. A sequência basal (Figuras 9b, 10 e 11) é de idade Turoniana e formada por calcários recristalizados com grãos siliciclásticos detritais, além de arenitos calcíferos. Esta sequência é frequentemente mencionada como a continuação da deposição da Formação Jandaíra (Bacia Potiguar) (Lana e Roesner, 1999). A sequência superior (Figuras 9b, 10 e 11) abrangem os depósitos de idade Campaniana e Maastrichtiana que são formados por margas siltosas, calcários arenosos e arenitos calcíferos (Barbosa et al., 2007). A sequência superior possivelmente é correlata das formações Itamaracá e Gramame (Bacia da Paraíba), entretanto, provavelmente os sistemas deposicionais eram mais rasos, os quais resultaram em diferentes associações de fácies (Barbosa e Lima Filho, 2006). A sequência mais nova, assim como na BPB, engloba os depósitos da Formação Barreiras.

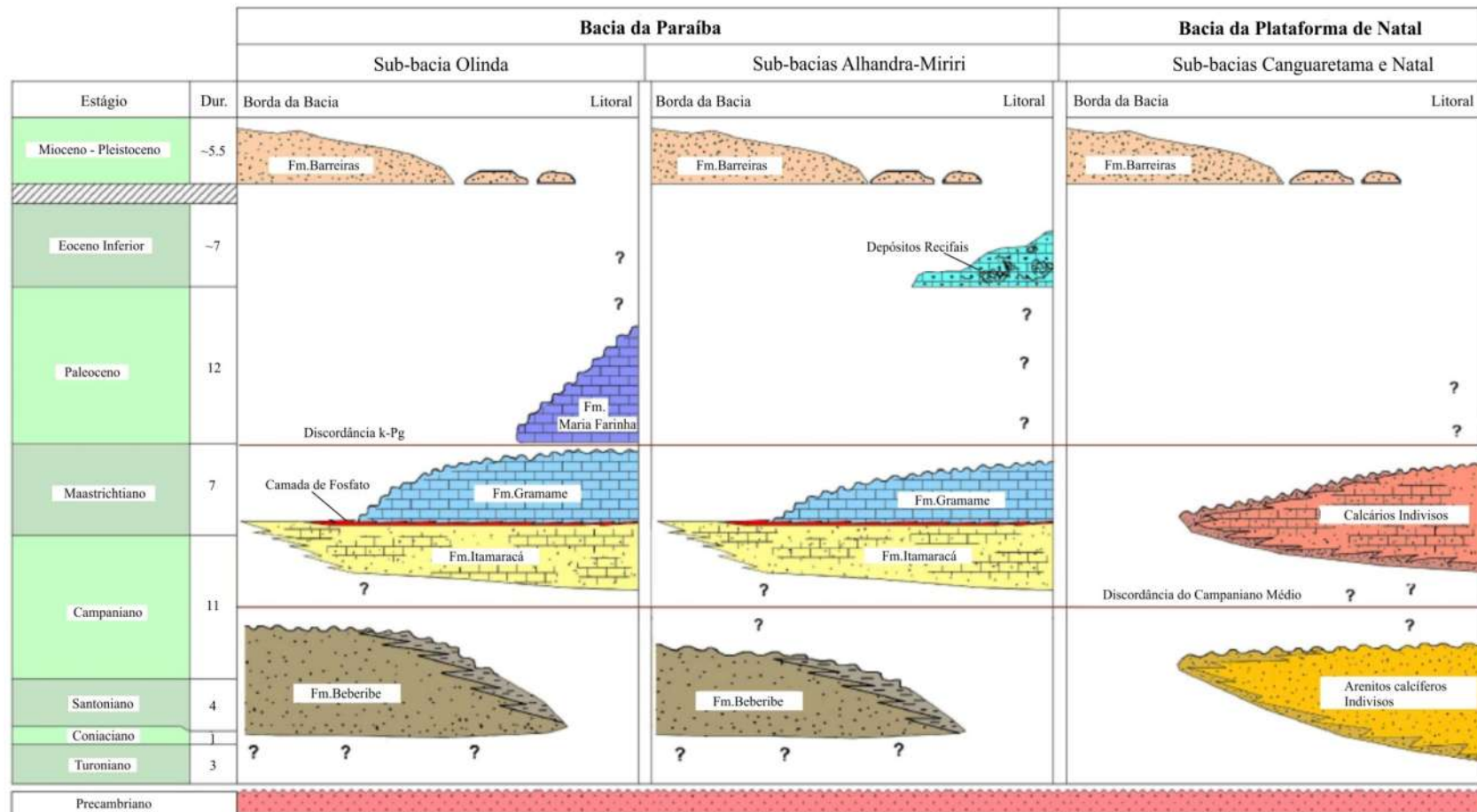


Figura 11: Carta estratigráfica da faixa costeira das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal (Modificada de Barbosa et al., 2007).

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

Este capítulo se dedicará a descrição básica dos procedimentos de compilação e processamento dos dados gravimétricos, magnéticos, sísmicos e topográficos/ batimétricos, utilizados nesta dissertação. No geral, os conjuntos dos dados englobam informações geofísicas dispostas em escala regional, que fazem parte de grandes acervos de bancos de dados nacionais e internacionais, os quais são disponibilizados para a realização de pesquisas acadêmicas. O processamento dos dados gravimétricos e magnéticos foi executado por meio de dois passos: i) interpolação dos dados e ii) aplicação de filtros no domínio do número de onda. A manipulação dos dados topográficos/batimétricos, pelo método de Airy-Heiskanen, permitiu a estimativa de primeira ordem das profundidades da descontinuidade de Mohorovicic. Sendo assim, inicialmente serão descritas as informações da compilação de cada banco de dados e na sequência serão abordados os aspectos do processamento digital dessas informações.

3.2 Banco de dados

3.2.1 Dados gravimétricos e de elevação digital de terreno (EDT)

Os dados gravimétricos e de elevação digital de terreno são provenientes do Modelo Geopotencial Terrestre (**EGM 2008**) e do **ETOPO 1**, respectivamente (Tabela 1). Esses dados foram disponibilizados pela Agência Nacional de Inteligência Geoespacial (NGA) (Pavlis et al., 2008). O modelo **EGM2008** inclui valores do campo de gravidade obtidos por uma compilação global/regional de dados terrestres, marítimos, aéreos, e de altimetria e gravimetria por satélites (Topex/Poseidon e Grace, por exemplo). O banco de dados do **ETOPO 1** é composto por dados da elevação digital de terreno (topografia e batimetria) do planeta e disponibilizado em arquivos de planilhas e *grids*. Essas informações foram obtidas pela compilação de dados topográficos e batimétricos terrestres, marítimos e por altimetria de satélites. Com a manipulação desses conjuntos de dados (**EGM2008** e **ETOPO 1**), os mapas de Gravidade do Mundo (WGM) (Balmino et al., 2012; Heiskanen e Moritz, 1967) mostram um quadro de anomalias Ar-livre (AAL), Bouguer completo (BC) e Isostática residual (ISR) computadas em escala regional. Os

arquivos disponibilizados incluem os mapas, *grids* e arquivos em planilha com valores de AAL, BC, ISR e de EDT com uma resolução de 1'x1' de arco (Pavlis et al., 2008; Amante e Eakins, 2009).

3.2.2 Dados magnéticos

Os dados magnéticos foram compilados a partir do projeto **EMAG2** (Tabela 1), que representa um avanço das informações contidas no projeto **WDMAM**. Os dados do projeto **EMAG2** são provenientes de medidas do campo geomagnético por meio de levantamentos aéreos, marítimos e por satélites (Maus et al., 2009). Os dados de campo magnético total (CMT) são disponibilizados em formatos de *grids* e planilhas, nivelados a uma altitude de 4 km. O produto contém um conjunto de dados do campo magnético terrestre com uma resolução de 2'x2' de arco.

Tabela 1: Composição do banco de dados gravimétricos, magnéticos e de elevação digital de terreno obtidos para esta pesquisa.

NATUREZA DO DADO	QUANTIDADE DE DADOS
GLOBAL/REGIONAL - AR-LIVRE - EGM2008	33.800
GLOBAL/REGIONAL - BOUGUER - EGM2008	33.800
GLOBAL/REGIONAL - ISOSTÁTICA - EGM2008	33.800
GLOBAL/REGIONAL - TOPOGRAFIA E BATIMETRIA - ETOPO1	33.800
GLOBAL/REGIONAL - TMI - EMAG2	33.164
TOTAL DE DADOS	168.364,00

3.2.3 Dados sísmicos

O conjunto de dados sísmicos utilizados nesta dissertação é composto por duas linhas sísmicas multicanais (Figura 12). Uma delas é proveniente do programa LEPLAC (L1) e a outra é oriunda do BDEP-ANP (L2). Esses dados foram adquiridos em diferentes épocas entre os anos de 1970 e 1992 com objetivos ligeiramente distintos. A linha sísmica do programa LEPLAC (L1) faz parte de uma compilação que foi adquirida com objetivos voltados para o entendimento da plataforma continental e da área oceânica adjacente do Brasil. Já a linha sísmica proveniente do BDEP-ANP (L2) faz parte de um programa de exploração das bacias marginais, adquiridos pela indústria do petróleo e gás, e financiados principalmente pela PETROBRAS. Ambas as linhas sísmicas foram disponibilizadas em formato seg-Y, empilhadas e migradas em tempo. A linha L1, apresenta um perfil profundo (cerca de 11s) e encontra-se localizada na região de fronteira entre o platô de Pernambuco e o final da região plataformal da Bacia da Paraíba (Figuras 12a e 12b). A linha L2 (Figuras 12A e 12C) está inserida na Bacia da Paraíba e inicia a aproximadamente

5 km da linha de costa. Esta linha sísmica não é tão profunda quanto a L1, cujo tempo de registro foi de 7s. Estas linhas são fundamentais para a avaliação integrada com os métodos potenciais na discriminação de cada domínio crustal e na interpretação do estilo estrutural dos setores crustais da área de estudo.

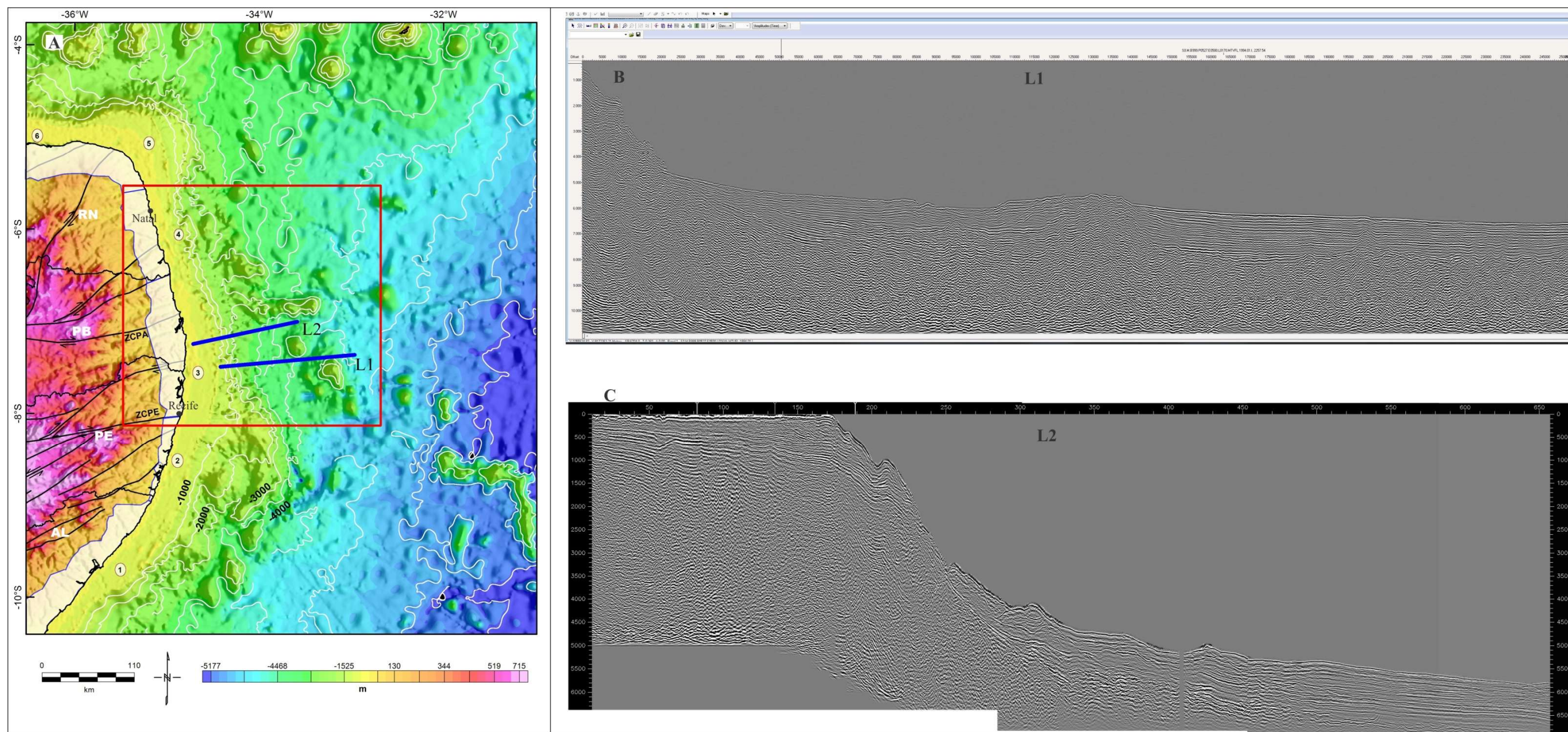


Figura 12: A) Mapa de Elevação digital de terreno da margem continental do NE do Brasil com a localização da área de estudo (Polígono vermelho) e das duas linhas sísmicas L1 e L2 (Linhas azuis). B) Linha sísmica L1. C) Linha sísmica L2.

3.3 Processamento dos dados - Interpolação

A partir dos arquivos de planilhas dos bancos de dados gravimétricos, magnéticos e de elevação digital de terreno, as interpolações dessas informações foram efetuadas pelo método de mínima curvatura. Este método foi escolhido por ajustar suavemente os dados que estão sendo utilizados. Além disso, promove a interpolação de um considerável volume de dados com baixo tempo de processamento (Geosoft, 2013). Na Gravimetria, os dados de anomalias gravimétricas Ar-livre, Bouguer completo e Isostática residual foram interpolados com células de 5 km x 5 km (Figuras 13 e 14A). Os dados magnéticos de Campo total também foram interpolados com células de 5 km x 5 km (Figura 14B). O mapa de elevação digital de terreno foi obtido pela interpolação dos dados em uma malha regular de 5 km x 5 km (Figura 12A).

3.4 Processamento dos dados - Filtragem

Após os processos de compilação e interpolação dos dados, os mesmos foram filtrados. Neste tópico, serão elucidadas as etapas de filtragem em 2D. De uma forma bem geral, os objetivos fundamentais do procedimento de filtragem são de realçar e/ou eliminar certas componentes de comprimento de onda, que estão inseridas no espectro de potência dos dados de campos potenciais e que refletem características específicas das fontes causadoras das anomalias. Este tipo de análise permite a obtenção de informações valiosas a respeito da geologia em subsuperfície, tanto com respeito às fontes profundas (Por exemplo: interface crosta-manto litosférico), quanto com as fontes rasas (Por exemplo: interface embasamento-cobertura sedimentar). Para a filtragem dos dados no domínio do número de onda, quatro etapas foram seguidas (Figura 15): 1) Transformada de Fourier, 2) Geração e Análise do espectro de potência, 3) Definição e Aplicação de filtros e 4) Transformada Inversa de Fourier. Abaixo, segue uma descrição sumarizada da aplicação dessas etapas. Na sequência serão abordadas as definições teóricas básicas dos filtros que foram utilizados nos dados gravimétricos e magnéticos desta dissertação.

1) A transformada de Fourier fará com que os dados sejam levados do domínio do espaço para o domínio do número de onda. Essa mudança de domínio é aplicada para facilitar o processamento do sinal geofísico com ganho de tempo no trabalho computacional.

2) Com os dados transformados no domínio do número de onda, o espectro de potência deles são gerados, abrangendo as informações de todas as fontes que compõem o sinal

geofísico (Spector e Grant, 1970). Isso engloba as respostas de fontes rasas, intermediárias e profundas. Essas informações são de grande importância para direcionar a escolha e os parâmetros físico-matemáticos dos filtros. De uma forma bem ampla, os números de onda menores irão conter o conteúdo do sinal relacionado às estruturas profundas e os maiores irão conter informações das estruturas mais rasas.

3) Os filtros compreendem uma série de operadores matemáticos com diferentes funcionalidades, sendo utilizados basicamente para decompor as componentes de diferentes comprimentos de onda do sinal geofísico. Esses processos englobam geralmente a separação e o realce de anomalias relacionadas a fontes rasas (residuais) e/ou profundas (regionais). Além dessas informações, existem filtros que são aplicados para análise de alinhamentos ou tendências geofísicas que são fiéis na representação da estruturação geológica. Também existem alguns filtros que podem ser bastante úteis para a definição de bordas e centros de anomalias, marcando assim, a geometria das respectivas fontes anômalas. Neste trabalho foram aplicados alguns filtros com objetivos voltados para a separação regional-residual, cujos parâmetros físico-matemáticos (definição dos filtros) serão descritos no próximo tópico.

