

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GEOLOGIA SEDIMENTAR E AMBIENTAL



**CARACTERIZAÇÃO DE FEIÇÕES VULCÂNICAS PRESENTES NA
SUCESSÃO SEDIMENTAR DO PLATÔ DE PERNAMBUCO A PARTIR DE
DADOS DE SÍSMICA DE REFLEXÃO**

Dissertação de Mestrado

Bruno Varela Buarque

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Barbosa

Recife-PE
Agosto – 2016

BRUNO VARELA BUARQUE

Geólogo, Universidade Federal de Pernambuco, 2012

**CARACTERIZAÇÃO DE FEIÇÕES VULCÂNICAS PRESENTES NA
SUCESSÃO SEDIMENTAR DO PLATÔ DE PERNAMBUCO A PARTIR DE
DADOS DE SÍSMICA DE REFLEXÃO**

Dissertação que apresenta à Pós-Graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, orientada pelo Prof. Dr. José Antonio Barbosa, como preenchimento parcial dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Geociências, área de concentração em Geologia Sedimentar e Ambiental.

Recife-PE

Agosto – 2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

B917c Buarque, Bruno Varela.
Caracterização de feições vulcânicas presentes na sucessão sedimentar do
platô de Pernambuco a partir de dados de sísmica de reflexão/Bruno Lima
Buarque.- Recife: O Autor, 2016.
55 folhas, il.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Barbosa.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-graduação em Geociências, 2016.
Inclui Bibliografia.

1. Geociências. 2. Estruturas vulcânicas. 3. *Buildups* carbonáticos.
4. Estratigrafia sísmica. 5. Bacia de Pernambuco. I. Barbosa, José
Antonio (Orientador). II. Título.

UFPE

551 CDD (22. ed.) BCTG/2016-272

CARACTERIZAÇÃO DE FEIÇÕES VULCÂNICAS PRESENTES NA SUCESSÃO
SEDIMENTAR DO PLATÔ DE PERNAMBUCO A PARTIR DE DADOS DE
SÍSMICA DE REFLEXÃO

BRUNO VARELA BUARQUE

Aprovada em 22 de Agosto de 2016

Prof. Dr. José Antonio Barbosa

Prof. Dr. Mário Ferreira de Lima Filho

Prof. Dr. David Lopes de Castro

Diálogo entre avô e neto

Verão de 1999, Município de Tibau do Sul, Praia de Pipa - RN:

"Bruno, venha cá!" chamou-me o meu avô Josué enquanto estávamos em um mirador no Santuário Ecológico de Pipa. Continuou: "você está vendo as variações de cores naquelas falésias? Está vendo como é diferente o relevo? Tudo isso tem um significado, tem um por quê. Você já tinha pensado nisso? As pessoas ao nosso redor só querem admirar a paisagem e sequer percebem o valor desses detalhes..." e dispensou-me sem que eu tivesse comentado nada...

Hoje, não sei até onde aquele perturbador comentário, que forçou uma criança de 10 anos de idade a olhar para uma rocha com o objetivo de fazê-la ver beleza naquilo, interferiu em minha futura escolha profissional. O fato é que desde aquele dia, nunca mais consegui olhar uma paisagem, uma rocha e um mineral da mesma forma. Nunca mais consegui olhar o mundo da mesma maneira.

Dedico esta dissertação ao meu avô Josué Moreira Buarque. Também a dedico aos meus pais Ana Rosa Marinho Varela Buarque e Josué Monte Buarque; à minha avó paterna Maria de Lurdes Monte Buarque e à memória dos meus avós maternos Antônio Gamboa Varela e Maria Conceição Varela Rabelo. Esta por sinal, foi uma entusiasta da geologia durante o meu período de graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos sinceros são devidos à Sinochem Petróleo Brasil Limitada, pelo apoio financeiro à presente pesquisa, através do projeto de cooperação em pesquisa e desenvolvimento intitulado *Seasound*, desenvolvido em parceria com a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). À Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) por fornecer, através do Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP), os dados geofísicos utilizados no trabalho; e à IHS Kingdom, por conceder a licença do *software* de interpretação sísmica ao Laboratório de Estratigrafia Sísmica da UFPE (SISMOS-DGEO-UFPE), que foi utilizado na realização desta pesquisa.

No campo acadêmico, gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Prof. José Antonio Barbosa, por sua dedicada orientação ao presente trabalho e amizade construída ao longo desse período. Agradeço também a todos os professores do Departamento de Geologia da UFPE, com os quais sempre tive um bom relacionamento, em especial aos professores Gelson Luís Fambrini, Haydon Mort, João Adauto de Souza Neto, Lúcia Maria Mafra Valença e Mario de Lima Filho.

Igualmente valioso foi o apoio que recebi de todos os meus colegas do SISMOS-DGEO-UFPE, pelas importantes discussões técnicoacadêmicas que tivemos; são eles: Artur Batista, Felipe Santana, Hewerton Alves, Jefferson Tavares, José Ricardo Magalhães, Márcio Carnby, Osvaldo Correia e Tiago Miranda.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus pais, Ana Rosa Marinho Varela Buarque e Josué Monte Buarque, por todo apoio dado às minhas decisões profissionais, sempre me encorajando a seguir meus desejos e depositando confiança nos objetivos a serem alcançados. Serei eternamente grato a eles.

RESUMO

A Bacia de Pernambuco representa uma das mais proeminentes fronteiras de exploração petrolífera da margem brasileira. O presente estudo trata da caracterização dos principais tipos de estruturas vulcânicas, assim como também da ocorrência de *buildups* carbonáticos que ocorrem na região *offshore* desta bacia. O estudo foi baseado na análise de 145 seções sísmicas 2D, migradas em tempo, que cobrem praticamente todo o Platô de Pernambuco. A metodologia utilizada se baseou na interpretação das principais sequências tectono-estratigráficas, na identificação e descrição dos corpos vulcânicos e das estruturas carbonáticas. Quanto às estruturas vulcânicas, os resultados permitiram a identificação de vulcões, soleiras, *vents* e sequências vulcanoclásticas, localizadas principalmente em associação com altos externos do platô. A interpretação das principais sequências estratigráficas sugere idade cretácea superior e cenozóica para os corpos vulcânicos encontrado neste trabalho. Isto permite propor que o evento magmático, cuja idade na região *onshore* é albiense, teria uma abrangência temporal maior na região distal da bacia. A dos *buildups* carbonáticos, permitiu classificar as estruturas encontradas em três tipos principais: recifes de margem de plataforma, *patch reefs* e plataformas carbonáticas isoladas. Essas estruturas estão inseridas em duas principais sequências deposicionais, no intervalo de estratos do pós-rifte da bacia: Santoniano-Maastrichtiano e Paleoceno-Mioceno Médio. Os resultados obtidos permitiram uma importante contribuição ao conhecimento do arcabouço estratigráfico da Bacia de Pernambuco, bem como de sua evolução como parte do Rifte do Atlântico Sul. Além disso, os dados aqui apresentados permitirão uma melhor compreensão sobre os efeitos e produtos do magmatismo para o sistema petrolífero da bacia. Da mesma forma, a descrição das estruturas carbonáticas é importante porque a exemplo do que ocorre em outras bacias marginais brasileiras, a confirmação da ocorrência destas estruturas permitirá que estas possam ser investigadas como possíveis *plays* petrolíferos.

Palavras-chave: Estruturas vulcânicas, *buildups* carbonáticos, estratigrafia sísmica, Bacia de Pernambuco.

ABSTRACT

The Pernambuco Basin is one of the most prominent frontier of oil exploration in the Brazilian margin. This study aims to characterize the major volcanic structures as well as the carbonate buildups of the offshore portion of this basin. A set of 145 2D multichannel seismic sections that cover the Pernambuco Plateau region are used to interpret the major tectono-stratigraphic sequences and to describe the volcanic and carbonate structures. For the volcanic structures, the results allowed the identification of volcanoes, sills, vent complexes and volcanoclastic sequences, located mainly in association with external plateau highs. The interpretation of the main stratigraphic sequences suggests Upper Cretaceous and Cenozoic age to the volcanic bodies found in this work. This allows us to propose that the magmatic event, which its age in the onshore region is Albian, would have had a greater time span in the distal region of this basin. For the carbonate buildups, this study allowed the classification of three different types of structure: the shelf margin reefs, patch reefs and isolated carbonate platforms. These structures are in two main depositional sequences, related to the post-rift phase: Santonian-Maastrichtian and Paleocene-Middle Miocene. The findings presented in this report provide a better understanding about the Pernambuco Basin as well as the evolution of this basin as part of the South Atlantic Rift. Moreover, the results presented here can also be useful for the understanding of the magmatism in the basin petroleum system. In the same manner, the description of the carbonate buildups is important because as happens in other Brazilian basins margins, the confirmation of the occurrence of these structures will allow them to be investigated as possible oil and gas play.

Keywords: Volcanic structures, carbonate buildups, seismic stratigraphy, Pernambuco Basin.

Apresentação

A presente dissertação foi elaborada em cumprimento aos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Geologia pelo Departamento de Geociências da Universidade Federal de Pernambuco. O trabalho foi financiado pelo projeto de cooperação em P&D, desenvolvido entre a Universidade Federal de Pernambuco e a Sinochem Brasil Petróleo Brasil Ltda. (convênio nº 52/2013 UFPE).

O estudo tem como objetivo principal, a interpretação e caracterização das principais estruturas vulcânicas que ocorrem na região *offshore* da Bacia de Pernambuco, mais precisamente, no Platô de Pernambuco. Para isso, utilizou-se da interpretação de seções sísmicas 2D como base para seu reconhecimento e classificação. Dados gravimétricos e magnetométricos, também foram utilizados a fim de auxiliar na interpretação das estruturas vulcânicas. Devido à presença de estruturas carbonáticas na área de estudo, estando elas inseridas nas mesmas sequências deposicionais que as estruturas vulcânicas aqui estudadas, fez-se necessário a busca por critérios que permitissem a diferenciação entre as estruturas de origem magmática e as estruturas relacionadas às construções carbonáticas. Os resultados obtidos permitiram identificar também a ocorrência e feições morfológicas das estruturas carbonáticas (*buildups* carbonáticos), sendo estas incorporadas ao arcabouço da pesquisa, devido à sua importância para o conhecimento da bacia e seu contexto exploratório.

Os resultados do trabalho fornecem uma avaliação qualitativa sobre a ocorrência das principais estruturas vulcânicas e das principais estruturas carbonáticas na área de estudo. As informações fornecidas aqui permitirão o avanço da discussão sobre a abrangência espacial e temporal do magmatismo e de sua possível influência no sistema petrolífero da Bacia de Pernambuco e em sua evolução. Além disso, aqui é apresentado o primeiro trabalho sistemático sobre estruturas carbonáticas isoladas e relacionadas com plataformas nesta região.

O Capítulo 1 descreve brevemente a região do Brasil em que a Bacia de Pernambuco está localizada, assim como traz também uma introdução ao tema do estudo, justificativas, objetivos e a abordagem metodológica utilizada para a sua realização.

O Capítulo 2 apresenta em forma de artigos científicos, os principais resultados obtidos na pesquisa. O primeiro artigo foi publicado na revista *Journal of South American Earth Sciences* e trata das estruturas vulcânicas. Nele, são abordadas as

principais estruturas vulcânicas encontradas no Platô de Pernambuco, sua caracterização a partir da análise de sismofácies e uma discussão sobre possíveis processos geológicos envolvidos na formação das estruturas vulcânicas. Também foram discutidas as áreas de maior influência magmática, dentro da área coberta pelos levantamentos disponíveis, na região e sua possível origem. O segundo artigo está submetido para publicação e trata das principais estruturas carbonáticas encontradas na região *offshore* da Bacia de Pernambuco. Nele foram descritas a localização dos principais *buildups* carbonáticos encontrados, assim como a classificação das estruturas com relação às suas morfologias. Tendo como base a interpretação sismoestratigráfica, também foram inferidas as idades dos *buildups* carbonáticos e a possível influência da formação do platô no desenvolvimento dessas estruturas.

O Capítulo 3 apresenta uma síntese dos resultados obtidos pela pesquisa e apresentados nos dois artigos que compõem esta dissertação. Nesse capítulo, também está colocada de forma sintetizada, a discussão a respeito dos critérios usados para a formulação da metodologia aplicada na caracterização dos dois grupos de estruturas geológicas - estruturas vulcânicas e *buildups* carbonáticos, sobre a contribuição destes novos dados para o conhecimento da bacia e sua importância no contexto geológico local e regional.

SUMÁRIO

1.1 BACIAS MARGINAIS DA PLATAFORMA BRASILEIRA	3
1.1.1 A Porção Leste da Plataforma continental do NE do Brasil	5
1.1.2 Arcabouço Estrutural da Bacia de Pernambuco	6
1.1.3 Estratigrafia da Bacia de Pernambuco.....	7
1.2 JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA	19
1.3 OBJETIVOS	26
1.4 METODOLOGIA	26
1.4.1 Compilação do conhecimento prévio.....	26
1.4.2 Dados de sísmica de reflexão.....	27
1.4.3 Conjunto de dados potenciais - Gravimétricos e Magnetométricos	28
CAPÍTULO 2 RESULTADOS	30
2.1 ARTIGO 1	30
2.2 ARTIGO 2	31
CAPÍTULO 3 DISCUSSÃO A RESPEITO DA DISTINÇÃO ENTRE AS ESTRUTURAS VULCÂNICAS E SEDIMENTARES	32
3.1 RESULTADOS DO ESTUDO DAS ESTRUTURAS VULCÂNICAS PÓS-RIFTE DA BACIA DE PERNAMBUCO	32
3.2 IDENTIFICAÇÃO DOS <i>BUILDUPS</i> CARBONÁTICOS DO ESTÁGIO PÓS-RIFTE DA BACIA DE PERNAMBUCO	33
3.3 METODOLOGIA APLICADA PARA A DISTINÇÃO ENTRE EDIFÍCIOS VULCÂNICOS E <i>BUILDUPS</i> CARBONÁTICOS	35
3.4 ROCHAS EVAPORÍTICAS E DEPÓSITOS DE TURBIDITOS NA BACIA DE PERNAMBUCO.....	40
CONCLUSÕES	41
BIBLIOGRAFIA	43

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - RECONSTRUÇÃO DAS PLACAS SUL AMERICANAS E AFRICANA PARA A ISÓCROMA 34 (84 MA.) (ADAPTADO DE MOULIN ET AL., 2010). AS LINHAS PONTILHADAS, PRETA, AZUL E MARROM, REPRESENTAM AS TRÊS FASES DA PROPAGAÇÃO DO RIFTE COMO PROPOSTO POR BUENO (2004). A LINHA PONTILHADA LARANJA REPRESENTA A QUARTA ETAPA, TAL COMO ADOTADA NESTE TRABALHO.	11
FIGURA 2 - MAPA DA PROVÍNCIA BORBOREMA NO NORDESTE BRASILEIRO E AS PRINCIPAIS ESTRUTURAS GEOLÓGICAS DE SUA BORDA LESTE. AS ÁREAS ROSA, VERDE CLARA, LARANJA, AZUL E VERDE ESCURA REPRESENTAM AS ZONAS COSTEIRAS DAS BACIAS DE ALAGOAS, PERNAMBUCO, PARAÍBA, PLATAFORMA DE NATAL E POTIGUAR, RESPECTIVAMENTE. OS DOMÍNIOS <i>OFFSHORE</i> DE CADA BACIA ESTÃO REPRESENTADOS PELAS ZONAS SOMBREADAS. A POSIÇÃO DO LIMITE DA CROSTA CONTINENTAL COM A CROSTA OCEÂNICA (COB) E AS ZONAS DE FRATURAS SÃO BASEADAS EM MAGALHÃES ET AL. (2014). QUANTO À COBERTURA DOS DADOS GEOFÍSICOS: PERÍMETRO DA LINHA CONTÍNUA AMARELA = COBERTURA DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS; PERÍMETRO DA LINHA CONTÍNUA AZUL = COBERTURA DOS DADOS SÍSMICOS (DE BUARQUE ET AL., 2016A).	12
FIGURA 3 - A) MAPA ESTRUTURAL SIMPLIFICADO DOS PRINCIPAIS DOMÍNIOS DA BACIA DE PERNAMBUCO. B) SEÇÃO GEOLÓGICA ESQUEMÁTICA BASEADA NA INTERPRETAÇÃO DE DUAS SEÇÕES SÍSMICAS 2D (A - A' e B - B'), QUE ESTÃO REPRESENTADAS PELAS LINHAS CONTÍNUAS VERMELHAS EM (A). A ESTRELA PRETA MARCA A LOCALIZAÇÃO DO POÇO ESTRATIGRÁFICO 2CP-01-PE (DE BUARQUE ET AL., 2016A).	13
FIGURA 04 - SEÇÃO CRONOLITOESTRATIGRÁFICA DO POÇO 2 CP-01-PE COM O PERFIL LITOLÓGICO E OS PERFIS GEOFÍSICOS DISPONÍVEIS. AS DISCORDÂNCIAS OBSERVADAS ESTÃO CORRELACIONADAS COM A SEÇÃO SÍSMICA OBTIDA NA REGIÃO DO POÇO (FIG. 03). A IDADE DOS DEPÓSITOS E A DESCRIÇÃO LITOLÓGICA FORAM OBTIDAS A PARTIR DO RELATÓRIO ORIGINAL DA PETROBRAS. SETAS PRETAS INDICAM PULSOS DE CICLOS DE GRANOCRESCÊNCIA ASCENDENTE MARCADOS POR CONGLOMERADOS NO TOPO (MODIFICADO DE BARBOSA ET AL., 2014).	14
FIGURA 05 - SEÇÃO SÍSMICA MIGRADA EM TEMPO, COM ORIENTAÇÃO <i>DIP</i> , LOCALIZADA NA PORÇÃO <i>ONSHORE</i> DA BACIA DE PERNAMBUCO (VER LOCALIZAÇÃO NA FIGURA 03). 1 E 2 – DISCORDÂNCIAS OBSERVADAS NA FIGURA 04. 3 –UM CORPO DE NATUREZA DESCONHECIDA INTERPRETADO NA SEÇÃO. 4 –SOLEIRAS (MODIFICADO DE BARBOSA ET AL., 2014).	15
FIGURA 06 - AFLORAMENTOS DE DEPÓSITOS ALBIANOS DA FORMAÇÃO SUAPE. F E G) DISCORDÂNCIA QUE SEPARA O TOPO DA FORMAÇÃO CABO A PARTIR DOS DEPÓSITOS DE PIROCLASTOS DA FORMAÇÃO SUAPE. H E I) DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS (TUFO E QUEDA DE CINZAS?) EXPOSTOS PERTO DE SERINHAEM - PE. J) DEPÓSITOS INTERCALADOS DE ROCHAS PIROCLÁSTICAS E DERRAMES PERTO DO PORTO DE SUAPE. K) DETALHE DE UM TUFO COM ABUNDANTES FRAGMENTOS DE RIOLITO E BASALTO (DE BARBOSA ET AL., 2014).	16
FIGURA 07 - EXPOSIÇÃO DE DERRAME RIOLÍTICO CORTADO POR DIQUES DE TRAQUITO, NA ÁREA DO PORTO DE SUAPE. DO LADO ESQUERDO DA IMAGEM, UM SEGUNDO DERRAME DE TRAQUITO SE FORMOU E DEFORMOU O RIOLITO CRIANDO UM <i>ROLLOVER</i> . A ÁREA LARANJA MARCA A OCORRÊNCIA DE TRAQUITO MISTURADO COM ROCHAS PIROCLÁSTICAS. A E B) DETALHES DOS DIQUES DE TRAQUITO MAIS RECENTES CORTANDO O CORPO DE RIOLITO (DE BARBOSA ET AL., 2014).	17
FIGURA 08 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DE <i>HOTSPOTS</i> NOS DIAS ATUAIS E O DESLOCAMENTO DELES NA ÁFRICA. AS LINHAS PONTILHADAS GROSSAS INDICAM O TRAJETO DOS <i>HOTSPOTS</i> DESDE 100 MA. ATÉ OS LOCAIS EM QUE ELES SE ENCONTRAM ATIVOS NOS DIAS ATUAIS. A LINHA PONTILHADA FINA (FAIXA AMARELA) MOSTRA O TRAJETO DO <i>HOTSPOT</i> DE CAMARÕES DESDE 200 MA. ATRÁS, DE HOGGAR ATÉ O MONTE CAMARÕES. A LINHA FINA CONTÍNUA (FAIXA AZUL) MOSTRA A TRILHA DO <i>HOTSPOT</i> ST. HELENA, DE SERRA LEOA ATÉ A SUA POSIÇÃO ATUAL. 1 E 2 INDICAM A LOCALIZAÇÃO DAS SUPERPLUMAS. OS NÚMEROS ENTRE PARÊNTESES REPRESENTAM AS IDADES EM MA. (MODIFICADO DE NGAKO ET AL., 2006).	18
FIGURA 9 - CARTA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DE PERNAMBUCO, COM A COMPILAÇÃO DAS INFORMAÇÕES OBTIDAS NA REGIÃO <i>ONSHORE</i> DA BACIA (AFLORAMENTOS E POÇOS ESTRATIGRÁFICOS) E DA REGIÃO <i>OFFSHORE</i> , A PARTIR DA INTERPRETAÇÃO DE DADOS SÍSMICOS (MODIFICADO A PARTIR DE MAIA, 2012).	19
FIGURA 10 - MAPA DOS BLOCOS EXPLORATÓRIOS SOB CONCESSÃO NA REGIÃO DA BACIA DE PERNAMBUCO E NA BACIA DA PARAÍBA. 01 - BLOCOS SENDO EXPLORADOS PELA NIKO RESOURCES LTD E A PETRA ENERGIA. 02 - BLOCOS SENDO EXPLORADOS PELA PETROBRAS E A GALP ENERGIA. 03 - BLOCOS EXPLORADOS PELA QUEIROZ GALVÃO ÓLEO E GÁS E PETRA. LINHAS VERDES - SEÇÕES SÍSMICAS DISPONÍVEIS NO BDEP DA ANP. LINHAS BRANCAS - SEÇÕES SÍSMICAS PERTENCENTES À ION (MODIFICADO DE SISMOS, 2014).	23
FIGURA 11 - MAPA DO BRASIL CONTENDO TODAS AS SUAS BACIAS SEDIMENTARES JUNTAMENTE COM A SUA NECESSIDADE DE CONHECIMENTO. A REGIÃO DA BACIA DE PERNAMBUCO, BACIA DA PARAÍBA E PLATAFORMA DE NATAL APRESENTAM ÍNDICE MÁXIMO DE NECESSIDADE DE CONHECIMENTO, SENDO ESSAS AS BACIAS SEDIMENTARES DA MARGEM CONTINENTAL BRASILEIRA DE MAIS ESCASSO CONHECIMENTO (MODIFICADO DE MME-EPE, 2012).	24
FIGURA 12 - FIGURA COMPOSTA ILUSTRANDO AS PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE A REGIÃO <i>OFFSHORE</i> DA BACIA DE PERNAMBUCO, A SUL DA ZONA DE CISALHAMENTO DE PERNAMBUCO, E A BACIA DA PARAÍBA, A NORTE DA ZONA DE CISALHAMENTO. A) MAPA DAS BACIAS MARGINAIS NA BORDA LESTE DO NORDESTE BRASILEIRO E A LOCALIZAÇÃO DAS DUAS SEÇÕES SÍSMICAS APRESENTADAS EM B E C. B) SEÇÃO SÍSMICA INTERPRETADA REFERENTE À BACIA DA PARAÍBA (MODIFICADA DE MAGALHÃES ET AL., 2013). C) SEÇÃO SÍSMICA INTERPRETADA DA BACIA DE PERNAMBUCO (MODIFICADA DE BARBOSA ET AL., 2008b).	26

FIGURA 13 - MAPA MOSTRANDO A LOCALIZAÇÃO DAS 59 SEÇÕES SÍSMICAS SELECIONADAS PARA ESTA PESQUISA NA REGIÃO <i>OFFSHORE</i> DA BACIA DE PERNAMBUCO. O CONTOURO ESTRUTURAL DO EMBASAMENTO, QUE É BASEADO NA INTERPRETAÇÃO DE 143 SEÇÕES SÍSMICAS, REVELA OS PRINCIPAIS ALTOS TOPOGRÁFICOS E DEPOCENTROS DA BACIA.	29
FIGURA 14 - MAPA DO EMBASAMENTO SÍSMICO DA REGIÃO <i>OFFSHORE</i> DA BACIA DE PERNAMBUCO, COM A LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES SÍSMICAS SELECIONADAS PARA ESTA PESQUISA, E A LOCALIZAÇÃO DAS PRINCIPAIS ESTRUTURAS CARBONÁTICAS E VULCÂNICAS INTERPRETADAS NESTE TRABALHO.	34
FIGURA 15 - SESSÃO GEOLÓGICA DA REGIÃO <i>OFFSHORE</i> DA BACIA DE PERNAMBUCO, BASEADA NA INTERPRETAÇÃO DE DADOS SÍSMICOS 2D, MOSTRANDO AS PRINCIPAIS SEQUÊNCIAS SÍSMICAS, POSIÇÕES ESTRATIGRÁFICAS E MORFOLOGIA DOS PRINCIPAIS TIPOS DE <i>BUILDUPS</i> CARBONÁTICOS. AS SEQUÊNCIAS ESTRATIGRÁFICAS SÃO BASEADAS NO ARTIGO DO TÓPICO 2.2 DESTE TRABALHO. ..	35
FIGURA 16 - SESSÃO SÍSMICA MOSTRANDO UM <i>BUILDUP</i> CARBONÁTICO (CBU), UMA CAMADA DE EVAPORITOS E ROCHAS VULCANOCLÁSTICAS NA BACIA DE PERNAMBUCO. A MODELAGEM DE PERFIS MAGNÉTICOS E GRAVIMÉTRICOS SERVIU DE APOIO À INTERPRETAÇÃO DOS DADOS SÍSMICOS. NOTAR A AUSÊNCIA DE ANOMALIA MAGNÉTICA POSITIVA RELACIONADA À ESTRUTURA CARBONÁTICA, COMO É O CASO OBSERVADO PARA O CORPO INTERPRETADO COMO DEPÓSITOS VULCANOCLÁSTICOS. O TOPO DO CBU ENCONTRA-SE MODELADO NA FIGURA 18 E PARA LOCALIZAÇÃO E DETALHAMENTO DAS SEQUÊNCIAS, VIDE ARTIGO DO TÓPICO 2.2 DESTE TRABALHO.	38
FIGURA 17 - A) A MODELAGEM DE PERFIS MAGNÉTICOS E GRAVIMÉTRICOS SERVIU DE APOIO À INTERPRETAÇÃO DOS DADOS SÍSMICOS. B) SESSÃO SÍSMICA MOSTRANDO UMA SÉRIE DE ESTRUTURAS MAGMÁTICAS E DEPÓSITOS ADJACENTES INTERPRETADOS COMO SEQUÊNCIAS VULCANOCLÁSTICAS (VC). FORAM INTERPRETADAS SOLEIRAS (<i>SILLS</i>) E EDIFÍCIOS VULCÂNICOS (OS NÚMEROS 01, 02, 03 INDICAM A ORDEM DE FORMAÇÃO DAS ESTRUTURAS). NOTAR ANOMALIA MAGNÉTICA POSITIVA ASSOCIADA À SEQUÊNCIA VULCANOCLÁSTICAS, ÀS SOLEIRAS E EDIFÍCIOS VULCÂNICOS. PARA LOCALIZAÇÃO DA SEÇÃO SÍSMICA E DETALHAMENTO DAS SEQUÊNCIAS, VIDE ARTIGO DO TÓPICO 2.1 DESTE TRABALHO.....	39
FIGURA 18 - MODELAGEM DO TOPO DE UM <i>BUILDUP</i> CARBONÁTICO ENCONTRADO NA BACIA DE PERNAMBUCO. PARA LOCALIZAÇÃO DA ESTRUTURA, VIDE ARTIGO DO TÓPICO 2.2 DESTE TRABALHO.	39

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Bacias Marginais da Plataforma Brasileira

A plataforma brasileira foi formada durante a abertura do Rifte do Atlântico Sul, no Cretáceo Inferior (Almeida et al., 2000; Jackson et al., 2000; Bueno, 2004; Dickson et al., 2003; Davison, 2007; Aslanian et al., 2009; Moulin et al., 2010; Lentini et al., 2010). O processo de rifteamento começou com um magmatismo volumoso que afetou a porção sul da Placa Sul-Americana e que formou a Província Magmática Paraná-Etendeka (Fig. 01), tendo seu principal pulso magmático datando entre 138 e 127 Ma. O processo de rifteamento avançou da região sul para a região norte devido à um processo diacrônico, em que sua primeira ruptura é estimada em torno de 132 Ma., com a produção das primeiras gerações de *seaward dipping reflectors* (SDRs) na Bacia de Pelotas e na Bacia do São Jorge (Fig. 01). O segundo estágio de rifteamento avançou em direção ao norte, alcançando a Bacia de Santos, cujo *break-up* tem idade de aproximadamente 126 Ma. Já o terceiro estágio de rifteamento, avançou além do Platô de São Paulo, alcançando a região da Bacia do Jacuípe e da Bacia de Sergipe, durante o Aptiano Superior, em torno de 112 Ma. (Bueno, 2004). Provavelmente, o último estágio de abertura do Rifte do Atlântico Sul avançou da Bacia de Sergipe, alcançando a Bacia de Alagoas e de Pernambuco, durante o Albiano (Matos, 1999; Córdoba, 2007; Barbosa, 2014) (Figs. 01 e 02). A última região a ser separada da Placa Africana é representada então pela Bacia Paraíba e Plataforma de Natal, onde o ramo distensional do Atlântico Sul conectou-se com o braço transformante do Atlântico Equatorial (Matos, 1999; Barbosa & Lima Filho, 2006; Lima Filho & Barbosa, 2010).

O segmento extensional, pertencente à margem leste brasileira, inclui as bacias marginais brasileiras que estão localizadas no lado leste do Nordeste brasileiro até a porção meridional da Bacia de Pelotas, no Sul brasileiro (Fig. 01). Este setor foi dominado por uma tectônica extensional e caracteriza-se por falhas normais preferencialmente paralelas à costa, localmente afetadas por zonas de transferência e que apresentam altos ângulos em relação às primeiras. O segmento transformante é representado pela região equatorial, onde o processo de separação foi dominado por cisalhamento e também menor extensão (Antobreh et al., 2009). Este segmento inicia-se na Bacia Potiguar, na porção norte do Nordeste do Brasil e estende-se até a Bacia da Foz do Amazonas.

O conhecimento reunido sobre a evolução do Atlântico Sul permite propor que a evolução tectono-sedimentar das bacias marginais brasileiras do setor extensional

compreendem quatro etapas principais de preenchimento (Milani et al., 2007), ou mega-sequências deposicionais:

- 1) Estágio Pré-rifte – Inclui os depósitos que preencheram as depressões formadas durante as primeiras ativações litosféricas no início do Rifte (Neo - Jurássico para Eo-Cretáceo). Esta etapa é representada por *red beds*, depósitos fluviais, eólicos e rochas de ambiente lacustre raso.
- 2) Estágio Rifte – Inclui depósitos de natureza diversas, formados enquanto o processo de abertura diacrônica da plataforma brasileira ocorria. Ele é marcado por ruptura litosférica e depocentros importantes que datam do Eo-Cretáceo. Os lagos profundos desta fase formaram folhelhos negros que se tornaram as rochas geradoras mais importantes nas bacias brasileiras. Conglomerados, arenitos, coquinas e rochas ígneas básicas também ocorrem.
- 3) Estágio Marinho Restrito – Esta fase é caracterizada pela presença de depósitos evaporíticos, principalmente halita e anidrita, muito expressivos em termos de ocorrência e espessura nas bacias de Santos, Campos e Espírito Santo. A bacia evaporítica se estende até as bacias do Sergipe e Alagoas e é menos expressiva nas regiões onde a margem torna-se estreita. Descobertas recentes mostraram que, de fato, a bacia de sal atingiu a região da Bacia de Pernambuco (Antunes et al., 2006; Córdoba et al., 2007; Barbosa et al., 2008; Buarque et al., 2016a), mas devido à falta de poços na região *offshore* da bacia, a idade e a natureza dos depósitos ainda são desconhecidas. Abaixo dos depósitos evaporíticos, existem rochas carbonáticas e siliciclásticas depositadas sobre a discordância de *break-up* e que, juntamente com os evaporitos, formaram os primeiros depósitos da seção pós-rifte. Na Bacia de Santos, essas rochas carbonáticas representam os reservatórios do Pré-Sal e carregam grandes volumes de petróleo.
- 4) Fase Marinha Profunda – Após a deposição evaporítica, houve a evolução para condições marinhas profundas. Durante o Albiano, da Bacia de Santos até a Bacia de Sergipe, há um registro expressivo de formações carbonáticas. Carbonatos são dominantes até o Turoniano, na maioria das bacias, e em alguns casos formam rochas geradoras e reservatórios. Do Neo-Cretáceo até o recente, uma grande sequência siliciclástica foi depositada devido à vários ciclos de eventos regressivo-transgressivo. Estes depósitos siliciclásticos são de natureza variada, principalmente folhelhos e arenitos marinhos, de plataformas rasas, deltas costeiros e turbiditos.

Quanto à proposição dos estágios de propagação do rifteamento na Figura 01, é importante destacar que o quarto estágio é o menos estudado e ainda não é claro como se deu a transição do setor extensional para o transformante.

1.1.1 A Porção Leste da Plataforma continental do NE do Brasil

A Bacia de Pernambuco e outras bacias da margem continental do tipo Atlântico se desenvolveram na porção leste da Província Borborema (BPB), no Nordeste do Brasil (Figs. 01 e 02). A BPB representa a porção nordeste da Plataforma Sul Americana (Almeida, 1981; Van Schmus et al., 2008; Santos et al., 2010; Araujo et al., 2013). Ela é limitada a sul pelo Cráton São Francisco, a oeste pelos domínios da bacia intracratônica da Parnaíba e a norte pelas bacias marginais do Potiguar e Ceará (Matos, 1999; Castro et al., 2012). A borda leste da BPB compreende três bacias marginais: Pernambuco, Paraíba e a Plataforma de Natal (Fig. 02) (Matos, 1999; Brito Neves et al., 2002; Barbosa & Lima Filho, 2006; Barbosa et al., 2007; Magalhães et al., 2014). Essas três bacias foram formadas no último estágio de separação entre a América do Sul e a África, durante o *break-up* no Cretáceo médio (Rand & Mabesoone, 1982; Barbosa & Lima Filho, 2006), tendo sido dominado pelo regime extensional (Matos, 1999).

A formação da BPB está associada a uma colagem complexa de massas continentais (Almeida et al., 1981; Neves et al., 2003; Santos et al., 2010), e a sua evolução envolveu uma série de eventos orogênicos Pré-Cambrianos (Van Schmus et al., 2008; Santos et al., 2010; Neves et al., 2012; Araujo et al., 2013), estágios de rifteamento e *break-up* continental durante o Cretáceo (Chang et al., 1992; Matos, 1999). A BPB é composta de grandes fragmentos de rochas gnáissicas/migmatíticas do Arqueano/Paleoproterozóico (Sá et al., 2002; Neves et al., 2003, 2012, 2015; Dantas et al., 2013) e secundariamente de rochas Mesoproterozóicas/Neproterozóicas do Cinturão do Cariris Velhos, que formaram o embasamento para as rochas supracrustais (Neves et al., 2009). A BPB também é afetada por intrusões do Proterozóico até o Cambriano, que estão relacionada com ciclos orogênicos (Santos & Medeiros, 1999; Leite et al., 2000; Archanjo et al., 2008; Van Schmus et al., 2008; Santos et al., 2010; Neves et al., 2012). Eventos vulcânicos intraplaca também são registrados durante os últimos 200 Ma. (Sial, 1976; Sial et al., 1981; Knesel, et al., 2010). Um processo tardio de soerguimento da região central da BPB causou o desnudamento das bacias interiores e das regiões continentais adjacentes (Morais Neto et al., 2008; Gurgel et al., 2013; Jelinek et al., 2014).