4) Após a aplicação dos filtros no domínio do número de onda, a transformada inversa de Fourier é aplicada para que os dados voltem para o domínio do espaço, onde as informações apresentam-se apropriadas para as etapas de interpretação.

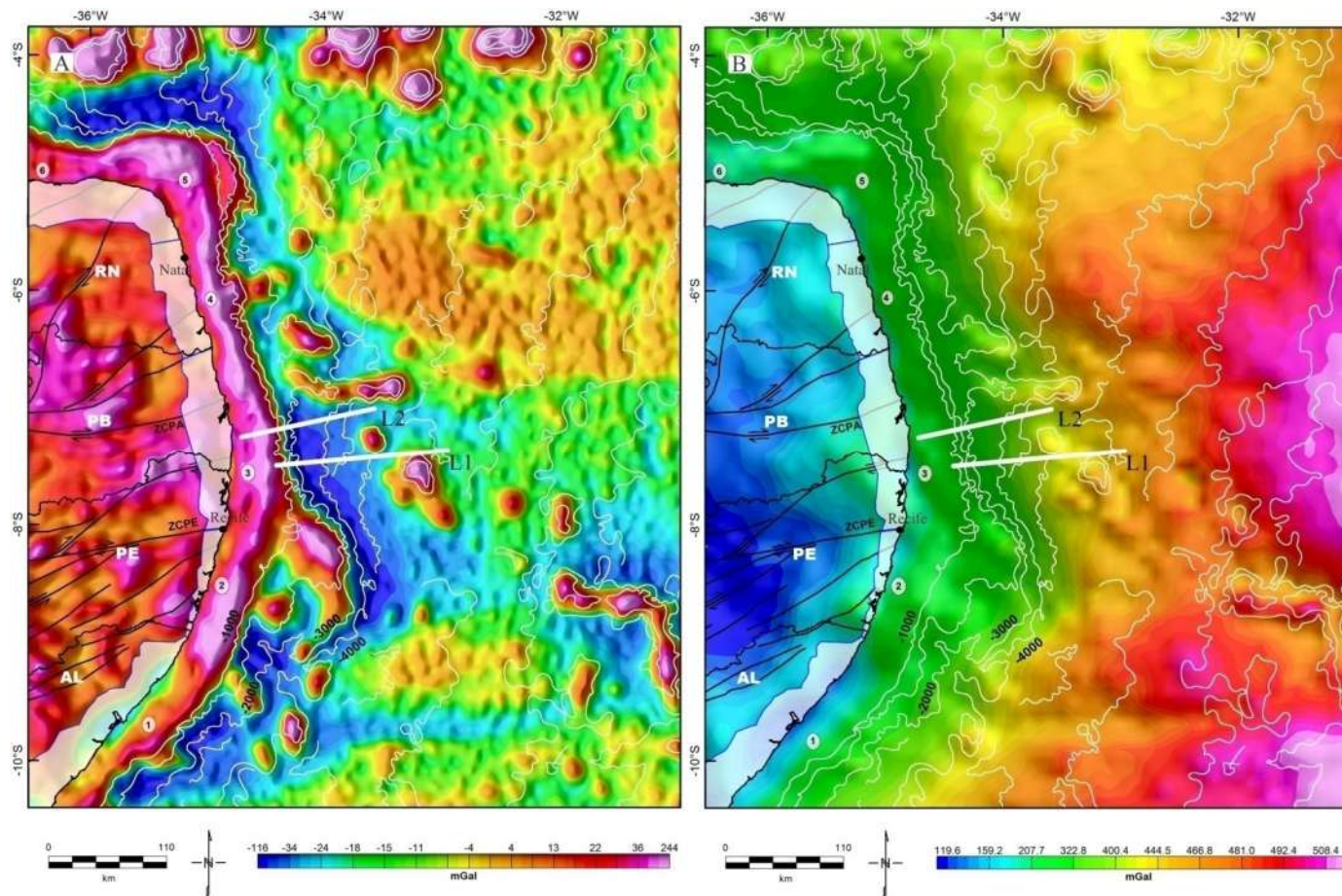


Figura 13: A) Mapa de anomalias Ar-Livre. B) Mapa de anomalias Bouguer. Linhas pretas: Zonas de cisalhamento e linha de costa. Polígonos transparentes: Contorno das bacias na região continental. Linhas brancas: Contornos batimétricos e localização das linhas sísmicas. Os números de 1 a 6 são as indicações das bacias sedimentares do NE oriental brasileiro (Consultar a Figura 1 para identificação dos nomes das bacias).

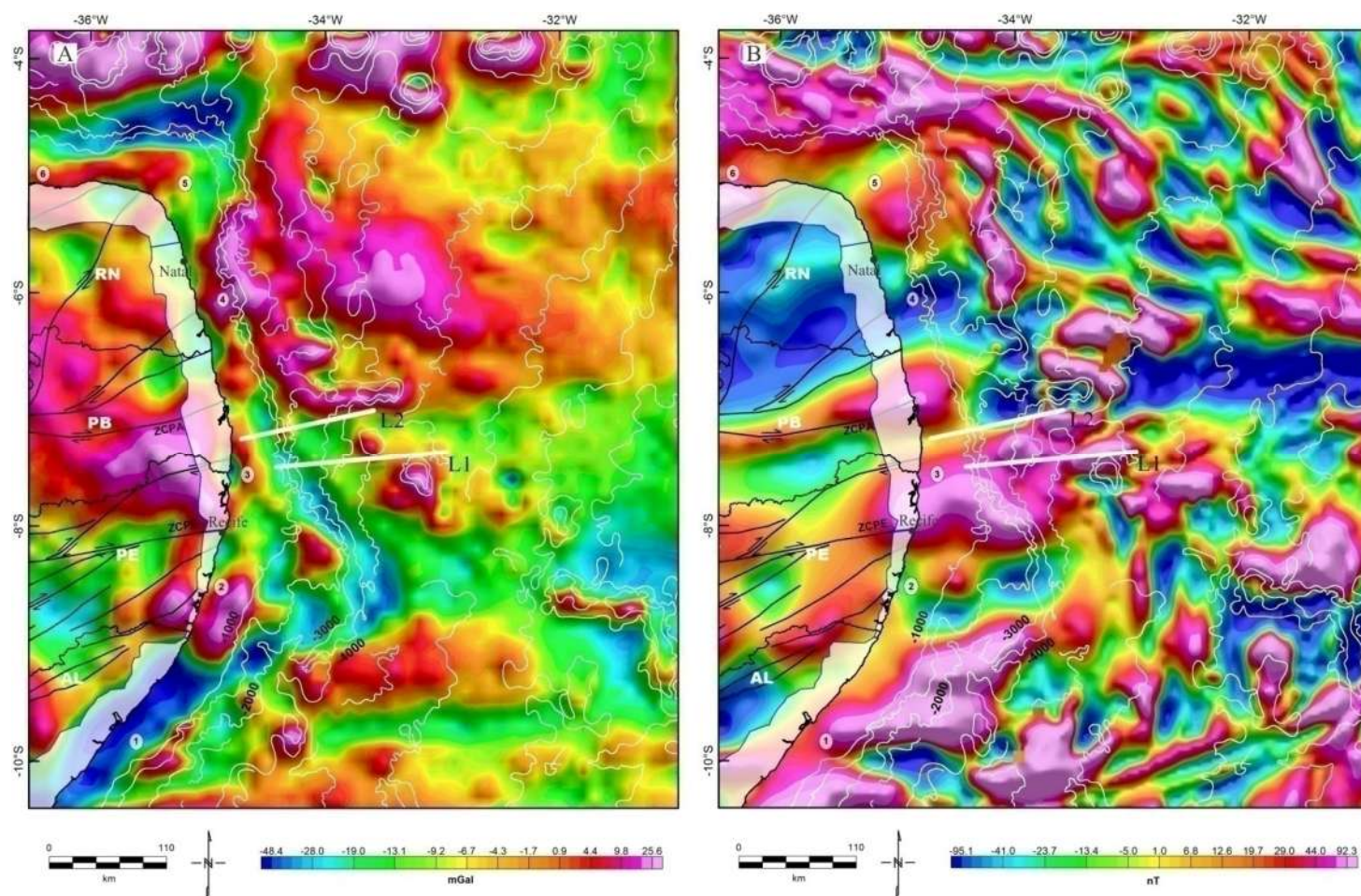


Figura 14: A) Mapa de anomalias isostáticas residuais. B) Mapa de anomalias magnéticas de campo total. Para legenda, consultar a figura anterior.

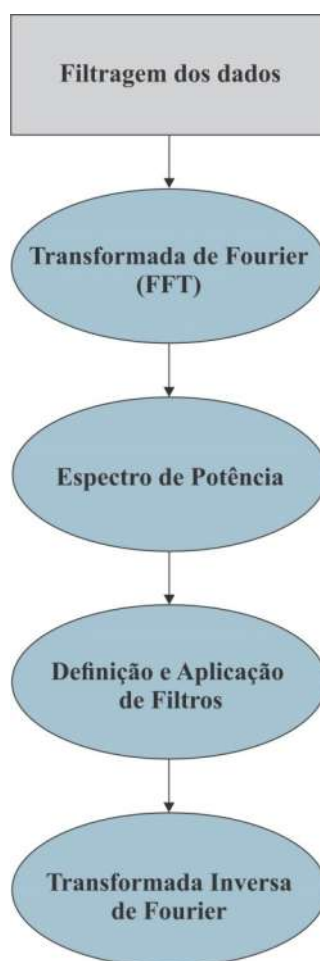


Figura 15: Passo a passo para a filtragem dos dados gravimétricos e magnéticos.

3.4.1 Definição dos filtros

A tabela 2 mostra a lista de filtros que foram aplicados nos dados gravimétricos e magnéticos. Esta parte da dissertação trará as definições básicas de cada uma das técnicas de filtragem utilizadas nesta pesquisa, abrangendo a sua expressão físico-matemática e a aplicação dessas nos dados de campos potenciais.

Tabela 2: Lista de filtros aplicados nos dados gravimétricos e magnéticos.

Filtros Gravimétricos	Filtros Magnéticos
Separação Regional-Residual	Separação Regional-Residual
Derivada Vertical (D.V)	Derivada Vertical (D.V)
	Sinal Analítico (ASA)
	Redução ao Pólo (RTP)

i) Separação Regional-Residual pelo Filtro Gaussiano

Esta técnica funciona como um filtro de frequência do tipo passa-banda, com o decaimento do filtro apresentando uma distribuição gaussiana (ou normal) em torno da frequência de corte. As frequências de corte são escolhidas a partir do desvio padrão da função gaussiana (k_0) (Geosoft, 2013) (Figura 16). A expressão matemática deste filtro no domínio do número de onda é dada pela equação 1:

$$L(k) = 1 - e^{-k^2/2k_0^2} \quad \text{Eq.1,}$$

onde k representa o número de onda escalar.

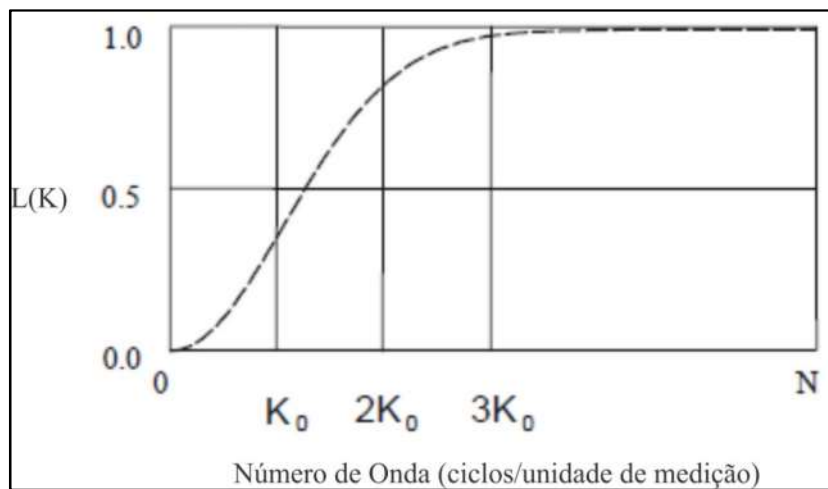


Figura 16: Representação gráfica do filtro gaussiano de separação regional-residual (Modificado de Geosoft, 2013).

Com este filtro pode-se identificar as componentes de altas ou baixas frequências, permitindo a separação das anomalias residuais e regionais, respectivamente. Os números de onda escolhidos para a separação dos dados gravimétricos (BC) e magnéticos (CMT) foram $0,007$ e $0,02 \text{ km}^{-1}$, respectivamente. A Figura 17 apresenta os espectros de potência desses dados com os devidos números de onda de corte utilizados. As Figuras 18 e 19 ilustram os mapas de separação regional-residual dos dados gravimétricos e magnéticos, respectivamente.

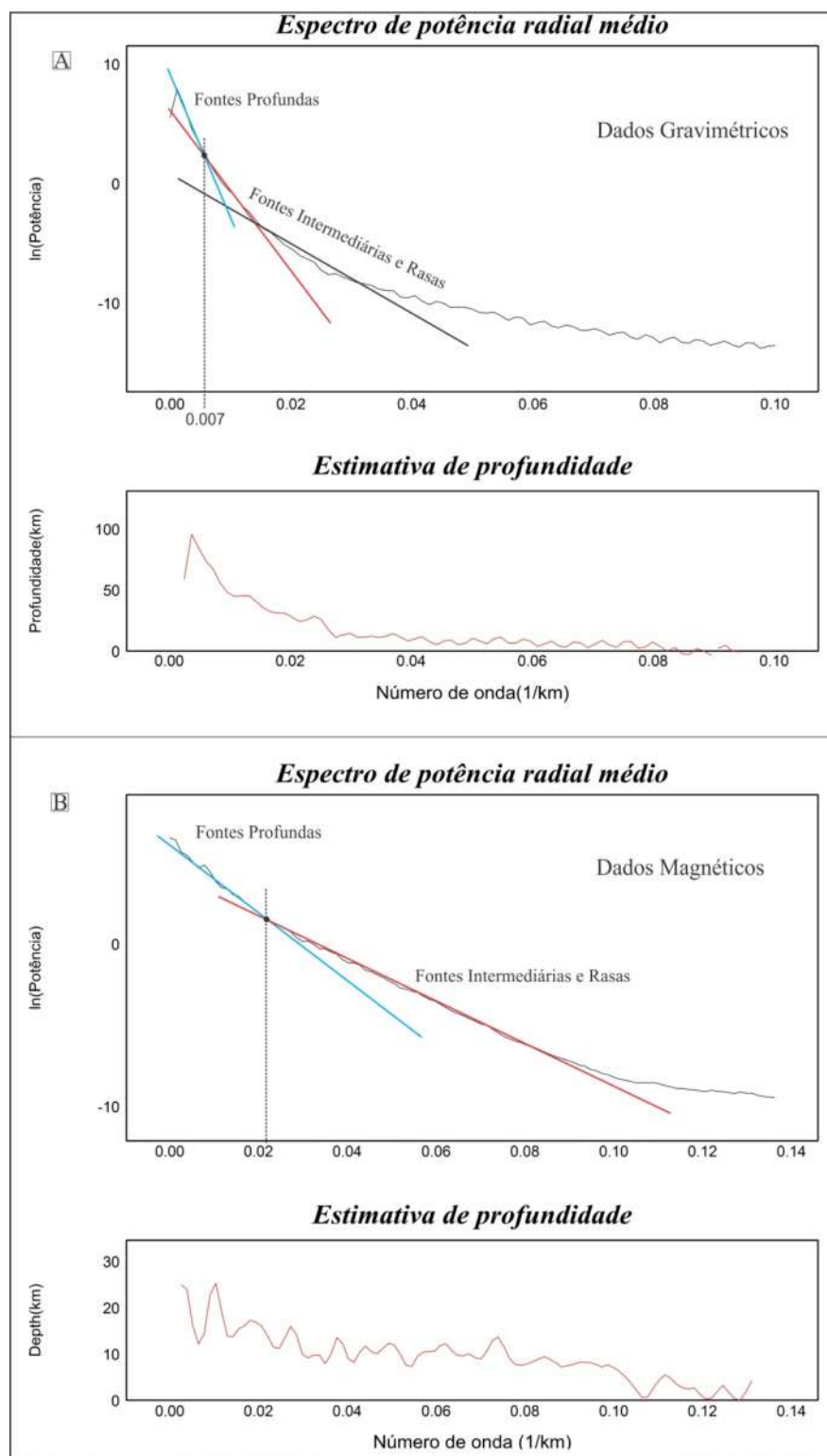


Figura 17: Espectros de potência radial médio dos dados gravimétricos (A) (anomalias Bouguer - Painel superior) e magnéticos (B) (Campo magnético total - Painel inferior). As retas azuis, vermelhas e pretas marcam as aproximações para a segmentação dos números de onda menores (fontes profundas) e maiores (fontes rasas), respectivamente.

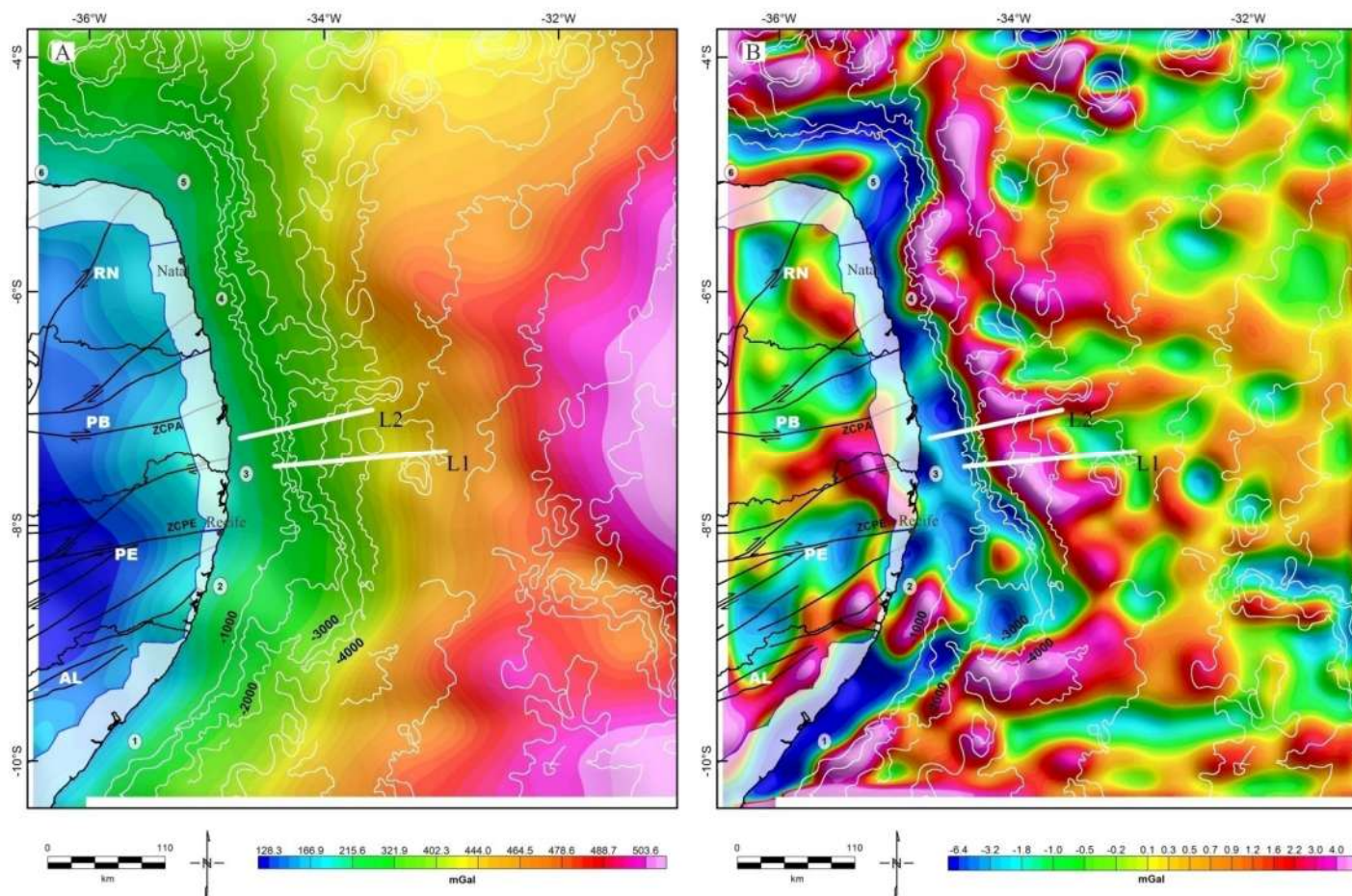


Figura 18: Mapas de anomalias Bouguer regionais (A) e residuais (B). Para a legenda dos mapas, consultar a Figura 13.

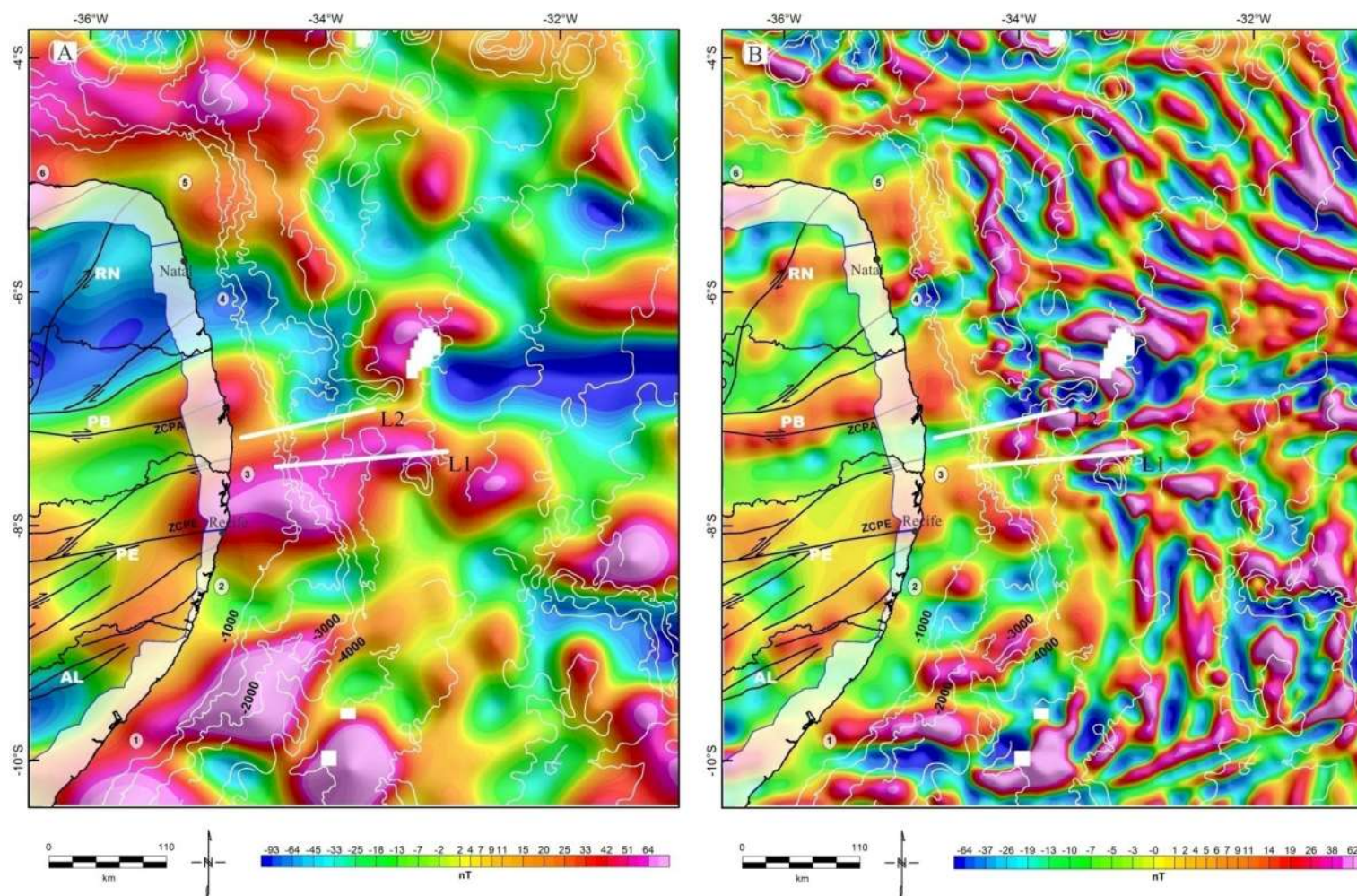


Figura 19: Mapas de anomalias magnéticas regionais (A) e residuais (B). Para a legenda dos mapas, consultar a Figura 13.

ii) Derivada Vertical (D.V)

A derivada do sinal geofísico na direção Z ou vertical é um filtro matematicamente definido pela seguinte expressão (Equação 2) no domínio do número de onda (Geosoft, 2013):

$$L(r) = r^n \quad \text{Eq.2,}$$

o parâmetro n é a ordem da derivada e r é o número de onda angular (radianos por unidades de medição): $r = 2\pi k$, onde k está expresso em ciclos por unidade de medição (Número de onda escalar).

A derivada vertical é comumente aplicada aos dados de campos potenciais para realçar fontes geológicas rasas. Para anomalias monopolares ou reduzidas ao polo magnético, o centro da anomalia é expresso por um máximo positivo e as bordas por zeros. Nos dados de campos potenciais desta pesquisa, foi utilizada a derivada vertical de primeira ordem. Este filtro foi aplicado às anomalias magnéticas de campo total e gravimétricas Ar livre, Bouguer residual e Isostática residual (Figuras 20 e 21).

iii) Amplitude do sinal analítico 3D (ASA)

O filtro de amplitude do sinal analítico 3D é matematicamente definido como a raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas da função do campo potencial (f) nas direções x , y e z (Equação 3) (Nabighian, 1972; Roest et al., 1992):

$$ASA = \sqrt{(df/dx)^2 + (df/dy)^2 + (df/dz)^2} \quad \text{Eq.3}$$

Este processo é útil na localização das bordas e centros de fontes magnéticas, particularmente quando há remanescência e/ou interpretações confusas em baixas latitudes magnéticas. A Figura 22A mostra o mapa de amplitude do sinal analítico (ASA) que foi aplicado apenas nos dados magnéticos de campo total.

iv) Redução ao Polo Magnético (RTP)

Este filtro é bastante utilizado em dados magnéticos, pois o mesmo posiciona as anomalias diretamente sobre as fontes, simulando o campo geomagnético no pólo magnético terrestre, fazendo com que elas possam ser interpretadas de forma monopolar (Grant e Dodds, 1972). O filtro é matematicamente definido pela Equação 4:

$$D = \frac{[\sin(I) - i \cdot \cos(I) \cdot \cos(D - \theta)]^2}{[\sin^2(I\alpha) + \cos^2(I\alpha) \cdot \cos^2(D - \theta)] \cdot [\sin^2(I) + \cos^2(I) \cdot \cos^2(D - \theta)]}, \text{ se } (|I\alpha| < |I|), I\alpha = I \text{ Eq.4}$$

Os parâmetros utilizados na equação apresentam a seguinte definição:

I é a inclinação geomagnética;

$I\alpha$ é a inclinação aparente (Neste caso, foi aplicado o valor de $-65,46^\circ$), utilizada para a correção de amplitude (não pode ser menor do que I);

D Declinação geomagnética;

A Figura 22B apresenta o mapa de anomalias magnéticas reduzidas ao polo. Como os dados provenientes do **EMAG 2** foram levantados entre os anos de 2000 e 2005, os parâmetros geomagnéticos (inclinação, declinação e intensidade do campo magnético) no centro da área foram obtidos para os dados do ano de 2005, os quais foram: $-24,54^\circ$, $-22,01^\circ$ e $25958,43 \text{ nT}$, respectivamente.

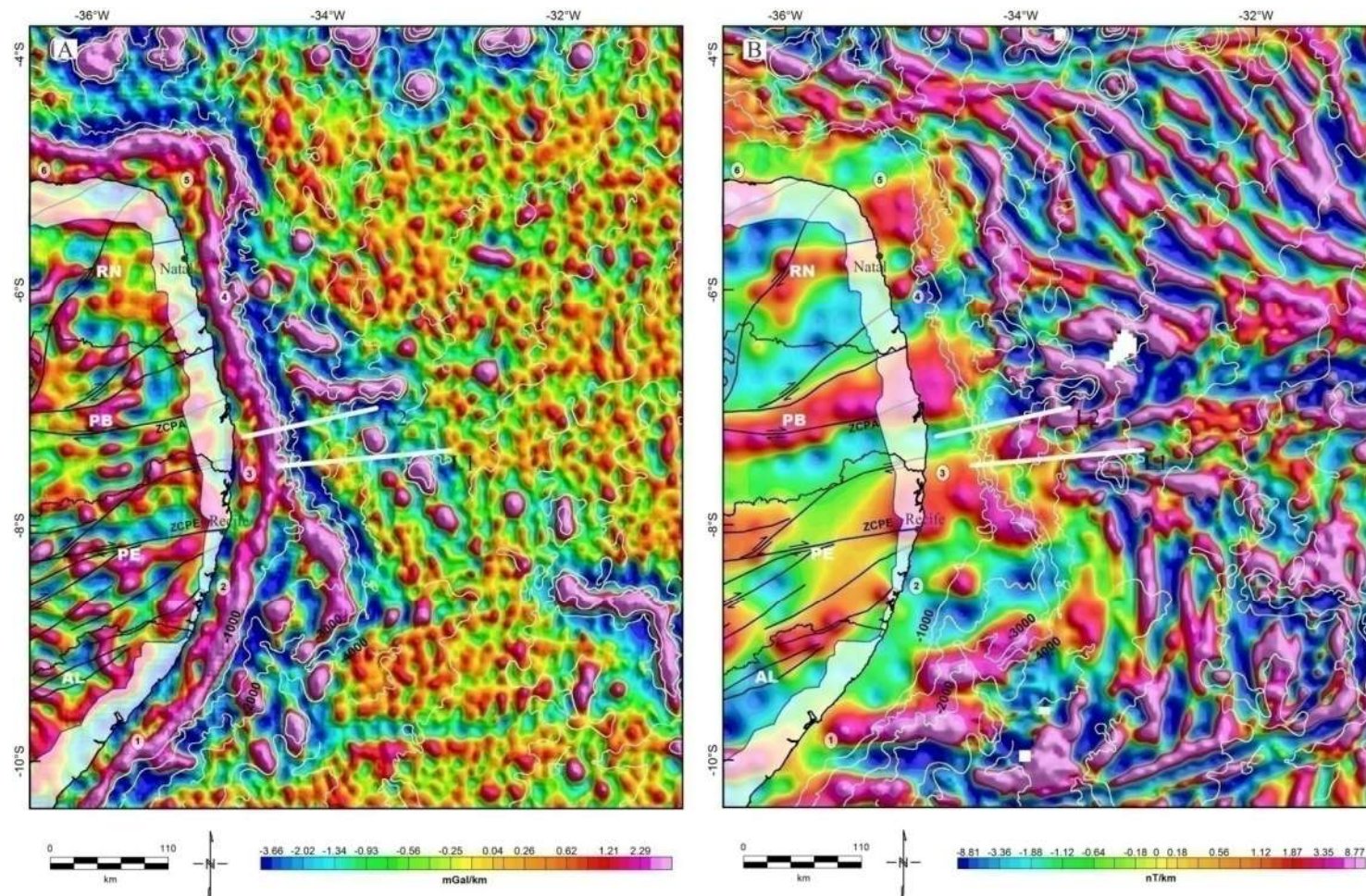


Figura 20: Mapas das derivadas verticais das anomalias Ar-livre (A) e do campo magnético total (B). Para a legenda dos mapas, consultar a Figura 13.

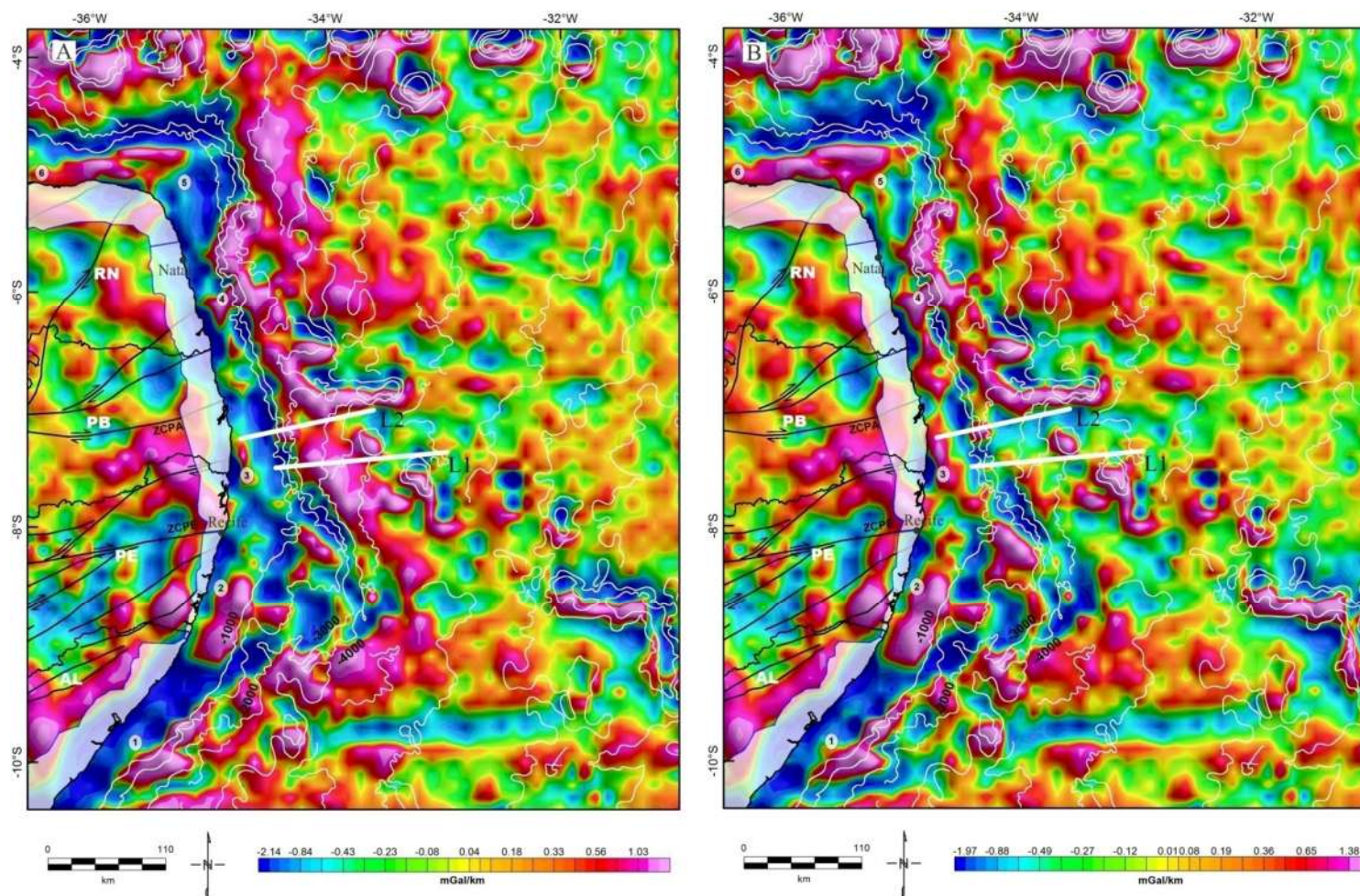


Figura 21: Mapas das derivadas verticais das anomalias Bouguer residuais (A) e isostáticas residuais (B). Para a legenda dos mapas, consultar a Figura 13.