A província está dividida em três grandes domínios, que são delimitados por zonas de cisalhamento de escala continental: O Complexo Pernambuco-Alagoas, ou o Domínio do Sul; a Zona Transversal, ou o Domínio Central; e o Domínio do Norte (Vauchez et al., 1995; Neves & Mariano, 1999; Brito Neves et al., 2002; Ferreira et al., 2008; Medeiros et al., 2011;

Araujo et al., 2013; Neves et al., 2015) (Fig. 02). As Zonas de Cisalhamento mais importantes da BPB são a Zona de Cisalhamento de Pernambuco (ZCPE) e a Zona de Cisalhamento de Patos (ZCPA), ambas com orientação principal E-W (Fig. 01 e 02). As zonas de cisalhamento principais e suas ramificações de sistemas de cisalhamento, foram reativadas durante o rifteamento continental para assim formar as bacias marginais e elas ainda mostram evidências de reativação durante o período pós-rifte. Estas reativações estão provavelmente relacionadas com o campo de estresse distante, criado pelo sistema de montanha dos Andes e que provavelmente influenciou a reativação da BPB (Bezerra et al., 2007; Ferreira et al., 2008; Bezerra et al., 2011, 2014; Rossetti et al., 2011; Gandini et al., 2014; Nogueira et al., 2015; Almeida et al., 2015; Marotta et al., 2015; Peulvast & Bétard, 2015).

1.1.2 Arcabouço Estrutural da Bacia de Pernambuco

A Bacia de Pernambuco, pertencente ao Domínio Sul da BPB (Figs. 01 e 02), é separada da Bacia de Alagoas; ao sul, pelo Alto de Maragogi e da Bacia da Paraíba, ao norte, pela ZCPE (Fig. 02). Essa bacia apresenta uma estreita zona costeira implantada sobre um rifte estreito, que forma uma bacia interior na plataforma continental (Barbosa & Lima Filho, 2006; Maia, 2012; Barbosa et al., 2014; Buarque et al., 2016a). De sua área total de 20.800 km², apenas 2,8% está localizado na região *onshore*. A quebra da plataforma é marcada por um alto externo em paralelo com a linha de costa, nomeado de Alto do Maracatu (Fig. 03). A região *offshore* distal foi desenvolvida sobre uma região de crosta continental hiperextendida, que formou o Platô de Pernambuco (Fainstein & Milliman, 1979; Gomes et al., 2000; Oliveira, 2013; Magalhães et al., 2014).

O Platô de Pernambuco apresenta importantes depocentros desenvolvidos sobre os grabens principais e altos do embasamento desenvolvidos na região central, nas bordas leste e nordeste (Oliveira, 2013). Os principais conjuntos de estruturas que controlaram a evolução da Bacia de Pernambuco são as zonas de cisalhamentos Pré-Cambriana, com orientação principal E-W e NE-SW e falhas de transferência oblíqua, com orientação NW-SE (Figs. 01, 02 e 03). As zonas de cisalhamento E-W e NE-SW foram reativadas, devido ao processo de rifteamento no Cretáceo, como falhas de cisalhamento e falhas normais durante o estiramento e afinamento da crosta continental. Devido a isto, estruturas de transferência de direção NW-SE foram criadas para acomodar os esforços oblíquos do processo de rifteamento (Polônia, 1997; Lima Filho, 1998; Almeida et al., 2005; Oliveira, 2013). Secundariamente, falhas

normais de direção N-S, WNW-ESE e NNW-SSE, foram também formadas durante a abertura da bacia.

A bacia pode ser dividida em três principais domínios estruturais (Maia, 2012; Oliveira, 2013; Barbosa et al., 2014; Buarque et al., 2016a):

- (1) Bacia Interna, que representa um rifte estreito em paralelo com a linha de costa (Fig. 03) e é composta por dois diferentes depocentros separados pelo Alto do Cabo de Santo Agostinho. Na zona costeira, esse alto estrutural está associado com a ocorrência de rochas vulcânicas intrudidas na cobertura sedimentar e uma bem estudada ocorrência de um álcali-feldspato granito, nomeado Granito do Cabo;
- (2) Alto do Maracatu, que representa um alto externo, de direção N-S, também em paralelo com a linha de costa (Fig. 03). Esse alto externo, formado pela plataforma continental, separa a bacia interior dos domínios do platô.
- (3) Platô de Pernambuco, formado pela crosta continental estirada e que se estende até a isóbata de aproximadamente três mil metros. A zona de transição de crosta continental hiperfinada para o domínio de crosta oceânica ainda não é tão claro (Figs. 02 e 03) (Oliveira, 2013; Magalhães et al., 2014). O platô é formado por pelo menos quatro baixos do embasamento principais e um importante alto externo, no seu centro, de direção E-W, nomeado de Alto de Gaibu. Estudos geofísicos anteriores sugerem que possivelmente há uma enorme influência de magmatismo intrusivo e extrusivo relacionado com esta estrutura (Oliveira, 2013; Magalhães et al., 2014; Buarque et al., 2016a).

1.1.3 Estratigrafia da Bacia de Pernambuco

O conhecimento geológico da Bacia de Pernambuco ainda apresenta muitas lacunas. Apenas dois poços estratigráficos foram perfurados na zona costeira da bacia, o 9JG (1100 m) na região norte da bacia e o poço 2 CP (2.953 m), em sua porção sul (Fig. 04). Nenhum destes poços atingiu o embasamento (Lima Filho, 1998). A zona costeira é estreita e fortemente afetada por eventos tectônicos relacionados com a abertura da bacia e também com eventos de reativações pós-rifte. A sucessão sedimentar na zona costeira da bacia é representada, principalmente, por depósitos siliciclásticos de idade Aptiana-Albiana, carbonatos de idade Cenomaniano-Turoniano e depósitos do Neógeno (Rand e Mabesoone, 1982; Lima Filho, 1998; Maia, 2012; Maia et al., 2012; Barbosa et al., 2014). A bacia foi afetada por um evento

magmático sin-rifte durante o Albiano Superior, o que gerou uma série de rochas vulcânicas incluídas na Suíte Magmática Ipojuca: trachyandesito, andesito, basaltos, riolitos, traquitos e uma ocorrência de um granito alcalino (Sial et al., 1988; Lima Filho, 1998; Nascimento, 2003). Devido à falta de poços na região *offshore*, a interpretação do preenchimento sedimentar neste domínio baseia-se na interpretação de dados sísmicos, o que forneceu evidências de uma importante coluna sedimentar ao longo dos principais depocentros de todo o Platô de Pernambuco, atingindo até 6 km de espessura (Oliveira, 2013). A interpretação sísmica também sugere a presença de uma camada de sal que abrange a região central do platô e abundância de estruturas vulcânicas (Barbosa et al, 2014; Buarque et al., 2016a).

Uma questão importante permanece no fato de que, para as bacias da margem sudeste, o Albiano marcou o início da deposição de carbonatos em ambiente marinho de plataforma rasa (megassequência de plataforma rasa). No entanto, como observado em afloramentos na faixa costeira da bacia e no registro do poço 2 CP, a sedimentação na zona proximal da Bacia de Pernambuco durante o Aptiano e o Albiano permaneceu dominada por siliciclásticos (Lima Filho, 1998). Isto se deve, provavelmente, ao fato de que a atual zona costeira encontra-se sobre a bacia interna, formada por um rifte estreito e separada da bacia do platô pelo Alto do Maracatu (Fig. 03). Estudos anteriores reuniram todos os depósitos siliciclásticos em uma única formação denominada Formação Cabo (Alheiros & Ferreira, 1989), embora alguns estudos tenham apontado para diferenças entre as sucessões de idade Aptiana e Albiana (Lima Filho, 1998; Lima Filho & Szatmari, 2002; Lima Filho & Santos, 2012).

A bacia também possui o registro de um evento magmático expressivo (Sial et al., 1988) (Figs. 04, 05, 06, 07), cuja idade foi determinada através do método $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ entre 104 a 100 Ma., com uma idade para o pulso principal formador de rochas ígneas na bacia em torno de 102 Ma. (Nascimento, 2003). Este magmatismo incluiu grandes intrusões e abundante registro de derrames (Lima Filho, 1998; Nascimento, 2003). O magmatismo originou uma variedade de rochas vulcânicas: ignimbritos, traquitos, riolitos, basaltos, traquiandesitos; e uma ocorrência de granito feldspato alcalino (Sial et al., 1988; Lima Filho, 1998; Nascimento, 2003). Lima Filho (1998) propôs a denominação formal dessas rochas como a Suíte Magmática Ipojuca, que apresenta relações de corte e sindeposição com as rochas sedimentares de idade Albiana.

Até 2009, a coluna estratigráfica da bacia tinha apenas três unidades estratigráficas: Formação Cabo (Aptiano-Albiano), que foi atribuída aos depósitos proximais formados por sistemas aluviais; Formação Estiva (Cenomaniano-Santoniano), que incluía calcários arenosos, siltitos calcíferos, margas e carbonatos recifais; Formação Algodoads, cuja

composição apresentaria depósitos fluviais, areno-argilosos, de idade incerta (Lima Filho, 1998; Lima Filho & Santos, 2001; Córdoba et al., 2007). Com o aumento do conhecimento sobre a região, alguns trabalhos propuseram a divisão da coluna estratigráfica da bacia em um número maior de unidades. Esta inclusão de novas unidades se baseou na consideração de aspectos estratigráficos importantes como a ocorrência de discordâncias, observadas em afloramentos e em dados sísmicos na região *onshore*, sedimentológicos (diferenciação de associações de fácies e de sistemas deposicionais) e na relação das unidades com os eventos tectônicos envolvidos na evolução da bacia (Barbosa et al., 2009; Maia, 2012).

Mais recentemente, Barbosa et al. (2014) propuseram a revisão da estratigrafia da Bacia de Pernambuco com base em nova análise dos dados disponíveis (seções sísmicas da região *onshore*, registro do poço 2 CP e mapeamento geológico ao longo da zona costeira) (Fig. 04). Estes autores propuseram que a sequência siliciclástica, Aptiana-Albiana, poderia ser dividida em três formações: Formação Cabo, relacionada com a uma primeira fase rifte da bacia (Aptiano); Formação Suape, relacionada com a segunda fase do rifte (Albiano Inferior a Médio); e a formação Paraíso, que representaria os depósitos da fase Pós-Rifte (Albiano Superior). Acima da Formação Paraíso, ocorre a sucessão de carbonato da Formação Estiva (Cenomaniano-Turoniano-Santoniano), relacionada com a invasão marinha na zona costeira. É possível que, como ressaltado por Barbosa et al. (2014), as Formações Suape e Paraíso possam ser subaflorantes na faixa costeira, devido à configuração estreita da faixa dentro do graben que formou a bacia interna. Apesar disso, a ocorrência de depósitos separados por discordâncias, abaixo da profundidade onde ocorrem os depósitos carbonáticos da Formação Estiva, na faixa costeira, pode ser observada em seções sísmicas e através do registro de perfis do poço 2 CP (Figs. 04, 05, 06, 07) (Barbosa et al., 2014).

Ainda não foi constatada até o presente momento, a ocorrência de rochas evaporíticas na faixa costeira da Bacia de Pernambuco, nem em afloramentos, nem nos dois poços estratigráficos que cruzaram o registro Aptiano-Albiano. Maia (2012) observou a ocorrência de traços de minerais evaporíticos em rochas de ambiente de sabkha encontradas no testemunho do poço 2 CP, de idade Aptiano-Superior. A maioria dos trabalhos anteriores sobre a existência de evaporitos nas bacias marginais brasileiras afirma que o registro de rochas evaporíticas se estende da Bacia de Santos, na margem Sudeste, à Bacia de Sergipe e Alagoas, no Nordeste do Brasil. A proposição da existência de evaporitos na porção *offshore* da Bacia de Pernambuco foi feita com base na interpretação de dados sísmicos pela primeira vez por Antunes et al. (2006) e por Barbosa et al. (2008). Baseado na reavaliação dos dados sísmicos disponíveis, um pequeno número de trabalhos tratou a existência da bacia de sal na

região do Platô de Pernambuco (Córdoba et al., 2007). No entanto, a idade da bacia de sal e a natureza das rochas que formam este intervalo são ainda desconhecidas devido à falta de poços na região do platô.

As rochas vulcânicas geradas através do evento magmático representam um capítulo especial no arcabouço geológico da Bacia de Pernambuco. A origem do vulcanismo, apesar de certo debate, é creditada por muitos autores à manifestação de uma anomalia termal relacionada ao manto – o *Hotspot* de Santa Helena (Fig. 08) (Rand & Mabesoone, 1982; Long et al., 1986; Sial et al., 1988; Jackson et al., 2000; Golonka, 2000; Ngako et al., 2006, Buarque et al., 2016a). Golonka et al. (2000) sugeriram que o *Hotspot* Santa Helena, afetou a região norte da placa sul-americana antes que ele se tornasse uma influência crítica no *break-up* da África e da América do Sul, na região da Bacia de Pernambuco. Ngako et al. (2006) mostraram que a Placa Africana foi submetida à várias anomalias mantélicas nos últimos 200 Ma. e que um dos *hotspots* cruzou a região da Bacia de Pernambuco há aproximadamente 100 Ma., no ponto exato onde o *break-up* entre a África e a América do Sul ocorreu (Fig. 08). Os fatos marcantes que resultaram dessa interação entre as anomalias térmicas que estão envolvidas com a ruptura da crosta continental, a Pluma de Tristão na região sul e o *Hotspot* de Santa Helena na região Norte, durante a abertura do Atlântico Sul são: 1 - o diacronismo na abertura do ramo sul; 2 - a formação do golfo restrito entre as duas zonas afetadas pelos *hotspots*. A formação da cordilheira de Walvis, no sul, e da possível restrição formada na região do Platô de Pernambuco, levou possivelmente à formação da gigante bacia de sal do Atlântico Sul (Aptiano) (Jackson et al., 2000; Davison, 2007).

A ocorrência de grandes derrames de lava, corpos intrusivos e depósitos piroclásticos na região *onshore* da Bacia de Pernambuco, aponta para a importância destas litologias em seu registro sedimentar (Barbosa et al., 2014) (Figs. 02, 04, 06, 07). A necessidade de incorporar este evento ao sistema petrolífero da bacia é fundamental, mas nenhuma investigação sistemática foi desenvolvida até o presente. O magmatismo sinrifte poderia apresentar um efeito diacrônico nos domínios da bacia, devido ao movimento da placa em relação ao local do *hotspot*. Análises anteriores sugeriram que o magmatismo na região de *offshore* se estendeu até o Paleógeno (Córdoba et al., 2007; Barbosa et al., 2008).

Seguindo as considerações mais recentes feitas em relação ao arcabouço estratigráfico da bacia, a carta estratigráfica proposta por Maia (2012) e modificada por Barbosa et al. (2014), sintetiza as revisões propostas para a estratigrafia da Bacia de Pernambuco na última década (Fig. 09).

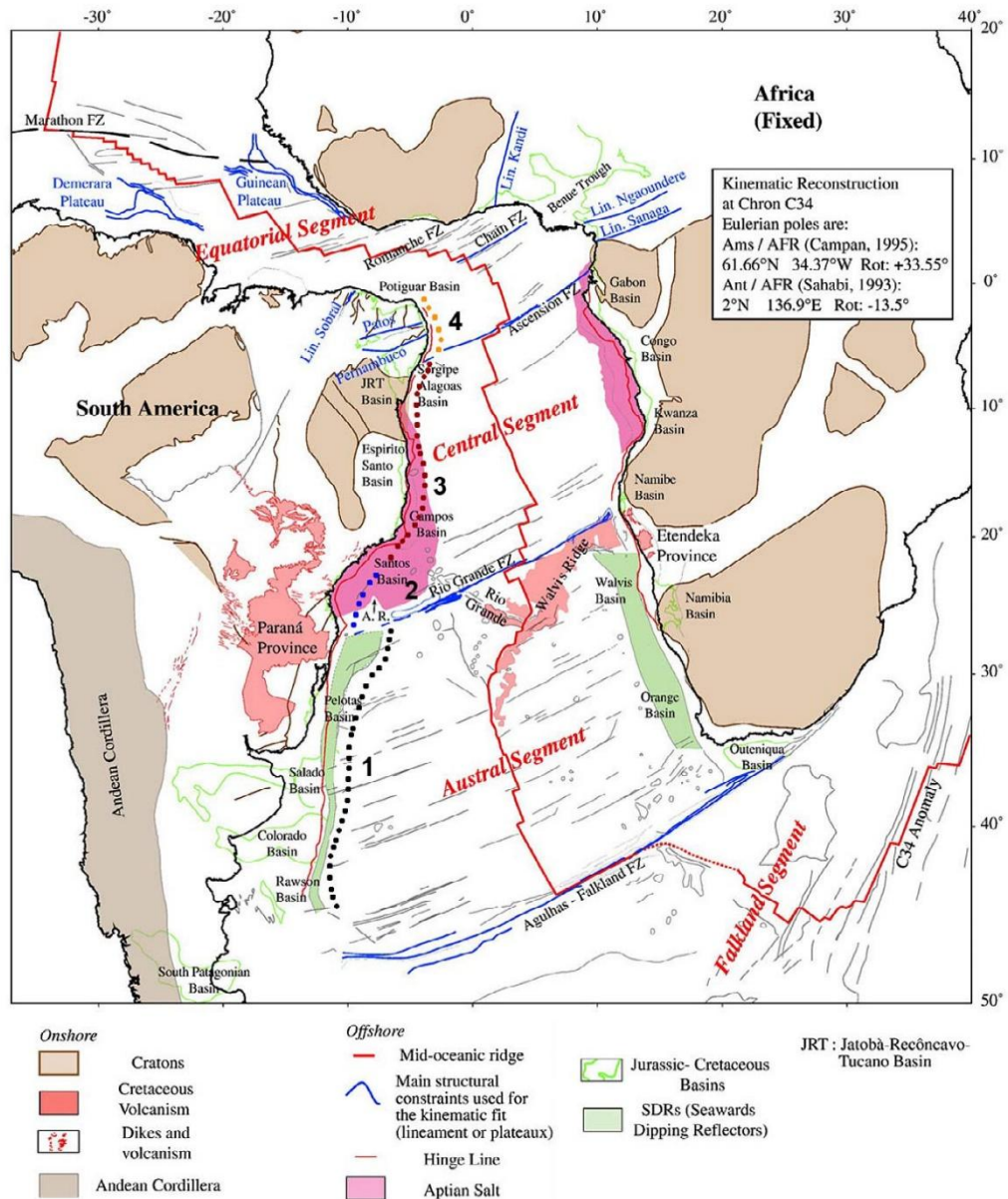


Figura 1 - Reconstrução das Placas Sul Americanas e Africana para a isócrona 34 (84 Ma.) (Adaptado de Moulin et al., 2010). As linhas pontilhadas, preta, azul e marrom, representam as três fases da propagação do rifte como proposto por Bueno (2004). A linha pontilhada laranja representa a quarta etapa, tal como adotada neste trabalho.

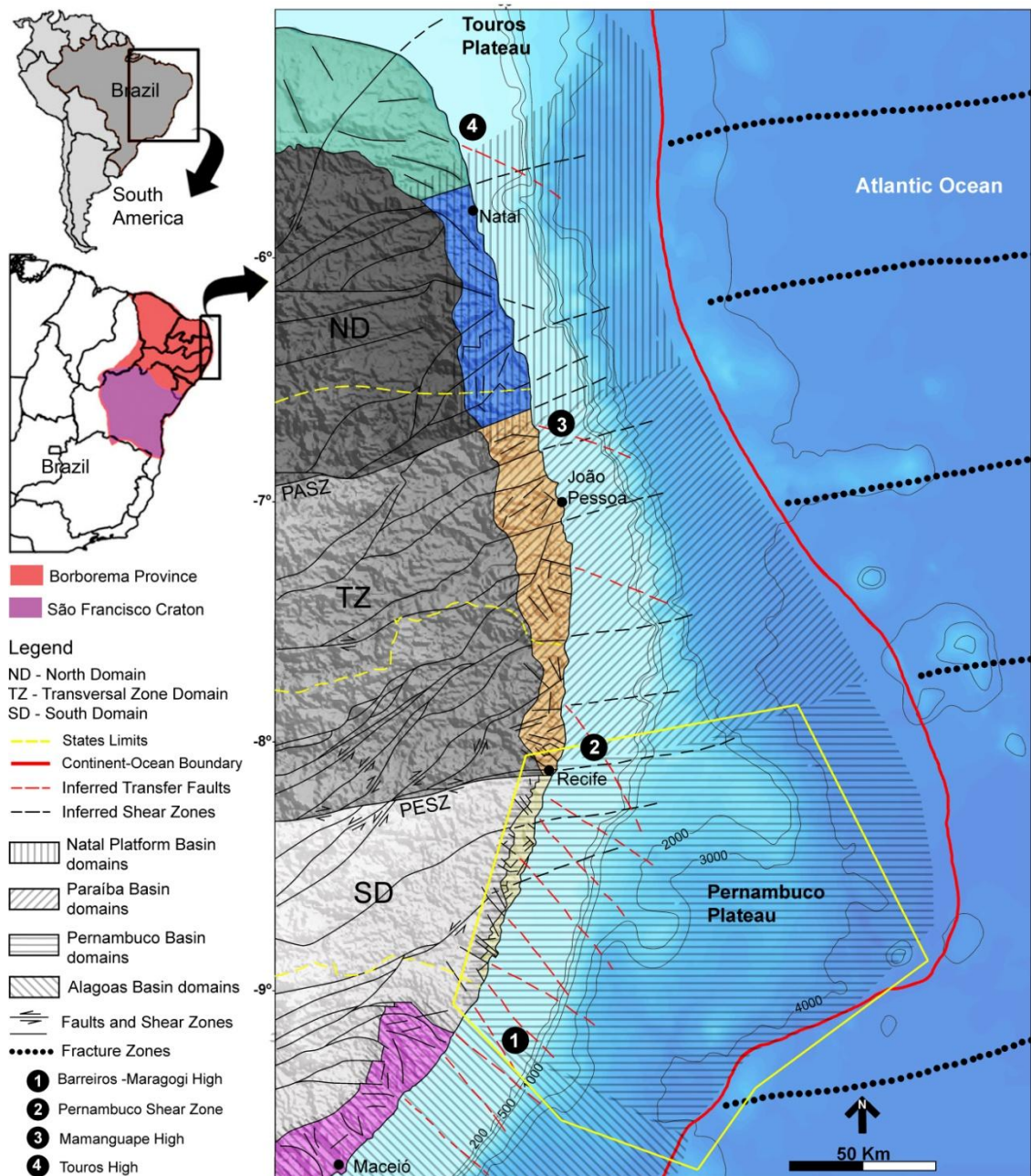


Figura 2 - Mapa da Província Borborema no nordeste brasileiro e as principais estruturas geológicas de sua borda leste. As áreas rosa, verde clara, laranja, azul e verde escura representam as zonas costeiras das bacias de Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Plataforma de Natal e Potiguar, respectivamente. Os domínios *offshores* de cada bacia estão representados pelas zonas sombreadas. A posição do limite da crosta continental com a crosta oceânica (COB) e as zonas de fraturas são baseadas em Magalhães et al. (2014). Quanto à cobertura dos dados geofísicos: perímetro da linha contínua amarela = cobertura dos dados aeromagnéticos; perímetro da linha contínua azul = cobertura dos dados sísmicos (de Buarque et al., 2016a).

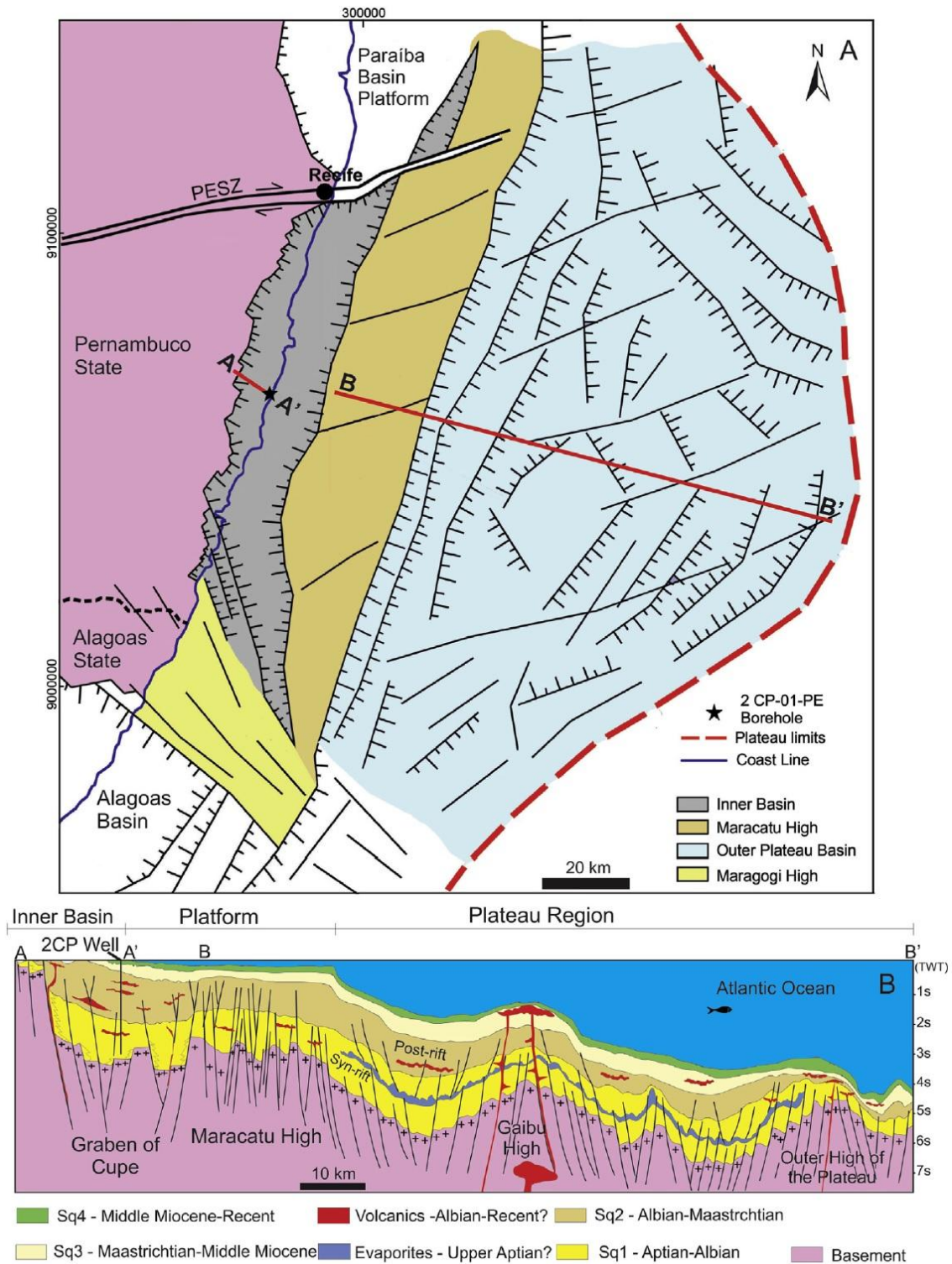


Figura 3 - A) mapa estrutural simplificado dos principais domínios da Bacia de Pernambuco. B) seção geológica esquemática baseada na interpretação de duas seções sísmicas 2D (A - A' e B - B'), que estão representadas pelas linhas contínuas vermelhas em (A). A estrela preta marca a localização do poço estratigráfico 2CP-01-PE (de Buarque et al., 2016a).

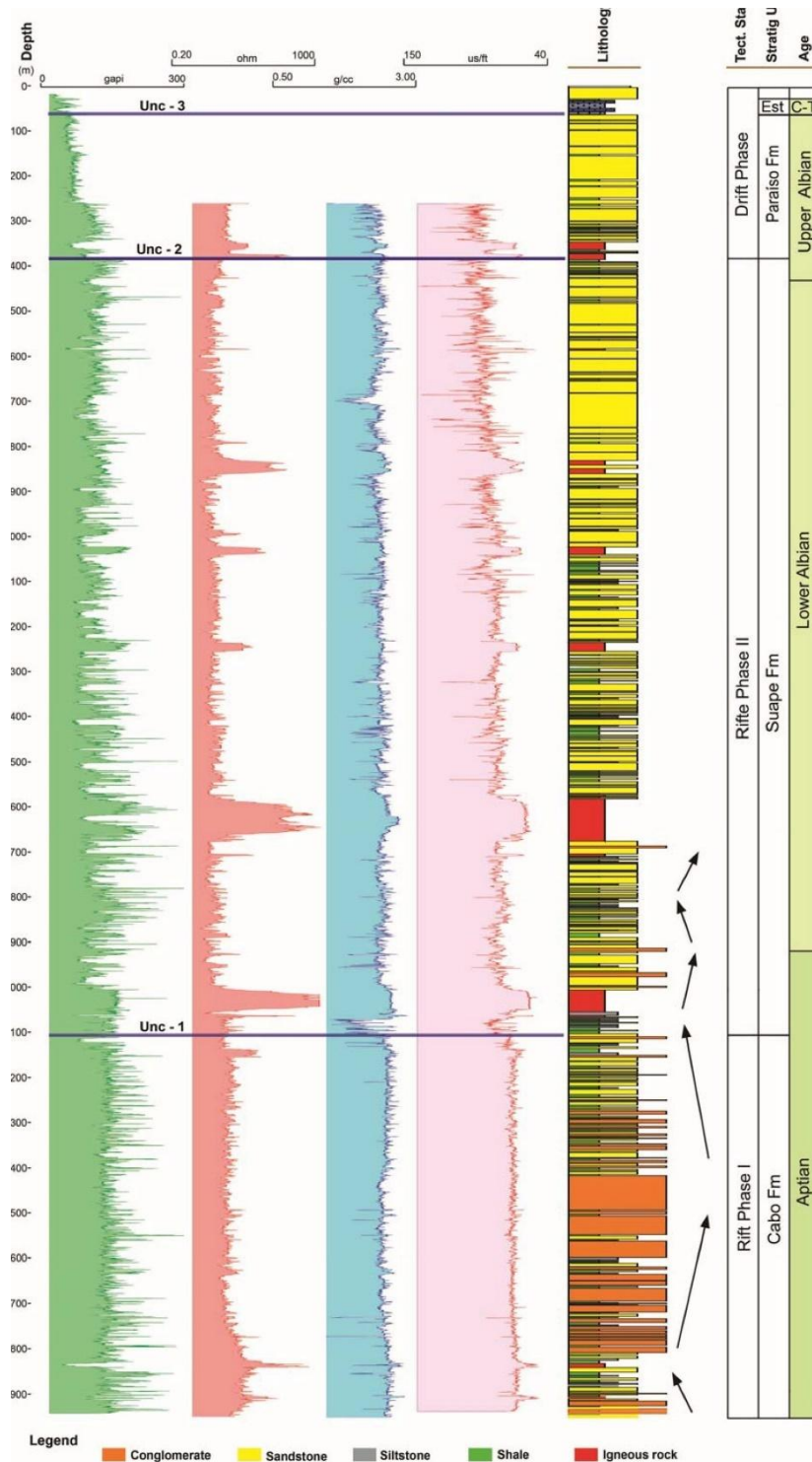


Figura 04 - Seção cronolitoestratigráfica do poço 2 CP-01-PE com o perfil litológico e os perfis geofísicos disponíveis. As discordâncias observadas estão correlacionadas com a seção sísmica obtida na região do poço (Fig. 03). A idade dos depósitos e a descrição litológica foram obtidas a partir do relatório original da Petrobras. Setas pretas indicam pulsos de ciclos de granocrescência ascendente marcados por conglomerados no topo (modificado de Barbosa et al., 2014).

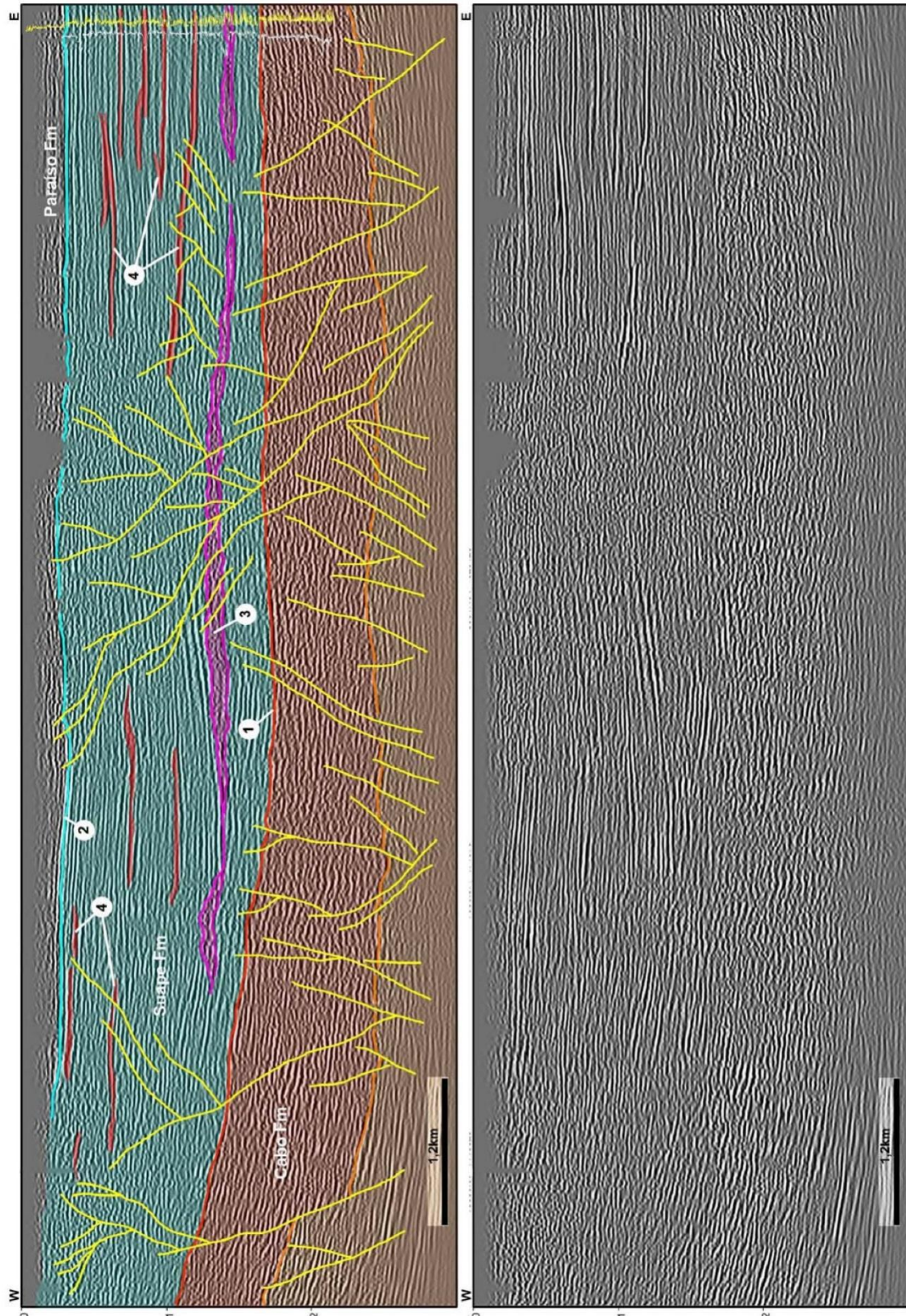


Figura 05 - Seção sísmica migrada em tempo, com orientação *dip*, localizada na porção *onshore* da Bacia de Pernambuco (ver localização na Figura 03). 1 e 2 – discordâncias observadas na Figura 04. 3 – um corpo de natureza desconhecida interpretado na seção. 4 – soleiras (modificado de Barbosa et al., 2014).

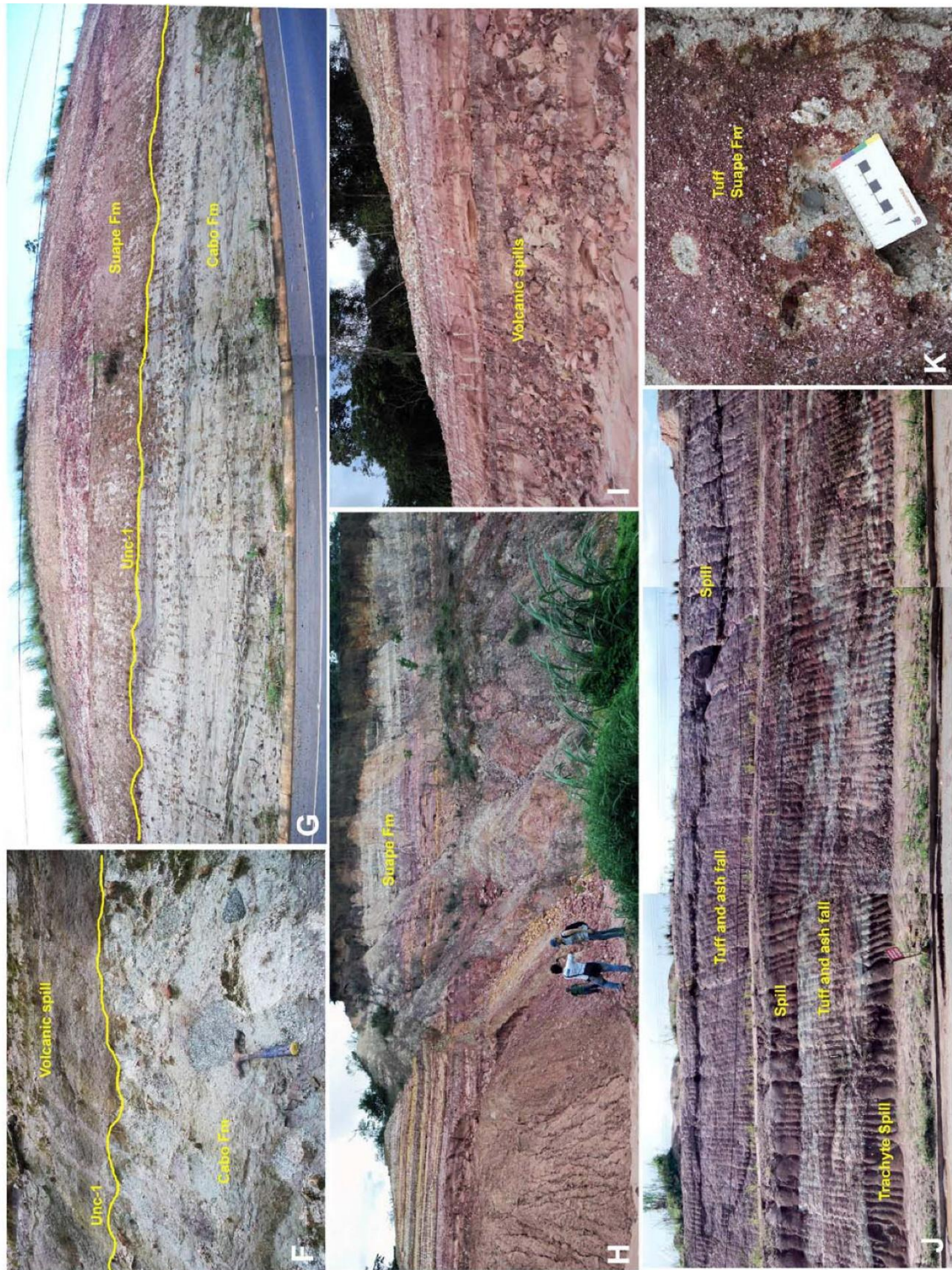


Figura 06 - Afloramentos de depósitos Albianos da Formação Suape. F e G) discordância que separa o topo da Formação Cabo a partir dos depósitos de piroclastos da Formação Suape. H e I) depósitos piroclásticos (tufo e queda de cinzas?) expostos perto de Serinhaem - PE. J) depósitos intercalados de rochas piroclásticas e derrames perto do Porto de Suape. K) detalhe de um tufo com abundantes fragmentos de riolito e basalto (de Barbosa et al., 2014).

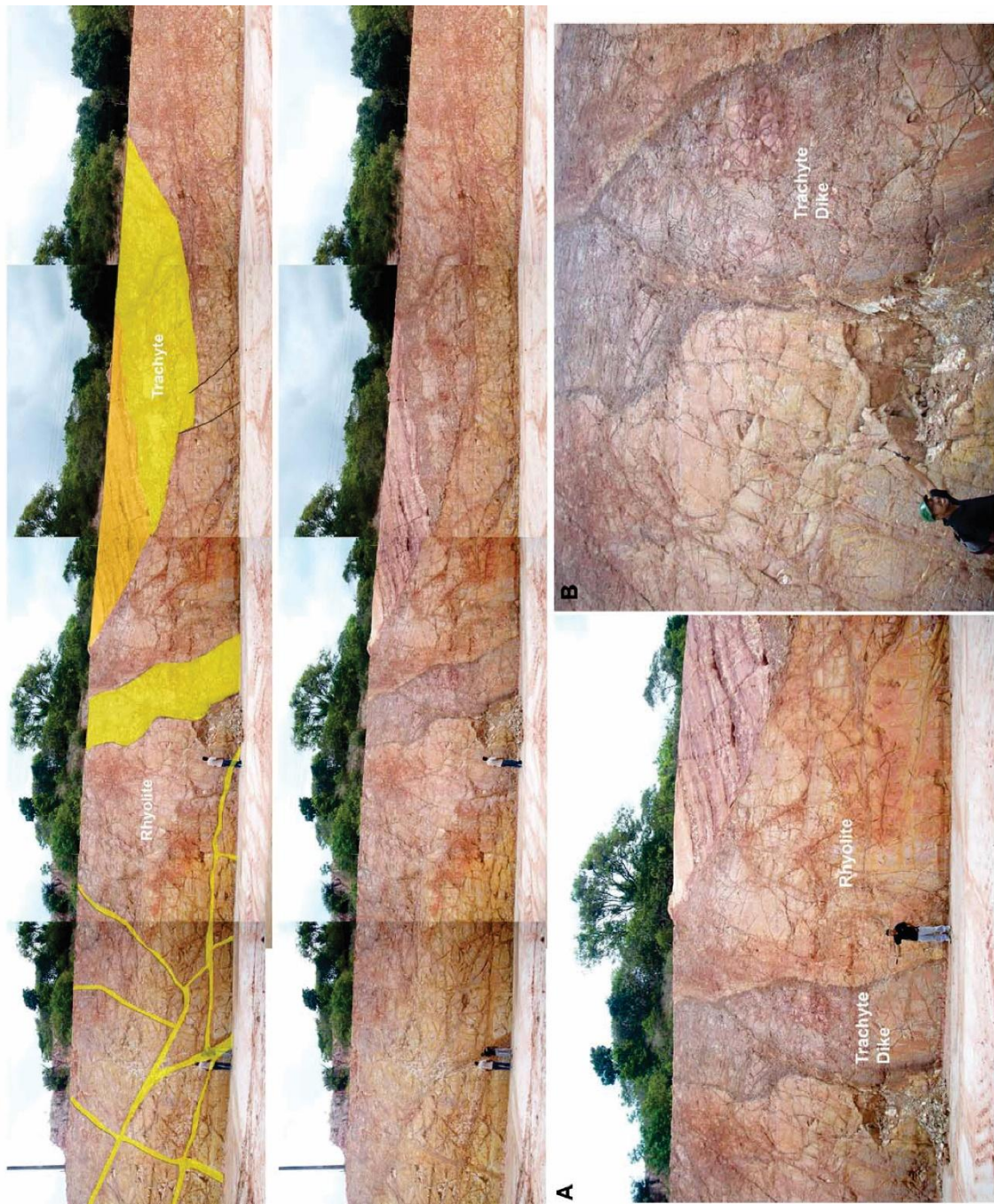


Figura 07 - Exposição de derrame riolítico cortado por diques de traquito, na área do Porto de Suape. Do lado esquerdo da imagem, um segundo derrame de traquito se formou e deformou o riolito criando um *rollover*. A área laranja marca a ocorrência de traquito misturado com rochas piroclásticas. A e B) detalhes dos diques de traquito mais recentes cortando o corpo de riolito (de Barbosa et al., 2014).

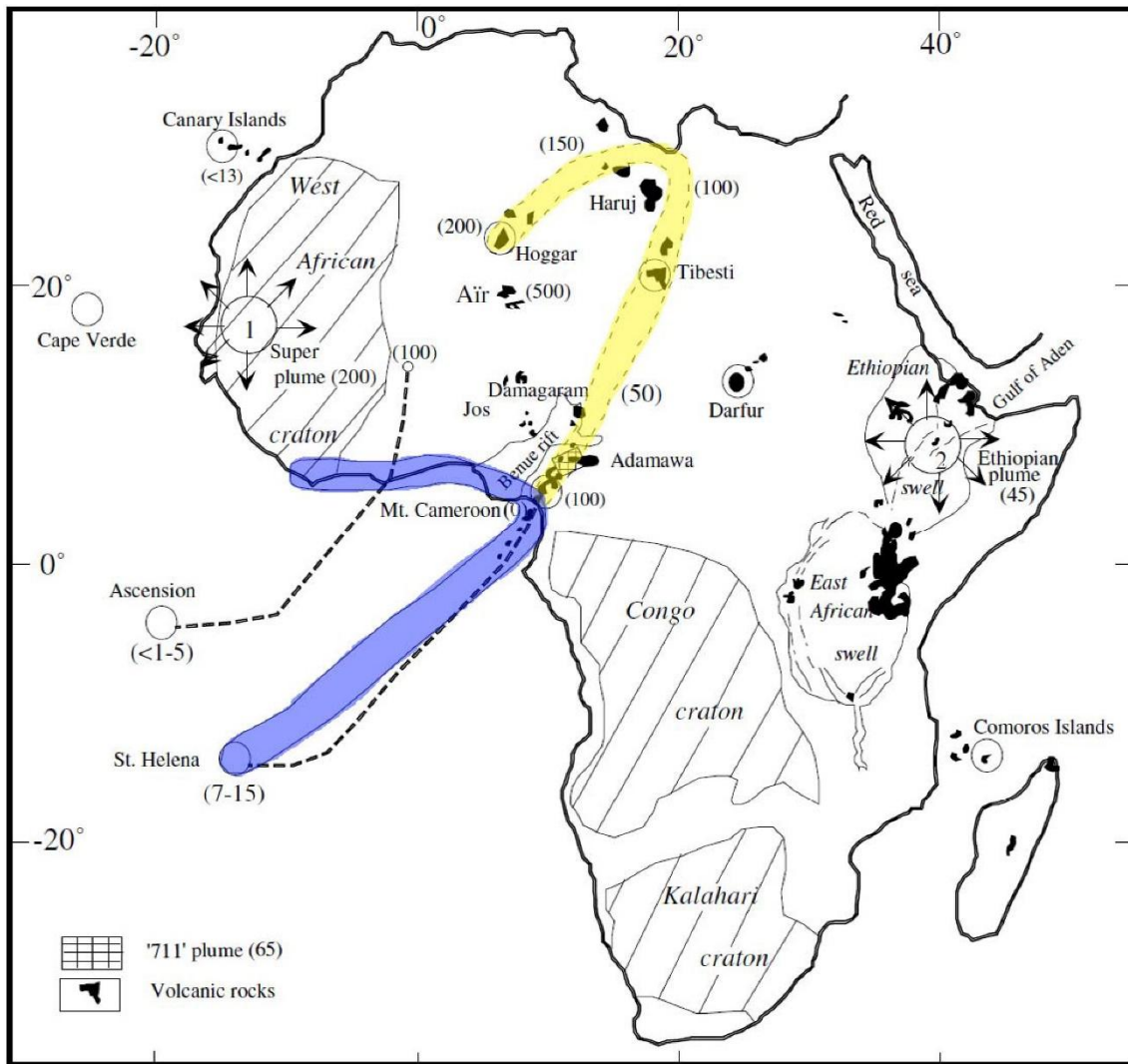


Figura 08 - Mapa de localização de *hotspots* nos dias atuais e o deslocamento deles na África. As linhas pontilhadas grossas indicam o trajeto dos *hotspots* desde 100 Ma. até os locais em que eles se encontram ativos nos dias atuais. A linha pontilhada fina (faixa amarela) mostra o trajeto do *Hotspot* de Camarões desde 200 Ma. atrás, de Hoggar até o Monte Camarões. A linha fina contínua (faixa azul) mostra a trilha do *Hotspot* St. Helena, de Serra Leoa até a sua posição atual. 1 e 2 indicam a localização das superplumas. Os números entre parênteses representam as idades em Ma. (modificado de Ngako et al., 2006).

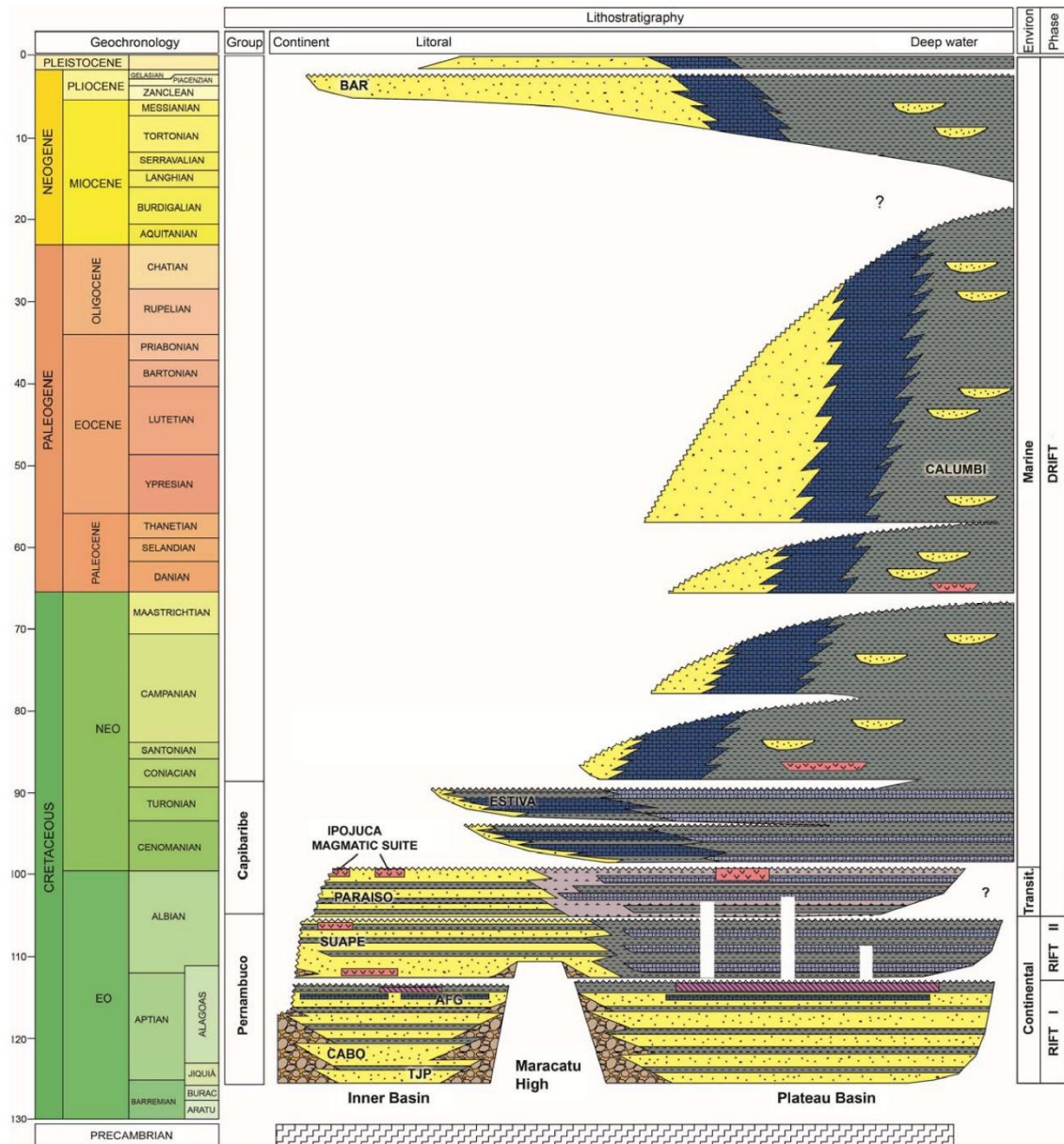


Figura 9 - Carta estratigráfica da Bacia de Pernambuco, com a compilação das informações obtidas na região *onshore* da bacia (afloramentos e poços estratigráficos) e da região *offshore*, a partir da interpretação de dados sísmicos (modificado a partir de Maia, 2012).

1.2 Justificativas da Pesquisa

O estudo de rochas vulcânicas em margens passivas tem uma grande aplicabilidade para o entendimento da evolução das margens continentais e para a exploração petrolífera. Os processos de soerguimento local e regional, alteração da porosidade e permeabilidade, deformação e aquecimento associado com o magmatismo na coluna sedimentar, costumavam ser interpretados como aspectos negativos pelos exploracionistas da indústria do petróleo (Rhorman, 2007). No entanto, esta visão de que o magmatismo não é tão prejudicial ao

sistema petrolífero das bacias tem aumentado nas últimas três décadas (Raymond & Murchison, 1988; Gries et al., 1997; Galushkin, 1997; Othman et al., 2001; Schutter, 2003; Huafeng et al., 2015). Alguns exemplos de campos de petróleo desenvolvidos em rochas plutônicas, vulcânicas e piroclásticas (Seemann, & Scherer, 1984; Hawlander, 1990; Vernik, 1990; Levin, 1995; Chen et al., 1999; Jinglam et al., 1999; Gu et al., 2002; Luo et al., 2005; Feng et al., 2008; Watton et al., 2014; Huafeng et al., 2015; Ólafsdóttir et al., 2015; Wang & Chen, 2015), assim como a participação das rochas vulcânicas atuando como selo para as acumulações de petróleo e gás, ou a influência do magmatismo no processo de maturação das rochas geradoras (Mango, 1992; Gries et al., 1997; Chen et al., 1999; Jin et al., 1999; Zu et al., 2007; Fjeldskaar et al., 2008; Lenhardt & Götz, 2011; Jiyan et al., 2014; Xiao-Yin et al., 2014), vem demonstrando que essas rochas vulcânicas e o processo de magmatismo em si, podem ser incorporados nos prospectos de exploração de petróleo e gás (Wu et al., 2006; Lee et al., 2006; Rohrman, 2007; Yulong et al., 2009; Ólafsdóttir et al., 2015). Exemplos de campos de petróleo em desenvolvimento, com a presença de reservatórios de petróleo em rochas ígneas, têm demonstrado a importância de estudar a natureza e potencialidade desses tipos de estruturas em bacias sedimentares no Mar do Norte, Índia, Japão, China, Brasil e Argentina (Jinglam et al., 1999; Kawamoto, 2001; Wu et al., 2006; Rohrman, 2007; Sruoga & Rubinstein, 2007; Zou et al., 2008; Xiao et al., 2010; Wu et al., 2010; Jin et al., 2013; Ramachandran et al., 2013; Reis et al., 2014; Hou et al., 2015).

No entanto, quando se estuda estruturas magmáticas através da interpretação de dados sísmicos em regiões onde não se tem acesso a dados de poços estratigráficos, a correta identificação e caracterização dessas estruturas podem ser desafiadoras, uma vez que estruturas magmáticas podem ser erroneamente interpretadas com outros tipos de estruturas geológicas, por apresentar similaridades entre si em dados sísmicos, tais quais evaporitos, montes de contornitos, montes de turbiditos e *buildups* carbonáticos (Zhang & Marfurt, 2011; Burgess et al., 2013). Este último, por sinal, representa uma das principais causas de erros no processo de interpretação sísmica de edifícios vulcânicos (Burgess et al., 2013). Por ocorrerem inúmeros *buildups* carbonatos na área de estudo (Buarque et al., 2016b), foi dada neste trabalho especial atenção na distinção das estruturas carbonáticas e dos edifícios vulcânicos. Apesar dessas limitações, a interpretação de estruturas magmáticas é viável a partir da interpretação de dados sísmicos regionais, utilizando-se da análise de algumas feições chaves, como por exemplo a geometria do corpo, fácies sísmicas, refletividade, velocidade sísmica e relações de corte (Conceição et al., 1993; Leslie et al., 2002; Smallwood & Maresh, 2002; Jamtveit et al., 2004; Planke et al., 2005; Oreiro, 2006a,b; Moreira et al.,

2006; Hansen, 2006; Rohrman, 2007; Hansen et al., 2008; Klarner et al., 2008; Magee et al., 2013; Posamentier et al., 2014; Alves et al., 2015; Magee et al., 2015). Apesar do fato de soleiras, diques e derrames de lava serem bem documentados na região costeira da Bacia de Pernambuco, a falta de dados sísmicos (Lima Filho, 1998; Nascimento, 2003) e poços estratigráficos cobrindo a região *onshore* e *offshore*, tornam difícil a realização de estudos mais detalhados dessas estruturas (Almeida et al., 2005; Barbosa et al., 2014; Maia, 2012; Maia et al., 2012), incluindo as relações cronoestratigráficas com as principais sequências tectono-estratigráficas, a classificação de suas geometrias e a estimativa dos volumes de rochas magmáticas intrudidas.

Apesar da Bacia de Pernambuco ser hoje considerada uma promissora região de fronteira exploratória de petróleo no Nordeste do Brasil, e que na última década tenha atraído interesses de várias companhias de petróleo (Fig. 10), a bacia ainda carece de melhoria do seu conhecimento quando comparada com bacias produtoras vizinhas (Fig. 11) (Barbosa et al., 2006; Magalhães et al., 2014; Buarque et al., 2016a). É importante salientar que os primeiros modelos tectono-sedimentares propostos para a região em que esta bacia se encontra, indicavam um baixo potencial petrolífero para toda a área que engloba a Bacia de Pernambuco, a Bacia da Paraíba e a Plataforma de Natal, denominada na época de Bacia Pernambuco - Paraíba - Rio Grande do Norte. Este considerado baixo potencial petrolífero relacionava-se à presença de uma estreita zona costeira e às pequenas espessuras sedimentares encontradas nas zonas *onshores* dessas bacias (Asmus & Carvalho, 1978; Mabesoone & Alheiros, 1993; Feijó, 1994). Acreditava-se que toda esta área, por estar ligada ao último estágio de separação com a África, teria se comportado como um alto estrutural durante muito tempo e que por isto, não teria alcançado condições para a geração e acumulação de petróleo e gás (Asmus & Carvalho, 1978; Mabesoone & Alheiros, 1993; Feijó, 1994). Dessa forma, a falta de atrativos exploratórios levou também a uma defasagem do conhecimento científico, e somente a partir da revisão desses primeiros modelos tectono-sedimentares para a Bacia de Pernambuco, é que a área passou a ser alvo de um maior interesse exploratório (Alves & Costa, 1986; Mello et al., 1988; Polónia, 1997; Barbosa et al., 2009; Barbosa & Lima Filho, 2010).

De fato, a Bacia de Pernambuco apresenta características bem distintas das bacias a norte da Zona de Cisalhamento de Pernambuco (Fig. 12). Apesar da sua estreita zona costeira, poços estratigráficos perfurados nesta área atingiram mais de 3500 m de profundidade, sem terem alcançado o embasamento cristalino; enquanto que na Bacia Paraíba, a maior profundidade registrada para o embasamento é de 400 m, e na Plataforma de Natal é de 200 m

(Lima Filho, 1998; Barbosa & Lima Filho, 2006; Barbosa, 2007). Diferenças ainda maiores entre a Bacia de Pernambuco e suas vizinhas a norte podem ser destacadas quando se compara as suas regiões *offshores* através de seções sísmicas (Fig. 12). Referente ao domínio da Bacia de Pernambuco, encontra-se uma configuração tectono-sedimentar complexa, com a presença de altos estruturais e pronunciados depocentros. Além da grande espessura sedimentar, estimada na região *offshore*, existe ainda a presença de camada evaporítica. Já a área a norte da Zona de Cisalhamento de Pernambuco, apresenta um embasamento raso, com uma estreita plataforma continental que possui uma quebra abrupta, podendo ter sido gerado um *bypass* da sedimentação da plataforma continental para a região de talude. Além disso, na região a norte não foi observada a ocorrência de estruturas evaporíticas (Fig. 12). Essas diferenças mostram que o embasamento cristalino a sul e a norte da Zona de Cisalhamento de Pernambuco se comportou de forma bastante diferente durante o processo de rifteamento das bacias e que apesar da proximidade geográfica, elas apresentam diferenças significativas quanto a sua evolução e potencial petrolífero.

A complexa evolução da Bacia de Pernambuco também envolve um rifteamento oblíquo, além da possível influência do *Hotspot* Santa Helena, conforme mencionado acima (Long et al., 1986; Wilson & Guiraud, 1992; Jackson et al., 2000; Ngako et al., 2006; Adam et al., 2007; Fairhead & Binks, 1991) (Figs. 03, 05, 06, 07, 08).

O melhor entendimento da estratigrafia e evolução da bacia representam algumas das principais exigências para o futuro desenvolvimento econômico da bacia. Portanto, os resultados apresentados neste trabalho têm um papel importante para o conhecimento da evolução desta parte da Margem do Atlântico Sul, assim como ajuda a entender melhor a influência do magmatismo presente na região e sua relação com o sistema petrolífero da bacia. Devido à necessidade de diferenciar as estruturas magmáticas das de outras naturezas, tais quais as estruturas carbonáticas identificadas durante a realização deste trabalho, a pesquisa ganha ainda mais relevância não apenas no campo acadêmico, como também no exploratório, uma vez que são descritas pela primeira vez *buildups* e plataformas carbonáticas na região *offshore* da Bacia de Pernambuco.

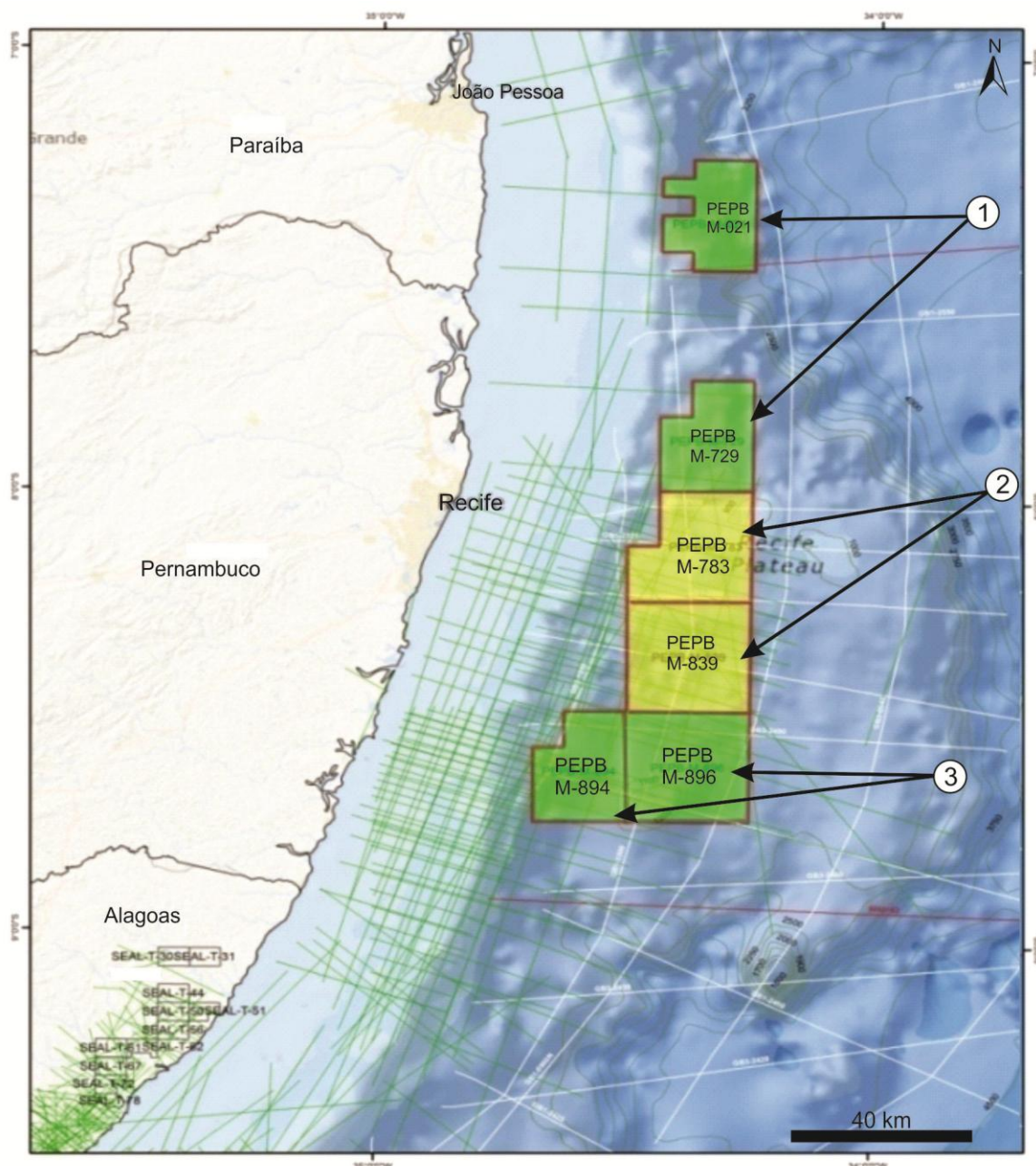


Figura 10 - Mapa dos blocos exploratórios sob concessão na região da Bacia de Pernambuco e na Bacia da Paraíba. 01 - Blocos sendo explorados pela Niko Resources LTD e a Petra Energia. 02 - Blocos sendo explorados pela Petrobras e a Galp Energia. 03 - Blocos explorados pela Queiroz Galvão Óleo e Gás e Petra. Linhas verdes - seções sísmicas disponíveis no BDEP da ANP. Linhas brancas - seções sísmicas pertencentes à ION (modificado de SISMOS, 2014).

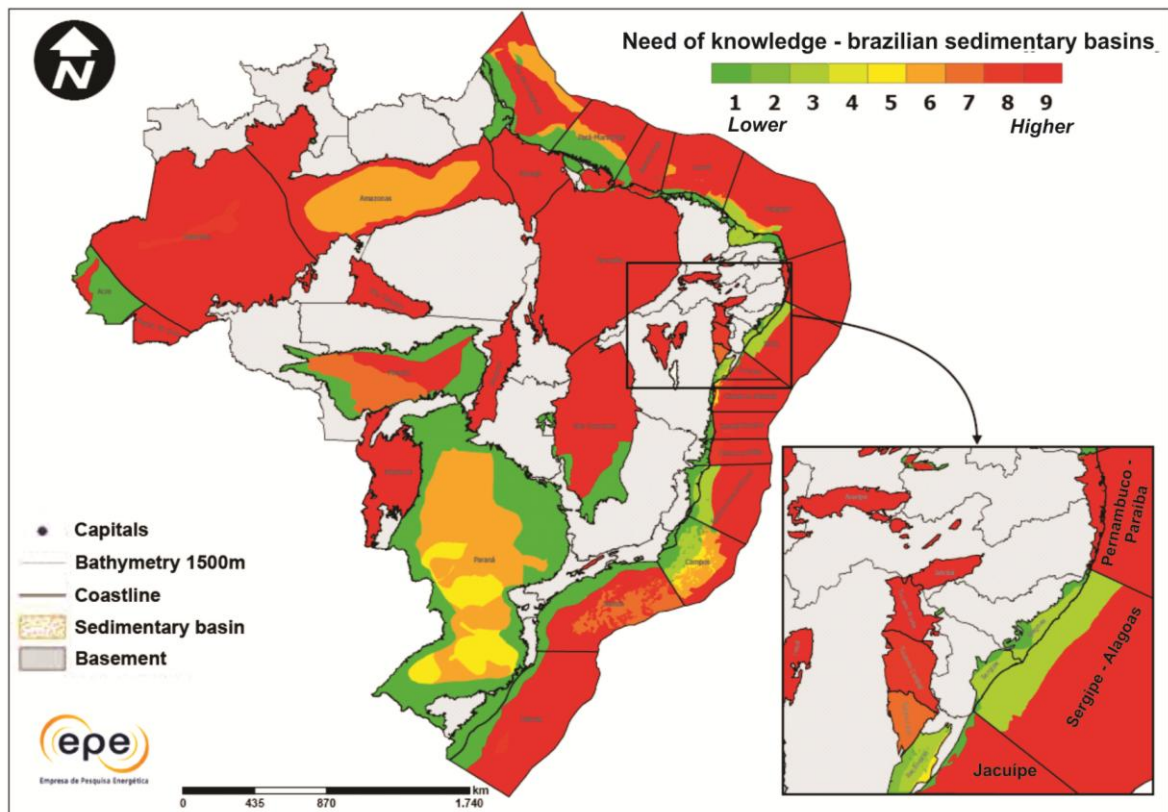


Figura 11 - Mapa do Brasil contendo todas as suas bacias sedimentares juntamente com a sua necessidade de conhecimento. A região da Bacia de Pernambuco, Bacia da Paraíba e Plataforma de Natal apresentam índice máximo de necessidade de conhecimento, sendo essas as bacias sedimentares da margem continental brasileira de mais escasso conhecimento (modificado de MME-EPE, 2012).

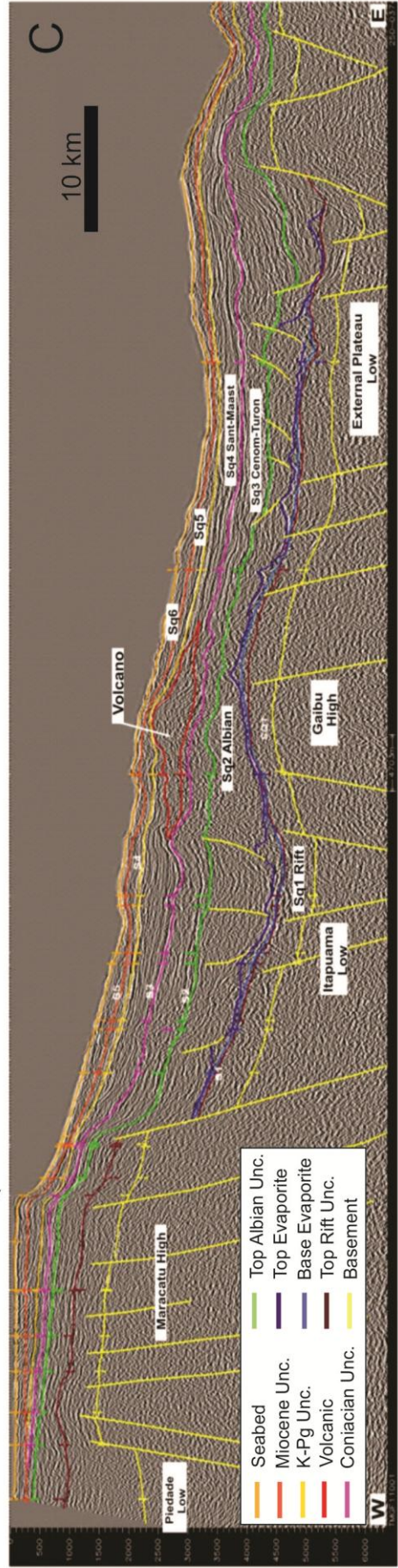
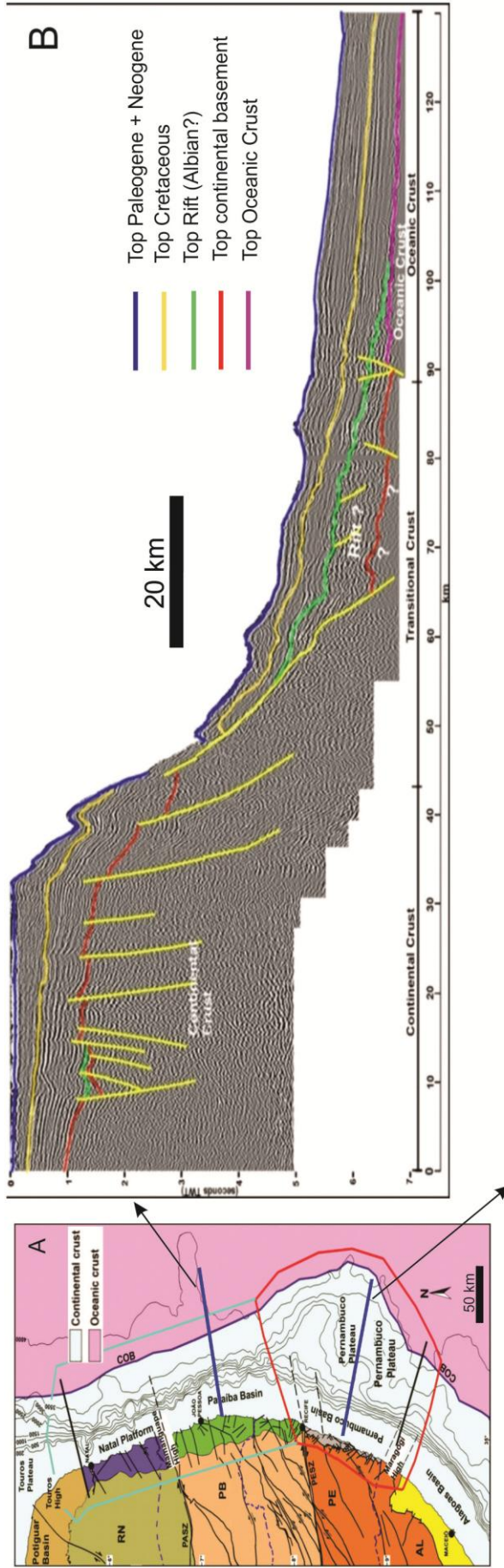


Figura 12 - Figura composta ilustrando as principais diferenças entre a região *offshore* da Bacia de Pernambuco, a sul da Zona de Cisalhamento de Pernambuco, e a Bacia da Paraíba, a norte da zona de cisalhamento. A) mapa das bacias marginais na borda leste do nordeste brasileiro e a localização das duas seções sísmicas apresentadas em B e C. B) seção sísmica interpretada referente à Bacia da Paraíba (modificada de Magalhães et al., 2013). C) seção sísmica interpretada da Bacia de Pernambuco (modificada de Barbosa et al., 2008b).