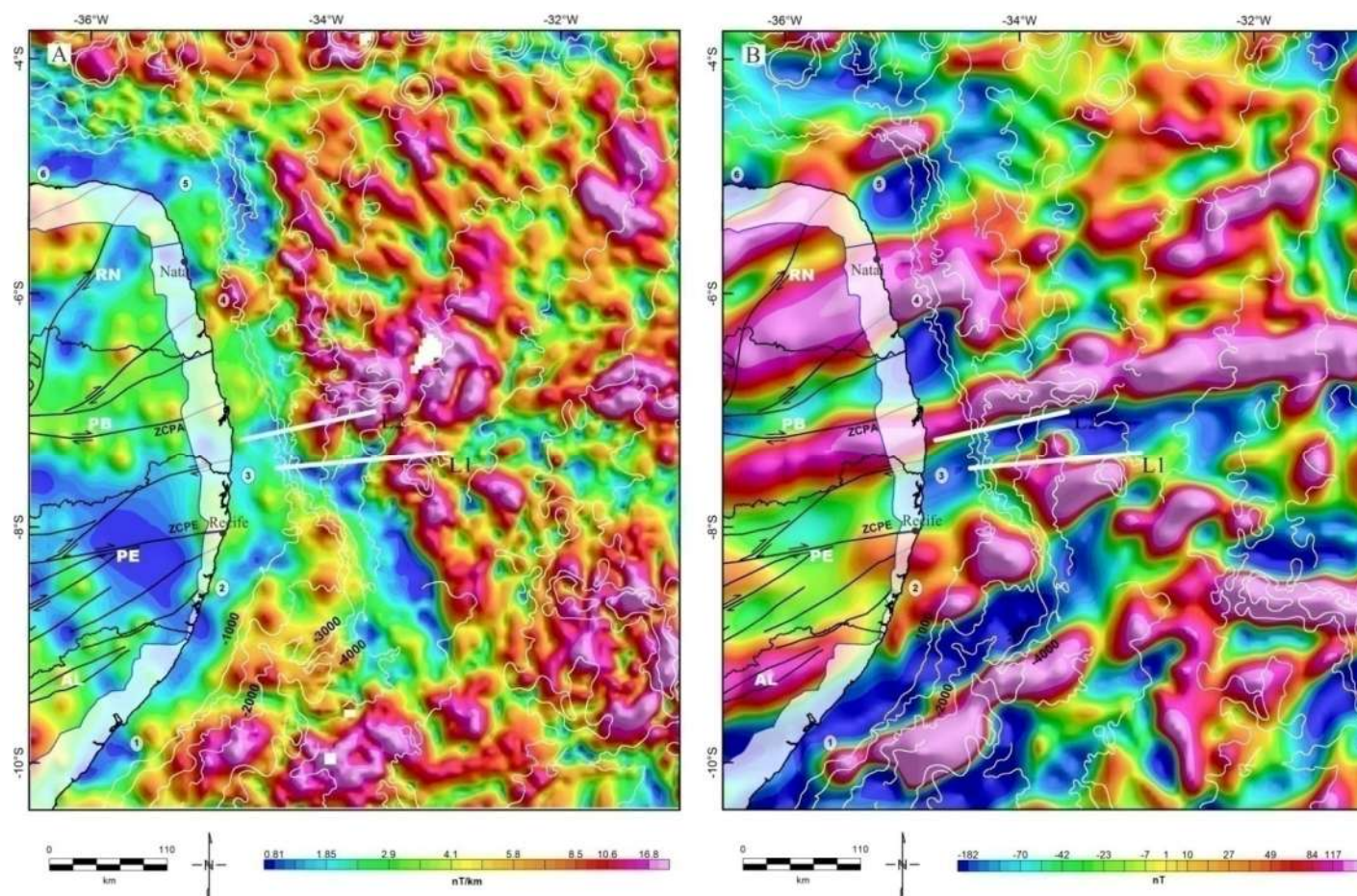


Figura 22: Mapa da amplitude do sinal analítico das anomalias magnéticas (A). Mapa do campo magnético total reduzido ao polo (B). Para a legenda dos mapas, consultar a Figura 13.

3.5 Cálculo das profundidades da Moho com base em dados topográficos/batimétricos

O método de Airy-Heiskanen foi utilizado nos dados de EDT para a obtenção da influência isostática das massas topográficas que envolvem a região de pesquisa. A utilização deste método nos permite estimar a profundidade da descontinuidade de Mohorovicic (d) de primeira ordem, e para tal objetivo, duas equações (5 e 6) foram empregadas (Simpson et al., 1986):

$$d = ds + e\left(\frac{\rho_t}{\Delta\rho}\right) \quad \text{Eq.5}$$

$$d = ds - dw\left(\frac{\rho_t - \rho_w}{\Delta\rho}\right) \quad \text{Eq.6}$$

Na Equação 5, os parâmetros ds , $\Delta\rho$, e e ρ_t , representam a espessura crustal para o nível do mar (ds), o contraste de densidade na base da raiz isostática ($\Delta\rho$), a topografia do terreno (e) e a densidade das cargas topográficas (ρ_t), respectivamente. A partir desses parâmetros a Equação 5 mostra as estimativas de profundidades da Moho para as regiões continentais. Na Equação 6, os parâmetros dw e ρ_w , representam a batimetria (dw) e a densidade para a água do mar (ρ_w). A partir desta equação, podemos estimar as profundidades da Moho para as porções oceânicas. A Figura 23 mostra as variáveis definidas nas equações 5 e 6. A Figura 24 ilustra o mapa de profundidades da Moho para a área de pesquisa. Os parâmetros utilizados para a estimativa das profundidades foram e e dw representando a topografia e a batimetria, respectivamente, a partir do mapa de elevação digital de terreno (Figura 12a), $ds = 28$ km e $\rho_t = 2,7$ g/cm³, $\rho_w = 1,03$ g/cm³, e $\Delta\rho = 0,45$ g/cm³.

As hipóteses do modelo de Airy-Heiskanen são (Simpson et al., 1986; Oliveira, 2008):

- i) A crosta está em equilíbrio isostático com seus carregamentos (topografia e batimetria);
- ii) O carregamento ocorre apenas no topo da crosta;
- iii) A superfície de compensação do carregamento é a descontinuidade de Mohorovicic;
- iv) A crosta e o manto litosférico apresentam densidades constantes;
- v) A crosta não apresenta propriedades elásticas, consequentemente os mecanismos de compensação isostática são localizados;

O mapa de profundidades da Moho (Figura 24) foi comparado com o mapa de inversão da Moho (Figura 25) proposto por Oliveira (2008). Ambos apresentam uma boa correlação na porção continental, entretanto na região oceânica, eles diferem em aproximadamente 2 e 4 km. Isso ocorre devido ao fato do mapa da inversão da Moho

(Figura 25) haver o vínculo de suavidade proveniente das anomalias Bouguer e da espessura elástica efetiva de 25 km, onde no modelo de Airy-Heiskanen as compensações isostáticas são locais e não há vínculos de suavidade e de parâmetros reológicos da litosfera.

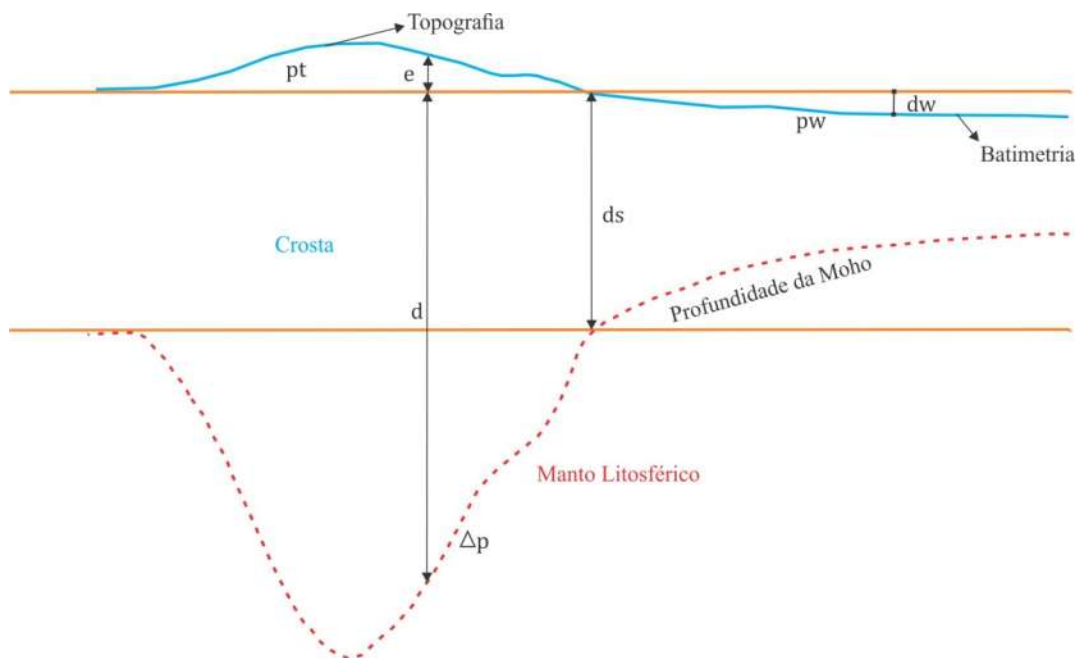


Figura 23: Esboço esquemático do modelo de compensação isostática de Airy-Heiskanen usado para estimar as profundidades da Moho. e - Topografia; d - Profundidade da descontinuidade de Mohorovicic; ds - Espessura crustal no nível do mar; pt - Densidade da crosta; dw - Batimetria; pw - Densidade da água do mar; Δp - Contraste de densidade (Crosta-Manto Litosférico) ao longo da raiz isostática.

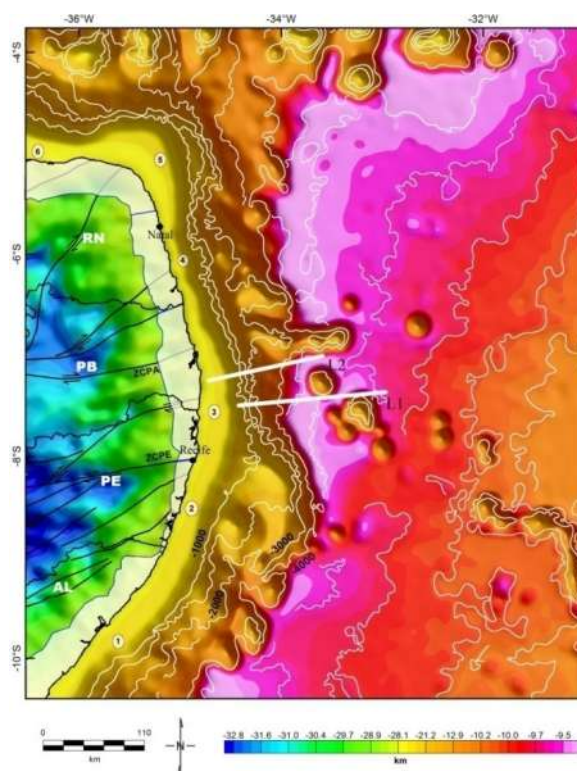


Figura 24: Mapa de profundidades da Moho, obtidas a partir da aplicação do método de Airy-Heiskanen. Para a legenda dos mapas, consultar a Figura 13.

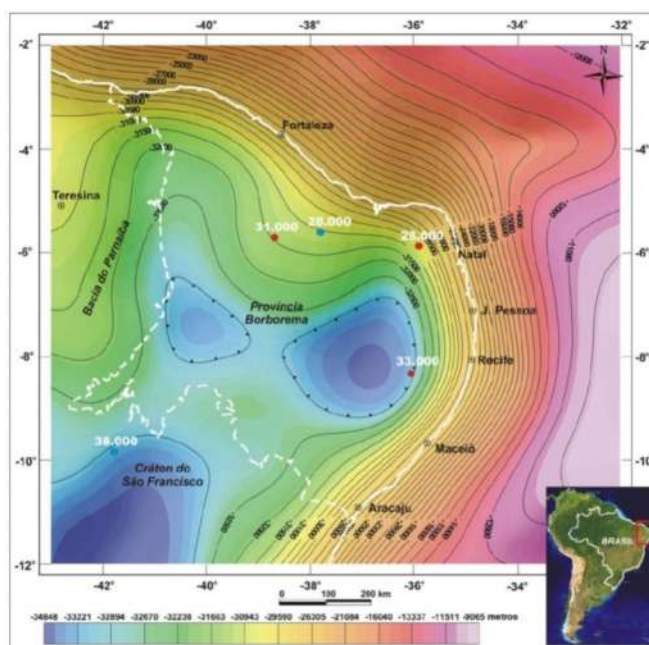


Figura 25: Mapa de profundidades da Moho, obtidas a partir da inversão de dados gravimétricos por Oliveira (2008). O intervalo de contorno é de 500 m no continente e 1 km na região oceânica. Os pontos vermelhos na PB são estimativas de espessura da crosta, obtidas por processamento de dados telesísmicos (França et al., 2006). O ponto azul na PB é uma estimativa da espessura crustal baseada na interpretação sísmica de reflexão profunda (Matos, 1992).

CAPÍTULO IV - RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Introdução

Os aspectos relacionados com a análise dos domínios crustais e o respectivo estilo estrutural da margem continental e da área oceânica adjacente das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal serão elucidados a partir daqui. Sendo assim, inicialmente será descrito o fluxo utilizado para a interpretação e modelagem dos dados geofísicos e de elevação digital de terreno. Depois disso, serão apresentadas as interpretações e os modelos geofísicos, compondo assim, o objetivo principal deste capítulo.

4.2 Fluxograma de Interpretação

Para o fluxo de interpretação e modelagem conjunta dos dados gravimétricos, magnéticos, sísmicos e de elevação digital de terreno, três procedimentos foram utilizados:

i) Modelagem Gravimétrica 2D: Dois modelos geofísicos foram gerados a partir da modelagem 2D das curvas gravimétricas de anomalias Ar-livre, integradas com as informações dos mapas geofísicos, de EDT e as interpretações sísmicas. A interpretação sísmica foi feita no *software* IHS Kingdom e a modelagem geofísica foi executada no menu GM-SYS 2D do *software* Oasis Montaj. Essas atividades permitiram diferenciar os setores crustais e avaliá-los estruturalmente. Os valores de densidades usados para a modelagem das curvas gravimétricas foram estimados a partir de trabalhos que consideram heterogeneidades intra-crustais (Tabela 3) (Wilson et al., 2003; Gomes, 2005; Blach et al., 2008; Dupré et al., 2011). As espessuras sedimentares foram estimadas por uma conversão tempo x profundidade, a partir da interpretação das seções sísmicas. Inicialmente, para a obtenção da velocidade média dos horizontes sísmicos que representam a cobertura sedimentar, foi aplicada a técnica de Gardner (Gardner et al., 1974). Com isso, a partir da equação de Gardner ($\rho = a \cdot V^{1/4}$), foi utilizada a densidade média da cobertura sedimentar (ρ) = 2400 kg/m³ e $a = 310$, que é uma constante de correlação entre a densidade média e a velocidade sísmica (V). Desta forma, foi possível transformar a densidade média da cobertura sedimentar na respectiva velocidade sísmica média ($V \sim 3600$ m/s). Depois de obter a velocidade sísmica, a partir da equação ($D = V \cdot \frac{\Delta T}{2}$), onde ΔT representa o intervalo de tempo duplo (TWT) em segundos, foi possível estimar a espessura sedimentar. As

profundidades da Moho foram aproximadas nas estimativas obtidas pela aplicação do método de Airy-Heiskanen.

ii) Assinaturas gravimétricas, magnéticas e de EDT: Para a representação das assinaturas dos dados de campos potenciais foram escolhidos os mapas de anomalias Ar-livre, Bouguer total, Campo magnético total e Sinal Analítico. Além desses, foram utilizados os mapas de elevação digital de terreno e de profundidades da Moho. Essas informações permitiram analisar os domínios qualitativamente e avaliar os padrões estruturais regionais das regiões continentais (blocos crustais do embasamento e zonas de cisalhamento) e oceânicas (zonas de fraturas, suas respectivas terminações e montes submarinos). Sendo assim, essas interpretações foram combinadas com os modelos geofísicos e cada domínio crustal pôde ser avaliado para toda a extensão da área de pesquisa.

iii) Gradientes magnéticos e gravimétricos: Os mapas das derivadas verticais das anomalias Ar-livre e do campo magnético total deram suporte aos processos i e ii. Esses mapas complementaram as interpretações das transições crustais, realçando assim, as assinaturas dos tipos crustais, as estruturas tectônicas da crosta continental, e as terminações das zonas de fraturas e os montes submarinos em crosta oceânica.