1.3 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo geral o estudo da evolução tectônica da Bacia de Pernambuco através da identificação e caracterização de estruturas magmáticas no Platô de Pernambuco, com base em interpretação sísmo-estratigráfico.

A interpretação sísmica tem como objetivo atingir as seguintes metas:

- I. Identificar padrões sísmicos de estruturas magmáticas e determinar critérios para diferenciá-las das estruturas sedimentares;
- II. Usar dados potenciais para subsidiar a diferenciação;
- III. Analisar os padrões de sismofácies das estruturas magmáticas e caracterizar o tipo de *emplacement* das rochas magmáticas;
- IV. Mapear as estruturas ao longo da bacia e propor seu posicionamento cronoestratigráfico;

1.4 Metodologia

1.4.1 Compilação do conhecimento prévio

Inicialmente, os dados já existentes sobre os temas que envolvem a dissertação foram compilados: relatórios, publicações, teses e dissertações que se referem ao magmatismo presente na Bacia de Pernambuco. Também foi feita uma compilação bibliográfica relacionada à identificação de estruturas magmáticas em dados sísmicos e de estruturas sedimentares que apresentam aspectos semelhantes aos de corpos magmáticos em dados sísmicos, como é o caso de *buildups* carbonáticos.

1.4.2 Dados de sísmica de reflexão

O presente trabalho utilizou-se de um banco de dados formado por 143 seções sísmicas 2D provenientes de campanhas de levantamentos regionais, migradas em tempo e que recobrem a região do Platô de Pernambuco. Os dados sísmicos foram obtidos juntos à Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), através do repositório de dados de exploração e produção (BDEP). A interpretação dos dados sísmicos foi realizada no Laboratório de Sismoestratigrafia do DGEO, SISMOS, que disponibilizou a infraestrutura necessária, além do acervo de dados: gabinete, computadores, *softwares*.

Devido ao fato de que o conjunto de seções sísmicas representa um conjunto de dados de diferentes levantamentos sísmicos, apresentando qualidade e profundidade de imageamento diferentes, foi realizada inicialmente a integração de todos os dados. Essa integração foi necessária para que fosse realizada a interpretação das feições regionais, tais quais o contorno do embasamento e as principais sequências sismoestratigráficas. Em seguida, foi feita uma seleção das seções com melhor imageamento sísmico e então 59 seções sísmicas foram selecionadas para o detalhamento da pesquisa aqui apresentada (Fig. 13). Estas seções sísmicas selecionadas, representam um total de 4340 km de levantamento que cobrem uma área de aproximadamente 14000 km² (Fig. 13). Atributos sísmicos, baseados na aplicação de filtros de frequência, foram empregados a fim de reduzir problemas ligados à razão sinal/ruído e gerar volumes sísmicos com um melhor destaque das anomalias de amplitude.

A interpretação do conjunto de dados sísmicos seguiu as seguintes etapas:

- 1 - Interpretação das principais regiões afetadas pelo magmatismo;
- 2 - Interpretação das principais sequências estratigráficas;
- 3 - Identificação das feições magmáticas;
- 4 - Classificação das feições encontradas conforme os critérios da literatura;
- 5 - Elaboração de um modelo geral para os principais tipos de relações encontradas.

Já no segundo momento, em que analisou-se as estruturas carbonáticas encontradas na área de estudo, devido à necessidade de separá-las do conjunto de estruturas vulcânicas, foram realizadas as seguintes etapas:

- 1 - Interpretação das principais estruturas carbonáticas;
- 2 - Revisão das principais sequências estratigráficas;

- 3- Classificação das estruturas carbonáticas encontradas conforme critérios da literatura;
- 4 - Criação de um mapa de ocorrência das estruturas carbonáticas descritas;

1.4.3 Conjunto de dados potenciais - Gravimétricos e Magnetométricos

Um conjunto de dados geofísicos potenciais foi utilizado com o intuito de auxiliar na interpretação dos corpos magmáticos e posteriormente na diferenciação entre essas estruturas e os *buildups* carbonáticos. Para isto, utilizou-se de dados aéreos e marítimos, que assim como os dados sísmicos, foram obtidos através do BDEP-ANP. Os dados aeromagnéticos recobrem boa parte da Bacia de Pernambuco, tanto a região *onshore* quanto a região *offshore*. Eles foram adquiridos e utilizados dos seguintes levantamentos geofísicos: 1 - "Plataforma continental do Nordeste", que foi realizado em 1970 com 176 linhas de voos com direção de orientação NE-SW, espaçamentos de 5 km e altura de voo de 700 m; 2 - "Platô de Pernambuco", que foi conduzido em 1988, tendo suas linhas de voos orientação N30°W, espaçamento de 3 km, linhas de controle orientadas em N60°E e uma altura de voo de 500 m; 3 - "Maragogi - Canavieiras", que foi realizado em 1986, possuindo 180 linhas de voo com orientação N30°W, linhas de controle orientadas em N60°E, espaçamento de 3 km e 500 m de altura de voo. Estes dados auxiliaram no mapeamento de anomalias magnéticas em praticamente toda a área do platô, o que tornou possível comparar os resultados da interpretação sísmica às áreas associadas com possíveis influências do magmatismo.

O conjunto de dados magnéticos e gravimétricos marítimos, foram adquiridos juntamente com os dados sísmicos durante a aquisição de 26 linhas sísmicas do programa de aquisição sísmica VB00_2D_BM_SEAL, realizado em 2000. Estes dados foram utilizados como auxílio na interpretação das linhas a eles associadas, a partir da observação dos perfis geofísicos 2D processados. Neste caso, tomou-se como hipótese que os dados geofísicos ofereceriam evidência para a distinção, nos dados marítimos, entre corpos ígneos (anomalias magnéticas), intercalados nos estratos sedimentares, e estruturas sedimentares como os *buildups* carbonáticos.

Nos dados aeromagnéticos, foi utilizado o filtro de amplitude do sinal analítico (ASA) aplicado ao dado magnético de campo total e *surveys* marítimos para então obter o mapa ASA e perfis geofísicos ao longo das seções sísmicas VB00. Já o filtro da primeira derivada vertical (VD) foi aplicado nas anomalias Bouguer ao longo dos perfis gravimétricos. A análise qualitativa tanto do mapa de ASA quanto da VD se mostram úteis em realçar as

anomalias residuais magnéticas e gravimétricas, ajudando a definir a localização das fontes (Gunn, 1997), seus centros e limites espaciais.

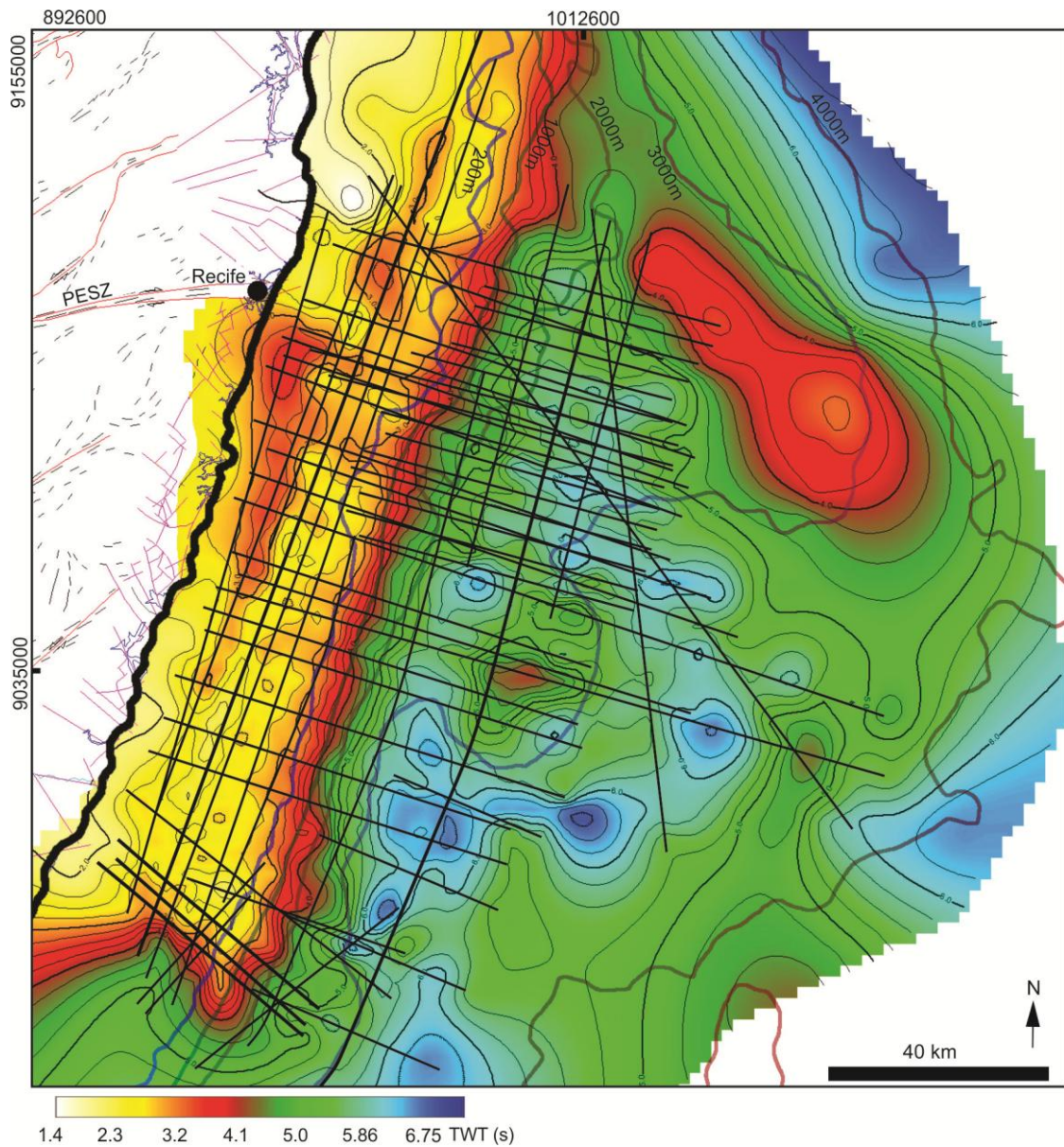


Figura 13 - Mapa mostrando a localização das 59 seções sísmicas selecionadas para esta pesquisa na região *offshore* da Bacia de Pernambuco. O contorno estrutural do embasamento, que é baseado na interpretação de 143 seções sísmicas, revela os principais altos topográficos e depocentros da bacia.

CAPÍTULO 2 RESULTADOS

2.1 ARTIGO 1

POST-RIFT VOLCANIC STRUCTURES OF THE PERNAMBUCO PLATEAU, NORTHEASTERN BRAZIL

Bruno V. Buarque^a, José A. Barbosa^a, José R. G. Magalhães^a, Jefferson T. Cruz Oliveira^a and
Osvaldo J. C. Filho^a

^a LAGESE, Department of Geology, Federal University of Pernambuco, Recife 50740-530, Brazil



Post-rift volcanic structures of the Pernambuco Plateau, northeastern Brazil



Bruno V. Buarque^{*}, José A. Barbosa, José R.G. Magalhães, Jefferson T. Cruz Oliveira, Osvaldo J. Correia Filho

LAGESE, Department of Geology, Federal University of Pernambuco, Recife 50740-530, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 February 2016

Received in revised form

26 May 2016

Accepted 29 May 2016

Available online 2 June 2016

Keywords:

Volcanic structures
Seismic stratigraphy
South Atlantic rift
Pernambuco Basin

ABSTRACT

The Pernambuco marginal basin is located on the eastern continental margin of northeastern Brazil, covers an area of 20,800 km², and represents one of the most prominent frontiers for deep water oil and gas exploration off the Brazilian coast. The onshore region of this basin was highly affected by extrusive and intrusive magmatism during the Upper Albian, and the relation of that event with the volcanic structures observed in the offshore sector has not been thoroughly characterized to date. This study aims to characterize the major extrusive and intrusive volcanic structures of the offshore portion of this basin, which is dominated by the Pernambuco Plateau, and its stratigraphic relations. A set of 143 2D multi-channel seismic sections that cover the Pernambuco Plateau region are used to interpret the major tectono-stratigraphic sequences and describe the distribution of volcanoes, sills, vent complexes and related volcanoclastic sequences. The interpretations are supported by aeromagnetic and gravimetric geophysical surveys. Volcanoes are classified into two groups that differ in terms of their morphology: shield-like structures and cone-shaped volcanic structures. Sill intrusions are mainly identified beneath the volcanic structures and are characterized by high-amplitude reflectors with short extensions and abrupt terminations. Volcanoclastic sequences are found adjacent to the volcanoes and are characterized by high-amplitude, disrupted reflections with local chaotic configurations. Vent complexes are classified on the basis of their morphologies as either eye-shaped or crater-shaped. The volcanic features identified within the available seismic dataset are concentrated in two main areas: in the centre of the plateau and near its northeastern border. These two regions are host basement outer highs and are surrounded by hyper-extended continental crust, which forms the plateau itself. The extrusive and intrusive features described in the offshore region were formed during the post rift Cretaceous and Cenozoic intervals and point to the continuation of magmatic events after the rifting process. The findings presented in this report provide a better understanding of the magmatism on the northeastern passive margin of Brazil and can also be useful for future modelling of the Pernambuco Basin petroleum system.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Detailed studies that consider the morphology, growth mechanisms and intrusive relations of different types of volcanic structures have been increasing since the nineties (Hasenaka, 1994; Rossi, 1996; Smith, 1996; Thouret, 1999; Davies et al., 2002; Michon and Saint-Ange, 2008; Grosse et al., 2009; Calvès et al., 2011; Magee et al., 2013, 2015; Alves et al., 2015). Those analyses are based on remote sensing, laboratory experiments, field

observations, and interpretations of high-resolution seismic data. In addition to its importance for volcanology, a better comprehension of those processes provides valuable information for understanding the evolution of continental margins due to the process of magma generation during rifting and as for the evaluation of sedimentary basins for oil and gas exploration (Chen et al., 1999; Wu et al., 2006; Rohrman, 2007; Delpino and Bermudez, 2009).

The processes of local and regional uplift, porosity and permeability alteration, deformation, and heating associated with magmatism in sedimentary basins have been considered negative aspects of basin evolution by the oil industry in the past (Rohrman, 2007). However, the advanced understanding of the products and

^{*} Corresponding author.

E-mail address: bv.buarque@gmail.com (B.V. Buarque).

effects of magmatism gained over the last three decades has revealed that magmatic processes can be beneficial to petroliferous systems (Raymond and Murchison, 1988; Gries et al., 1997; Galushkin, 1997; Othman et al., 2001; Schutter, 2003; Rateau et al., 2013; Huafeng et al., 2015). For example, there are several hydrocarbon fields within extrusive and intrusive volcanic rocks (Seemann, and Scherer, 1984; Hawlander, 1990; Vernik, 1990; Levin, 1995; Chen et al., 1999; Jinglam et al., 1999; Gu et al., 2002; Luo et al., 2005; Feng, 2008; Holford et al., 2012; Watton et al., 2014; Huafeng et al., 2015; Ólavsdóttir et al., 2015; Wang and Chen, 2015), whereas some types of volcanic rocks can also act as seals for oil and gas accumulation and provide migration pathways (Rateau et al., 2013). There is also growing evidence for the influence of magmatism on the maturation of source rocks (Mango, 1992; Gries et al., 1997; Chen et al., 1999; Jin et al., 1999; Zu et al., 2007; Fjeldskaar et al., 2008; Rodriguez Monreal et al., 2009; Lenhardt and Götz, 2011; Jiyan et al., 2014; Xiao-Yin et al., 2014). Those discoveries demonstrate that magmatic processes should be incorporated into oil and gas exploration (Jinglam et al., 1999; Kawamoto, 2001; Wu et al., 2006; Lee et al., 2006; Rohrman, 2007; Sruga and Rubinstein, 2007; Zou et al., 2008; Yulong et al., 2009; Xiao et al., 2010; Wu et al., 2010; Jin et al., 2013; Ramachandran et al., 2013; Reis et al., 2014; Hou et al., 2015; Ólavsdóttir et al., 2015).

However, when studying volcanic structures in seismic data in regions where there are no stratigraphic wells, the accurate identification and characterization of volcanic structures can be a problematic issue because of the similarities of their signatures to those of sedimentary rocks such as evaporites, contourite mounds, turbidity mounds and carbonate buildups (Zhang and Marfurt, 2011; Burgess et al., 2013). In addition, the dimensions of certain volcanic structures may lie below the seismic resolution. However, despite those limitations, many volcanic structures can be successfully identified from seismic data based on the analysis of a few key features such as body geometry, seismic facies, reflectivity, seismic velocities, and cross-cutting relationships (Conceição et al., 1993; Leslie et al., 2002; Smallwood and Maresh, 2002; Jamtveit et al., 2004; Planke et al., 2005; Oreiro, 2006a,b; Moreira et al., 2006; Hansen, 2006; Rohrman, 2007; Hansen et al., 2008; Klarner et al., 2008; Magee et al., 2013; Posamentier et al., 2014; Alves et al., 2015; Magee et al., 2015).

This study aims to characterize the major volcanic features of the offshore Pernambuco Basin through an extensive investigation of multichannel 2D seismic sections and magnetometric and gravimetric surveys that are available from the Bank of Exploration and Production Data of the Brazilian Petroleum National Agency (BDEP-ANP). The analysis presented here focuses mainly on the offshore regions of the Pernambuco Basin that are dominated by the Pernambuco Plateau, have the highest potential for oil and gas production and are still scarcely known (Fig. 1). The results provide a qualitative assessment of the distribution of the main volcanic structures such as sills and volcanoes, allowing the delineation of areas with major volcanic influence within the area covered by available seismic surveys. The definition of those areas can help future exploration programs and can be useful in future investigation regarding the origin and extension of the magmatism in the Pernambuco Plateau. The analysis conducted here is further supported by recent works that investigated the structural framework of this marginal region of Brazil based on analyses of geophysical data, including gravimetry and magnetometry (Oliveira, 2013; Magalhães et al., 2014; Magalhães, 2015).

2. Geological setting

The Pernambuco Basin comprises an Atlantic-type rift margin

(Franke, 2013; Peron-Pinvidic et al., 2013) located in the eastern part of the Borborema Province (BP) in northeastern Brazil (Fig. 1). The BP represents the northeastern portion of the South American Platform (Almeida et al., 1981; Van Schmus et al., 2008; Santos et al., 2010; Araujo et al., 2013) and is bounded to the south by the São Francisco Craton, to the west by domains of the large Paraíba intracratonic basin, and to the north by the Potiguar and Ceará marginal basins (Matos, 1999; Castro et al., 2012). The eastern border of the BP comprises three marginal basins: the Pernambuco, Paraíba, and Natal Platform basins (Fig. 1) (Fainstein and Milliman, 1979; Rand and Mabesoone, 1982; Mabesoone and Alheiros, 1993; Matos, 1999; Brito Neves et al., 2002; Barbosa and Lima Filho, 2006; Barbosa et al., 2007; Magalhães et al., 2014). Those three basins were formed during the final stage of separation between South America and Africa as part of the Cretaceous South Atlantic rift (Reyment and Dingle, 1987; Fairhead and Binks, 1991; Wilson and Guiraud, 1992; Rand and Mabesoone, 1982; Barbosa and Lima Filho, 2006).

The BP is divided into three large domains, which are bounded by continental-scale shear zones: the Pernambuco Alagoas Complex, or the South Domain; the Transversal Zone, or the Central Domain; and the North Domain (Vauchez et al., 1995; Neves and Mariano, 1999; Brito Neves et al., 2002; Ferreira et al., 2008; Medeiros et al., 2011; Araujo et al., 2013; Neves et al., 2015) (Fig. 1). The most important shear zones within the BP are the Pernambuco Shear Zone (PESZ) and the Patos Shear Zone (PASZ), both of which trend mainly E-W (Fig. 1). Those main shear zones and their branching shear systems were reactivated during continental rifting to form the marginal basins.

The Pernambuco Basin, which is linked to the South Domain of the BP (Fig. 1), is separated from the Alagoas Basin to the south by the Maragogi-Barreiros High, and from the Paraíba Basin to the north by the PESZ (Fig. 1).

The structural framework of Pernambuco Basin can be divided in three main sectors (Barbosa and Lima Filho, 2006; Maia, 2012; Oliveira, 2013; Barbosa et al., 2014):

- (1) The inner basin, which forms a narrow graben that is parallel to the coastline. It comprises two different depocentres separated by the Cabo de Santo Agostinho High (Figs. 2 and 4).
- (2) The Maracatu High, which forms an elongated outer hinge, trends almost NS and lies parallel to the coastline (Figs. 2 and 4). This outer hinge, which was formed by the continental platform, separates the interior basin from the offshore domains.
- (3) The Pernambuco Plateau (PEP), which was formed from the hyper-extended continental crust and extends to isobaths of approximately 3000 m (Fainstein and Milliman, 1979; Gomes et al., 2000; Oliveira, 2013; Magalhães et al., 2014). The transition zone from hyper-extended continental crust to oceanic crust domain remains poorly understood (Figs. 1, 2, 4 and 12) (Oliveira, 2013; Magalhães et al., 2014). The PEP comprises at least four main basement lows and a major outer high that trends E-W and is located at its centre; this is called the Gaibu High (Figs. 2 and 4). Previous geophysical studies have suggested that this structure was strongly influenced by both intrusive and extrusive magmatism (Figs. 2 and 12) (Oliveira, 2013; Magalhães et al., 2014). Another important outer high, named the Itamaracá High, is located on the northeast border of the plateau and trends NW-SE (Fig. 4).

The main structures that have controlled the evolution of the Pernambuco Basin include ductile Pre-Cambrian shear zones that

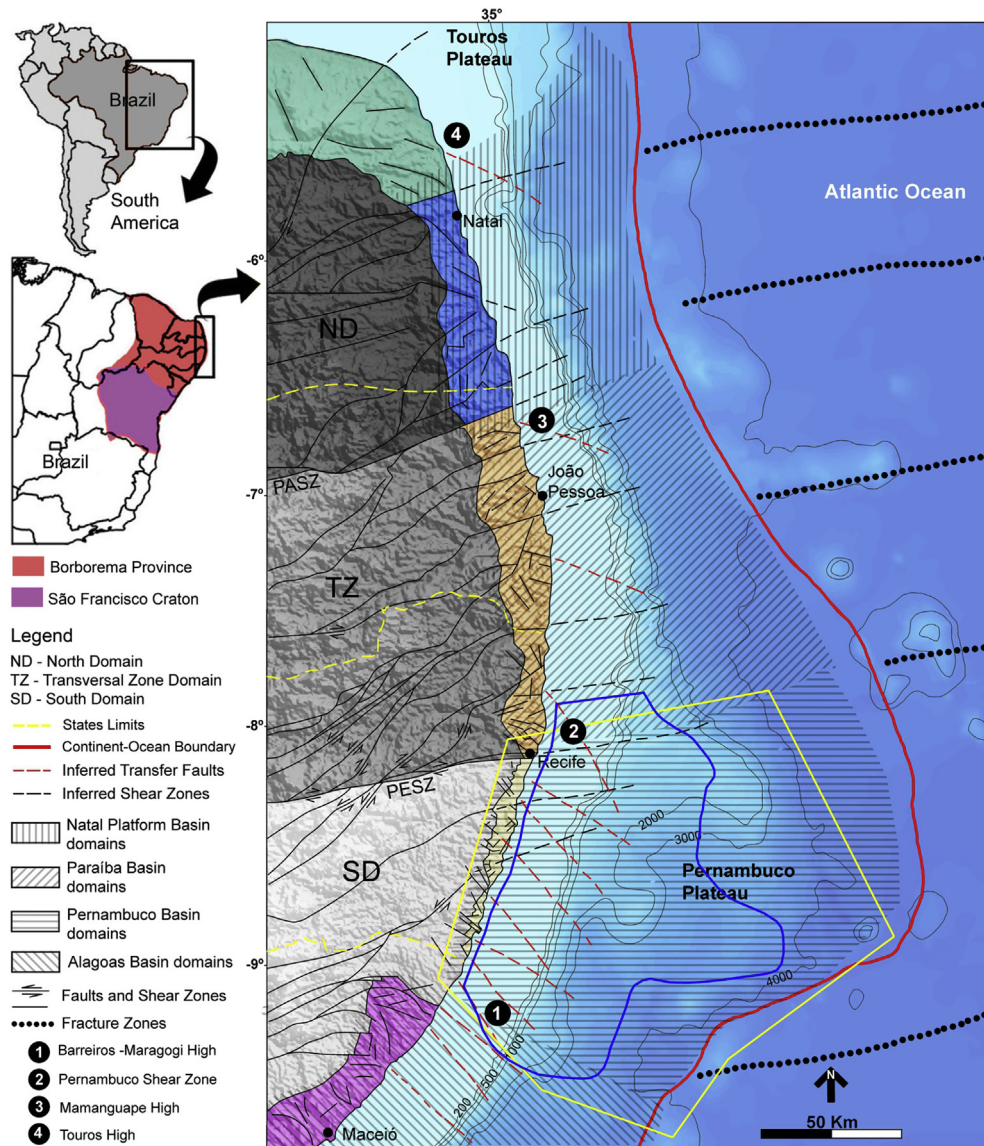


Fig. 1. Map showing the location of the Borborema Province (BP) in northeastern Brazil and the geological structure of its eastern border, which is formed by three related marginal basins. The delineation of the basins is directly linked to the crustal domains that comprise the BP and are bounded by shear zones and structural highs. The pink, light green, orange, blue, and dark green areas represents the coastal zones of the Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Natal Platform, and Potiguar basins, respectively. The offshore domains of each basin are depicted by the hatched zones. The position of the Continent-Ocean Boundary and the fracture zones are after Magalhães et al. (2014). Study area geophysical data coverage: continuous yellow line perimeter = aeromagnetic survey; continuous blue line perimeter = area covered by seismic surveys. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

trend mostly E-W and NE-SW and oblique transfer faults, that trend NW-SE (Figs. 1 and 2) (Polônia, 1997; Lima Filho, 1998). The E-W and NE-SW shear zones were reactivated as strike-slip and oblique faults during the Cretaceous rifting process. Meanwhile, the NW-SW transfer structures were created to accommodate the oblique movements of the rifting process (Polônia, 1997; Lima Filho, 1998; Almeida et al., 2005; Oliveira, 2013). Secondary normal faults trending N-S, WNW-ESE, and NNW-SSE were also formed during the opening of the basin. The rift process spanned from the Aptian to the Middle Albian in the onshore region (Lima Filho, 1998; Córdoba et al., 2007; Barbosa et al., 2014).

The sedimentary succession in the coastal zone mainly comprises siliciclastic formations of Aptian and Albian age, carbonates of Cenomanian-Turonian age, and Neogene deposits (Rand and Mabesoone, 1982; Lima Filho, 1998; Maia, 2012; Maia et al., 2012; Barbosa et al., 2014). Owing to the lack of wells in the offshore

regions, the proposed age of the seismic sequences in this domain is based on the interpretation of seismic data, the onshore record and from correlations made to the offshore stratigraphy of the northern portion of neighbouring Alagoas Basin (Campos Neto et al., 2007). The interpretation of seismic and potential field data has provided evidence of a significant sedimentary column in the plateau regions, which reaches up to 6 km in thickness, over the main depocentres of the PEP (Oliveira, 2013).

The coastal zone of the Pernambuco Basin records a magmatic event that occurred during the Albian and generated a series of volcanic rocks, which form the Ipojuca Magmatic Suite. These include trachyandesites, andesites, basalts, rhyolites, trachytes, and one occurrence of an alkali-feldspar granite (Sial et al., 1988; Lima Filho, 1998; Nascimento, 2003). The age of the main pulse of the magmatic event is 102–103 my (Long et al., 1986 by RbSr isochrons, and Nascimento, 2003 by $\text{Ar}^{39}/\text{Ar}^{40}$ zircon fission tracks).

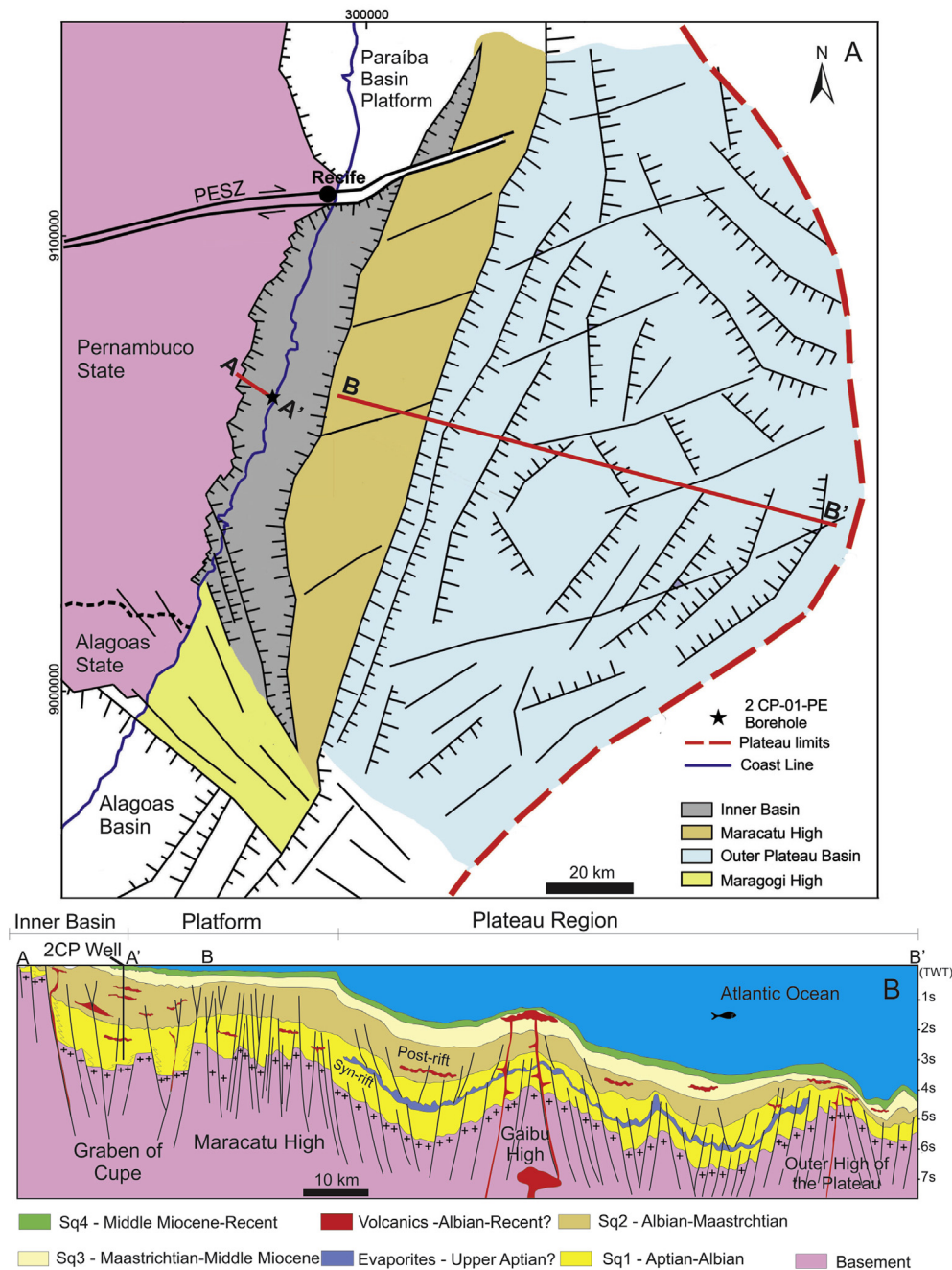


Fig. 2. A) Simplified structural map that shows the main domains of the Pernambuco Basin. B) Schematic geological section based on the interpretation of two 2D seismic sections (A–A' and B–B'), which are marked by the red continuous lines. The black star marks the location of the 2CP-01-PE stratigraphic well. The individualizations and estimated ages of the main seismic-sequences are based on the stratigraphic analysis performed under this research, the onshore stratigraphic framework (Barbosa et al., 2014), and correlation with the stratigraphy of the offshore neighbouring Alagoas Basin. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

The origin of that magmatism motivates debate. Some authors have discussed the influence of a thermal anomaly caused by the Santa Helena Hotspot (Rand and Mabesoone, 1982; Sial et al., 1988; Wilson, 1992; Wilson and Guiraud, 1992; Jackson et al., 2000; Golonka and Bocharova, 2000; Ngako et al., 2006) or the Ascension Hotspot (Long et al., 1986; Peyve and Skolotnev, 2014) in this region. According to Sial (1976), the bimodal characteristic of this magmatism suggests a hotspot influence, which caused the initial uplift of materials from the mantle, and with the continuation of the process, the fusion of the crust caused the contamination of the mantle magma and the consequent mixtures of mafic and felsic

volcanic rocks. Golonka and Bocharova (2000) suggested that the Santa Helena hot spot affected the region of northern Brazil before it became the critical influence on the separation of Africa and South America. Ngako et al. (2006) proposed that the African plate was subjected to a number of mantle anomalies in the last 200 my and that one of those hotspots crossed the Pernambuco Basin region over approximately 100 my. Torsvik et al. (2009) also pointed that the Santa Helena hotspot acted as a second hotspot in the south Atlantic rifting (Fig. 3).

Some previous works have recognized the existence of volcanic structures in the offshore Pernambuco Basin (Gomes et al., 2000).

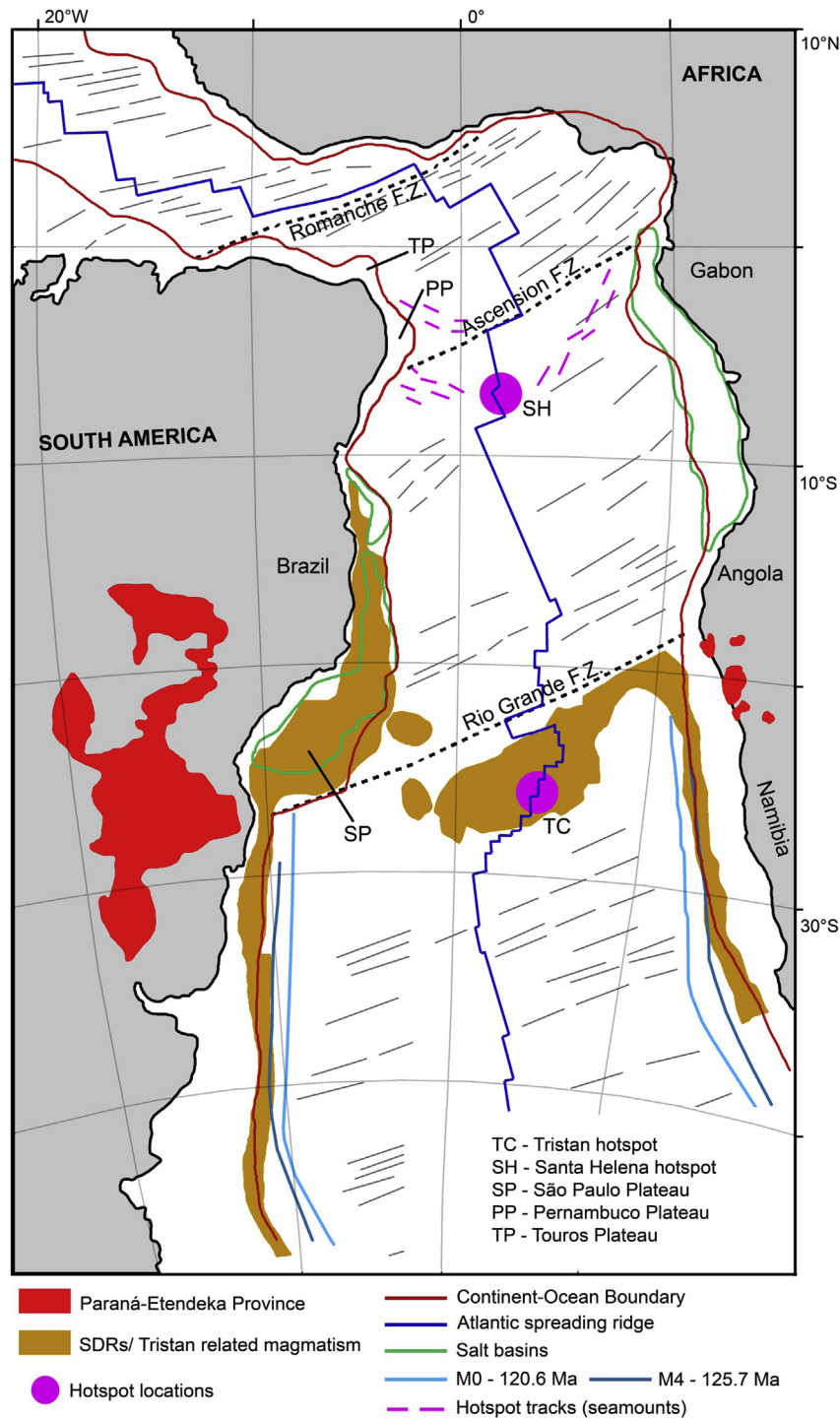


Fig. 3. Palaeogeographic reconstruction of the south Atlantic during the Santonian (83.5 Ma) based on geophysical data, considering a fixed Africa, modified from Torsvik et al. (2009). The authors proposed that at that time the Tristan and Santa Helena hotspots were located close to the spreading ridge. The ages of magnetic anomalies M0 and M4 are based on Müller et al. (1997). The positions of the seamounts that are possibly related to the Santa Helena hot spot are based on O'Neil et al. (2005), Adam et al. (2007) and Peyve and Skolotnev (2014).

However, the lack of age data for the oceanic crust in the transition of the continental crust off the Pernambuco Plateau and of the volcanic rocks in the plateau make it difficult to correlate the magmatism in the onshore and offshore regions. Thus, the influence of a hotspot in the formation of the plateau and in the origin of the volcanic structures observed in the offshore region is little studied.

3. Materials and methods

3.1. Seismic data

This study is based mainly on the analysis of 143 time-migrated 2D seismic sections that were obtained from the BDEP-ANP. The set of seismic sections covers almost the entire Pernambuco Plateau

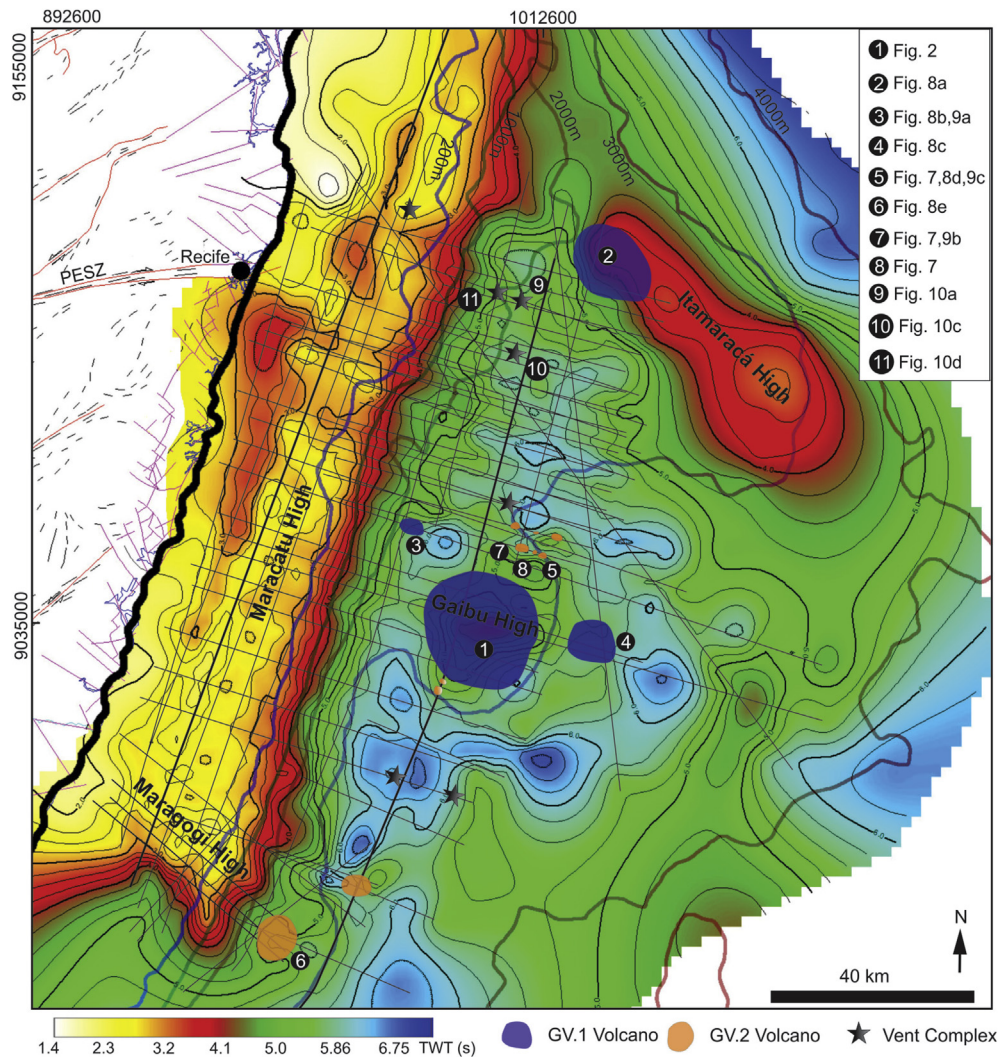


Fig. 4. Map showing the locations of the 59 selected seismic sections across the offshore domains of the Pernambuco Basin; they were selected to best describe the volcanic structures. The basement structural contour in time is also shown, revealing the main topographic highs and depocentres of the basin. The blue polygons indicate the location of the GV1 volcanic group, the orange polygons indicate the volcanic structures included in the GV2 group, and the black stars indicate the locations of vents. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

(Fig. 4). The surveys represent a set of different generations of data with different qualities and imaging depths, which therefore needed to be integrated to allow the interpretation of regional features, as well as the basement contour and the main seismic sequences. After the interpretation of the regional sequences, a set of 59 seismic lines was selected that possessed the best imaging quality and had a total length of 4339.5 km (Fig. 4). The selected sections were used to perform a detailed interpretation of the volcanic features in the region (Fig. 4). The selected set of 2D seismic sections have imaging depths that vary from 8 to 12 s two-way time (TWT) and cover an area of the PEP of approximately 13,915 km² (Figs. 1 and 4). All the volumes were normalized to represent the peak of the wavelets as the normal polarity. Post-processing procedures, which mainly consisted of frequency filters, were applied to reduce problems related to the noise to signal ratio. Band pass filters were applied to produce different versions of the original volumes by emphasizing high frequencies (50 Hz) and low frequencies (15 Hz). This procedure was performed to improve the detection of volcanic features, which are normally associated with high amplitudes and the strong attenuation of the seismic signal, and can be highlighted using low frequency filtering (Rohrman, 2007).

The investigation was limited by the minimum and maximum spacings between the 2D seismic sections, which are 2 and 18 km, respectively. The resolution of the seismic data is also very important because in deeper regions the signal/noise ratio and resolution decrease due to the acquisition processes, indicating that the identification of structures in deep regions of the sedimentary cover is difficult. For this reason, this investigation mainly concentrated on the post-rift interval.

3.2. Geophysical surveys

The potential field dataset, which was acquired from aerial and maritime surveys, was obtained from the BDEP-ANP. The aeromagnetic survey, which is called the “Platô de Pernambuco”, was acquired by Petrobras S/A and Lasa/Prospec in 1988; it covered most of the Pernambuco Basin region and encompassed the onshore and the offshore areas. The maritime magnetic and gravimetric data were acquired together during the 02-VB00-2D-BM-SEAL 2D seismic program in the year 2000. This set of geophysical surveys consists of magnetic and gravimetric profiles that were acquired along each of the 2D lines of the seismic program.

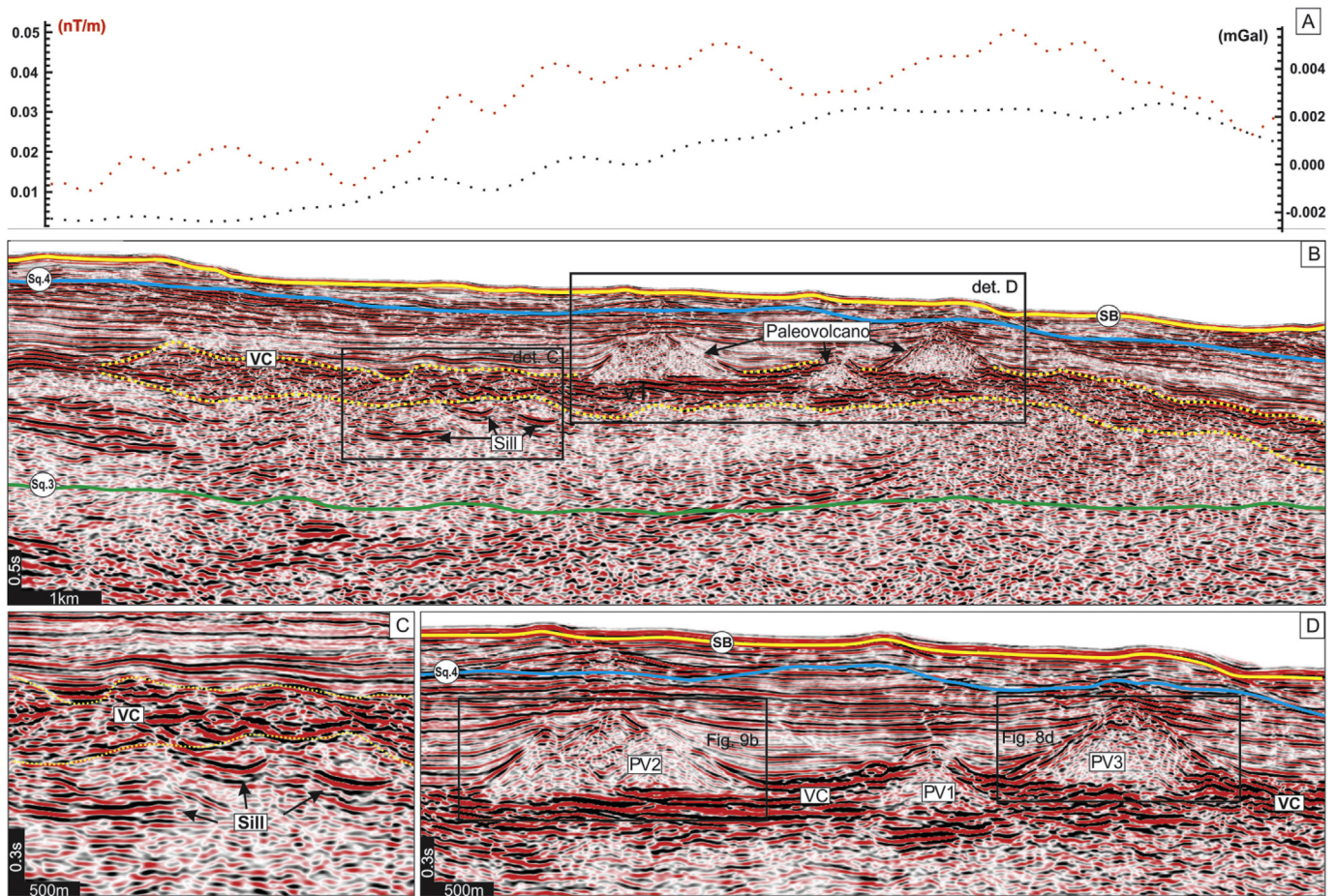


Fig. 7. Seismic section (see the location in Fig. 4) showing a series of volcanic structures. A) Magnetic and gravimetric curves acquired over the seismic section showing an anomaly caused by the volcanic structures. B) Examples of the interpreted volcanic buildings (PV1–PV3), sills and related sequences of volcaniclastic deposits (VC—dotted yellow line). SB = Sea bed; Sq.4 = Middle Miocene Unconformity; Sq.3 = Maastrichtian Unconformity. C) Detail of volcaniclastic deposits and sill intrusions presenting high amplitudes with abrupt terminations. D) Detail of cone-shaped volcanic buildings and volcaniclastic deposits between them. PV2 is interpreted as having a polygenetic evolution. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

marks the base of the volcanic structures, and (2) the TV horizon marks the top of the volcanic structures. However, it is worth noting that the measured heights of the volcanoes depend on the point of intersection of the 2D seismic profile and the volcanic structure (Magee et al., 2013). Those two markers were mapped in all the seismic sections that intersected the volcanic structures. The downlap terminations of the TV horizon correspond to the outer limits of each structure (Fig. 8). The PS horizon normally exhibits a high-amplitude reflector associated with the palaeo-seabed, over which the magmatic extrusion formed. This reflector decreases sharply in amplitude below the volcanic structures, as expected due to seismic signal attenuation. Another important aspect is the upward deflection of the reflector, along with underlying reflectors, below the centre of the volcanic structures as a result of the pull-up effect caused by increases in seismic velocity due to the higher density of volcanic rocks that form the structures (Figs. 8a–b and 9).

In the literature, vent complexes were previously named (1) dyke-fed volcanic vents and volcanoes (Joppen and White, 1990; Skogseid et al., 1992; Davies et al., 2002), and (2) hydrothermal vents (Bell and Butcher, 2002; Jamtveit et al., 2004; Planke et al., 2005). However, studies based on analyses of data from the field and from wells (Gevers, 1928; Jamtveit et al., 2004; Svensen et al., 2006) showed that the composition of vent complexes varies from almost entirely volcanic to almost completely sedimentary deposits (Du Toit, 1904, 1912; Gevers, 1928; Seme, 1997; Dingle

et al., 1983; Woodford and Chevallier, 2001; Jamtveit et al., 2004).

Vent complexes are pipe-like complexes formed by the fracturing, transport, and eruption of hydrothermal fluids and sediments that are normally triggered by sill intrusions (Jamtveit et al., 2004; Planke et al., 2005; Hansen, 2006). Heating from a sill intrusion increases the pressure of pore fluids in the host rocks, leading to metamorphic reactions near the intrusion (Fig. 5). When the fluid pressure exceeds the lithostatic load pressure, the overburden rocks are fractured, and a column of gases rises toward the surface, remobilizing unconsolidated sediments and forming an inward/outward-dipping strata near the conduit zone. When the rising gas reaches the surface, a blowout crater is produced, forming the upper-part of the vent complex. The upper part may resemble an eye, dome, or crater (Fig. 5). The shape of the eye and dome-shaped upper part is generally convex and is not a result of the eruption process but a differential compaction process; the crater infill experiences less compaction than the surrounding sedimentary strata (Hansen, 2006).

Vent complexes are usually represented as poorly imaged structures in seismic sections, implying that the geometry of the upper part cannot be easily recognized in most cases (Hansen, 2006). The identification of vent complexes depends on (1) the quality of the seismic survey, 2) the length of its upper part, and 3) erosion processes affecting the upper part of the vent complex. In general, a vent complex needs to be intersected by a seismic line

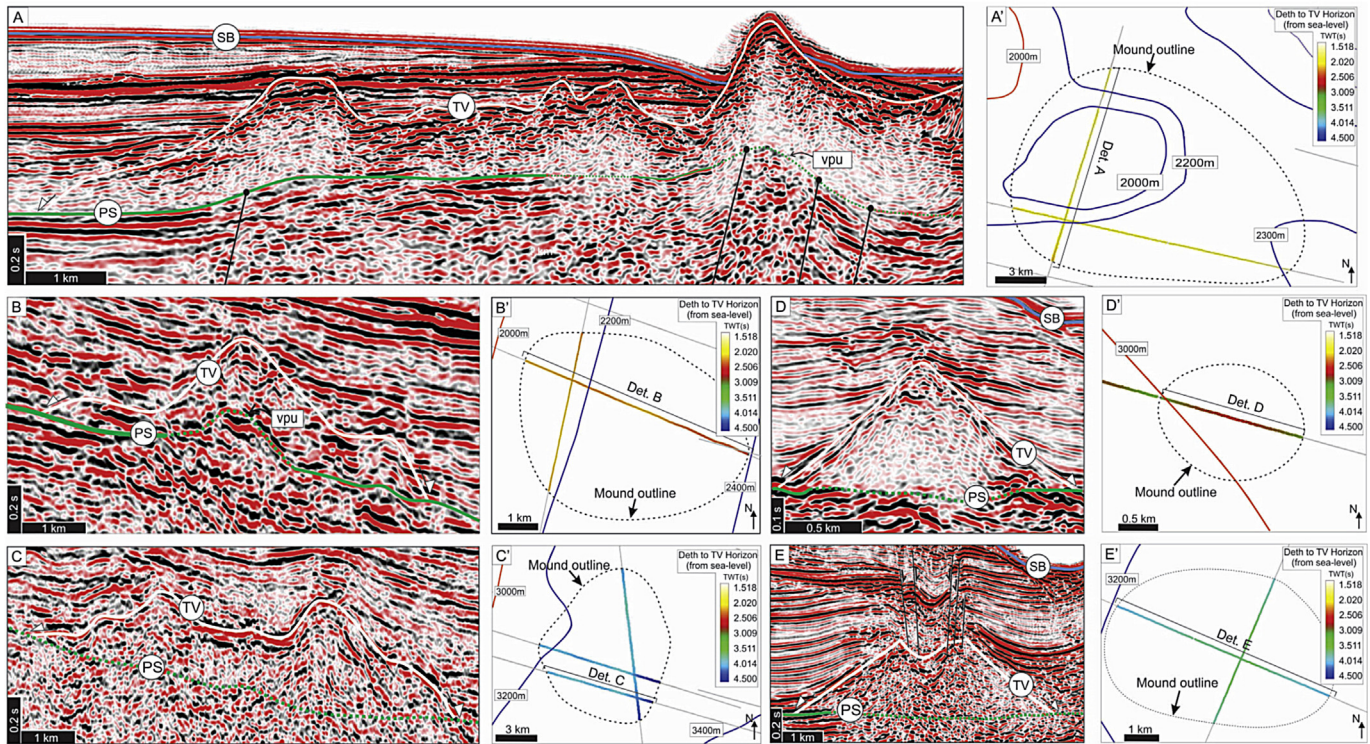


Fig. 8. Volcanic structures observed in seismic sections of the Pernambuco Plateau. A to E) composed detail of the samples and the location of the structure shown in Fig. 4. A, B, and C) volcanoes of group GV1. D and E) volcanoes of group GV2. The dotted lines represent the estimated diameters of the structure as interpreted in intersecting seismic sections (vpu – velocity pull-up, PS – reflector marking the palaeo seabed horizon that served as the base for extrusive building, TV – reflector marking the top of the horizon).

within 0.75–1 km from the centre of the structure for it to be well imaged in a seismic profile (Planke et al., 2005). In this study, the spacings of the 2D seismic sections are larger than 1 km, and therefore, the occurrence of vent complexes in the study area is expected to be more than the recorded value (Fig. 4). Hence, we adopted the approach presented by Planke et al. (2005) to characterize vent complexes (Fig. 5). Thus, four parameters regarding the general aspects of the vent complexes and the host sedimentary strata were analyzed: 1) the size and geometry of the upper part of the vent complex, 2) the configuration of seismic facies of the overlying reflections, 3) the configuration of the seismic facies of the underlying reflections, and 4) the relationships between the basal and overlying sedimentary strata in the upper part of the vent complex (Planke et al., 2005).

4. Results

4.1. Seismic Stratigraphy

Due to the lack of offshore wells, the ages of the main seismic sequences are based on available data from the onshore part of the basin and from comparisons with available data from the offshore region of the neighbouring Alagoas Basin (Mohriak et al., 1998, 2000; Campos Neto et al., 2007) (Figs. 2 and 6). Thus, for practical purposes, four main seismic sequences were defined in our interpretation: Sq.1 – rift phase 1 (Aptian) and rift phase 2 (Albian); Sq.2 – Cretaceous post-rift (Albian-Maastrichtian); Sq.3 – Lower Cenozoic post-rift (Maastrichtian-Middle Miocene); and Sq.4 – Upper Cenozoic post-rift (Middle Miocene-Recent) (Fig. 6). The two phases of rifting have previously been discussed by Matos (1999) and Barbosa et al. (2014).

The rift sequence is generally represented by discontinuous reflections with low amplitudes and low frequencies and that are

disrupted by a large number of faults. In some regions, preserved blocks show locally parallel configurations, and in some sections it is possible to identify the intra-rift unconformity from the top of the first rift phase. In the borders of the inner basin and the Maracatu High (Fig. 4), chaotic to free seismic facies probably indicate the occurrence of conglomerates derived by mechanical deformation during the rift phases. An increase in the continuity and frequency of the reflectors can be noted near the top of the Sq.1 rift sequence, which possibly indicates the beginning of sag deposit formation (Figs. 2 and 6). A salt layer is interpreted in the rift sequence as being related to the first rift phase. The layer has been squeezed through the second rift sequence, forming diapirs and other structures related to its lateral inflation. The deformation of the salt layer, which migrated from proximal to distal regions due to the forces applied during basin subsidence, produced local compressional features, as in the schematic depicted in Fig. 2.

The Cretaceous post-rift seismic sequence (Sq.2) probably contains sedimentary deposits of the Albian-Maastrichtian interval. The base of this sequence shows evidence of the most significant flooding pulse in the basin, which is represented in the onshore region by the Estiva Formation (Lima Filho, 1998). The pulse was probably related to the eustatic maximum that occurred during the Cenomanian-Turonian interval, which marked a stage of deep circulation of oceanic waters across the Atlantic Ocean (Pletsch et al., 2001). In the northern PEP, the depositional event is limited by an unconformity that apparently represents a strong erosive event across the basin.

The Sq.2 seismic sequence is characterized by continuous internal reflections with medium and low amplitudes and frequencies. These reflections are typically parallel in the proximal region of the basin, transitioning to a freer internal configuration with incipient parallel reflections in the distal regions of the PEP (Fig. 6).

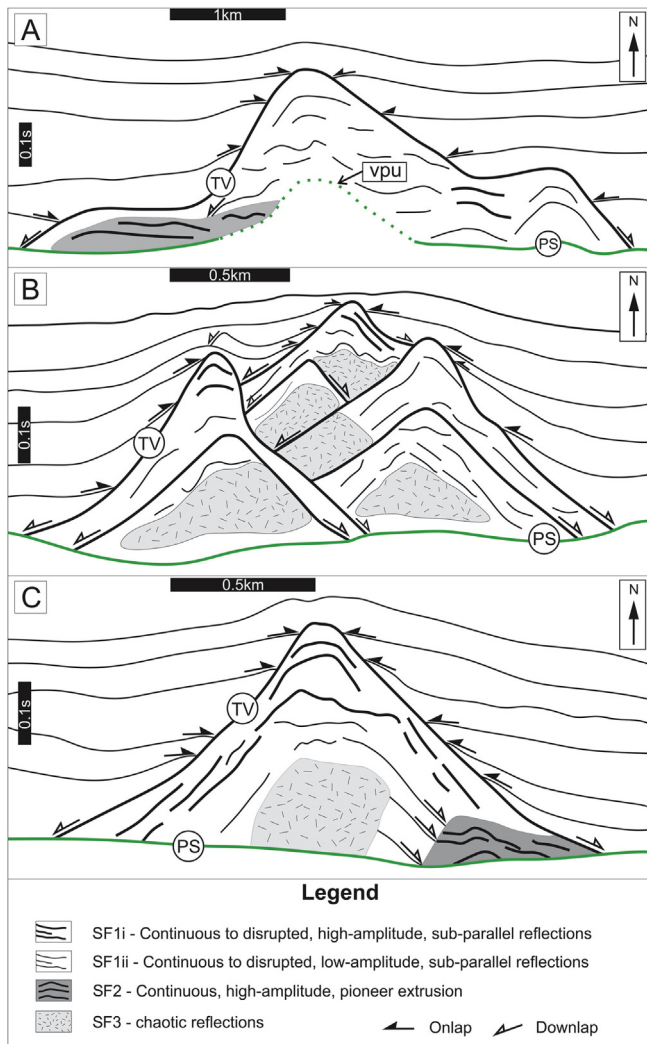


Fig. 9. Schematic of the three groups of strata that form the volcanic structures, based on the seismic facies interpretation. A) Schematic based on the volcano in Fig. 8b, B) schematic based on the interpretation of the structure in Fig. 7d, and C) schematic based on the interpretation of the structure in Figs. 7d and 8d.

The Lower Cenozoic post-rift seismic sequence (Sq.3) comprises deposits of the Maastrichtian–Middle Miocene interval. In the neighbouring basin, this sequence is mainly related to a regressive event that is recognized in the Alagoas Basin (Campos Neto et al., 2007). Evidence of the regressive cycle is well recorded in the dipping seismic sections observed herein in the offshore region of the Pernambuco Basin. This process is mainly observed within the platform and is dominated by shallow processes, where the progradation of clinoforms can be clearly identified. This seismic sequence is characterized by a low continuity of internal reflections, low frequencies, and amplitudes that range from low to medium. In the proximal region of the platform, it is mainly marked by prograding clinoforms and a parallel configuration of internal reflections that pass to incipient parallel and free internal reflections in the distal regions.

This work estimates that the Upper Cenozoic post-rift seismic sequence (Sq.4) comprises deposits ranging from Middle Miocene to recent times (Figs. 2 and 6). This depositional sequence is well studied in neighbouring basins, including the Alagoas and Potiguar basins (Feijó, 1994; Campos Neto et al., 2007). Over the platform and in the proximal region of the plateau, this sequence is

characterized by reflections with good continuity, high amplitudes and low frequencies. In the distal region, the sequence is mainly characterized by free to chaotic reflections (Fig. 6).

4.2. Extrusions

Volcanic structures, volcanoclastic sequences and vents were interpreted based on a few key elements such as geometry, seismic facies, reflectivity signals, and cross-cutting relationships; the interpretations were constrained by geophysical data (gravimetric and magnetic signatures). A correlation was found between the structures, and there was a local increase in the gravity and magnetic anomalies obtained in the geophysical 2D profiles (Fig. 7). Fourteen extrusive structures were clearly identified as palaeo-volcanoes over the PEP region (Fig. 4). Most of the volcanoes identified in the post-rift sequences are observed to be positioned within an interval ranging from 0.3 to 1.5 s (TWT), beneath the seafloor, in the central region of the PEP.

Based on the most important set of considerations regarding the morphological parameters used to classify the volcanic structures, the volcanoes identified in the seismic sections of the PEP were classified into two main groups: group 1 (GV1) and group 2 (GV2) (Figs. 4 and 8). The locations and estimated diameters of the GV1 and GV2 structures are indicated by the blue and orange polygons, respectively, in Fig. 4.

The height (TWT)/width ratio of the four structures in GV1 is approximately 0.6. These structures are slightly rounded or have flat tops and are characterized by slightly convex to concave or straight slope profiles (Figs. 8 and 9). Their diameters range from 1.5 to 12 km, and the maximum heights of their cones range from 0.1 to 0.5 s (TWT). The height (TWT)/width ratio of the ten structures in GV2 is approximately 0.2. These structures have a more classical cone-shaped morphology with steeper flanks than those in GV1 (Figs. 7–9). The GV2 structures have sharp peaks and concave to straight slope profiles. Their estimated diameters vary from 0.45 to 4.5 km, and their maximum heights range from 0.03 to 0.6 s (TWT). These structures are buried under onlapping young strata, and they usually show some draped reflections, probably due to a differential compaction process (Figs. 7 and 9).

The GV2 structures have a simple conical shape because of their probable monogenetic evolution (Figs. 7 and 8). An exception observed within that group is that a volcanic structure was classified as a stratovolcano. In that case, high-resolution internal reflections within the structure allow the identification of an inverted “V” shape configuration formed by the accretion of materials during extrusive growth, representing at least six different growth-deposition phases; this is evidence of its polygenetic evolution (Figs. 8 and 9).

A seismic facies analysis allowed the distinction of three groups of seismic facies possibly associated with the evolution of the extrusive processes that created the volcanic structures. These seismic facies were classified into the following groups according to the formation of the volcanic structures: SF1, SF2, and SF3 (Fig. 9). Seismic facies type one (SF1) is present in all the volcanoes and can be further divided into two sub-groups: (i) SF1i, which was formed by medium to high-amplitude reflections that range from continuous to disrupted, and (ii) SF1ii, which is comprised of low-amplitude reflections that also vary from continuous to disrupted. SF1 presents a sheet-like configuration and forms the structures of the GV1 group (Figs. 8a–c and 9). This seismic facies is usually restricted to areas near the flanks of the structures of the GV2 group (Fig. 9b and c). SF1 has a parallel to sub-parallel configuration, but it usually shows concave-downward reflections near the top of the flanks.

The presence of volcanoclastic sequences related to the

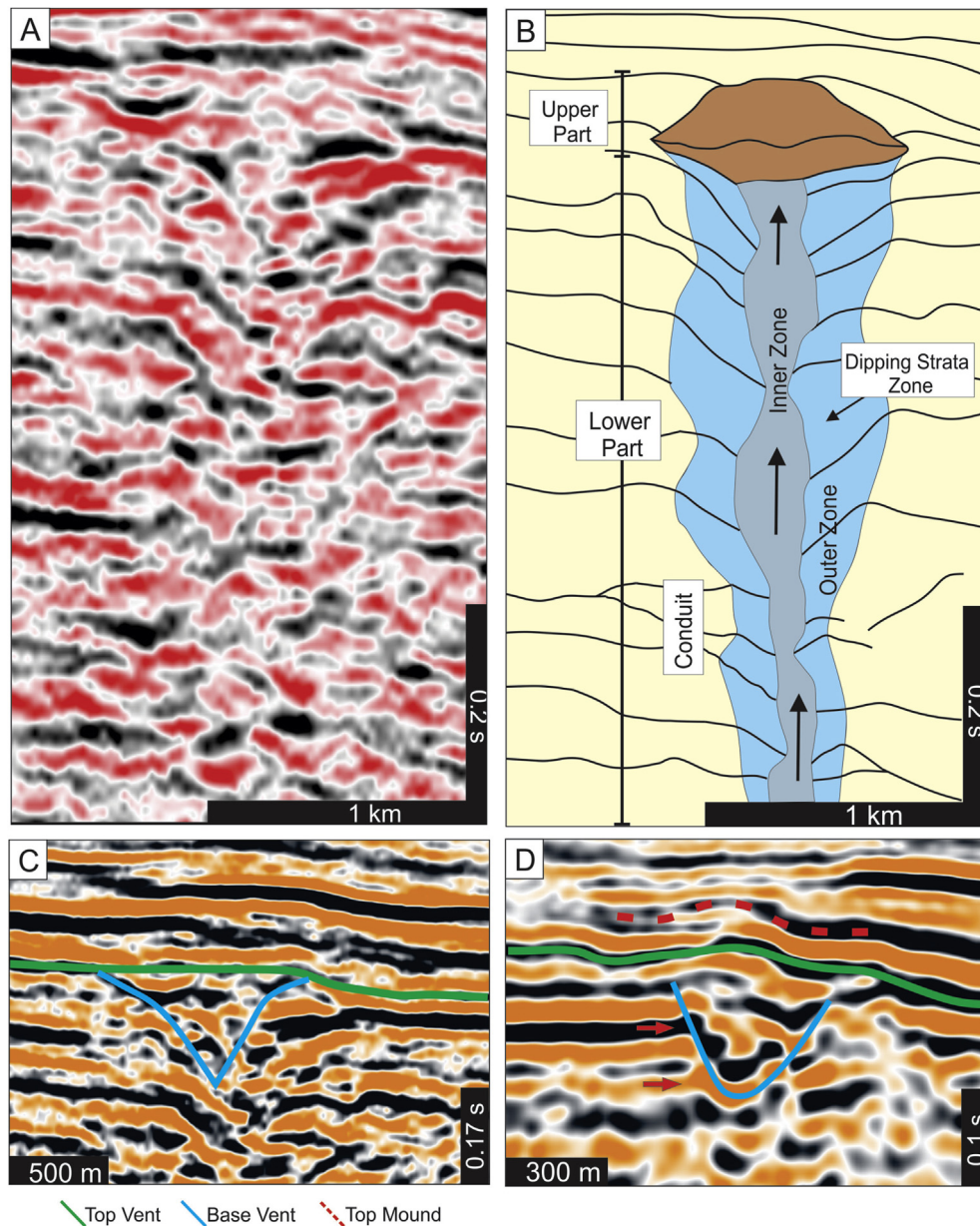


Fig. 10. A) example of a vent complex found in a seismic section over the Pernambuco Plateau and B) a schematic interpretation of its parts. C) A crater-shaped vent complex and D) an eye-shaped vent complex. It is possible to observe the configuration of internal reflections. Note the presence of onlap terminations and the doming of the overlying strata above the upper part of the vent complex (red dashed line). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

formation of the volcanic structures is inferred from the occurrence of strata with a well defined top and poorly defined base. The characteristic set of reflections occurs immediately beneath and around many volcanic structures at the volcanic apron. Those features are characterized by a set of generally disrupted reflections with high amplitudes and locally chaotic configurations (Fig. 7). Those elongated bodies can extend up to approximately 10 km and are interpreted as volcanoclastic sequences or a mixture of cyclic events of flows and pyroclastic deposition.

Seven structures were identified as vent complexes (see the location in Fig. 4), and they commonly have low to moderate amplitude reflections that delimit the top of the upper part of the vent structure and a low-amplitude reflection that delimits the base of the upper part (Fig. 10). Four structures had an eye-shaped geometry, and the other three had a crater-shaped geometry (Fig. 10). The minimum and maximum diameters of the

upper parts of the seven vent complexes varied from 284.23 m to 1.2 km, and their total width varied from 0.092 to 0.244 s (TWT).

Within the eye or crater-shaped strata, the configurations of the overlying reflections varied between chaotic and disrupted, and the underlying reflections of all the vent complexes showed inward dipping around the vent chimney (Fig. 10). The basal relationship with the sedimentary strata is characterized by truncation, whereas the overburden relationship is concordant in most of the examples, but onlap terminations are also observed (Fig. 10).