Tabela 3: Relação das unidades constituintes dos modelos geofísicos e as respectivas densidades utilizadas para a modelagem das curvas gravimétricas Ar-livre.

Unidade do Modelo Geofísico	Densidade média (g/cm³)
Água do Mar	1,03
Cobertura Sedimentar	2,4
Vulcânicas	2,83 e 2,87
Crosta Continental Pouco Deformada	2,79
Crosta Continental Afinada/Transicional	2,85
Proto-Crosta e Crosta Oceânica	2,9
Manto Litosférico	3,2

4.3 Domínios crustais e Configuração estrutural

Seguindo o fluxograma de interpretação, três setores crustais foram definidos: Setor A – Crosta Continental Pouco Deformada; Setor B – Crosta Continental Afinada/Transicional; e Setor C - Crosta Oceânica. Os objetivos principais deste processo é mapear esses domínios na BPB e na BPN, como podemos ver em vários trabalhos que

foram realizados em outras regiões inseridas no contexto da evolução das bacias da Margem Atlântica (Gomes et al., 2000; Watts, 2001; Wilson et al., 2003; Gomes, 2005; Blaich et al., 2008; 2010; Aslanian et al., 2009; Winterbourne et al., 2009; Dupré et al., 2011). As estruturas tectônicas dispostas nos mapas geofísicos e de EDT representam o resultado de uma interpretação conjunta dos principais alinhamentos magnéticos e gravimétricos.

SETOR A (Crosta Continental Pouco Deformada)

O setor A está limitado a oeste pelo limite emerso das bacias (linha preta fina) e a leste pela crosta continental afinada/transicional (linha branca pontilhada) (Figuras 26, 27 e 28). A partir da linha de costa, este setor apresenta uma extensão de 50-60 km na Bacia da Paraíba, e de 35-40 km na Plataforma de Natal (Figuras 26 a 30). O mapa de elevação digital de terreno mostra um leve decréscimo da topografia/batimetria para leste com valores diminuindo de 80 para -400 m, apresentando assim, uma passagem da região emersa para a porção de quebra da plataforma continental (Figura 26A). No mapa de profundidades da Moho, essas variaram entre 27 e 28 km, onde podemos dizer que os blocos crustais deste setor apresentam uma região que sofreu pouco estiramento e afinamento crustal (Pinvidic et al., 2013; Stica et al., 2014) (Figura 26B). Nos mapas de anomalias Bouguer e Ar-livre (Figuras 27A e 27B), esta zona apresenta valores entre 100 e 260 mGal e entre 72 e -10 mGal, respectivamente. Essas características foram interpretadas como um primeiro passo do estiramento da crosta continental, devido a subida suavizada dos valores das anomalias Bouguer (Figura 27A). No mapa de derivada vertical das anomalias Ar-livre, pode-se observar que a orientação principal das estruturas gravimétricas, de sul para norte, são NNE-SSW e NNW-SSE, respectivamente, e encontram-se dispostas em faixas positivas e negativas intercaladas (Figura 27C). Essa configuração dos gradientes gravimétricos está coerente com a estruturação do Rifte Atlântico nessa região da margem continental, onde pode-se dizer que há uma rotação na orientação das estruturas tectônicas de sul para norte.

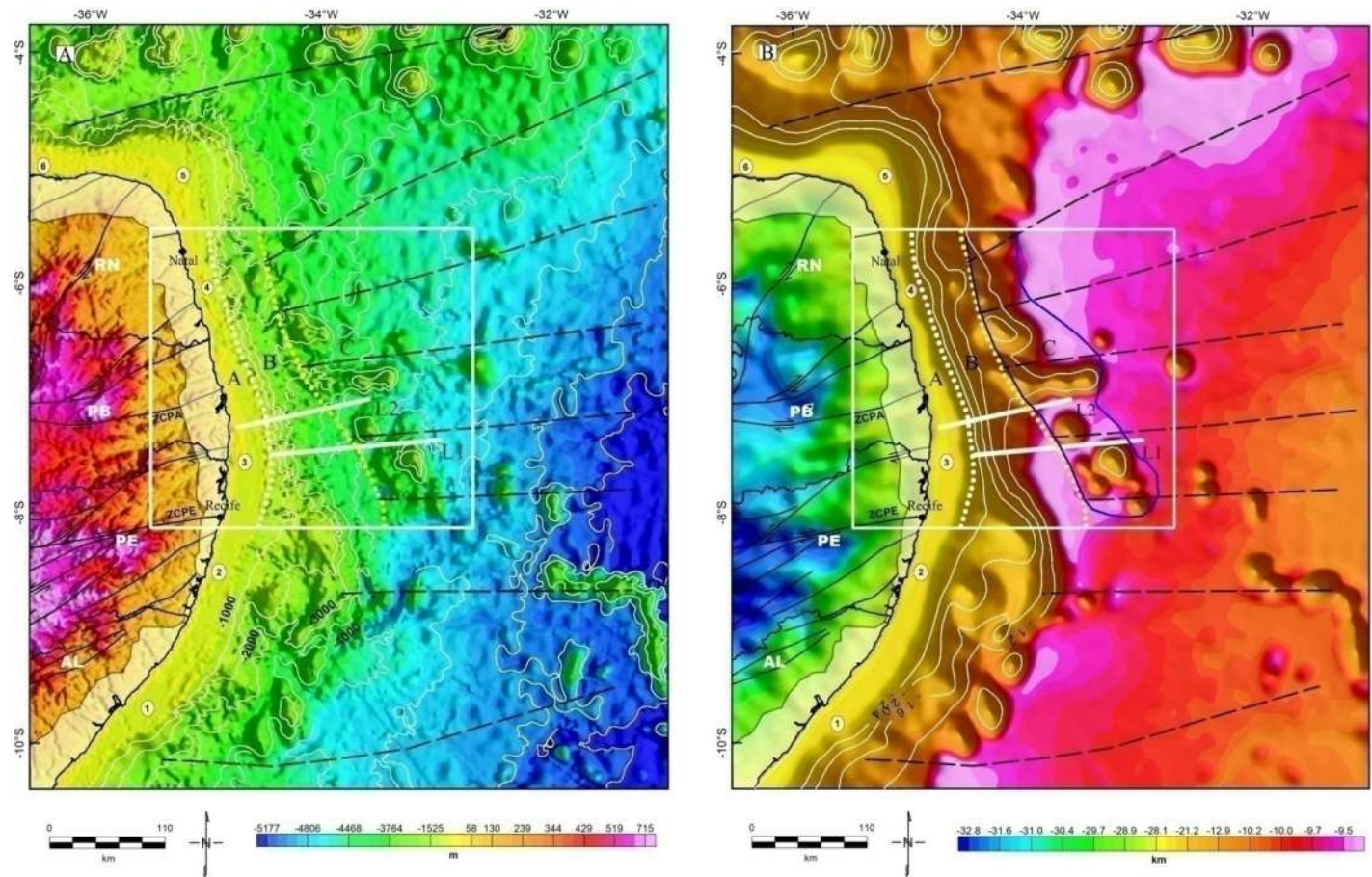
No mapa de Amplitude do Sinal Analítico (Figura 28A), as variações dos gradientes estão entre 3,5 e 2,0 nT/km, e estão relacionados com as assinaturas dos blocos crustais do embasamento da BPB e da BPN. Neste caso, o embasamento da BPB é marcado por um domínio negativo (Domínio Central - entre a ZCPE e a ZCPA) e o

embasamento da BPN (Maciço São José do Campestre - a norte da ZCPA) encontra-se em um domínio positivo (Figura 28A). Nos mapas de campo magnético total e de sua respectiva derivada vertical, podemos ver os *trends* NE-SW e E-W de alinhamento das anomalias magnéticas. Os valores do CMT oscilam entre -65 e 70 nT. Essas estruturas magnéticas estão relacionadas com heterogeneidades intra-embasamento, as quais constituem os diferentes blocos crustais da Província Borborema (Figuras 28B e 28C). Com isso, entre a ZCPE e a ZCPA, há um domínio positivo, e a norte da ZCPA, há um domínio negativo. Essas assinaturas representam o embasamento da BPB (Domínio central - Domínio magnético positivo) e da BPN (Maciço São José do Campestre - Domínio magnético negativo).

O Setor A foi parcialmente imageado nas seções sísmicas L1 e L2 (Figuras 29 e 30). Na região da plataforma continental da Bacia da Paraíba, ocorre uma variação nas profundidades do embasamento sísmico de 1,0 à 1,8 s (TWT), perto da região de borda da plataforma (Figura 30). As profundidades do pacote sedimentar varia de 0,8 km na região proximal à aproximadamente 2,5 km próximo a região de quebra da plataforma (Figuras 29 e 30).

Figura 26: Mapas de EDT (A) e de profundidades da Moho (B). O polígono branco representa a localização da área de pesquisa. Os setores crustais estão separados pelas linhas pontilhadas branca e amarela: A - Crosta Continental Pouco Deformada; B - Crosta Continental

Afinada/Transicional; C - Crosta Oceânica. A linha amarela pontilhada marca a localização da COB. As linhas brancas cheias representam as posições das linhas sísmicas (L1 e L2). As linhas pretas tracejadas representam as zonas de fraturas. As linhas pretas contínuas marcam as zonas de cisalhamento na região continental e a linha de costa. O contorno preto fino marca o limite emerso das bacias na região continental. As linhas brancas finas marcam os contornos da batimetria (A) e das profundidades da Moho (B). Bacias sedimentares do Nordeste oriental do Brasil: 1 - Bacia de Alagoas; 2 - Bacia de Pernambuco; 3 - Bacia da Paraíba; 4 - Bacia da Plataforma de Natal; 5- Platô de Touros; 6 - Bacia Potiguar.



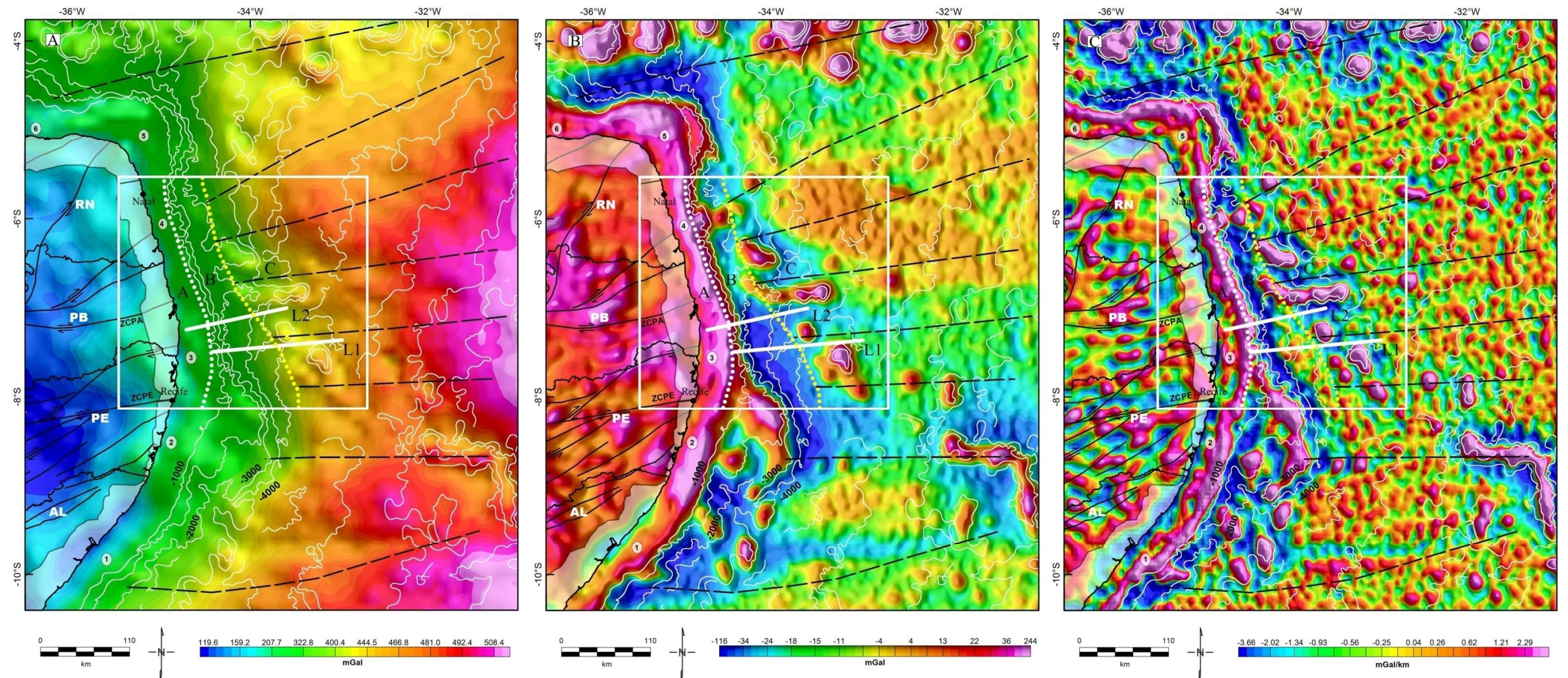


Figura 27: Mapas de anomalias gravimétricas Bouguer (A), Ar-livre (B) e de derivada vertical Ar-livre (C). Para a legenda, consultar a Figura 26.

SETOR B (Crosta Continental Afinada/Transicional)

Este setor está limitado a oeste e a leste pela crosta continental pouco deformada e pelo limite crosta continental-oceânica (*Continental-Oceanic Boundary* – COB), respectivamente (Figuras 26, 27 e 28). Este setor é caracterizado por uma forte variação na batimetria, onde os valores decrescem de -500 para -3500 m, abrangendo assim, as regiões de águas profundas e ultra-profundas (Figura 26A). A variação batimétrica nas bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal ocorre de forma abrupta em direção ao plano abissal (Figura 26A). O mapa de profundidades da Moho mostra uma subida bem expressiva da interface crosta-manto litosférico, com as profundidades variando de 26 km na região de contato com o Setor A à 11 km, na porção próxima a COB (Figura 26b). Nos mapas de AAL e de derivada vertical da AAL, as principais estruturas estão dispostas na direção NW-SE e NNW-SSE, coincidindo com os principais altos e baixos estruturais. Além disso, esta configuração também apresenta influência da quebra abrupta da plataforma continental (Figuras 26A, 27B e 27C). Na região da BPN, é possível observar a disposição de anomalias gravimétricas positivas na direção ENE-WSW, que encontram-se orientadas paralelamente as ramificações da ZCPA. Neste setor, os valores das anomalias Ar-livre oscilam entre -20 e -60 mGal. O mapa de anomalias Bouguer também mostra uma forte variação (de 260 a 360 mGal) em direção a região de crosta oceânica. Este gradiente gravimétrico positivo, está relacionado com a subida da Moho e o consequente afinamento crustal deste setor (Figura 27A).

No mapa de ASA, esta região mostra um padrão mais complexo na distribuição das anomalias magnéticas. As bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal apresentam valores em torno de 6 a 1 nT/km e 3 a 17 nT/km, respectivamente, que variam de forma mais intensa na região da BPN do que na BPB (Figura 28A). O mapa de CMT e de derivada vertical do CMT mostram anomalias magnéticas com orientação preferencial para ENE-WSW, perpendiculares à linha de costa (Figuras 28B e 28C). Os valores positivos e negativos das anomalias magnéticas variam de 30 a 90 nT e de -30 a -80 nT, respectivamente. A configuração das anomalias representa a possível combinação das estruturas do embasamento (E-W) com as respectivas reativações dessas durante o estágio de abertura do Atlântico (NW-SE). Este padrão de alinhamentos magnéticos termina no limite leste deste setor, marcando a transição com a crosta oceânica (COB) (Figuras 28B e 28C). Para a Bacia da Plataforma de Natal, duas possíveis situações podem ser usadas para explicar a variação mais intensa dos padrões magnéticos e gravimétricos em relação à

Bacia da Paraíba. No primeiro caso, esta configuração sugere que a transição com a crosta oceânica parece ter uma influência mais expressiva das regiões de intrusões magmáticas e montes submarinos ao longo da combinação das estruturas do embasamento com as zonas de fraturas (Figuras 27 e 28). A outra possibilidade seria a possível continuação do embasamento (Maciço São José do Campestre) para dentro deste setor crustal como um Alto estrutural. Com respeito à localização da COB, uma série de montes submarinos marca a região de transição entre a crosta continental afinada/transicional com a crosta oceânica. Esses montes estão associados com uma série de intrusões magmáticas desenvolvidas ao longo das zonas de fraturas que estão em contato com a COB (Figuras 26, 27 e 28).

A interpretação do embasamento neste setor foi feita usando a linha sísmica L1, pois a linha L2 não o alcançou. Sendo assim, na linha L1 este setor se estende por 75 km a partir do contato com o Setor A até a COB. A profundidade do embasamento varia de aproximadamente 4,0 a 8,0 s (TWT) (Figura 29). A espessura máxima em tempo da coluna sedimentar formada nas porções mais rasa e na região de quebra da plataforma foi estimada em 2,5 s (TWT) (Gomes et al., 2000). Com isso, pela conversão tempo x profundidade, as espessuras sedimentares em profundidades são da ordem de 2,2 a 4,2 km. O rifte nesta região é estreito e está representado por sequências falhadas e rotacionadas sobre o domínio de crosta afinada (Figura 29). Entretanto, as características e as idades destes depósitos ainda permanecem em aberto (Lima Filho e Barbosa, 2010). As falhas sintéticas rotacionadas mudam sua geometria gradualmente de subvertical à inclinada com o acréscimo do afinamento da crosta, devido à extensão progressiva dos blocos crustais em direção à COB. No fim deste setor, aparece uma seção de bloco afinado com falhas sintéticas e antitéticas rotacionadas. Nesta parte mais distal do Setor B, as características geofísicas indicam que esta região apresenta uma influência mais abundante de intrusões e de coberturas piroclásticas, do que a cobertura sedimentar propriamente dita. Com isso, essa porção foi denominada como sendo representativa de uma crosta proto-oceânica (POC). A possível causa para formar esta feição pode estar relacionada ao rápido afinamento da crosta continental, o qual faz com que a crosta seja fortemente intrudida durante a formação da crosta oceânica. Algumas estruturas interpretadas no domínio de crosta proto-oceânica sugerem que este setor foi formado provavelmente nos últimos estágios de deformação que por sua vez teria uma fase de transpressão associada (Refletores dobrados, geometrias em *pop-up* e inversão de Bacia).

Na linha L2, é evidente que a quebra da região plataformal é abrupta e está controlada por blocos rotacionados (Figura 30). Para norte, em direção a Plataforma de Natal, a quebra da plataforma torna-se ainda mais abrupta, onde a escarpa torna-se quase vertical (Barbosa e Lima Filho, 2010). Em ambas as linhas (L1 e L2), as fácies sísmicas observadas nesta região de quebra indicam a presença de depósitos tanto da fase rifte quanto pós-rifte, onde esses foram afetados por transporte de material ao longo da escarpa. Neste caso, os depósitos menos deformados da fase pós-rifte cobrem tanto o domínio de crosta afinada quanto o de crosta oceânica. O transporte de material da plataforma até a bacia oceânica ao longo da escarpa criou uma grande zona de *bypass*. Devido ao fato de não haver poços na parte *offshore*, a nossa interpretação de sequências rifte e pós-rifte são tentativas.

No geral, pode-se ver que nas bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal o padrão de transição com a COB ocorre de forma abrupta. Com isso, a posição da COB em relação à linha de costa na Bacia Paraíba está localizada a aproximadamente 130 e 95 km, respectivamente, e na Bacia da Plataforma de Natal está posicionada à 60-75 km (Figuras 26, 27, 28, 29 e 30). Essas características mostram um perfil de estrangulamento/afunilamento da crosta afinada/transicional, a partir da Bacia da Paraíba em direção a Plataforma de Natal.

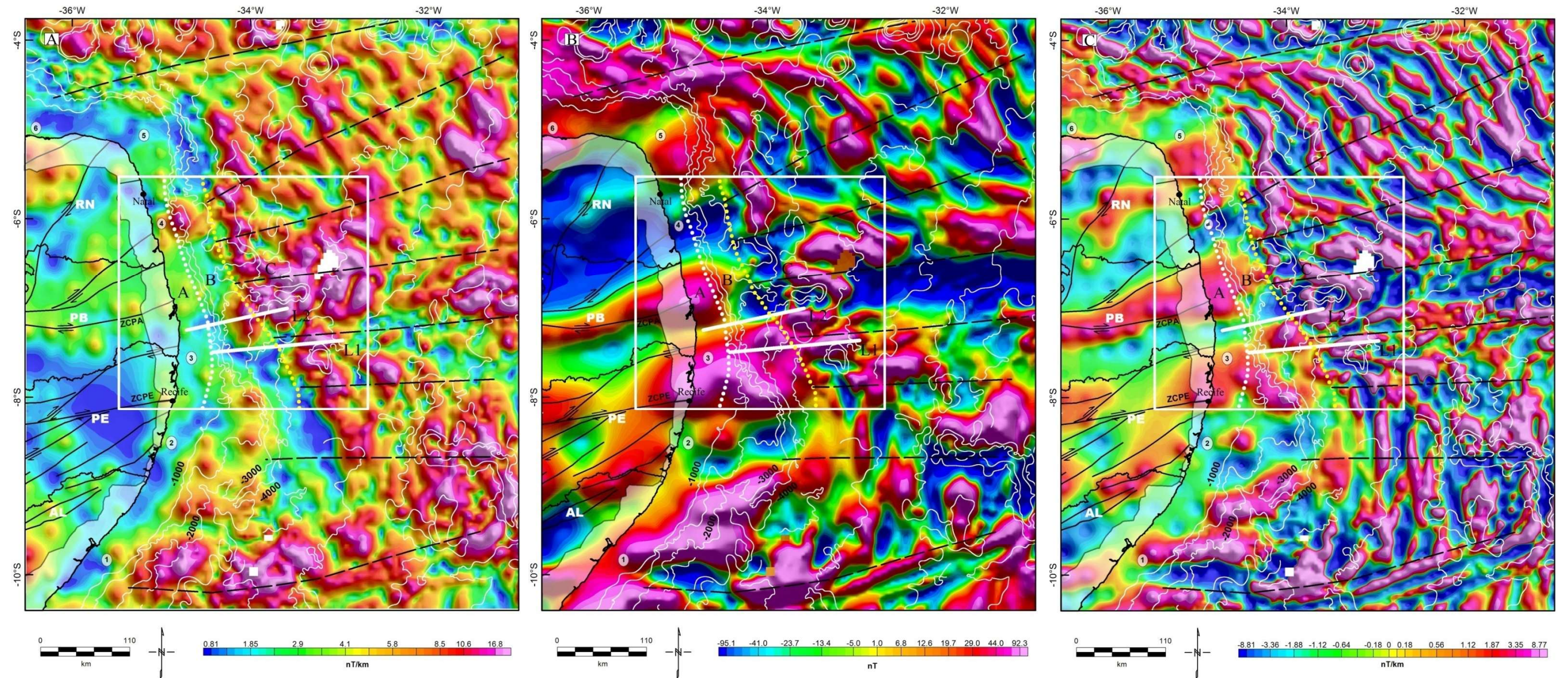


Figura 28: Mapas magnéticos de Amplitude do sinal analítico (A), Campo magnético total (B) e de derivada vertical do Campo magnético total (C). Para a legenda, consultar a Figura 26.

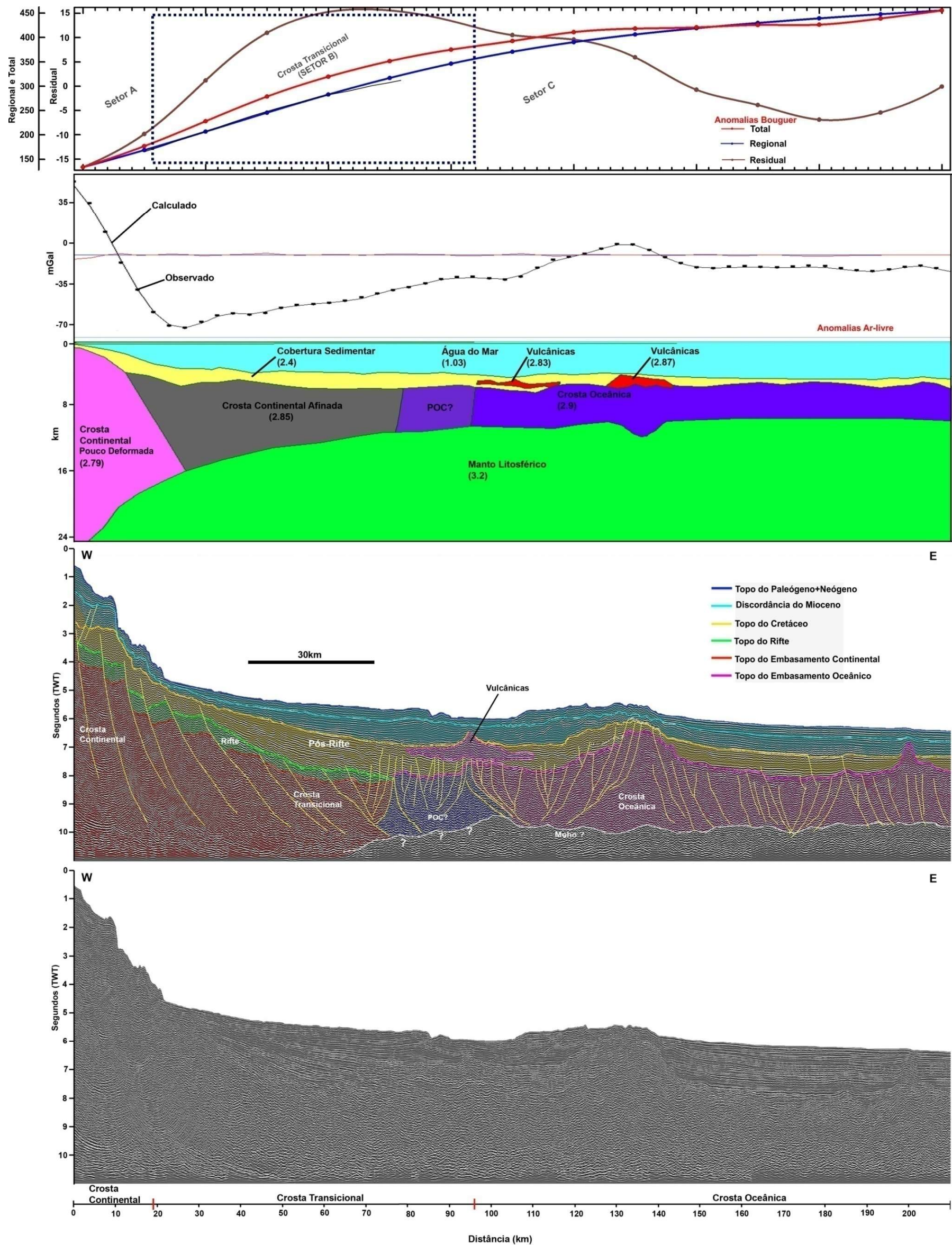


Figura 29: Modelo geofísico integrado. Do topo para baixo: Perfil das anomalias Bouguer (total, regional e residual) com a localização dos setores crustais; Anomalia Ar-livre modelada; Modelo geológico interpretativo; Seção sísmica L1 interpretada. Os horizontes estratigráficos foram obtidos em Barbosa et al. (2008) e Lima Filho e Barbosa (2010). O retângulo azul pontilhado no perfil das anomalias Bouguer mostra a região de Crosta Continental Afinada/Transicional.

SETOR C (Crosta Oceânica)

Neste setor, o mapa de EDT apresenta a batimetria típica de uma bacia oceânica (-4000 e -5000 m) (Figura 26A). No mapa de profundidades da Moho, o Setor C apresenta profundidades entre 12 e 9 km, o que é compatível com as profundidades médias da Moho em crosta tipicamente oceânica (Figura 26B). Nas regiões dos montes submarinos, as profundidades da Moho aumentam para 14 e 16 km. Este espessamento da crosta está relacionado a uma raiz isostática causada pela acreção crustal na base da crosta oceânica (Blaich et al., 2008). Podemos observar que a leste das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal, há uma faixa NNW-SSE de espessamento da crosta oceânica (Linha de contorno azul no mapa de profundidades da Moho) devido ao alojamento de montes submarinos na terminação das zonas de fraturas (Figura 26B). A leste da posição da COB, o mapa de AAL mostra padrões diferentes de distribuição de anomalias gravimétricas, com valores aumentando de -80 a 10 mGal. Nos mapas de AAL e de sua derivada vertical, regiões de picos gravimétricos (19 a 70 mGal, no mapa de AAL) ocorrem em vários locais neste setor, relacionados com os montes submarinos. Estes padrões de distribuição de anomalias gravimétricas estão claramente relacionadas com o domínio de crosta oceânica (Blaich et al., 2008; Sandwell et al., 2014) (Figuras 27B e 27C). Outra característica importante é que esses padrões estão limitados ao longo de terminações de zonas de fraturas (Figuras 27 e 28). O mapa de anomalias Bouguer varia de 370 a 500 mGal, indicando a presença de uma Moho mais rasa (Figura 27A).

Os mapas magnéticos mostram um padrão típico de crosta oceânica, com intercalações de anomalias magnéticas positivas e negativas, orientadas nos *trends* N-S e NW-SE. Esses estão associados com a formação da crosta oceânica, durante o espalhamento do assoalho oceânico, e limitados por zonas de fraturas na direção E-W a partir da COB (Figura 28). Os mapas de CMT e de derivada vertical do CMT mostram a disposição de anomalias magnéticas na direção E-W, no domínio de crosta continental afinada/transicional, sendo truncadas pelo padrão de anomalias magnéticas N-S e NW-SE de crosta oceânica na região da COB (Figuras 28B e 28C). Entretanto, a leste da COB há várias anomalias magnéticas orientadas na direção E-W, mostrando a influência das estruturas da Província Borborema na formação de importantes zonas de falhas transformantes e de fraturas (Linhas pretas tracejadas) (Figuras 28B e 28C). Os valores do mapa de CMT variam de -80 a 60 nT.

Na linha sísmica L1 (Figura 29), este setor representa o domínio de crosta oceânica, onde podemos observar os refletores que marcam o topo do embasamento oceânico. As sismofácies relacionadas com as coberturas sedimentares tem um padrão predominantemente paralelo e são causadas pelas sequências pós-rifte e drifte. Na região da COB, há um vulcão recoberto por depósitos relacionados às sequências pós-rifte (Cenozoico?). Adicionalmente, grandes montes submarinos recobertos por depósitos sedimentares podem ser vistos e estão claramente associados, como já descrito, com expressivas anomalias gravimétricas e magnéticas nos mapas de campos potenciais (Figuras 27 e 28). Enumeras falhas subverticais puderam ser interpretadas dentro da crosta oceânica, as quais provavelmente representam falhas de transferência que acomodaram a deformação na crosta oceânica. A posição da Moho neste setor foi tentativamente interpretada na profundidade de 10 s (TWT). Na linha L2 (Figura 30), refletores dentro da seção pós-rifte e drifte apresentam feições similares as que foram observadas na linha L1, ou seja, com uma configuração de refletores predominantemente paralelos.

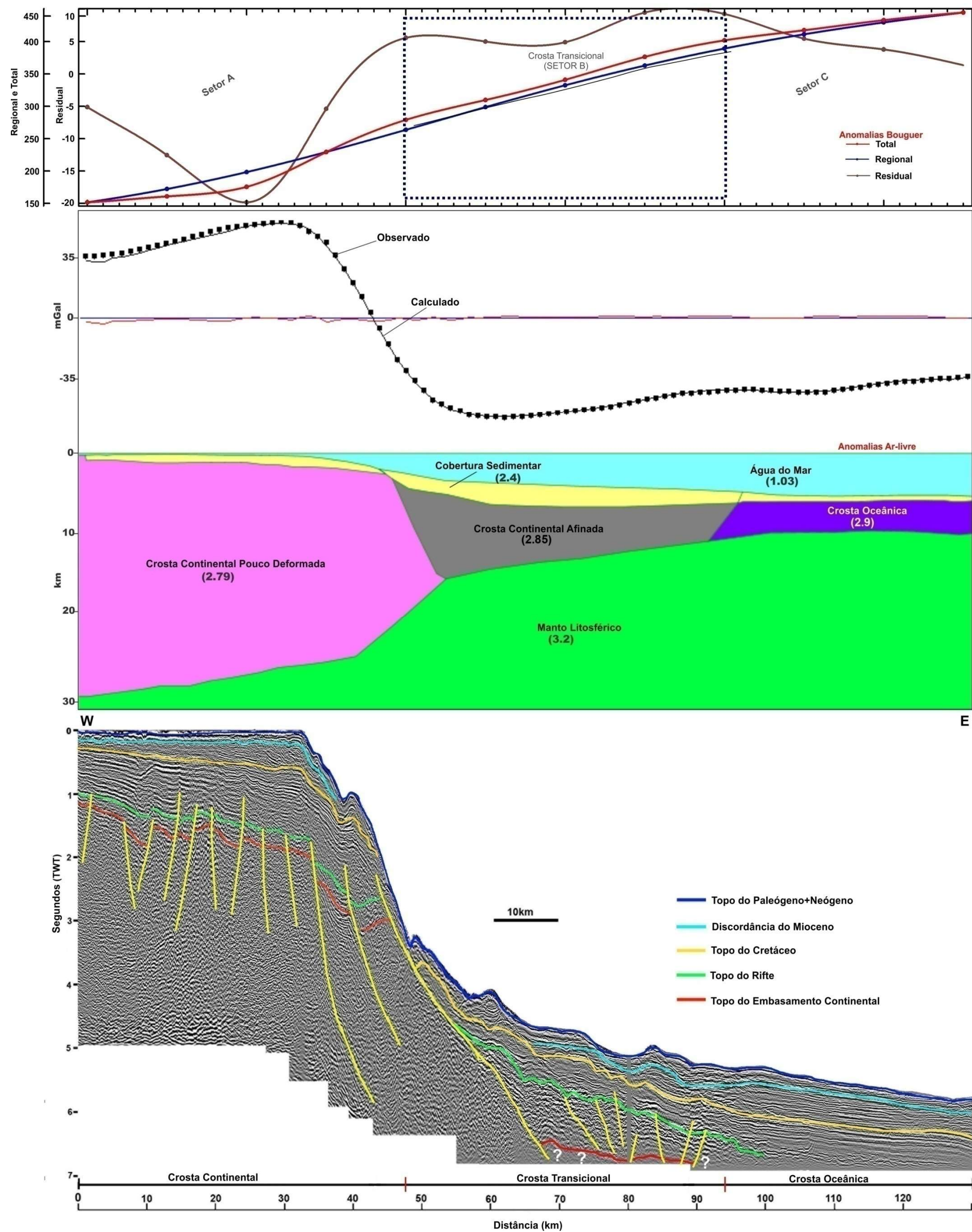


Figura 30: Modelo geofísico integrado. Do topo para baixo: Perfil das anomalias Bouguer (total, regional e residual), com a localização dos setores crustais; Anomalia Ar-livre modelada; Modelo geológico interpretativo; Seção sísmica L2 interpretada. Os horizontes estratigráficos foram obtidos por Barbosa et al. (2008) e Lima Filho e Barbosa (2010). O retângulo azul pontilhado no perfil das anomalias Bouguer mostra a região da Crosta Continental Afinada/Transicional.