4.3. Sill intrusions

Volcanic sills are identified in seismic sections of the PEP region mainly beneath the volcanic structures. They are positioned between 1.53 and 4.3 s (TWT) (Fig. 7), mainly within the Cretaceous

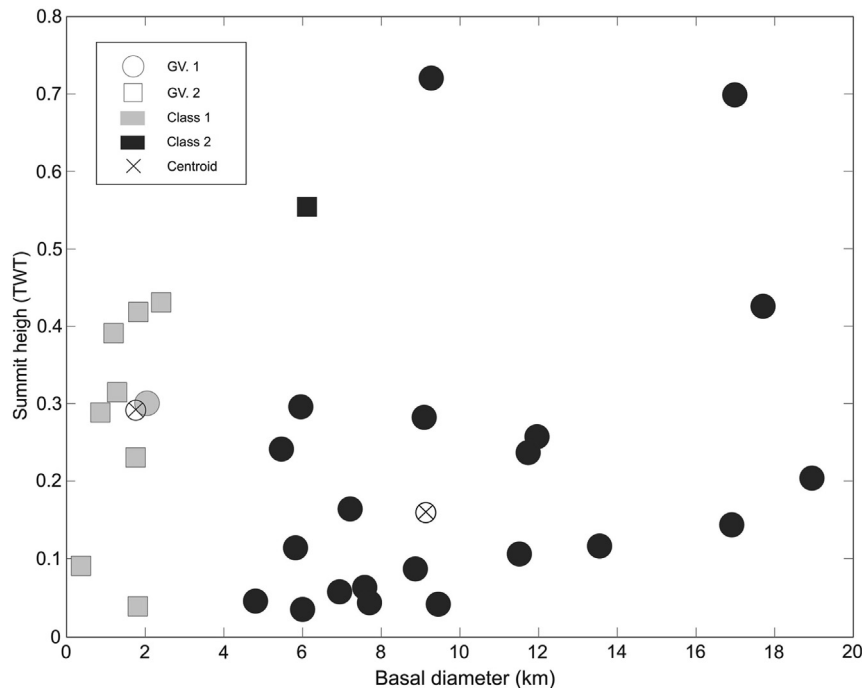


Fig. 11. Cross plot between heights and basal diameters of the volcanoes described in this investigation and in the Seduna Sub-basin offshore Australia (Magee et al., 2013). GV.1 are interpreted as shield volcanoes. GV.2 are interpreted as cone-shaped volcanoes. Class 1 and Class 2 are result of the k-Means Clustering analysis, which identified two different classes represented by two different centroids.

Post-rift sequence (Sq.2) but also in the rift sequence (Sq.1) and in the Palaeogene sequence (Sq.3). The sill intrusions in the plateau could not be completely analyzed due to the attenuation of seismic signals below the depth where abundant volcanic structures are present. The main criteria used here to identify sill intrusions were the high amplitudes of the seismic reflectors, which coincide with short extensions of the event, and abrupt terminations of those reflectors (Planke et al., 2005; Hansen et al., 2008; Rohrman, 2012; Alves et al., 2015). The high amplitudes are a result of the high contrast in impedance that results from the high differences in density/velocity between magmatic rocks and the host sedimentary rocks. In terms of geometry, the reflections appear in a concave shape in the 2D seismic surveys, and most of them are probably saucer-shaped in three dimensions (Galerie et al., 2011; Alves et al., 2015) (Fig. 7). The lengths of the sill structures as observed in the 2D sections range from 0.5 to 1.96 km.

4.4. Interpretation of the results

The morphological characteristics of the GV1 structures agree with those of shield-like volcanoes as defined through seismic data in other parts of the world such as offshore southern Australia (Schofield and Totterdell, 2008; Magee et al., 2013) and offshore western India (Calvès et al., 2011). The morphometric parameters of the GV2 group correspond to the cone- and sub-cone-shaped volcanoes classified by Grosse et al. (2009) in the onshore region of Central America and the southern Central Andes. Moreira et al. (2006) and Oreiro (2006a, 2006b) also identified cone-shaped volcanoes in offshore southeastern Brazil by analyzing 3D seismic data.

A cross plot between the heights of the volcanoes (in time), and their apparent diameters (km) was created. This cross plot presents the data of volcanoes from the Pernambuco Basin and from the Seduna Sub-Basin off the shore of Australia (Magee et al., 2013)

(Fig. 11). The aim of the cross plot was to compare general features between two sets of volcanoes described using similar parameters. To constraining the seismic interpretation of two volcanoes groups (GV.1 and GV.2), it was used a statistical clustering software that clearly identified itself two different classes of volcanoes (Class 1 and Class 2) such as the seismic interpretation realized. The analysis of the cross plot suggests that the volcanoes interpreted as shield volcanoes (GV.1) and cone-shaped volcanoes (GV. 2) show similar ratios in both cases. Group 1 shows no direct relation between height and diameter, but it presents a clearly separation from the GV.2 volcanoes, which have minor basal diameter. Volcanoes of Group 2 show a slight positive correlation between height and diameter (Fig. 11). The outliers observed in the cross plot could be the result of artifacts and specific differences in the constitution of the volcanoes that impact the indirect estimation of their heights.

The strata identified as volcanoclastic sequences in the seismic sections probably have different origins. Facies SF1 probably represents the products of lava flows and hyaloclastite breccias (Symonds et al., 1998; Planke et al., 2000, 2005; Spitzer et al., 2008; Calvès et al., 2011; Magee et al., 2013). Possible slumps or slides of materials that formed the volcanic structures can also be associated with features observed in that seismic facies as high amplitude pods. Seismic facies type two (SF2) typically forms a relatively thin package over which SF1 reflections downlap. It is characterized by a set of continuous and contorted high-amplitude reflections that are sub-parallel and occur over the basal PS horizon. It is present in the GV1 and GV2 structures and may represent magmatic extrusions that first formed over the PS horizon at the beginning of the growth of the volcanic structures (Calvès et al., 2011; Magee et al., 2013) (Fig. 9). Seismic facies type three (SF3) usually forms a part of the central portion at the core of the structures, and it consists of low-amplitude, discontinuous reflections that exhibit a chaotic pattern configuration. The chaotic seismic facies may represent more than

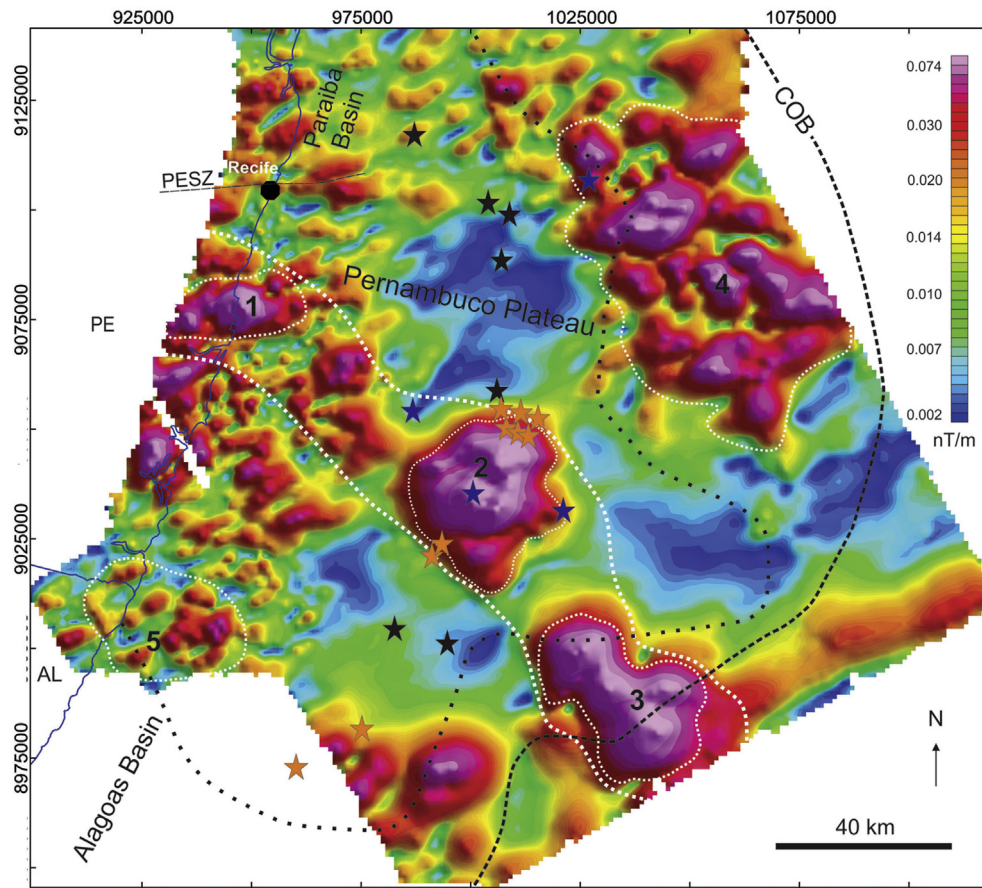


Fig. 12. Map of the analytic signals of the magnetic anomaly in the Pernambuco Basin. Large positive anomalies are visible that are correlated with the Cabo de Santo Agostinho Volcanic High in the coastal zone (No. 1 in the figure), the Gaibu outer high (No. 2), and the outer high at the southeastern border of the plateau (No. 3). The Itamaracá outer high (No. 4) may represent a heterogeneous crustal block that remained as a topographic high during the formation of the Pernambuco Plateau. The Maragogi High limits the PEB from the Alagoas Basin in the south (No. 5). The black dashed line marks the continental-ocean boundary (Magalhães et al., 2014). The thick white dotted line marks the interpreted alignment formed by the magnetic anomalies, which are interpreted as a hot spot track that formed as the South American plate drifted away westward. The thin white dotted lines mark the edges of the large positive anomalies. The black dotted line marks the area covered by the seismic data. The black stars represent vent complexes. The dark blue stars represent the GV1 volcanoes. The orange stars represent the GV2 volcanoes. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

one element in terms of process and lithology: (1) minor magmatic intrusions interconnected in a dense network (Magee et al., 2013); (2) homogenized acoustic impedance due to hydrothermal activity (Planke et al., 2000; Jaya et al., 2010); and (3) fracturing and brecciation of hyaloclastites (Planke et al., 2000) (Fig. 9).

A localized deformation of sedimentary seismic reflections was observed immediately above a GV2 structure in the southern portion of the PEP, near the limits with the Alagoas Basin (Figs. 4 and 8e). That strata deformation was generated by high-angle gravity faults restricted to a zone above the volcano structure. Those features indicate caldera collapse (Fig. 8e).

The parameters of the seismic facies of the volcanoclastic sequence found in the PEP are similar to those of the volcanoclastic sequences in the northern part of the Santos Basin described by Moreira et al. (2006) and Oreiro (2006a, 2006b). In addition, the seismic facies observed in the PEP are similar to the volcanoclastic seismic facies in the southeastern region of the Hawaii islands described by Leslie et al. (2002).

The term volcanoclastic sequence represents a descriptive approach that is attributed to strata rich in volcanic constituents without any genetic implication (Fisher, 1961; Fisher and Schmincke, 1994). Vertical sets of high-amplitude reflections are a result of intercalated deposits with different physical properties. A possible model of their formation is the occurrence of lava flows

deposited during the initial eruptive phase or intertrapped pyroclastic flows that were interbedded with sediments deposited in periods of volcanic quiescence. Shallow sill intrusions may also be present in the volcanoclastic sequences (Oreiro, 2006a).

5. Discussion

Over the last decade, the Pernambuco Basin has attracted renewed interest as a promising oil exploration frontier in north-eastern Brazil. However, knowledge of this region remains poor compared to neighbouring productive basins (Barbosa et al., 2007; Magalhães et al., 2014). Despite the fact that volcanic features such as sills, dykes, and lava flows can be easily identified and assessed in outcrops in the coastal zone of the Pernambuco Basin, a lack of seismic data (Lima Filho, 1998; Nascimento, 2003) and wells spanning the onshore and offshore regions of the basin hinder the detailed study of those structures in the subsurface (Almeida et al., 2005; Barbosa et al., 2014; Maia, 2012; Maia et al., 2012).

The results show the abundance of the extrusive and intrusive features that affect the Cretaceous and Cenozoic strata in the Pernambuco Plateau. Considering the extrapolation of the chronostratigraphy, it is possible to infer that the ages of the volcanoes observed in the sections could be placed into two main intervals, one belonging to Santonian-Maastrichtian and the other

belonging to the Oligocene–Recent. Thus, considering the limitations of the investigation due to the spacing of the 2D seismic sections, our results indicate that the real number of volcanic features in the study area seems to be quite important.

Two main areas of magmatic influence are suggested: a region on the northeastern border of the plateau, where the Itamaraca High is located, and a second sector in the central portion of the plateau, which probably represents the largest volcanic centre of the basin and also coincides with the location of the Gaibu High (Figs. 4 and 12). Both Itamaracá and Gaibu represent outer highs (basement highs) of the plateau, and their origin is still unclear (Magalhães et al., 2014). They could be associated with magmatic doming or may simply represent crust heterogeneities with concentrated magmatism.

Considering the possible origins of the magmatism recorded onshore and offshore the Pernambuco Basin, it is interesting to highlight that the basin can be classified as a magma-poor margin (i.e., an absence of SDRs) (Magalhães et al., 2014). Thus, the magmatic processes that continued after the end of the rift in the distal region, as observed in the seismic sections in this study, could actually represent evidence of the continued action of a local thermal anomaly that affected the hyper-extended crust that formed the plateau after the rifting process. The continuation of the magmatism during the drift period could explain the diachronism between the ages of the Cretaceous magmatic pulse in the onshore regions and Cenozoic magmatism in the offshore regions.

Some considerations regarding the possible hotspot activity that affected the thinned continental crust that formed the plateau domain can be constrained by the geophysical data processed in this research. In the magnetic anomaly map, it is possible to define alignments related to strong positive anomalies that cross the plateau region (Fig. 12). Those anomalies are related to the concentration of volcanics in the onshore and offshore regions. It is important to note that the basement outer highs coincide with the concentration of volcanics (inferred from local and regional magnetic data) in the central portion of the plateau and in its border near the continental-oceanic crustal boundary (Fig. 12). The alignment of the major anomalies that mainly trend NW–SE coincides with the alignment of the Pernambuco Seamount chain that trends 135°–140° and is located to the north of the Pernambuco Plateau, over the oceanic plate, and which could be the expression of a hotspot track (Peyve and Skolotnev, 2014).

This investigation tentatively suggests that the volcanic rocks in the onshore region of the basin, which date to the Upper-Albian, and the younger volcanic rocks in the plateau region mainly originated from the diachronic action of a hotspot, as indicated in the geophysical map in Fig. 12. The hotspot activity probably formed a line of large magnitude intrusions that obliquely trended NW–SE as the South American plate moved away and rotated in a westward direction (Fig. 12). The volcanic structures described herein (volcanoes, sills and vents) were probably the product of that influence, which occurred over a long time. The quantity and quality of data applied in this research was insufficient to analyze the relation between the rift process and volcanism because the role of the rift faults in the conduction of magma through the sedimentary column could have been very important. However, based on seismic sections that show the presence of volcanoes and sills immediately above rift faults, one can argue that this fact suggests that those faults really acted as natural conduits for the ascending magma. Due to the dimension of that process throughout the basin, the nature of magmatism and possibly the long-time increase in the geothermal flow needs to be considered in the petroleum system modelling (Galushkin, 1997; Fjeldskaar et al., 2008).

6. Conclusions

Basic interpretation methods and post-processing procedures, including band pass frequency filtering, were applied to a set of 142 old 2D multichannel seismic sections that cover a large part of the offshore domain of the Pernambuco Basin in northeastern Brazil to investigate volcanic structures. Although constrained by limited geophysical data, it was possible to identify different types of intrusive and extrusive volcanic structures including volcanoes, sills and vent complexes in the offshore domains of the Pernambuco Basin. The analysis of local potential field data allowed the correlation of an increase in gravimetric and magnetometric anomalies with volcanic structures.

The palaeo-volcanoes differed in morphology, but their internal seismic reflections patterns were similar. They were divided into two different groups; the GV1 group of volcanic structures represents a shield-like morphology, and the GV2 group represents a more classical cone to sub-cone-shaped morphology. In contrast to the Albian age of the magmatism recorded in the onshore region of the Pernambuco Basin, the volcanic structures observed in the offshore region formed during the Upper Cretaceous and Cenozoic. Two main intervals are proposed based on the comparative stratigraphic framework: Santonian–Maastrichtian and Oligocene–Recent.

The sill intrusions characterized by high amplitude reflectors with limited extension and abrupt terminations were identified below the volcanic structures. The adjacent regions of the volcanoes showed sequence intervals that are characterized by strong and discontinuous reflections with local chaotic configurations, which were interpreted as volcanoclastic sequences that formed around the extrusion centre because of interbedded magma flows, pyroclastic flows, and/or sediments.

The vent complexes have crater and eye-shaped geometries and are probably related to intrusions that caused highly pressurized and heated gases and fluids to ascend through the sedimentary column.

Considering the seismic coverage applied in this study, a large number of important volcanic structures were observed on the central and northeastern borders of the plateau. The results corroborate previous propositions that the concentration of magmatic structures was caused by a thermal anomaly, over which the hyper-extended continental crust of the Pernambuco Plateau drifted westward due to the opening of the South Atlantic. In complement, an oblique alignment of highly magnetic anomalies observed in the processed total magnetic anomaly map, are associated with magmatic processes, and trend NW–SE is argued to be evidence of the action of a hot spot track in this region.

The findings presented here enhance the understanding of the evolution of the Pernambuco Basin and knowledge of the opening of the South Atlantic in this region. The information provided by this study is critical to better understand the role of volcanic structures in the petroleum system of the Pernambuco Basin, including their potentially negative or positive influences on local and regional scales. Overall, these features can be incorporated into exploration processes as examples for sedimentary basins with similar characteristics.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Seasound Cooperation Project, which was funded by SINOCHEN Petróleo Brasil Ltda. and developed by the Federal University of Pernambuco (UFPE), as well as the National Agency of Petroleum Natural Gas and Biofuels (ANP). We also would like to thank the IHS Kingdom for providing the seismic interpretation software licenses to the Laboratory of

Seismic Stratigraphy of the UFPE (SISMOS-DGEO-UFPE) and Dr. C. Magee for his patient analysis of the manuscript and valuable suggestions that enriched the final version.

References

- Adam, C., Vidal, V., Escartín, J., 2007. 80-Myr history of buoyancy and volcanic fluxes along the trails of the Walvis and St. Helena hotspots (South Atlantic). *Earth Planet. Sci. Lett.* 261 (3–4), 432–442. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.005>.
- Almeida, F.F., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sci. Rev.* 17, 1–29. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](http://dx.doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9).
- Almeida, C.B., Cruz, L.R., Sá, E.F.J., Vasconcelos, P.M.P., Medeiros, W.E., 2005. Tectônica e relações estratigráficas na sub-bacia de Pernambuco, NE do Brasil: contribuição ao conhecimento do rifte Sul-Atlântico. *Bol. Geociências Petrobras* 13 (2), 167–180.
- Alves, T.M., Omosanya, K., Gowling, P., 2015. Volume rendering of enigmatic high-amplitude anomalies in southeast Brazil: a workflow to distinguish lithologic features from fluid accumulations. *Interpretation* 3 (2), A1–A14. <http://dx.doi.org/10.1190/INT-2014-0106.1>.
- Araujo, 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. <http://dx.doi.org/10.1111/ter.12084>.
- Barbosa, J.A., Lima Filho, M.F., 2006. Aspectos estruturais e estratigráficos da faixa costeira Recife-Natal: observações em dados de poços. *Bol. Geociências Petrobras* 14 (2), 287–306.
- Barbosa, J.A., Neumann, V.H., Lima Filho, M., Souza, E.M., Moraes, M.A., 2007. Estratigrafia da faixa costeira Recife-Natal (Bacia da Paraíba e Plataforma de Natal), NE Brasil. *Estud. Geol.* 17 (2), 3–30.
- Barbosa, J.A., Maia, M.F., Lima Filho, M., Magalhães, J.R., Correia Filho, O.J., 2014. Seismic stratigraphy of the onshore portion of Pernambuco Basin: evidence of break up during Middle Albian for the south Atlantic rift in Northeast Brazil. In: AAPG Annual Exhibition and Convention, Houston. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2943.2809>. Search and Discovery Article #30324.
- Bell, B., Butcher, H., 2002. On the emplacement of sill complexes: evidence from the Faroe–Shetland Basin. In: Jolley, D.W., Bell, B.R. (Eds.), *The North Atlantic Igneous Province: Stratigraphy, Tectonic, Volcanic and Magmatic Processes*, Geological Society, London, Special Publications, 197, pp. 307–329. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.197.01.12>.
- Bruto Neves, B.B., Van Schmus, W.R., Fetter, A., 2002. North-western Africa–North-eastern Brazil. Major tectonic links and correlation problems. *J. Afr. Earth Sci.* 34 (3–4), 275–278. [http://dx.doi.org/10.1016/S0899-5362\(02\)00025-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0899-5362(02)00025-8).
- Burgess, P.M., Winefield, P., Minzoni, M., Elders, C., 2013. Methods for identification of isolated carbonates buildups from seismic reflection data. *AAPG Bull.* 97 (7), 1071–1098. <http://dx.doi.org/10.1306/12051212011>.
- Castro, D.L., Bezerra, F.H.R., Sousa, O.L., Fuck, R.A., 2012. Influence of Neoproterozoic tectonic fabric on the origin of the Potiguar Basin, Northeast Brazil and its links with West Africa based on gravity and magnetic data. *J. Geodyn.* 54, 29–42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2011.09.002>.
- Calvès, G., Schwab, A.M., Huuse, M., Clift, P.D., Gaina, C., Jolley, D., Tabrez, A.R., Inam, A., 2011. Seismic volcanostratigraphy of the western Indian rifted margin: the pre-Deccan igneous province. *J. Geophys. Res.* 116, 1–28. <http://dx.doi.org/10.1029/2010JB008062>. B01101.
- Campos Neto, O.P.A.C., Lima, W.S., Cruz, F.E.G., 2007. Bacia de Sergipe-Alagoas. *Bol. Geociências Petrobras* 15 (2), 405–415.
- Chen, Z., Huo, Y., Li, J., Ge, Z., Zhang, Z., Liu, B., 1999. Relationship between tertiary volcanic rocks and hydrocarbons in the Liaohe Basin, People's Republic of China. *AAPG Bull.* 83 (6), 1004–1014.
- Conceição, J.C.J., Zálán, P.V., Dayan, H., 1993. Deformações em rochas sedimentares induzidas por intrusões magmáticas: classificação e mecanismos de intrusão. *Bol. Geociências Petrobras* 7 (1–4), 57–91.
- Córdoba, V.C., Jardim de Sá, E.F., Sousa, D.C., Antunes, A.F., 2007. Bacia de Pernambuco-Paraíba. *Bol. Geociências Petrobras* 15 (2), 391–403.
- Davies, R., Bell, B.R., Cartwright, J.A., Shoulders, S., 2002. Three dimensional seismic imaging of Paleogene dike-fed submarine volcanoes from the northeast Atlantic margin. *Geology* 30 (3), 223–226. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0223:TDSIOP>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0223:TDSIOP>2.0.CO;2).
- Delpino, D.H., Bermudez, A.M., 2009. Petroleum systems including unconventional reservoirs in intrusive igneous rocks (sills and laccoliths). *Lead. Edge* 28 (7), 804–811. <http://dx.doi.org/10.1190/1.3167782>.
- Dingle, R.V., Siesser, W.G., Newton, A.R., 1983. Mesozoic and Tertiary Geology of Southern Africa. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Du Toit, A.L., 1904. Annual Report Geological Comm. Cape of Good Hope for 1903. Geological Survey of Elliot and Xalanga, Tembuland, vol. 8, pp. 169–205.
- Du Toit, A.L., 1912. Annual Report Geological Comm. Cape of Good Hope for 1911. Geological Survey of Part of the Stormbergen, vol. 16, pp. 112–136.
- Fainstein, R., Milliman, J.D., 1979. Structure and origin of three continental-margin plateaus, northeastern Brazil. *AAPG Bull.* 63 (2), 218–238.
- Fairhead, J.D., Binks, R.M., 1991. Differential opening of the Central and South Atlantic Oceans and the opening of the West African rift system. *Tectonophysics* 187, 191–203. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90419-S](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(91)90419-S).
- Feijó, F.J., 1994. Bacias de Sergipe e Alagoas. *Bol. Geociências Petrobras* 8 (1), 149–216.
- Feng, Z., 2008. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: a case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China. *Mar. Pet. Geol.* 25 (4–5), 416–432. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.01.008>.
- Ferreira, J.M., Bezerra, F.H.R., Sousa, M.O.L., Nascimento, A.F., Sá, J.M., França, G.S., 2008. The role of Precambrian mylonitic belts and present-day stress field in the coseismic reactivation of the Pernambuco lineament, Brazil. *Tectonophysics* 456, 111–126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2008.01.009>.
- Fisher, R.V., 1961. Proposed classification of volcanoclastic sediments and rocks. *GSA Bull.* 72 (9), 1409–1414. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[1409:PCOVSA\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[1409:PCOVSA]2.0.CO;2).
- Fisher, R.V., Schminke, H.U., 1994. Volcanoclastic sediment transport and deposition. In: Pye, K. (Ed.), *Sediment Transport and Depositional Processes*, Blackwell Scientific, London, pp. 351–388.
- Fjeldskaar, W., Helset, H.M., Johansen, H., Grunnaleite, I., Horstad, I., 2008. Thermal modelling of magmatic intrusions in the Gjallar Ridge, Norwegian Sea: implications for vitrinite reflectance and hydrocarbon maturation. *Basin Res.* 20 (1), 143–159. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2117.2007.00347.x>.
- Franke, D., 2013. Rifting, lithosphere breakup and volcanism: comparison of magma-poor and volcanic rifted margins. *Mar. Pet. Geol.* 43, 63–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.11.003>.
- Galerne, C.Y., Galland, O., Neumann, E.R., Planke, S., 2011. 3D relationships between sills and their feeders: evidence from the Golden Valley Sill Complex (Karoo Basin) and experimental modelling. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 202, 189–199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.02.006>.
- Galushkin, Y.I., 1997. Thermal effects of igneous intrusions on maturity of organic matter: a possible mechanism of intrusion. *Org. Geochem.* 26 (11–12), 645–658. [http://dx.doi.org/10.1016/S0146-6380\(97\)00030-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0146-6380(97)00030-2).
- Gevers, T.W., 1928. The volcanic vents of the Western Stormberg. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.* 31, 43–62.
- Golonka, J., Bocharova, Y.B., 2000. Hot spot activity and the break-up of Pangea. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 161, 49–69.
- 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. In: Monography Series, 15. American Geophysical Union, pp. 261–291. <http://dx.doi.org/10.1029/GM115p0261>.
- Gries, R.C., Clayton, J.L., Leonard, C., 1997. Geology, thermal maturation and source rocks geochemistry in a volcanic covered basin: San Juan sag, South-Central Colorado. *AAPG Bull.* 81 (7), 1133–1160.
- Grosse, P., Vries, B.V.W., Petrino, I.A., Euillades, P.A., Alvarado, G.E., 2009. Morphometry and evolution of arc volcanoes. *Geology* 37 (7), 651–654. <http://dx.doi.org/10.1130/G25734A.1>.
- Gu, L., Ren, Z., Wu, C., Zhao, M., Qiu, J., 2002. Hydrocarbon reservoirs in a trachyte porphyry intrusion in the eastern depression of the Liaohe Basin, Northeast China. *AAPG Bull.* 86 (10), 1821–1832. <http://dx.doi.org/10.1306/61EEDD8C-173E-11D7-8645000102C1865D>.
- Gunn, P.J., 1997. Quantitative methods for interpreting aeromagnetic data: a subjective review. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.* 17 (2), 105–113.
- Hansen, D.M., 2006. The morphology of intrusion-related vent structures and their implications for constraining the timing of intrusive events along the NE Atlantic margin. *J. Geol. Soc.* 163, 789–800. <http://dx.doi.org/10.1144/0016-76492004-167>.
- Hansen, D.M., Redfern, J., Federici, F., Biasse, D., Bertozzi, G., 2008. Miocene igneous activity in the Northern Subbasin, offshore Senegal, NW Africa. *Mar. Pet. Geol.* 25 (1), 1–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.04.007>.
- Hasenaka, T., 1994. Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Central Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 63, 13–31. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90016-7](http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273(94)90016-7).
- Hawland, H.M., 1990. Diagenesis and reservoir potential of volcanogenic sandstones - Cretaceous of the Surat Basin, Australia. *Sediment. Geol.* 66 (3–4), 181–195. [http://dx.doi.org/10.1016/0037-0738\(90\)90059-3](http://dx.doi.org/10.1016/0037-0738(90)90059-3).
- Holford, S.P., Schofield, N., MacDonald, J.D., Duddy, I.R., Green, P.F., 2012. Seismic analysis of igneous systems in sedimentary basins and their impacts on hydrocarbon prospectivity: examples from the Southern Australian margin. *Aust. Pet. Prod. Explor. Assoc. J.* 52, 229–252.
- Hou, L., Yang, C., Yang, F., Lou, X., Wei, Y., 2015. Petroleum geology of Carboniferous volcanic weathered crust in northern Xinjiang, China. *Bull. Can. Pet. Geol.* 63 (2), 171–191. <http://dx.doi.org/10.2113/jgscpgbull.63.2.171>.
- Huafeng, T., Phiri, C., Youfeng, G., Yulong, H., Weihua, B., 2015. Types and characteristics of volcanostratigraphic boundaries and their oil-gas reservoirs significance. *Acta Geol. Sin.* 89 (1), 163–174. <http://dx.doi.org/10.1111/1755-6724.12402>.
- Jackson, M.P.A., Cramez, C., Fonck, J., 2000. Role of subaerial volcanic rocks and mantle plumes in creation of South Atlantic margins: implications for salt tectonics and source rocks. *Mar. Pet. Geol.* 17 (4), 477–498. [http://dx.doi.org/10.1016/S0264-8172\(00\)00006-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0264-8172(00)00006-4).
- Jamtveit, B., Svensen, H., Podladchikov, Y., Planke, S., 2004. Hydrothermal vent complexes associated with sill intrusions in sedimentary basins. In: Breitzkreuz, C., Petford, N. (Eds.), *Physical Geology of High-level Magmatic Systems*, Geological Society, London, Special Publications, 234, pp. 233–241. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.234.01.15>.
- Jaya, M.S., Shapiro, S.A., Kristinsdóttir, L.H., Bruhn, D., 2010. Temperature dependence of seismic properties in geothermal rocks at reservoir conditions. *Geothermics* 39, 115–123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.12.002>.