CAPÍTULO V - DISCUSSÕES

5.1 Introdução

A partir da interpretação e da modelagem dos dados geofísicos na área de estudo, as características regionais dos domínios crustais que compõem as bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal puderam ser observadas. Os modelos geofísicos permitiram uma análise regional completa a respeito das variações da natureza crustal e do estilo estrutural de cada domínio (Crosta Continental Pouco Deformada, Crosta Continental Afinada/Transicional e Crosta Oceânica) que compõe a porção oriental da margem continental nordeste. Com a integração das assinaturas geofísicas, dos modelos geofísicos e dos gradientes gravimétricos e magnéticos foi possível identificar os padrões de distribuição das principais estruturas tectônicas e a estimativa da posição da COB.

5.2 Herança tectônica do embasamento

A herança tectônica do Domínio Central, do Maciço São José do Campestre e das estruturas tectônicas regionais que compõem o embasamento da BPB e da BPN, representaram um decisivo controle na evolução tectônica da região nordeste da margem continental brasileira. Comparando as bacia da Paraíba e da Plataforma de Natal com suas respectivas margens conjugadas (Bacia de Douala e parte da região do Delta do Niger, respectivamente), é possível perceber que existe uma forte diferença em seus estilos tectônicos: configuração estrutural, espessura da cobertura sedimentar, como previamente discutido por Brito Neves et al. (2002), além de diferentes taxas de estiramento e afinamento da crosta afinada/transicional. Bonatti (1996) argumentou que a "Faixa Equatorial" entre a África e a América do Sul representou uma zona litosférica fria e espessa, criando uma zona que bloqueou a propagação do rifte. Uma hipótese similar sugere que o núcleo da Província Borborema, formado pelo Domínio Central (limitado pelas zonas de cisalhamento Pernambuco e Patos), atuou como uma vasta zona de acomodação (Mattos, 1992; 1999), bloqueando a propagação do rifte ao longo do interior do nordeste do Brasil. Além desse domínio, o Maciço Arqueano São José do Campestre, possivelmente, também atuou como uma zona de acomodação da propagação do rifte, devido ao estilo de transição crustal abrupta da Plataforma de Natal. Vale ressaltar que este maciço representa o embasamento da margem continental brasileira que marca a transição entre a margem distensional (Atlântico Sul) e a margem transformante (Atlântico Equatorial).

Outra hipótese seria que a propagação do rifte foi parada por uma região fria e espessa da placa continental, as quais formam o núcleo da PB (Lima Filho e Barbosa, 2010). Novas investigações da estruturação crustal profunda da PB, a partir de dados sísmicos e perfis gravimétricos regionais produziram informações que corroboram a importância do domínio central e seus limites, formados por extensas zonas de cisalhamento, principalmente a ZCPA (De Castro et al., 2011; Osako et al., 2011). As espessuras crustais atuais dos domínios do embasamento da BPB e da BPN não parecem ser representativas para o que existiu durante a abertura do Atlântico. Isso provavelmente ocorreu devido as feições litosféricas profundas terem sido modificadas tanto no processo de rifteamento (Osako et al., 2011), quanto pelo soerguimento do Planalto da Borborema no cenozoico (Oliveira, 2008; Pavão et al., 2013; Lima et al., 2015).

5.3 Configuração tectono-estrutural e tipo de margem rifteada

O estilo abrupto de afinamento da crosta continental, a extensão da crosta afinada/transicional e a configuração tectono-estrutural ortogonal a trama interna do embasamento sugerem que houve apenas uma pequena taxa de estiramento e de afinamento durante o processo de rifteamento. Além disso, a falta de evidências de SDRs indica fortemente que a margem continental, onde a BPB e a BPN estão inseridas, se trata de uma margem do tipo não-vulcânica ou pobre em magma. Blaich et al. (2010) discutiram a respeito dos possíveis mecanismos de extensão litosférica causadores da expressiva assimetria entre as margens conjugadas das bacias de Camamu-Almada e Gabão. Esses autores sugerem que o modelo envolvendo um mecanismo de extensão dependente da profundidade (*Depth-dependent extension*) poderia explicar esta configuração, o qual pode ter atuado de maneira similar na evolução das margens conjugadas onde as bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal estão localizadas.

5.4 Distribuição dos domínios crustais e potencial exploratório

A partir da integração dos mapas e modelos geofísicos dos setores crustais (Crosta Continental Pouco Deformada, Crosta Continental Afinada/Transicional e Crosta Oceânica), é proposto o mapa geológico interpretativo, ilustrando os diferentes tipos crustais que envolvem a área de estudo (Figura 31). A distribuição geográfica dos setores crustais realça especialmente a zona de crosta afinada/transicional (Setor B) da BPB e da

BPN. Sendo assim, principalmente no setor sul da Bacia da Paraíba, em contato com a Bacia de Pernambuco, a área de influência desse tipo crustal (Crosta Continental Afinada/Transicional + Crosta Proto-oceânica) é mais larga, alcançando cerca de 100 km de extensão. O Setor B foi fortemente influenciado por afinamento e enfraquecimento crustal. A forma como ocorrem as variações na espessura crustal ao longo deste setor sugere que estas foram causadas por uma rápida ascensão da crosta inferior em resposta ao mecanismo de rifteamento, causando assim, importantes variações reológicas na natureza dos blocos crustais dessas bacias (Wilson et al., 2003; Dupré et al., 2011), como podemos observar nos mapas e modelos geofísicos (Figuras 26, 27, 28, 29 e 30). Outra evidência que não foi possível observar nos dados sísmicos foi a presença de SDRs dentro da zona de crosta afinada. Para a geração de crosta proto-oceânica neste setor, Blaiç et al. (2010) propuseram a existência de crosta proto-oceânica na Bacia de Almada, nordeste do Brasil. Segundo esses autores, o mecanismo de formação da crosta proto-oceânica estaria relacionado com uma rápida ascensão da crosta inferior e o consequente alojamento do manto continental, causando assim um aumento na densidade. Wilson et al. (2003) propuseram a existência de crosta proto-oceânica na Bacia de Rio Muni, oeste da África, devido ao estilo de abertura oblíqua desta margem. As bacias de Rio Muni e Douala representam, respectivamente, as margens conjugadas das bacias de Pernambuco e da Paraíba (Barbosa e Lima Filho, 2010).

A largura e a variação das características geofísicas e estruturais dentro do Setor B, torna-se importante em termos de potencial exploratório, considerando os aspectos envolvidos para a maturação de hidrocarbonetos (crosta térmica e armadilhas estruturais) na região distal da BPB. A Bacia da Plataforma de Natal apresenta uma largura de crosta continental afinada/transicional de apenas 40 km, sugerindo uma evolução tectônica distinta da Bacia da Paraíba. Porém, devido a falta de dados sísmicos nesta área, a maneira como este setor evoluiu ainda permanece em aberto.

Com relação ao cenário econômico, pode-se considerar duas principais implicações para o potencial petrolífero da área de pesquisa. Primeiramente, devido ao processo de rifteamento ter gerado uma margem abrupta e tardia em relação a propagação da deformação, pode-se dizer que a formação das rochas geradoras não pôde ser significativa. Segundo, a espessura sedimentar pouco expressiva, tanto na parte *onshore* quanto *offshore*, reduz fortemente a possibilidade para um sistema petrolífero produtivo. Por outro lado, na

região de transição entre o Platô de Pernambuco e a Bacia da Paraíba parece ser mais promissor do que a estreita zona transicional da Plataforma de Natal.

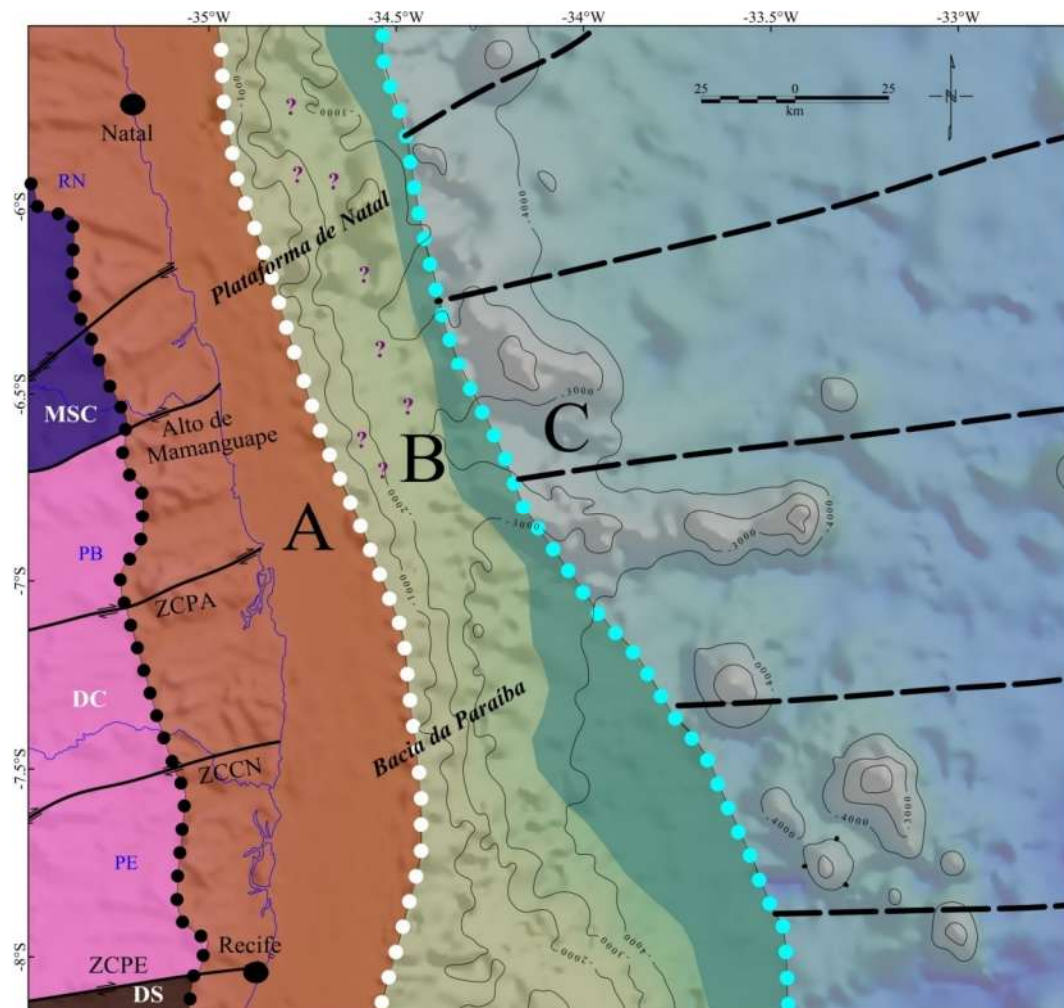


Figura 31: Domínios crustais da margem continental e da área oceânica adjacente das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal. A linha preta pontilhada marca o contato entre os domínios tectônicos da Província Borborema, não associados à tectônica rifte, e o setor A (Crosta Continental Pouco Deformada - Marrom). A linha branca pontilhada apresenta o limite da crosta continental pouco deformada. A linha azul clara pontilhada representa a posição da COB. A região localizada entre a crosta continental pouco deformada e a crosta oceânica (B) é composta pela crosta continental afinada/transicional (Verde claro) e pela crosta proto-oceânica (Verde escuro). A região com interrogações no setor B representa a área de crosta afinada/transicional na Bacia da Plataforma de Natal. Para a definição mais robusta desta região, precisa-se de informações sísmicas. O Setor C representa a área de crosta oceânica com ocorrências de montes submarinos e zonas de fraturas (linhas pretas tracejadas). Domínios da PB: DS - Domínio Sul; DC - Domínio Central; MSC: Maciço São José do Campestre. ZCCN - Zona de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste.

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES

Os dados geofísicos apresentados aqui revelam que a margem continental das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal é caracterizada por uma plataforma estreita, com uma quebra abrupta da plataforma continental, uma escarpa íngreme e uma zona de crosta afinada/transicional estreita. Devido ao estilo tectônico, possivelmente esta região sofreu menores taxas de estiramento e afinamento crustal do que as áreas vizinhas como as bacias de Pernambuco e Sergipe-Alagoas. Essas contêm uma crosta continental afinada/transicional mais extensa e espessuras sedimentares mais expressivas. A transição da crosta continental afinada/transicional para a crosta oceânica (COB) nas bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal está a uma distância de aproximadamente 100 e 70 km, respectivamente, a partir da linha de costa.

Os modelos geofísicos permitiram diferenciar a crosta em três setores: Setor continental (Crosta continental pouco deformada), marcado por anomalias gravimétricas Ar-livre positivas e uma quebra abrupta da plataforma continental no contato com a crosta afinada/transicional; Setor transicional (crosta continental afinada/transicional + crosta proto-oceânica), que apresenta os mínimos gravimétricos das anomalias Ar-livre; O Setor oceânico, onde há um incremento do gradiente gravimétrico, marcando assim, a transição para a crosta oceânica.

Do ponto de vista geofísico, os três setores crustais são marcados por diferentes padrões de anomalias gravimétricas e magnéticas. As anomalias magnéticas e as suas respectivas derivadas verticais nos setores de crosta continental e transicional, revelam claramente os padrões estruturais do embasamento, dispostos principalmente na direção ENE-WSW. Em contrapartida, as anomalias gravimétricas Ar-livre e seu gradiente vertical mostram um padrão estrutural ortogonal (NNE-SSW e NNW-SSE) às estruturas tectônicas do embasamento. No setor de crosta oceânica, as assinaturas magnéticas encontram-se dispostas nas direções E-W, NW-SE e N-S, evidenciando, assim, a configuração das zonas de fraturas (padrão E-W) e os respectivos *trends* de formação do assoalho oceânico (NW-SE e N-S). As assinaturas gravimétricas neste setor são caracterizadas por uma série de anomalias positivas, relacionadas à formação dos montes submarinos. Estas indicam uma correlação entre a disposição geográfica dos montes submarinos e a terminação oeste das zonas de fraturas.

Os tipos crustais também foram caracterizados por variações em suas respectivas espessuras crustais. No Setor A, a crosta continental pouco deformada apresenta espessuras de 27 a 28 km. As espessuras crustais do Setor B variam de 20 a 10,5 km, marcando assim a crosta afinada/transicional. E o Setor C representa uma crosta oceânica típica, com espessuras de aproximadamente 7 e 8 km.

Uma sequência rifte pouco expressiva na região plataformal e ausente na parte proximal, poderia ser resultante do processo de rifteamento tardio. A quantidade e a distribuição de depósitos da fase rifte nas porções distais e mais profundas da Bacia da Paraíba ainda permanecem em aberto, devido à falta de poços na parte *offshore*. A cobertura sedimentar na região da plataforma continental e no domínio de crosta continental afinada/transicional das bacias da Paraíba e da Plataforma de Natal aparenta ser menos pronunciada do que nas bacias vizinhas (Pernambuco e Sergipe-Alagoas). Isso restringe o potencial petrolífero dessas áreas, principalmente da Bacia da Plataforma de Natal, por apresentar um estilo de quebra ainda mais abrupto. Além disso, há uma forte assimetria com as margens conjugadas africanas (Bacia de Douala e parte do Delta do Niger, respectivamente) que é representada por seus diferentes estilos tectônicos (configuração estrutural, padrões de sedimentação, magmatismo e taxas de estiramento e afinamento crustal/litosférico).

REFERÊNCIAS

- Ab'Saber A.N. 1953. O Planalto da Borborema na Paraíba. Fotografias e comentários. Boletim Paulista de Geografia, 13:54-73.
- Amante, C., B.W. Eakins, 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5C8276M [access date].
- Almeida F.F.M., Carneiro C.D.R., Machado Jr. D.L., Dehira L.K. 1988. Magmatismo Pós-Paleozóico no Nordeste Oriental do Brasil. Revista Brasileira de Geociências, 18(4):451-462.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B. 1976. The upper precambrian of South America. Boletim IG/USP, 7: 45-80.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. In: SBG-Núcleo Nordeste, Simpósio de Geologia do Nordeste, 8^o, Campina Grande, Atas, Boletim 6: 363-391.
- Araújo, C.E.G., Weinberg, R.F., Cordani, U.G. 2013. Extruding the Borborema Province (NE-Brazil): a two stage Neoproterozoic collision process. Terra Nova, 26(2): 157-168.
- Araújo, I.L., Moraes, R.A.V., Dantas, E.L., Vidotti, R.M., Fuck, R.A. 2014. Tectonic framework of the São José do Campestre Massif, Borborema Province, Based on new aeromagnetic data. Brazilian Journal of Geophysics, 32(3): 445-463.
- Aslanian, D., Moulin, M., Olivet, J-L., Unternehr, P., Matias, L., Bache, F., Rabineau, M., Nouzé, H., Klingelhoefer, F., Contrucci, I., Labails, C. 2009. Brazilian and African passive margins of the Central Segment of the South Atlantic Ocean: Kinematic constraints. Tectonophysics, 468: 98–112.
- Asmus H.E. 1984. Geologia da margem costeira brasileira. In: Schobbenhaus C. (Coord.) Geologia do Brasil: texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais, escala 1:2.500.000. Brasília, DNPM, 443-472 p.
- Balmino, G., Vales, N., Bonvalot, S., Briais, A., 2012. Spherical harmonic modeling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies. Journal of Geodesy. July 2012, Volume 86, Issue 7, 499-520 p, DOI 10.1007/s00190-011-0533-4.

- Barbosa, J.A., Lima Filho, M.F. 2006. Aspectos estruturais e estratigráficos da faixa costeira Recife- Natal: observações em dados de poços. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 14(1): 287-306.
- Barbosa., J.A, Neumann, V.H, Lima Filho, M., Souza, E.M., Moraes, M.A. 2007. Estratigrafia da faixacosteira Recife-Natal (Bacia da Paraíba e Plataforma de Natal), NE Brasil. *Estudos Geológicos*, 17(2): 3-30.
- Barbosa, J.A., Morais, D.M.F., Neto, J.C.J. 2008. Interpretação dos dados sísmicos. In: Lima Filho, M. (coord). *Nova metodologia de integração geológico-geofísica regional, com aplicação experimental na bacia sedimentar de Pernambuco e norte de Alagoas*. Rio de Janeiro, PETROBRAS, E&P ESP. Internal Report.
- Bezerra, F.H., Rossetti, D.F., Oliveira, R.G., Medeiros, W.E., Brito Neves, B.B., Balsamo, F., Nogueira, F.C., Dantas, E.L., Andrades Filho, C., Góes, A.M. 2014. Neotectonic reactivation of shear zones and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. *Tectonophysics*, 614: 78-90.
- Bittar, S.M.B. 1998. Faixa Piancó-Alto Brígida: terrenos tectonoestratigráficos sob regimes metamórficos e deformacionais contrastantes. PhD. thesis. Universidade de São Paulo, São Paulo, 126 p.
- Blaich, O.A., Tsikalas, F., Faleide, J.I. 2008. Northeastern Brazilian margin: regional tectonic evolution based on integrated analysis of seismic reflection and potential field data and modelling. *Tectonophysics*, 458 (1/4): 51–67.
- Blaich, O.A., Faleide, J.I., Tsikalas, F., Lilletveit, R., Chiossi, D., Brockbank, P., Cobbold, P. 2010. Structural architecture and nature of the continent-ocean transitional domain at the Camamu and Almada Basins (NE Brazil) within a conjugate margin setting. In: VINING BA & PICKERING SC (Eds.). *Petroleum Geology: From Mature Basins to New Frontiers – Proceedings of the 7th Petroleum Geology Conference*, 867–883.
- Bonatti, E. 1996. Anomalous opening of the Equatorial Atlantic due to an equatorial mantle thermal minimum. *Earth and Planetary Science Letters*, 143(1/4): 147–160.
- Brito Neves B.B. 1975. Regionalização Geotectônica do Pré-Cambriano Nordeste. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 198 p.
- Brito Neves, B.B., Santos, E.J., Van Schmus, W.R. 2000. Tectonic history of the Borborema Province, northeastern Brazil. In: Cordani, U.G., et al. (Eds.), *Tectonic Evolution of South America, 31st International Geological Congress*. FINEP, Rio de Janeiro, 151-182.

- Brito Neves, B.B., Van Schmus W.R., Fetter, A. 2002. North-western Africa-North-eastern Brazil. Major tectonic links and correlation problems. *Journal of African Earth Sciences*, 34(3): 275–278.
- Bueno, G.V. 2004. Diacronismo de eventos no rifte Sul-Atlântico. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 12(2): 203-229.
- Caixeta, J.M., Ferreira, T.S., Machado Jr., D.L., Teixeira, J.L., Romeiro, M.A.T. 2014. Albian rift Systems in Northeastern Brazilian margin: an example of rifting in hyper-extended continental crust. AAPG International conference 7 Exhibition, Istanbul, 2014. Search & Discovery Article #30378.
- Castro C., Mabesoone J.M. 1980. Relevo do Nordeste: Feições principais. Universidade Católica de Pernambuco, Centro de Ciências Sociais, Recife. Série Geomorfologia, Caderno 2, 61-84 p.
- Dantas, E.L., Van Schmus, W.R., Hackspacher, P.C., BritosNeves, B.B., Fetter, A., Cordani, U., Nutman, A., Willians, I.S. 2004. The 3.4-3.5 Ga São José do Campestre Massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South America. *Precambrian Research*. 130: 113-137.
- Dantas, E.L., Souza, Z.S., Wernick, E., Hackspacher, P.C., Martin, H., Xiaodong, D., Li, J. 2013. Crustal growth in the 3.4 2.7Ga São José do Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. *Precambrian Research*. 227: 120-156.
- De Castro, D.L., Osako, L.S., Soares, J.E.P., Fuck, R.A., Lima, V.A.G. 2011. Gravity and Deep Seismic Transects across the Precambrian Borborema Province, NE Brazil. In: SEG Annual Meeting, 81., San Antonio. Expanded Abstracts, San Antonio: SEG, 2011, 897–911.
- De Castro, D.L., Phillips, J.D., Fuck, R.A., Vidotti, R.M., Bezerra, F.H.R. 2013. Using airborne gravity and magnetic data to recognize crustal domains concealed underneath the Parnaíba basin. 13th International Congress of Brazilian Geophysical Society, 2013, Rio de Janeiro, Brazil.
- De Castro, D.L., Fuck, R.A., Phillips, J.D., Vidotti, R.M., Bezerra, F.H.R., Dantas, E.L. 2014. Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. *Tectonophysics*, 614: 128-145.
- Dupré, S., Cloetingh, S., Bertotti, G. 2011. Structure of the Gabon Margin from integrated seismic reflection and gravity data. *Tectonophysics*, 506 (1/4): 31–45.

- França, G.S., Assumpção, M., Ferreira, J.M. 2006. O estudo da crosta no NE do Brasil, usando função Receptor. In: SBGF, Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2^o, Natal, Estudo da Crosta, Resumos Expandidos, 1 cd-rom.
- Gardner, G.H.F., Gardner, L.W., Gregory, A.R. 1974. Formation velocity and density - The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39: 770-780.
- Geosoft, 2013. Oasis Montaj 7.5 Mapping and Processing System. Quick Start Tutorials. Geosoft Incorporated (258 p).
- Gomes, P.O., Gomes, B.S., Palma, J.J.C., Jinno, K., Souza, J.M. 2000. Ocean-continent transition and tectonic framework of the oceanic crust at the continental margin of Northeast Brazil: results of LEPLAC Project. *American Geophysical Union, Monography Series*, 15: 261–291.
- Gomes, P.O. 2005. Tectonismo, vulcanismo, sedimentação e processos erosivos no segmento nordeste da margem continental brasileira. Unpublished Doctorate Thesis, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. 183 p.
- Granot, R., Dymant, J. 2015. The Cretaceous opening of the South Atlantic Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 414: 156-163.
- Grant, F.S., Dodds, J. 1972. MAGMAP FFT processing system development notes, Paterson Grant and Watson Limited.
- Heine, C., Brune, S. 2014. Oblique rifting of the Equatorial Atlantic: Why there is no Saharan Atlantic Ocean. *Geology*. doi: 10.1130/G35082.1.
- Heiskanen, W.A., Moritz, H., 1967. *Physical Geodesy*. W.H. Freeman & Co., San Francisco and London, 364 p.
- Jardim de Sá E.F., Fuck R.A., Macedo M.H.F., Kawashita K. 1992. Terrenos Proterozóicos na Província Borborema e a margem Norte do Cráton São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 22(4): 472-480.
- Jardim de Sá E.F. 1994. A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan-Africana. Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 804 p.
- Karner, G.D., Driscoll, N.W. 1999. Tectonic and stratigraphic development of the West African and eastern Brazilian margins: insights from quantitative basin modelling. In: Cameron, N.R; Bate, R.H, Clure, V.S. (eds). *The oil and gas habitats of the South Atlantic*. Geological Society Special Publication. 153: 11-40.
- Lana, M.C.C., Roesner, E.H. 1999. Palinologia do Cretáceo Superior marinho subaflorante na região de Natal, RN. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 71(1): 149-150.

- Lima Filho, M.F., Barbosa, J.A. 2010. The peculiar tectonostratigraphic evolution of the eastern margin of Northeast Brazil, and its African Counterpart. In: Central and North Atlantic Conjugate Margins Conference, 2., 2010, Lisbon. Proceedings Book, Lisbon, 8: 304–308.
- Lima, M.V.A.A., Berrocal, J., Soares, J.E.P., Fuck, R.A. 2015. Deep seismic refraction experiment in northeast Brazil: New constraints for Borborema province evolution. *Journal of South American Earth Sciences*. 58: 335-349.
- Mabesoone J.M., Castro C. 1975. Desenvolvimento geomorfológico do Nordeste brasileiro. In: SBG-Núcleo Nordeste, Simpósio de Geologia do Nordeste, 7^o, Boletim 3, 5-36 p.
- Matos, R.M.D. 1992. The Northeast Brazilian Rift System. *Tectonics*, 11(4): 766-791.
- Matos, R.M.D. 1999. History of the northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break-up between Brazil and West Africa. In: CAMERON NR, BATE RH & CLURE VS (Eds.). *The oil and gas habitats of the South Atlantic*. Special Publication, 153, GSL, 55–73.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., Frese B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Luhr H., Miligan P., Mogren S., Muller D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., Thébaud E., Tontini F. 2009. EMAG2: A 2-arc minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine magnetic measurements. *Journal of Geophysical Research*, London.
- Mizusaki A.M.P., Thomaz-Filho A., Milani P., Césero P. 2002. Mesozoic and Cenozoic igneous activity and its tectonic control in Northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 15:183-198.
- Nabighian, M. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37: 507–517.
- Neves, S.P., 2003. Proterozoic history of the Borborema Province (NE Brazil): correlations with neighboring cratons and Pan-African belts, and implications for the evolution of western Gondwana. *Tectonics*, 22: 10-31.
- Neves, S.P., Bruguier, O., Vauchez, A., Bosch, D., Silva, J.M.R., Mariano, G., 2006. Timing of crust formation, deposition of supracrustal sequences, and Transamazonian and Brasiliano metamorphism in the East Pernambuco belt

- (Borborema Province, NE Brazil): implications for western Gondwana assembly. *Precambrian Research*, 149: 197-216.
- Neves, S.P., Moniz, P., Bruguier, O., Silva, J.M.R., 2012. Geochronological, thermochronological and thermobarometric constraints on deformation, magmatism and thermal regimes in eastern Borborema Province (NE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, 38: 129-146.
- Oliveira, J.T.C. 2013. Análise integrada de dados geofísicos da transição crustal (continente - oceano) da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 62 p.
- Oliveira, R.G. 2008. Arcabouço Geofísico, Isostasia e Causas do Magmatismo Cenozóico da Província Borborema e de sua Margem Continental (Nordeste do Brasil). Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Tese de Doutorado, 411 p.
- Oliveira, R.G., Medeiros, W.E. 2012. Evidences of buried loads in the base of the crust of Borborema Plateau (NE Brazil) from Bouguer admittance estimates. *Journal of South American Earth Sciences*, 37: 60-76.
- Osako, L.S., De Castro, D.L., Fuck, R.A., Castro, N.A., Pitombeira, J.P.A. 2011. Contribuição de uma seção gravimétrica transversal ao estudo da estruturação litosférica na porção setentrional da Província Borborema, NE do Brasil. *Brazilian Journal of Geophysics*, 29(2): 309–329.
- Pavão, C.G., França, G.S., Bianchi, M., Almeida, T., Von Huelsen, M.G. 2013. Upper-lower thickness of the Borborema Province, NE Brazil, using Receiver Function. *Journal of South American Earth Sciences*, 42: 242–249.
- Pavlis, N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. 2008. An Earth Gravitational Model to degree 2160: EGM2008. General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18, 2008.
- Péron-Pinvidic, G., Manatschal, G., Osmundensen, P.T. 2013. Structural comparison of archetypal Atlantic rifted margins: a review of observations and concepts. *Marine and Petroleum Geology*. 43: 21-47
- Roest, W.R., L. Verhoef, M. Pilkington, 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *Geophysics*, 57: 116-125.

- Rossetti, D.M., Góes, A.M. 2009. Marine influence in the Barreiras Formation, State of Alagoas, Northeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 81(4): 741-755.
- Sá, J.M., Bertrand, J.M., Leterrier J., Macedo M.H.F. 2002. Geochemistry and geochronology of pré-Brasiliano rocks from the Transversal Zone, Borborema Province, Northeast Brazil. *Journal of South America Earth Sciences*, 14:851-866.
- Sandwell, D.T., Müller, R.D., Smith, W.H.F., Garcia, E., Francis, R. 2014. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, 346: 65-67.
- Santos, E.J. 1996. Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema. In: SGB, Congresso Brasileiro de Geologia, 39^o, Salvador, Anais, 6:47-50.
- Santos, E.J., Brito Neves, B.B., Van Schmus, W.R., Oliveira, R.G., Medeiros, V.C. 2000. Na overall view on the displaced terrane arrangement of the Borborema Province, NE Brazil. In: International Geological Congress, 31th, Rio de Janeiro, Brazil, General Symposia, Tectonic Evolution of South American Platform, Anais, 9-5.
- Santos, E.J., Ferreira, S.A., Silva Jr., J.F. 2002. Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Minas e Metalurgia. CPRM-Serviço Geológico do Brasil.
- Sial, A.N. 1976. The post-paleozoic volcanism of Northeast Brazil and its tectonic significance. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 48: 299-311.
- Simpson, R.W., Jachens, R.C., Blakely, R.J., Saltus, R.W., 1986. A New Isostatic Residual Gravity Map of the Conterminous United States With a Discussion on the Significance of Isostatic Residual Anomalies. *Journal Of Geophysical Research*, 91: 8348-8372.
- Souza Z.S., Vasconcelos P.M., Nascimento M.A.L., Silveira F.V., Paiva H.S., Dias L.G.S., Viegas M.C.D., Galindo A. C., Oliveira M.J.R. 2004. Geocronologia e geoquímica do magmatismo cretácico a terciário no NE do Brasil. In: SBG/Núcleo NE, Congresso da Sociedade Brasileira de Geologia, 42^o, João Pessoa, Anais, S32.607.
- Spector, A., Grant, F.S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2): 293-302.
- Stica, J.M., Zalán, P.V., Ferrari, A.L. 2014. The evolution of rifting on the volcanic margin of the Pelotas Basin and the contextualization of the Paraná-Etendeka LIP in the

- separation of Gondwana in the South Atlantic. *Marine and Petroleum Geology*, 50: 1-21.
- Van Schmus, W.R., BritoNeves, B.B., Willians, I.S., Hackspacher, P.C., Fetter, A.H., Dantas, E.L., Babinski, M., 2003. The Serido Group of NE Brazil: a late Neoproterozoic, pre-collisional flysch basin in west Gondwanaland- insights from Shrimp U-Pb detrital zircons ages. *Precambrian Research*. 127: 287-327.
- Watts, A.B. 2001. Gravity anomalies, flexure and crustal structure at the Mozambique rifted margin. *Marine and Petroleum Geology*, 18: 445–455.
- Wilson P.G., Turner J.P., Westbrook G.K. 2003. Structural architecture of the ocean-continent boundary at an oblique transform margin through deep-imaging seismic interpretation and gravity modelling: Equatorial Guinea, West Africa. *Tectonophysics*, 374: 19–40.
- Winterbourne, J., Crosby, A., White, N. 2009. Depth, age, and dynamic topography of oceanic lithosphere beneath heavily sedimented Atlantic margins. *Earth and Planetary Science Letters*, 287: 137–151.