- Jin, Q., Shousheng, X., Lu, P., 1999. Catalysis and hydrogenation: volcanic activity and hydrocarbon generation in rift basins, eastern China. *Appl. Geochem.* 14 (5), 547–558. [http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927\(98\)00086-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927(98)00086-9).
- Jin, C., Pan, W., Qiao, D., 2013. Volcanic facies and their reservoir characteristics in Eastern China basins. *J. Earth Sci.* 24 (6), 935–946. <http://dx.doi.org/10.1007/s12583-013-0380-8>.
- Jinglam, L., Chengli, Z., Zhihao, Q., 1999. Volcanic reservoir rocks: a case study of the Cretaceous Fenghuadian suite, Huanghua basin, Eastern China. *J. Pet. Geol.* 22 (4), 397–415. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-5457.1999.tb00476.x>.
- Jiyan, L., Xuanlong, X., Zhe, S., Xiaoting, X., Yu, R., 2014. Thermal simulation of basic volcanic fluid influence on different source rocks. *Chin. J. Geochem.* 33, 168–172. <http://dx.doi.org/10.1007/s11631-014-0673-3>.
- Joppen, M., White, R.S., 1990. The structure and subsidence of Rockall Trough from two-ship seismic experiments. *J. Geophys. Res.* 95, 19821–19837. <http://dx.doi.org/10.1029/JB095iB12p19821>.
- Kawamoto, T., 2001. Distribution and alteration of the volcanic reservoir in the Minami-Nagaoka gas field. *J. Jpn. Assoc. Pet. Technol.* 66 (1), 46–55.
- Klärner, A., Ujetz, B., Fontana, R.L., 2008. Enhanced depositional and AVO models for lithologically complex sandstones in the Santos Basin, offshore Brazil. *Pet. Geosci.* 14 (3), 235–243. <http://dx.doi.org/10.1144/1354-079308-760>.
- Lee, G.H., Kwon, Y.I., Yoon, C.S., Kim, H.J., Yoo, H.S., 2006. Igneous complexes in the eastern Northern South Yellow Sea Basin and their implications for hydrocarbon systems. *Mar. Pet. Geol.* 23 (6), 631–645. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2006.06.001>.
- Lenhardt, N., Götz, A., 2011. Volcanic settings and their reservoir potential: an outcrop analog study on the Miocene Tepoztlán Formation, Central Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 204, 66–75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.03.007>.
- Leslie, S.C., Moore, G.F., Morgan, J.K., Hills, D.J., 2002. Seismic stratigraphy of the frontal Hawaiian Moat: implications for sedimentary processes at the leading edge of an oceanic hotspot trace. *Mar. Geol.* 184 (1–2), 143–162.
- Levin, L.E., 1995. Volcanogenic and volcanoclastic reservoir rocks in Mesozoic-Cenozoic island arcs: examples from the Caucasus and the NW Pacific. *J. Pet. Geol.* 18 (3), 267–288. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-5457.1995.tb00906.x>.
- Lima Filho, M.F., 1998. *Análise Estrutural e Estratigráfica da Bacia Pernambuco* (Doctorate Thesis). Geosciences Institute, São Paulo University IAG-USP, São Paulo, 139 pp.
- Long, L.E., Sial, A.N., Nekvasil, H., Borba, G.S., 1986. Origin of Granite at Cabo de Santo Agostinho, Northeast Brazil. *Contrib. Mineral. Petrol.* 92, 341–350.
- Luo, J., Morad, S., Liang, Z., Zhu, Y., 2005. Controls on the quality of Archean metamorphic and Jurassic volcanic reservoir rocks from the Xinglongtai buried hill, Western depression of Liaohai Basin, China. *AAPG Bull.* 89 (10), 1319–1346. <http://dx.doi.org/10.1306/05230503113>.
- Mabesoone, J.M., Alheiros, M.M., 1993. Evolution of the Pernambuco-Paraíba-Rio Grande do Norte Basin and the problem of the south Atlantic connection. *Geol. Mijnb.* 71, 351–362.
- Mango, F.D., 1992. Transition metal catalysis in the generation of petroleum and natural gas. *Geochim. Cosmochim. Acta* 56 (1), 553–555. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90153-A](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(92)90153-A).
- Magalhães, J.R., Barbosa, J.A., Oliveira, J.T.C., Lima Filho, M.F., 2014. Characterization of the ocean-continent transition in the Paraíba Basin and natal platform region, NE Brazil. *Rev. Bras. Geofísica* 32 (3), 481–496.
- Magalhães, J.R.G., 2015. *Compartimentação tectono-sedimentar da bacia da Paraíba, a partir da integração de métodos potenciais e interpretação sísmica de dados offshore* (Master Dissertation Thesis). Post-Graduation Program in Geosciences, Department of Geology, Federal University of Pernambuco, Recife – Brazil, 86 pp.
- Magee, C., Hunt-Stewart, E., Jackson, C.A.L., 2013. Volcano growth mechanisms and the role of sub-volcanic intrusions: insights from 2D seismic reflection data. *Earth Planet. Sci. Lett.* 373, 41–53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.04.041>.
- Magee, C., Duffy, O.B., Purnell, K., Bell, R.E., Jackson, C.A.-L., Reeve, M.T., 2015. Fault-controlled fluid flow inferred from hydrothermal vents imaged in 3D seismic reflection data, offshore NW Australia. *Basin Res.* 1–20. <http://dx.doi.org/10.1111/bre.12111>.
- Maia, M.F.B., 2012. *Revisão Estratigráfica do intervalo Aptiano-Albiano da Bacia de Pernambuco Nordeste do Brasil* (Master Dissertation Thesis). Post-Graduation Program in Geosciences, Department of Geology, Federal University of Pernambuco, Recife – Brazil, 226 pp.
- Maia, M.F.B., Barbosa, J.A., Lima Filho, M., Mort, H.P., Santana, F.R., 2012. Características petrográficas e geoquímicas das formações siliciclásticas (Aptiano-Albiano) da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil. *Estud. Geol.* 22 (1), 55–75.
- 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, N.R., Bate, R.H., Clure, V.S. (Eds.), *The Oil and Gas Habitats of the South Atlantic*, *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 153, pp. 55–73. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.153.01.04>.
- Medeiros, V.C., Medeiros, W.E., Sá, E.F.J., 2011. Utilização de imagens aerogamaespectrométricas, Landsat 7 ETM+ e aeromagnéticas no estudo do arcabouço crustal da porção central do domínio da Zona Transversal, Província Borborema, NE do Brasil. *Rev. Bras. Geofísica* 29 (1), 83–97. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2011000100006>.
- Michon, L., Saint-Ange, F., 2008. Morphology of Piton de la Fournaise basaltic shield volcano (La Réunion Island): characterization and implication in the volcano evolution. *J. Geophys. Res.* 113, B03203. <http://dx.doi.org/10.1029/2005JB004118>.
- Mohriak, W.U., Bassetto, M., Vieira, I.S., 1998. Crustal architecture and tectonic evolution of the Sergipe-Alagoas and Jacuipe basins, offshore northeastern Brazil. *Tectonophysics* 288, 199–220.
- Mohriak, W.U., Rosendahl, B.R., Turner, J.P., Valente, S.C., 2000. Crustal architecture of South Atlantic volcanic margins. In: Menzies, M.A., Klemperer, S.L., Ebinger, C.J., Baker, J. (Eds.), *Volcanic Rifted Margin*, 362. Geological Society of America, Boulder, pp. 159–202. Special Paper.
- Moreira, J.B.P., Esteves, C.A., Rodrigues, J.J.G., Vasconcelos, C.S., 2006. Magmatism, sedimentation and stratigraphy of the northern region of the Santos Basin. *Bol. Geociências Petrobras* 14 (1), 161–170.
- Müller, R.D., Roest, W.R., Royer, J.-Y., Gahagan, L.M., Sclater, J.G., 1997. Digital isochrons of the world's ocean floor. *J. Geophys. Res.* 102 (B2), 3211–3214. <http://dx.doi.org/10.1029/96JB01781>.
- Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics* 37 (3), 507–517. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1440276>.
- Nascimento, M.A.L., 2003. *Geologia, geocronologia, geoquímica e petrogênese das rochas ígneas cretácicas da província magmática do Cabo e suas relações com as unidades sedimentares da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil* (Doctorate thesis). Post-Graduation Program in Geology and Geodynamics, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Brazil, 264 pp.
- Neves, S.P., Mariano, G., 1999. Assessing the tectonic significance of a large-scale transcurrent shear zone system: Pernambuco Lineamento, northeastern Brazil. *J. Struct. Geol.* 21. [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141\(99\)00097-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00097-8), 1639–1383.
- Neves, S.P., Lages, G., Brasilino, R.G., Miranda, A.W.A., 2015. Paleoproterozoic accretionary and collisional processes and the build-up of the Borborema Province (NE Brazil): geochronological and geochemical evidence from the Central Domain. *J. S. Am. Earth Sci.* 58, 165–187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2014.06.009>.
- Ngako, V., Njonfang, E., Aka, F.T., Affaton, P., Nnange, J.M., 2006. The north-south Paleozoic to Quaternary trend of alkaline magmatism from Niger-Nigeria to Cameroon: complex interaction between hotspots and Precambrian faults. *J. Afr. Earth Sci.* 45 (3), 241–256. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2006.03.003>.
- Ólavsdóttir, J., Andersen, M.S., Boldreel, L.O., 2015. Reservoir quality of intrabasalt volcanoclastic units onshore Faroe Islands, North Atlantic Igneous Province, Northeast Atlantic. *AAPG Bull.* 99 (3), 467–497. <http://dx.doi.org/10.1306/08061412084>.
- Oliveira, J.T.C., 2013. *Análise integrada de dados geofísicos da transição crustal (continente-oceano) da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil* (Master Dissertation Thesis, Post-Graduation Program in Geosciences). Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil, 65 pp.
- O'Neil, C.D., Mueller, D., Steinberg, B., 2005. On the uncertainties in hot spot reconstructions and the significance of moving hotspot reference frames. *Geochim. Geophys. Res.* 6, Q04003. <http://dx.doi.org/10.1029/2004GC000784>.
- Oreiro, S.G., 2006a. *Interpretação sísmica dos eventos magmáticos Pós-aptianos no Alto de Cabo Frio, Sudeste do Brasil, gênese e relação com os lineamentos pré-sal* (Doctorate Thesis, Post-Graduation Program in Basin Analysis and Mobile Belts). State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 160 pp.
- Oreiro, S.G., 2006b. *Magmatismo e sedimentação em uma área na plataforma continental de Cabo Frio, Rio de Janeiro, no intervalo Cretáceo Superior - Terciário*. *Bol. Geociências Petrobras* 14 (1), 95–112.
- Othman, R., Arouri, K.R., Ward, C.R., McKirdy, D.M., 2001. Oil generation by igneous intrusions in the northern Gunnedah Basin, Australia. *Org. Geochem.* 32 (10), 1219–1232. [http://dx.doi.org/10.1016/S0146-6380\(01\)00089-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0146-6380(01)00089-4).
- Peron-Pinvidic, G., Manatschal, G., Osmundsen, P.T., 2013. Structural comparison of archetypal Atlantic rifted margins: a review of observations and concepts. *Mar. Pet. Geol.* 43, 21–47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.02.002>.
- Planke, S., Symonds, P.A., Alvestad, E., Skogseid, J., 2000. Seismic volcano stratigraphy of large-volume basaltic extrusive complexes on rifted margins. *J. Geophys. Res.* 105 (B8), 19335–19351. <http://dx.doi.org/10.1029/1999JB900005>.
- Planke, S., Rasmussen, T., Rey, S.S., Myklebust, R., 2005. Seismic characteristics and distribution of volcanic intrusions and hydrothermal vent complexes in the Vøring and More basins. In: Doré, A.G., Vining, B.A. (Eds.), *Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives*, Proceedings of 6th Petroleum Geology Conference, pp. 833–844.
- Pletsch, T., Erbacher, J., Holbourn, A.E.L., Kuhn, W., Moullade, M., Obolukunobede, F.E., Söding, E., Wagner, T., 2001. Cretaceous separation of Africa and South America: the view from the West African margin (ODP Leg 159). *J. S. Am. Earth Sci.* 14, 147–174. [http://dx.doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00020-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00020-7).
- Polónia, J.A.P., 1997. *Geometria e cinemática do Rife do Cabo, litoral Sul do Estado de Pernambuco* (Master Dissertation Thesis, Post-Graduation Program in Geology). Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 156 pp.
- Posamentier, H., Aydemir, V., Sipahioğlu, Ö., Korucu, Ö., Stanley, R., Abriel, W., Nantais, P., Welch, R., 2014. Volcanic deposits in the Black Sea – seismic recognition criteria for differentiating volcanics from carbonates. In: AAPG Annual Convention and Exhibition, Houston. Search and Discovery Article #90189.
- Peyve, A.A., Skolotnev, S.G., 2014. Systematic variations in the composition of volcanic rocks in tectono-magmatic seamount chains in the Brazil Basin. *Geochim. Int.* 52 (2), 111–130. <http://dx.doi.org/10.1134/S0016702914020062>.
- Ramachandran, K., Babu, V., Behera, B.K., Harinarayana, T., 2013. Source rock analysis, thermal maturation and hydrocarbon generation using rock-eval pyrolysis in parts of Krishna-Godavari basin, India: a case study. *J. Pet. Explor. Prod.*

- Technol. 3 (1), 11–20. <http://dx.doi.org/10.1007/s13202-012-0041-y>.
- Rand, H.M., Mabesoone, J.M., 1982. Northeastern Brazil and the final separation of south America and Africa. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoeconol.* 38 (3–4), 163–183. [http://dx.doi.org/10.1016/0031-0182\(82\)90002-5](http://dx.doi.org/10.1016/0031-0182(82)90002-5).
- Rateau, R., Schofield, N., Smith, M., 2013. The potential role of igneous intrusions on hydrocarbon migration, West of Shetland. *Pet. Geosci.* 19, 259–272. <http://dx.doi.org/10.1144/petgeo2012-035>.
- Raymond, A.C., Murchison, D.G., 1988. Development of organic maturation in the thermal aureoles of sills and its relation to sediment compaction. *Fuel* 67 (12), 1599–1608. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-2361\(88\)90202-5](http://dx.doi.org/10.1016/0016-2361(88)90202-5).
- Reis, G.S., Mizusaki, A.M., Roisenberg, A., Rupert, R., 2014. Formação Serra Geral (Cratão da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira. *Pesqui. em Geociências* 41 (2), 155–168.
- Reyment, R., Dingle, R., 1987. *Palaeogeography of Adria during the Cretaceous period*. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoeconol.* 59, 93–116.
- Rodriguez Monreal, F., Villar, H.J., Baudino, R., Delpino, D., Zencich, S., 2009. Modeling an atypical petroleum system: a case study of hydrocarbon generation, migration and accumulation related to igneous intrusions in the Neuquen Basin, Argentina. *Mar. Pet. Geol.* 26, 590–605. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.01.005>.
- Roest, W.R., Verhoef, J., Pilkington, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics* 57 (1), 116–125. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1443174>.
- Rohrman, M., 2007. Prospectivity of volcanic basins: trap delineation and acreage de-risking. *AAPG Bull.* 91 (6), 915–939. <http://dx.doi.org/10.1306/12150606017>.
- Rohrman, M., 2012. Seismic delineation of igneous sheet complexes on the Exmouth Plateau (NW Australia): origin, emplacement mechanism and implications for petroleum generation. In: *AAPG International Conference and Exhibition, Singapore. Search and Discovery Article #10444*.
- Rossi, M.J., 1996. Morphology and mechanism of eruption of postglacial shield volcanoes in Iceland. *Bull. Volcanol.* 57 (7), 530–540. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00304437>.
- Santos, E.J., Van Schmus, W.R., Kozuch, M., Brito Neves, B.B., 2010. The Cariris Velhos tectonic event in Northeast Brazil. *J. S. Am. Earth Sci.* 29 (1), 61–76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.003>.
- Schofield, A., Totterdell, J.M., 2008. Distribution, Timing and Origin of Magmatism in the Bight and Eucla Basins. *Geoscience Australia. Record 2008/24*. 19pp.
- Schutter, S.R., 2003. Occurrence of hydrocarbons in and around igneous rocks. In: *Pettford, N., McCaffrey, K.J.W. (Eds.), Hydrocarbons in Crystalline Rocks, Geological Society, Special Publication, 214*, pp. 35–68. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.214.01.03>.
- Seemann, U., Scherer, M., 1984. Volcaniclastics as potential hydrocarbon reservoirs. *Clay Miner.* 19 (9), 457–470. <http://dx.doi.org/10.1180/claymin.1984.019.3.13>.
- Seme, U.T., 1997. Diatreme Deposits Near Rossouw, North Eastern Cape: Sedimentology-volcanology and Mode of Origin. *Geology Honours Project. Department of Geology, Rhodes University, Grahamstown, South Africa*.
- Sial, A.N., 1976. The post-Paleozoic volcanism of northeast Brazil and its tectonic significance. *An. Acad. Bras. Ciências* 48 (Suppl. 1), 299–311.
- Sial, A.N., Long, L.E., Borba, G.S., 1988. Cretaceous Magmatic Province of Cabo, Pernambuco, Northeast Brazil. *Rev. Bras. Geociências* 4 (17), 667–673.
- Skogseid, J., Pedersen, T., Eldholm, O., Larsen, B.T., 1992. Tectonism and magmatism during the NE Atlantic continental break-up: the Vøring Margin. In: *Storey, B.C., Alabaster, T., Pankhurst, R.J. (Eds.), Magmatism and the Causes of Continental Break-up, Geological Society, London, Special Publications, 68*, pp. 305–320. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1992.068.01.19>.
- Smallwood, J., Maresh, J., 2002. The Properties, Morphology and Distribution of Igneous Sills: Modelling, Borehole Data and 3D Seismic from the Faroe-shetland Area. In: *Geological Society of London, Special Publication, 197*, pp. 271–306. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.197.01.11>.
- Smith, D.K., 1996. Comparison of shapes and sizes of seafloor volcanoes on Earth and “pancake” domes on Venus. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 73, 47–64. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273\(96\)00007-8](http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273(96)00007-8).
- Spitzer, R., White, R.S., Christie, P.A.F., 2008. iSIMM Team, 2008. Seismic characterization of basalt flows from the Faroes margin and the Faroe-Shetland basin. *Geophys. Prospect.* 56, 21–31. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2478.2007.00666.x>.
- Sruoga, P., Rubinstein, N., 2007. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina. *AAPG Bull.* 91 (1), 115–129. <http://dx.doi.org/10.1306/08290605173>.
- Svensen, H., Jamveit, B., Planke, S., Chevallier, L., 2006. Structure and evolution of hydrothermal vent complexes in the Karoo Basin, South Africa. *J. Geol. Soc. Lond.* 163, 671–682. <http://dx.doi.org/10.1144/1144-764905-037>.
- Symonds, P.A., Planke, S., Frey, Ø., Skogseid, J., 1998. Volcanic development of the Western Australian continental margin and its implications for basin development. In: *Purcell, P.G., Purcell, R.R. (Eds.), Proceedings of the Petroleum Exploration Society of Australia, Symposium—The Sedimentary Basins of Western Australia, vol. 2. Oxford. Petroleum Exploration Society of Australia, Perth*, pp. 33–54.
- Thouret, J.-C., 1999. Volcanic geomorphology - an overview. *Earth-Science Rev.* 47, 95–131.
- Torsvik, T.H., Rouse, S., Labails, C., Smethurst, M.A., 2009. A new scheme for the opening of the South Atlantic Ocean and the dissection of an Aptian salt basin. *Geophys. J. Int.* 177, 1315–1333. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04137.x>.
- Van Schmus, W.R., Oliveira, E.P., Silva Filho, A.F., Toteu, S.F., Penaye, J., Guimarães, I.P., 2008. Proterozoic links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African fold belt. In: *Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., Brito Neves B.B., De Wit, M.J. (Eds.), West Gondwana: Pre-cenozoic Correlations across the South Atlantic Region, Geological Society, London, Special Publications, 294*, pp. 69–99. <http://dx.doi.org/10.1144/SP294.5>.
- Vauchez, A., Neves, S.P., Caby, R., Corsini, M., Egydio-Silva, M., Arthaud, M., Amaro, V., 1995. The Borborema shear zone system, NE Brazil. *J. S. Am. Earth Sci.* 8 (3–4), 247–266. [http://dx.doi.org/10.1016/0895-9811\(95\)00012-5](http://dx.doi.org/10.1016/0895-9811(95)00012-5).
- Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M., Mackenzie, C., 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *Lead. Edge* 23 (2), 116–119. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1651454>.
- Vernik, L., 1990. A new type of reservoir rock in volcaniclastic sequences. *AAPG Bull.* 74 (6), 830–836. <http://dx.doi.org/10.1306/0C9B23A3-1710-11D7-8645000102C1865D>.
- Wang, P., Chen, S., 2015. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, Northeast China. *AAPG Bull.* 99 (3), 499–523. <http://dx.doi.org/10.1306/09041413095>.
- Watton, T.J., Wright, K.A., Jerram, D.A., Brown, R.J., 2014. The petrophysical properties of hyaloclastite deposits: implications for petroleum exploration. *AAPG Bull.* 98 (3), 449–463. <http://dx.doi.org/10.1306/08141313029>.
- Wilson, M., 1992. Magmatism and continental rifting during the opening of the South Atlantic Ocean: a consequence of Lower Cretaceous super-plume activity? In: *Storey, B., Alabaster, T., Pankhurst, R.J. (Eds.), Magmatism and the Causes of Continental Break-up, Geological Society Special Publication, 68*: 241–255. doi: 10.1144/GSL.SP.1992.068.01.15.
- Wilson, M., Guiraud, R., 1992. Magmatism and rifting in Western and Central Africa, from Late Jurassic to recent times. *Tectonophysics* 213 (1–2), 203–225. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90259-9](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(92)90259-9).
- Woodford, A.C., Chevallier, L., 2001. *Hydrogeology of the Main Karoo Basin: Current Knowledge and Research Needs. Water Research Commission Report, 860*, Pretoria, 310 pp.
- Wu, C., Gu, L., Zhang, Z., Ren, Z., Chen, Z., Li, W., 2006. Formation mechanisms of hydrocarbon reservoirs associated with volcanic and subvolcanic intrusive rocks: examples in Mesozoic-cenozoic basins of eastern China. *AAPG Bull.* 90 (1), 137–147. <http://dx.doi.org/10.1306/07130505004>.
- Wu, X., Liu, T., Su, L., Su, J., 2010. Lithofacies and reservoir properties of Tertiary igneous rocks in Qikou depression, East China. *Geophys. J. Int.* 181 (2), 847–857. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04559.x>.
- Xiao, Q., He, S., Yang, Z., He, Z., Furong, W., Li, S., Tang, D., 2010. Petroleum secondary migration and accumulation in the central Jungar Basin, Northwest China: insights from basin modeling. *AAPG Bull.* 94 (7), 937–955. <http://dx.doi.org/10.1306/12090909002>.
- Xiao-Yin, T., Gong-Cheng, Z., Jian-She, L., Shu-Chun, Y., Song, R., Sheng-Biao, H., 2014. Modelling of thermal effects of igneous intrusions on the temperature field and organic maturity in the Changchang Sag, Qiongdongnan Basin, South China Sea. *Chin. J. Geophys.* 57 (2), 219–229. <http://dx.doi.org/10.1002/cjg2.20098>.
- Yulong, H., Pujun, W., Shuming, C., 2009. Distribution and characteristics of volcanic reservoirs in China. *Glob. Geol.* 12 (2), 64–79. <http://dx.doi.org/10.13969/j.issn1167329736120091021002>.
- Zhang, K., Marfurt, K.J., 2011. Seismic attribute illumination of an igneous reservoir in China. *Lead. Edge* 30 (3), 266–270. <http://dx.doi.org/10.1190/1.3567256>.
- Zou, C., Qu, W., Jia, C., Zhu, R., Zhang, G., Zhao, X., Yuan, X., 2008. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China. *Pet. Explor. Dev.* 35 (3), 257–271. [http://dx.doi.org/10.1016/S1876-3804\(08\)60071-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1876-3804(08)60071-3).
- Zu, D., Jin, Z., Hu, W., Song, Y., Gao, X., 2007. Effect of igneous activity on hydrocarbon source rocks in Jiyang sub-basin, Eastern China. *J. Pet. Sci. Eng.* 59 (3–4), 309–320. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petro.2007.05.002>.

2.2 ARTIGO 2

CARBONATE BUILDUPS OF THE PERNAMBUCO BASIN, NE BRAZIL

Bruno V. Buarque^a, José A. Barbosa^a, José R. G. Magalhães^a, Jefferson T. Cruz Oliveira^a and Osvaldo J. C. Filho^a

^a LAGESE, Department of Geology, Federal University of Pernambuco, Recife 50740-530, Brazil

Artigo submetido no periódico Anais da Academia Brasileira de Ciências, na data de 18 de agosto de 2016.

CARBONATE BUILDUPS OF THE PERNAMBUCO BASIN, NE BRAZIL

Bruno V. Buarque^a, José A. Barbosa^a, Jefferson T. Cruz Oliveira^a, José R. G. Magalhães^a and Osvaldo J. Correia Filho^a

^a Universidade Federal de Pernambuco/UFPE, Departamento de Geologia, LAGESE - Avenida Prof. Moraes Rego, 1235, 50740-530 Cidade Universitária, Recife, PE, Brasil

Abstract

The Pernambuco Basin represent one of the most prominent frontiers for deep water oil and gas exploration off the Brazilian margin. This study aims to identify and describe the occurrence of carbonate buildups in the offshore regions of the basin. The study was based on the analysis of a set of 143 2D time-migrated seismic sections that cover the offshore region of the Pernambuco Basin. The interpretation of the seismic dataset allowed us to define the main seismic sequences related to the main regional pulses of deposition and to identify three main groups of carbonate buildups: 1) shelf margin reefs, 2) patch reefs, and 3) isolated carbonate platforms. The carbonate formed in two main intervals in post-rift sequences, the Santonian-Maastrichtian and the Palaeocene-Middle Miocene, which extend the known periods of carbonate deposit formation in the basin. The formation of carbonate buildups and carbonate platforms was controlled by the tectonic evolution of the Pernambuco Plateau, which created a series of palaeotopographic highs that enabled the establishment of oceanographically and climatically favourable conditions for carbonate formation and deposition. These findings are very important for understanding the evolution of the basin and for future evaluations of its petroleum potential.

Key words - Carbonate Buildup, Pernambuco Basin, Brazilian margin, Seismic Stratigraphy

1. Introduction

The development of a carbonate platform is dictated by many factors, including a combination of tectonics, eustasy, basinal physiography, oceanography and climatic conditions (Fulthorpe and Schlanger 1989; Sun and Esteban 1994; Wilson 2002;

Bachtel et al. 2003). These factors contribute to a variety of types of carbonate buildups, from isolated platforms to rimmed shelf systems, as well as a full spectrum of variations in between (Pomar 2001). The methodologies applied to the identification of these structures in seismic data have seen great advancements bolstered by interest by the petroleum industry (Saller et al. 2004; Melville et al. 2004). The discovery of oil fields associated with carbonate platforms has driven efforts in academic research mainly regarding ancient and recent examples of carbonate platforms in rift marginal basins (Sarg 1988; Kuznetsov 1997; Zampetti et al. 2004, Burgess et al. 2012).

The Pernambuco Basin forms part of the eastern portion of the Brazilian continental platform. This marginal region is formed in the eastern border of the Borborema tectonic province (Almeida et al. 1981; Santos et al. 2010) (Fig. 1). The region is claimed to be the last continental link between South America and Africa before the final breakup and formation of the South Atlantic Ocean (Fainstein and Milliman 1979; Rand and Mabesoone 1992; Mabesoone and Alheiros 1993; Lima Filho 1998; Matos 1999; Nascimento 2003). The Pernambuco Basin presents a region of hyper-extended continental crust, forming a region called the Pernambuco Plateau (Fainstein and Milliman 1979; Gomes et al. 2000; Oliveira 2013; Magalhães et al. 2014), which represents one of the most prominent frontiers for deep water exploration off the Brazilian coast (MME-EPE, 2012). The geology of the Pernambuco Basin in offshore domains is unknown due to the lack of stratigraphic wells. The main tectono-stratigraphic characteristics of the plateau region are based on the interpretation of seismic data and geophysical surveys (Córdoba et al. 2007; Magalhães et al. 2014; Buarque et al. 2016). The inferred model for the basin suggests that the rift deposits are Aptian-Albian in age and are related to two rift phases (Maia et al. 2012; Buarque et al. 2016). The plateau basin also carries a salt layer that has produced halokinetic features, such as diapirs and salt domes (Córdoba et al. 2007; Buarque et al. 2016). Although carbonate rocks have been found in onshore region of the Pernambuco Basin in outcrops and stratigraphic boreholes (Lima and Pedrão 1989; Lima Filho 1998; Córdoba et al. 2007; Barbosa et al. 2008; Maia et al. 2012), the occurrence of carbonate deposits has never been studied in the offshore domain of the Pernambuco Basin.

This paper aims to identify and describe a series of structures that we identified as large carbonate platforms and buildups. The objectives were to verify the occurrence of carbonate structures, mainly based on morphology; suggest a classification; and determine their possible age based on stratigraphic inferences. The methodological

approach was mainly based on the analysis of 2D seismic reflection data covering the plateau region. The results allowed us to create a map with the main occurrences of buildups and classify the occurrences in 03 types of morphologies as well as to infer the age of their formation. The data presented here are useful for the understanding of the evolution and stratigraphy of the last bridge between South America and Africa during the Pangea breakup. It is also important for future exploration projects in the basin, once carbonate buildups can represent important oil and gas fields (Kusumastuti et al. 2002; Saller et al. 2004; Burgess et al. 2013; Koša et al. 2015).

2. Geological Setting

The Pernambuco Basin is located in the eastern part of the Borborema Province, which represents the northeastern portion of the South American Platform (Almeida et al. 1981; Van Schmus et al. 2008; Santos et al. 2010; Araujo et al. 2013), in northeastern Brazil (Fig. 1). The Borborema Province is regarded as a structural province that consists of a complex collage of continental masses (Almeida et al. 1981; Santos et al. 2010), and its evolution involved a series of Precambrian orogenic events (Santos et al. 2010; Neves et al. 2012) and late rifting stages that culminated in continental breakup during the Cretaceous (Chang et al. 1992; Matos 1999).

The Pernambuco Basin is separated from the Alagoas Basin to the south by the Maragogi-Barreiros High and from the Paraíba Basin to the north by the Pernambuco Shear Zone (Figs. 1 and 2) and is linked to the Southern Domain (SD) (Fig. 1). This basin exhibits a narrow coastal zone that was implanted over a narrow graben, which formed an interior basin, in the continental platform (Fig. 2) (Maia 2012; Barbosa et al. 2014; Buarque et al. 2016). The platform break is marked by an outer hinge that runs parallel to the coast line and comprises the Maracatu High. The distal offshore region of the Pernambuco Basin developed over a large region of hyper-extended continental crust (Magalhães et al. 2014), which formed the Pernambuco Plateau (Fainstein and Milliman 1979; Gomes 2000; Oliveira 2013), and extends to isobaths of approximately 3000 m (Figs. 1 and 2). The Pernambuco Plateau comprises at least four main basement lows and a central outer high, that is, the Gaibu High, which trends E-W (Figs. 2 and 3). Another important outer high, which trends NW-SE, is located on the northeastern border of the plateau, the Itamaracá High (Fig. 3). The main sets of structures that controlled the Pernambuco Basin evolution are ductile Precambrian shear zones that

trend mostly NE–SW and E–W, which were reactivated as strike-slip and normal faults during the rifting process. The second main group of structures are oblique transfer faults that trend NW–SE (Polônia 1997; Lima Filho 1998). Additionally, normal faults that trend N–S, WNW–ESE and NNW–SSE formed as the basin opened (Figs. 1 and 2).

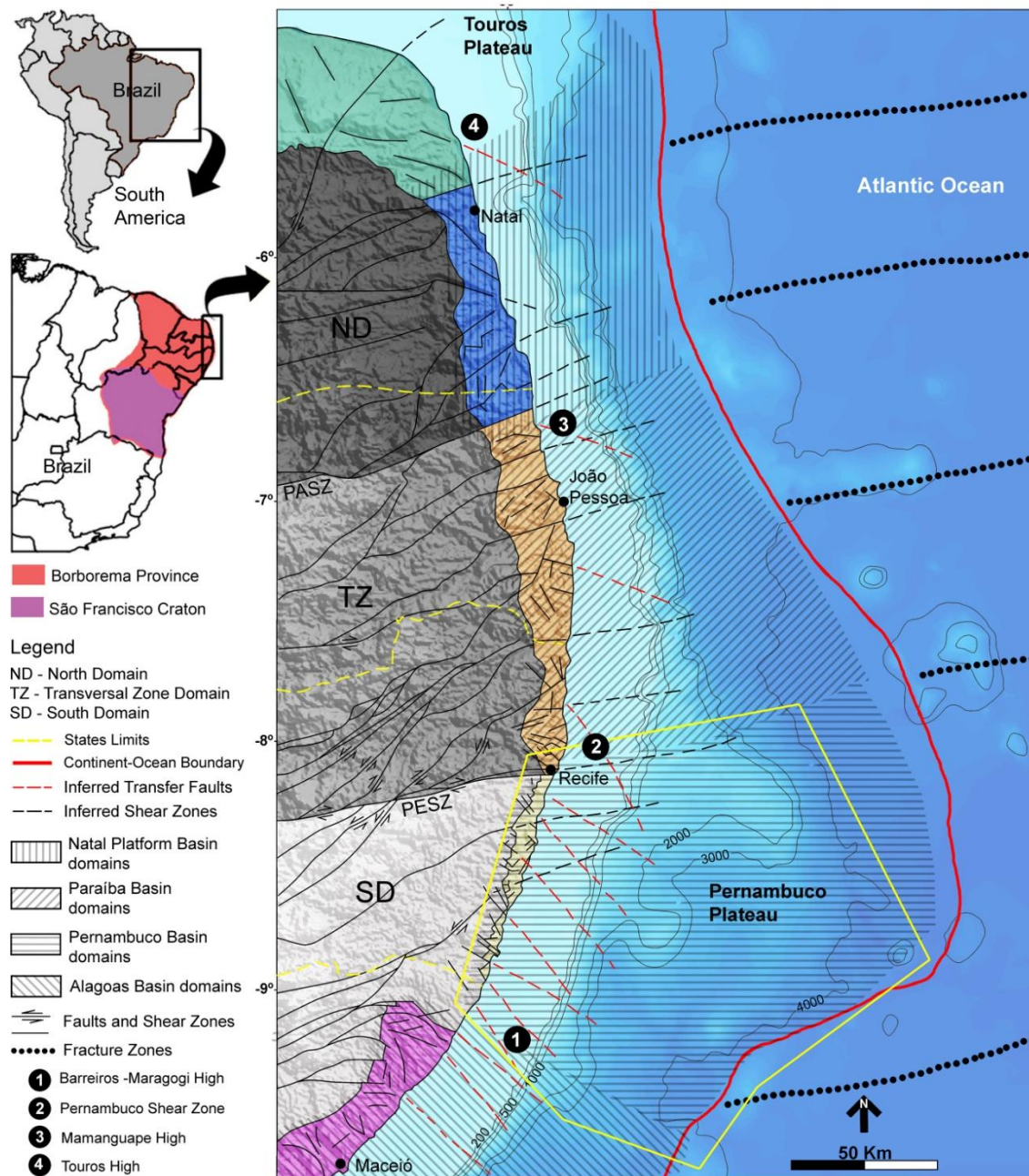


Figure 1 - Location of the Pernambuco Basin (PEB) in the eastern border of Borborema Province (BP). The compartmentation of the PEB is directly linked to the Southern Domain (SD) of the BP. The basin is bounded by the Pernambuco Shear Zone and by the Maragogi-Barreiros structural high. The pink, light-green, orange, blue and dark-green areas represent the coastal zones of the Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Natal Platform and Potiguar Basins, respectively. The offshore domain of each basin is depicted by hatched zones. The positions of the COB and fracture zones are from

Magalhães et al. (2014). The thin yellow line polygon marks the location of the 2D seismic surveys (study area).

The sedimentary succession in the coastal zone is mainly represented by siliciclastic formations of Aptian–Albian age, carbonates of Cenomanian–Turonian age and siliciclastic Neogene deposits (Rand and Mabesoone 1982; Lima Filho 1998; Maia 2012; Barbosa et al. 2014). The interpretation of seismic and potential field data has provided evidence of a significant sedimentary column in the plateau region, which possibly reaches up to 6 km in thickness, over the main depocentres of the Pernambuco Plateau (Oliveira 2013; Magalhães et al. 2014). The coastal zone of the Pernambuco Basin records a magmatic event that occurred during the Albian and generated a series of volcanic rocks, forming the Ipojuca Magmatic Suite (Sial et al. 1988; Lima Filho 1998; Nascimento 2003). The age of the main pulse of this magmatic event is 102–103 my by Rb–Sr isochrons and $\text{Ar}^{39}/\text{Ar}^{40}$ zircon fission tracks (Long et al. 1986; Nascimento 2003). Buarque et al. (2016) proposed that this magmatic event continued in the plateau region, forming extrusive and intrusive structures during the post-rift period. Seismic interpretations have also demonstrated the presence of a salt layer covering the centre of the Pernambuco Plateau (Buarque et al. 2016), which is probably Aptian in age.

The Pernambuco Basin can be divided into three main structural domains (Maia 2012; Oliveira 2013; Barbosa et al. 2014):

- (1) The inner basin, forming a narrow rift that is parallel to the opening of the South Atlantic. It comprises two different depocentres separated by the Cabo de Santo Agostinho High (Figs. 2). In the coastal zone, this structural high is associated with volcanic rocks intruded into the sedimentary cover and one occurrence of an alkali feldspar granite, known as the Cabo de Santo Agostinho Granite.
- (2) The Maracatu High, which forms an elongated outer hinge, trends almost N–S, and lies parallel to the coastline (Figs. 2 and 3). This outer hinge, formed by the continental platform, separates the interior basin from the offshore domains.
- (3) The Pernambuco Plateau, which formed over the hyper-extended continental crust and extends to isobaths of approximately 3000 m (Fainstein and Milliman 1979; Gomes et al. 2000; Oliveira 2013; Magalhães et al. 2014) (Figs. 1, 2). The plateau comprises at least four main basement lows and a major outer high, which trends E–W and is located in its centre, called the Gaibu High. Previous geophysical studies have suggested that this structure was strongly influenced by

both intrusive and extrusive magmatism (Figs. 2 and 3) (Oliveira 2013; Magalhães et al. 2014).

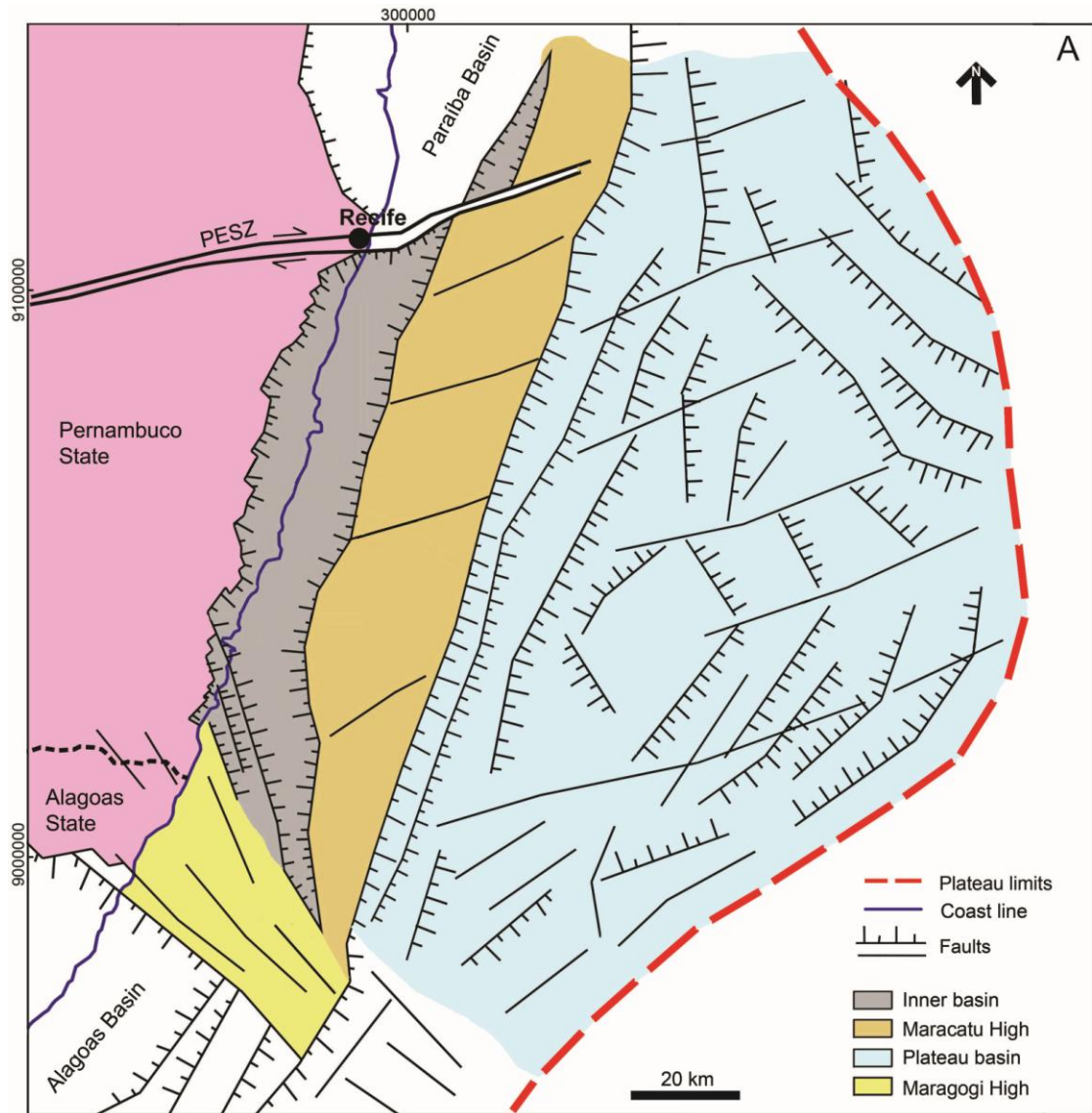


Figure 2 - Tectonic compartmentation of Pernambuco Basin (modified from Buarque et al. 2016). Three main domains are distinguished: 1) the inner basin; 2) the platform domain, formed by the Maracatu High; and 3) the plateau basin.

3. Material and Methods

This study is mainly based on the analysis of 143 time-migrated 2D seismic sections obtained from the national Repository of Exploration and Production (BDEP), kept by the Brazilian National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP). The set of seismic sections covers almost the entire Pernambuco Plateau. The surveys represent a set of different generations of data with different qualities and imaging

depths, which needed to be integrated to allow for the interpretation of regional features as well as the basement contour and main seismic sequences. After the interpretation of the main seismic sequences, a set of 59 seismic lines were selected. This selected set presents the best imaging quality, with a total length of 4340 km (Fig. 3). The selected seismic sections were used to perform a detailed interpretation of the carbonate buildups in the region (Fig. 3) (Burgess et al. 2013). The selected set of 2D seismic sections has imaging depths that vary from 8–12 seconds two-way time (TWT) and covers an area of the offshore region of approximately 13.915 km² (Fig. 3). Post-processing procedures, mainly consisting of frequency filters, were applied to reduce problems related to noisy signal. The approach suggested by Rohrman (2007) based on the use of high frequency filters helped to distinguish the carbonate buildups from volcanic structures (Buarque et al. 2016), which are abundant in the Pernambuco Plateau. All of the volumes were normalized to represent the peak of the wavelets as the normal polarity.

The interpretation of the seismic sequences, and possible ages, was based on the stratigraphic relations recorded in the onshore region of the Pernambuco Basin (Lima Filho 1998; Maia et al. 2012; Barbosa et al. 2014) and on the well-studied offshore record of the Alagoas Basin (Campos Neto 2007). This interpretation was tentative; there are no boreholes in the offshore Pernambuco Basin.

The interpretation of the carbonate structures was based mainly on a systematic description, which was based on the morphology and stratigraphic relation of these structures with the underlying and overlying strata (Saller et al. 2004; Burgess 2013;).

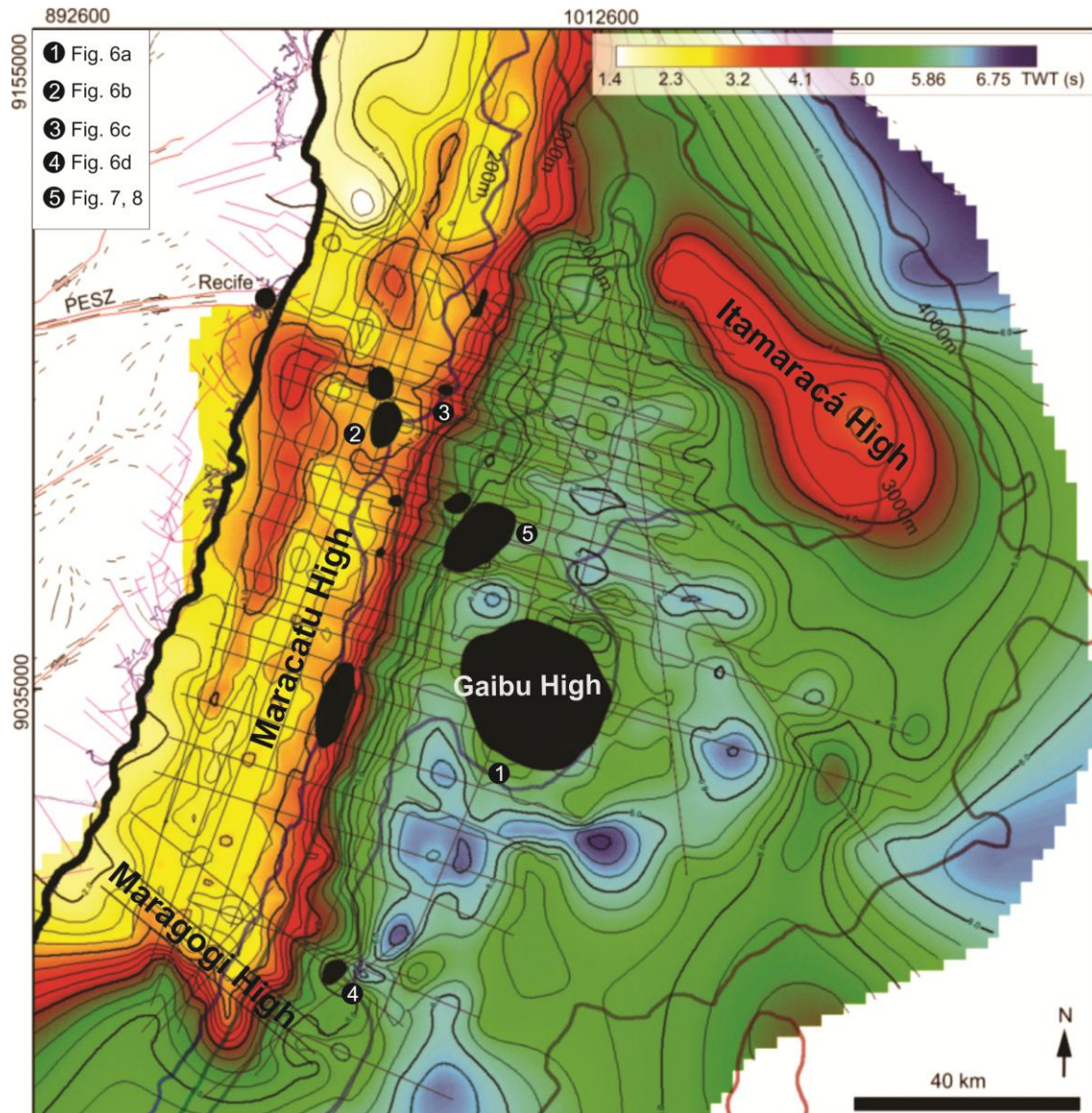


Figure 3 - Map of the seismic basement contours based on the interpretation of 143 time-migrated 2D seismic sections (depth in time). The main topographic highs and depocentres are shown. The locations of the 59 selected seismic sections are shown; they were selected to best describe the carbonate buildups (black zones). The dotted black lines mark the extension of Precambrian shear zones towards the platforms. Isobaths at 200 m, 2000 m, 3000 m and 4000 m are shown. Structures in the continent: thin black lines - lineaments, thin red lines - shear zones, and thin pink lines - faults in the onshore region of the marginal basins.

4. Results

4.1 Seismic Stratigraphy

Five main seismic sequences are defined: Sq.1 - rift phase 1 (Barremian-Aptian) and rift phase 2 (Albian), Sq.2 - Cretaceous post-rift (Cenomanian-Santonian), Sq.3 -

(Campanian-Maastrichtian), Sq.4 - Lower Cenozoic post-rift (Paleocene-Middle Miocene), and Sq.5 - Upper Cenozoic post-rift (Upper Miocene-Recent) (Figs. 1 and 4). The ages of the seismic sequences are based on available data from the onshore part of the basin and from comparisons with available data from the offshore region of the neighbouring Alagoas Basin (Figs. 2 and 3).

The deposits of Sq.1 were tilted by the syn-rift faults and have synthetic and antithetic orientations (Fig. 4). The rift sequence is generally represented by discontinuous reflections with low amplitudes and low frequency, disrupted by a large number of faults. In some regions, preserved blocks show locally parallel configurations, and in some sections, it is possible to identify the intra-rift unconformity from the top of the first rift phase. An increase in the continuity and frequency of the reflectors can be noted near to the top of the Sq.1 rift sequence, which possibly indicates the beginning of the sag phase deposits (Figs. 4 and 7). The occurrence of two rift phases was previously discussed by Maia et al. (2012) and Barbosa et al. (2014) based on evidence found in outcrops and seismic data in the onshore region of Pernambuco Basin.

The first Cretaceous post-rift seismic sequence (Sq.2) possibly contains sedimentary deposits of the Albian-Santonian interval. The base of this sequence shows evidence of the most significant flooding pulse in the basin, which is represented in the onshore region by the Estiva Formation (Lima Filho 1998). This pulse is probably related to the eustatic maximum that occurred during the Cenomanian-Turonian interval, which marked a stage of deep circulation of oceanic water across the Atlantic Ocean (Pletsch et al. 2001). The Sq.2 seismic sequence is characterized by continuous internal reflections with medium and low amplitudes and frequencies. These reflections are typically parallel in the proximal region of the basin, transitioning to a free internal configuration with incipient parallel reflections in the distal regions of the plateau (Fig. 4).

The second Cretaceous post-rift seismic sequence (Sq.3) is probably represented by sedimentary deposits of the Santonian-Maastrichtian interval. In the neighbouring Alagoas Basin, this sequence is related to a transgressive event, with its maximum occurring during the Turonian with the deposition of a carbonate ramp (Koutsoukos 1989; Campos Neto et al. 2007) and a regressive event in the end of the Coniacian (Campos Neto et al. 2007) (Figs. 4 and 7). Within this sequence, we found that the main carbonate buildups occur in the platform region and in palaeotopographic

highs in the Pernambuco Plateau. Over the platform and in the proximal region of the plateau, the seismic sequence is characterized by continuous internal reflections with high amplitudes and a low frequency. In the distal region of the plateau, the sequence transitions to a free and chaotic reflections.

The Lower Cenozoic post-rift seismic sequence (Sq.4) comprises deposits of the Paleocene-Middle Miocene interval. In the neighbouring Alagoas Basin, this sequence is mainly related to a regressive event (Campos Neto et al. 2007). Evidence of this regressive cycle is well recorded in the dipping seismic sections observed herein in the offshore region of Pernambuco Basin. We assert that this process mainly affects the platform depositional systems and is dominated by shallow processes, where the progradation of clinoforms can be clearly identified (Figs. 4 and 7). In the north portion of the plateau, this depositional event is limited by an unconformity that apparently represents a strong erosive event across the basin. This seismic sequence is characterized by a low continuity of internal reflections, a low frequency, and amplitudes ranging from low to medium. In the proximal region of the platform, it is mainly marked by prograding clinoforms and a parallel configuration of internal reflections, passing to an incipient parallel and free internal reflections in distal regions.

The Upper Cenozoic post-rift seismic sequence (Sq.5) comprises deposits ranging from the Middle Miocene to recent times (Figs. 4 and 7). This depositional sequence is well studied in neighbouring basins, including the Alagoas and Potiguar basins (Feijó 1994; Campos Neto et al. 2007). Over the platform and in the proximal region of the plateau, this sequence is characterized by reflections with good continuity, high amplitudes and low frequency. In the distal region, the sequence is mainly characterized by free to chaotic reflections.

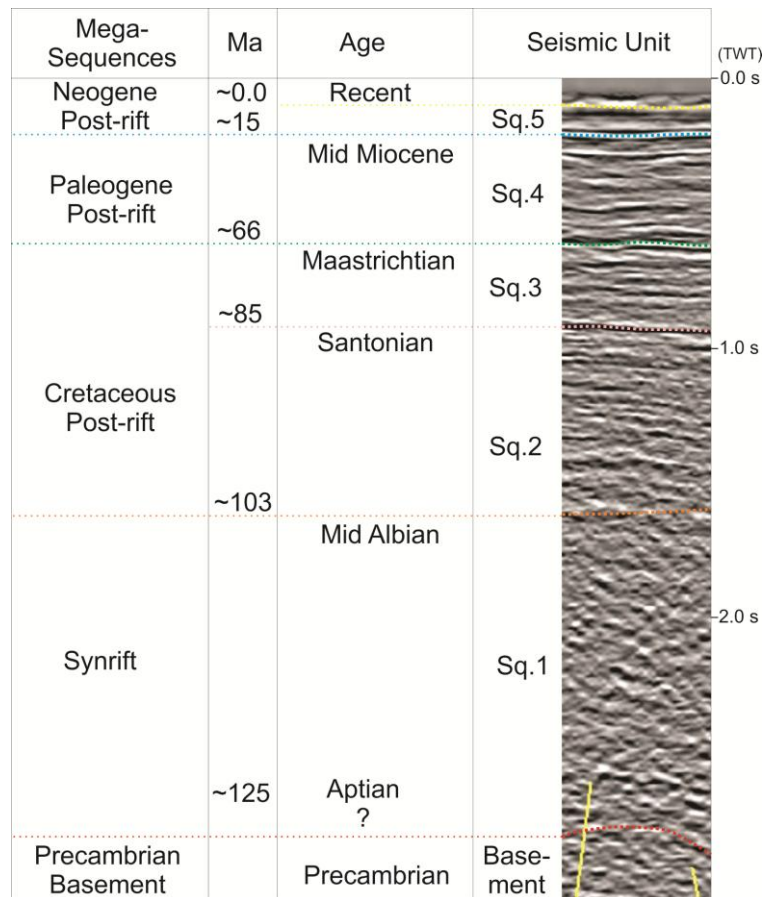


Figure 4 - Definition of the seismic stratigraphic sequences and main unconformities observed in the seismic surveys of the Pernambuco Basin. The ages of the sequences are indirectly estimated on available data from the onshore region of the Pernambuco Basin and the offshore region of the Alagoas basin.

4.2 Carbonate buildups

Three types of carbonate buildups have been identified in this study with regard to their position in the offshore portion of the basin (Pomar 2001; Kusumastuti et al. 2002; Rosleff-Soerensen et al. 2012): shelf margin reefs, patch reefs and isolated platforms (Figs. 5 to 7). The locations and estimated diameters of the platforms are indicated by the black polygons in Fig. 3. Large carbonate buildups were identified based on a few key elements, such as geometry, reflectivity signals and cross-cutting relationships (Saller et al. 2004; Burgess et al. 2013). The identified buildups are in post-rift sequences and are observed to be positioned within an interval ranging from 0.2 to 2.63 s (TWT). Some seismic reflection aspects are observed in the carbonate buildups, such as continuous high-amplitude capping reflections and onlap termination over their flanks (Figs. 5 and 6).

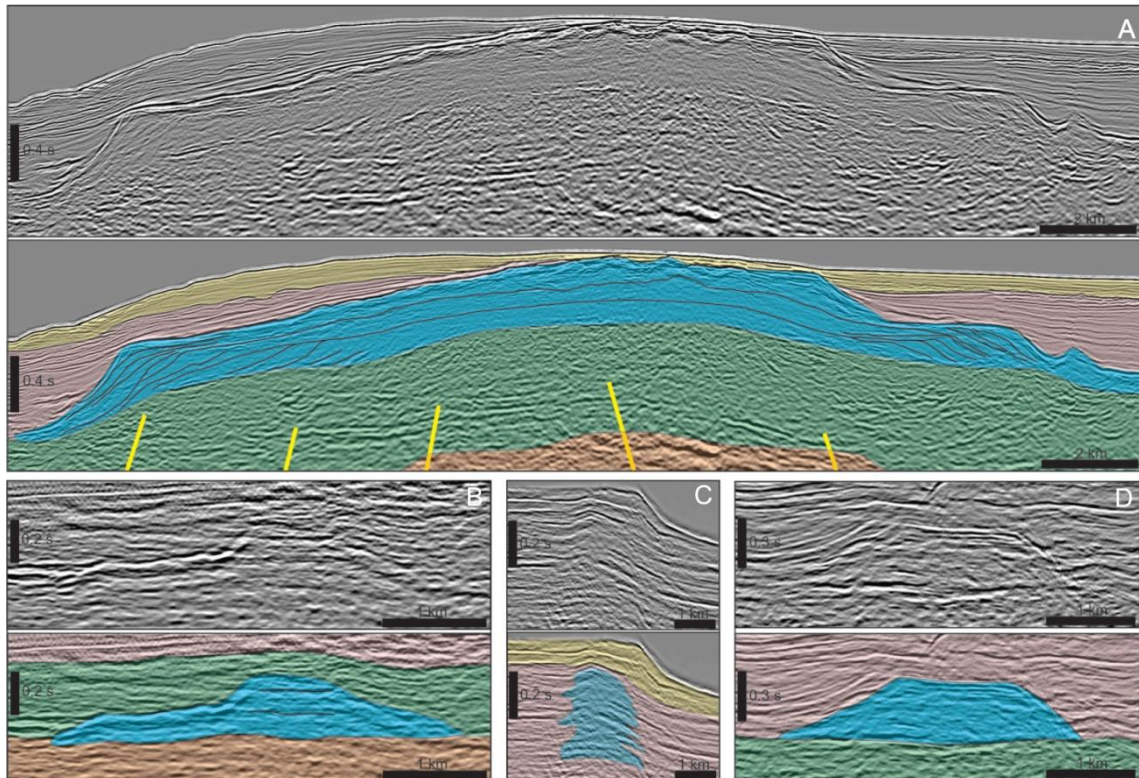


Figure 5 - Carbonate structures (blue area) observed in seismic sections (interpreted and non-interpreted) of the PEB. Locations of the structures are shown in Figure 3. A) Large isolated carbonate platform exhibiting prograding clinoforms over the Gaibu High. B) Patch reef located over the Maracatu High. C) Shelf margin reef in the border of the Maracatu High showing depositional wings. D) Small isolated carbonate platform.

Shelf margin reefs are found at the margins of the Maracatu High, parallel to the coastline (Figs. 3 and 5C). These reefs present widths ranging from 1.3 to 4.7 km, lengths ranging from 1.2 to 13 km, and heights ranging from 0.2 to 0.39 s. It is important to highlight that the quantification of the morphologic parameters is related to the intersection of the seismic surveys on the carbonate structures, and because of the spacing between the surveys, misinterpretation about the continuity of these structures may interfere with the measurement. The length of the margin reef system is probably larger than what was observed, but because of the spacing between the seismic surveys this issue cannot be confirmed.

The shelf margin reefs display medium-amplitude, continuous to sub-continuous, mounded reflections at their tops and low-amplitude internal reflections (Fig. 5C). The identification of onlap termination on the shelf margin reefs is complicated by the presence of interfingering between the marginal carbonate deposits

with surrounding sediments (probably siliciclastics), producing what is known as depositional wings or stringers (Burgess et al. 2013; Koša et al. 2015).

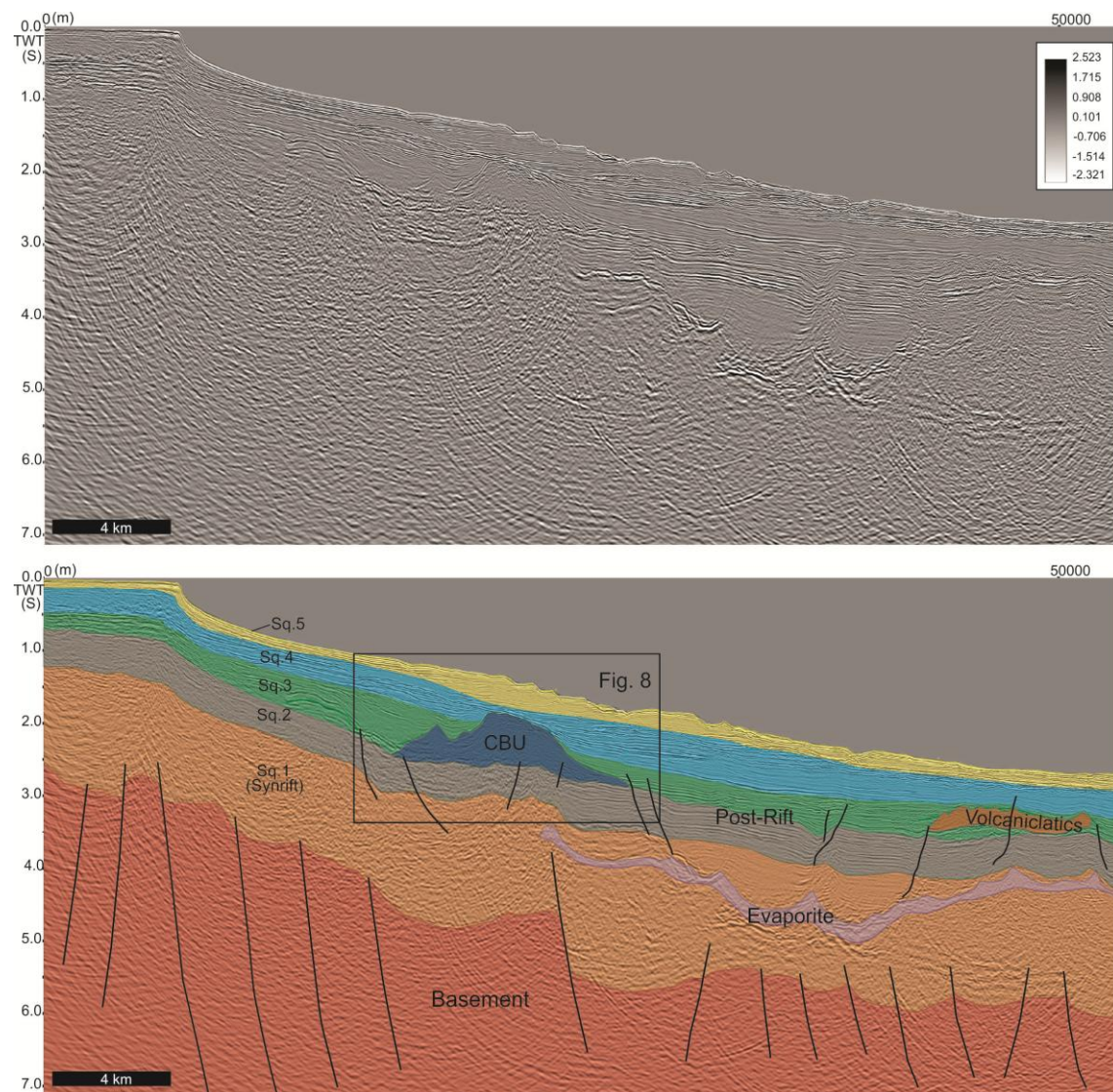


Figure 6 - Interpreted seismic survey (interpreted and non-interpreted) showing an isolated carbonate platform (CBU) in the PEP. It is possible to observe the geometry formed below the structure, caused by the velocity pull-up. This buildup is not located over a palaeotopographic high formed by a basement ridge.

Over the Maracatu High and behind the reef barriers in the shelf margin, 2 large carbonate buildups were found, interpreted here as patch reefs - forming a back-reef zone (Fig. 3 and 5B). They present length ranges from 4 to 9.5 km and width ranges from 4.3 to 5.7 km, with a mean height of 0.23 s. The patch reefs display continuous and high-amplitude seismic reflection at its flat tops and continuous to semi-continuous, medium- to high-amplitude seismic reflections in the interior of the structures. Some

small patch reefs are indicated only by high-amplitude reflection with a convex-upward shape and disrupted to chaotic reflection in its interior (Fig. 5B).

The third carbonate buildup type is the isolated platforms found in the plateau regions (Figs. 3, 5A and 5D, and Figure 6). These large platforms were built over structural highs and paleo-topographic highs (outer highs, salt diapirs, and magmatic structures). During the evolution of the Pernambuco Plateau, the topographic conditions and sea-level variations probably enabled the production and deposition of carbonate deposits (Figs. 5A and 6). A total of four isolated carbonate platforms were studied, and they present lengths ranging from 4 to 26 km, widths ranging from 3.5 to 25 km and heights ranging from 0.34 to 0.62 s. The isolated platforms exhibit continuous and high-amplitude seismic reflection at their flat tops and mainly continuous to semi-continuous, medium- to high-amplitude, and, in some cases, chaotic or free seismic reflections in their interior. Another important aspect is the upward deflection of the seismic reflector of the base of the buildup, along with underlying reflectors, below the centre of some carbonate platforms, as a result of the pull-up effect caused by an increase in seismic velocity due to the higher density associated with carbonate rocks

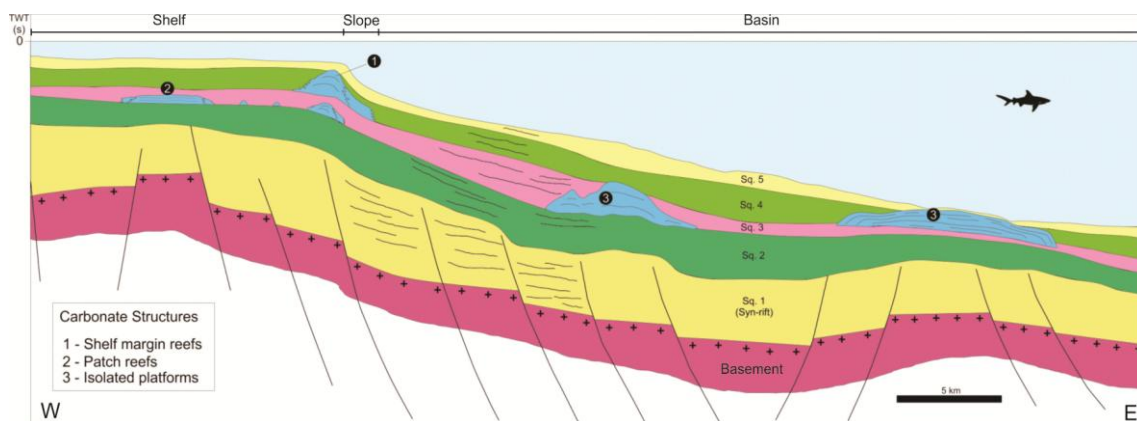


Figure 7 - Schematic geological section across the offshore domains of PEB, based on the interpretation of 2D seismic sections, showing the main interpreted seismic sequences and the stratigraphic position and morphology of the main types of carbonate buildups. The stratigraphic sequences are detailed in Figure 4.

In regions with better coverage of seismic surveys, with closer crossing seismic sections, it was possible to produce the interpolation of the 2D interpreted horizon related to the top of the isolated carbonate platforms. This allowed us to create a contour map of the top surface, which revealed that these structures possess an elongated

morphology with a flat top due to the end of the carbonate buildup growth (Burgess et al. 2013; Koša et al. 2015). (Fig. 8).

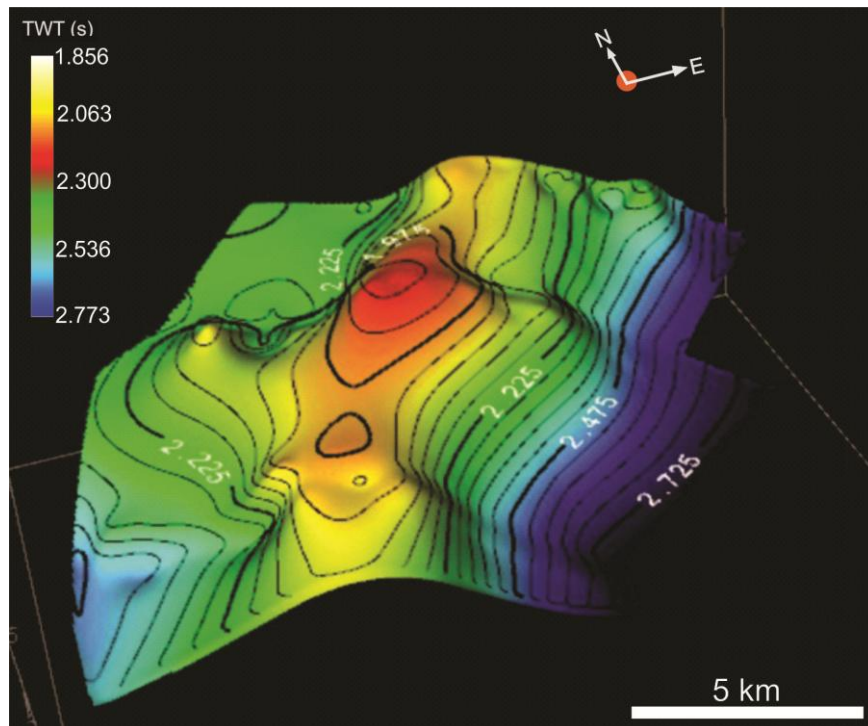


Figure 8 - Contour map of the top of the isolated carbonate buildup shown in Figure 6. It exhibits an elongated morphology and a flat top, which differ from other types of structures common in the basin, such as volcanoes.

5. Discussion

Despite the fact that carbonate rocks have been found in two stratigraphic boreholes drilled in the coastal zone of the Pernambuco Basin, related to the Cenomanian-Turonian marls and sandy limestones of Estiva Formation, outcrops of carbonate deposits are scarce in its onshore regions. Thus, the identification of carbonate buildups provided here represents the first systematic description of carbonate structures for the offshore domains of this basin.

The age claimed here for the carbonate buildups is younger than the age observed for the onshore record, which indicates favourable conditions for carbonate depositions prevailing until the uppermost Cretaceous and Early Paleogene (Figs. 5, 6 and 7). The lack of Cretaceous post-Turonian and Paleogene deposits in the onshore region of basin is probably a result of tectonic uplift and extensive erosion (Lima Filho 1998), which likely removed the record of these carbonate deposits from the proximal

part of the basin. Considering the extrapolation of the chronostratigraphy on which our interpretation is based, it is possible to infer that the age of the described carbonate buildups and isolated platforms can be assigned to two main periods/seismic sequences: Sq. 3 Campanian-Maastrichtian and Sq. 4 Paleocene-Middle Miocene (Figs. 5, 6 and 7).

Markedly, the ages interpreted here show a correlation with the age of carbonate deposits found in seamounts (Pernambuco Seamounts) located in the oceanic basin to the north of the Pernambuco Plateau (Skolotnev et al. 2012). These authors investigated microfossils found in carbonate rocks dredged from seamounts, the tops of which are ~2400 m below the relative sea level. They defined the carbonate rocks capping the seamounts as forming during the Campanian-Maastrichtian and the Turonian-Santonian. As observed for the now submerged seamounts, topographic highs formed within the plateau region reached oceanographic and climatic conditions that enabled expressive carbonate deposition. The inferred age of the carbonate buildups in the offshore Pernambuco Basin suggest that this phase of carbonate deposition occurred during the post-rift period. Certainly, the tectonic setting generated by Pernambuco Plateau formation represented an important condition for the formation of these structures. Notably, the major isolated carbonate platforms developed over outer topographic highs, such as the Maracatu High and the Gaibu High (Magalhães et al. 2014) (Fig. 3).

This finding represents an important discovery regarding the perspective of future exploratory projects. Carbonate buildups and platforms located over basement highs can represent important oil and gas reservoirs due to the effect of focusing migration paths around the highs. Carbonates deposited over outer highs in the pre-salt interval represent a very important prospect in the Santos Basin, in the southeastern margin of Brazil. This type of petroleum play corresponds to some of the most prominent discoveries in the region (São Paulo Plateau - Southeast Brazil) (Gomes et al. 2011).

This investigation suggests that the process of development of carbonate platforms in the offshore of the Pernambuco Basin was directly controlled by the formation of the Plateau, which once it led to the creation of topographic highs that created local conditions for carbonate deposition. The same processes is not present for the neighbouring Alagoas Basin, for which the Campanian-Maastrichtian and Paleogene sequences are mainly dominated by siliciclastics rocks (Campos Neto et al. 2007). However, the importance of sea level variations in the development of the isolated

carbonate platforms within the Pernambuco Plateau needs to be constrained by future investigations.

6. Conclusions

Basic interpretation methods and post-processing procedures, including band pass frequency filtering, were applied to a set of 143 multichannel seismic sections that cover a large part of the offshore domain of the Pernambuco Basin in northeastern Brazil. The investigation successfully identified and described three types of carbonate buildups in the basin: 1) shelf margin reefs, developed along the border of the Pernambuco Basin outer hinge, the Maracatu High; 2) patch reefs that formed over the Maracatu High along the continental platform behind the shelf margin reefs; and 3) isolated carbonate platforms developed in the Pernambuco Plateau regions, associated with palaeotopographic highs formed by outer basement highs, salt diapirs and probably magmatic structures.

The carbonate buildups described in this investigation were formed within post-rift sequences. Considering the inferred ages for the seismic sequences, the carbonate buildups are constrained within two main intervals: Campanian- Maastrichtian and Paleogene-Middle Miocene. The formation of carbonate buildups in the Pernambuco Plateau domains was controlled by the formation of the plateau, which possibly created local conditions for expressive carbonate deposition during post-rift periods.

The findings presented here provide important contributions to understanding the evolution of the Pernambuco Basin and knowledge about the opening of the South Atlantic in this region. Moreover, the information provided by this study is critical to the evaluation of the petroliferous potential of the Pernambuco Basin. The configuration of carbonate buildups and platforms formed over outer highs within the Pernambuco Plateau has impressive similarities with known large oil reservoirs formed in the pre-salt interval in the Santos Basin, São Paulo Plateau, in the southeastern Brazilian margin.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Seasound Cooperation Project, which was funded by SINOCHEM Petróleo Brasil Ltda. and developed by the Federal University

of Pernambuco (UFPE), as well as the National Agency of Petroleum Natural Gas and Biofuels (ANP). We also would like to thank the IHS Kingdom for providing the seismic interpretation software licenses to the Laboratory of Seismic Stratigraphy of the UFPE (SISMOS-DGEO-UFPE).

References

Almeida FF, Hasui Y, Brito Neves, BB, Fuck RA. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sci. Rev.* 17, 1-29. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](http://dx.doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9)

Araujo CEG, Weinberg RF, Cordani UG. 2013. Extruding the Borborema Province (NE-Brazil): a two stage Neoproterozoic collision process. *Terra Nova* 26 (2), 157-168. <http://dx.doi.org/10.1111/ter.12084>

Bachtel ST, Kissling RD, Martono D, Rahardjanto SP, Dunn PA, MacDonald BA. 2004. Seismic stratigraphic evolution of the Miocene-Pliocene Segitiga platform, East Natuna Sea, Indonesia: the origin growth and demise of an isolated carbonate platform. In: Eberli, G.P., Masferro, J.L., Sarg, J.F.R. (Eds.), *Seismic Imaging of Carbonate Reservoirs and Systems. Memoir*, vol. 81. American Association Petroleum Geologists, Tulsa, pp. 309-328

Barbosa JA, Neumann VH, Lima Filho M, Souza EM, Moraes MA. 2007. Estratigrafia da faixa costeira Recife-Natal (Bacia da Paraíba e Plataforma de Natal), NE Brasil. *Estud. Geol.* 17 (2), 3-30

Barbosa JA, Pereira PJF, Lima Filho MF. 2008. Dente de um picnodontiforme (Actinopterygii, Neopterygii) da Formação Estiva, Cenomaniano-Turoniano da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil. *Gaea* (São Leopoldo. Online), v. 4, p. 43-48

Barbosa, JA, Maia MF, Lima Filho M, Magalhães JR, Correia Filho OJ. 2014. Seismic stratigraphy of the onshore portion of Pernambuco Basin: evidence of break up during Middle Albian for the south Atlantic rift in Northeast Brazil. In: AAPG Annual Exhibition and Convention, Houston. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2943.2809>. Search and Discovery Article #30324

Buarque BV, Barbosa JA, Magalhães RG, Oliveira, JTC, Filho OC. 2016. Post-rift volcanic structures of the Pernambuco Plateau, northeastern Brazil. *J. s. am. Earth. Sci.* 70 (2016) 251-267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2016.05.014>

Burgess PM, Winefield P, Minzoni M, Elders C. 2013. Methods for identification of isolated carbonate buildups from seismic reflection data. *AAPG Bull.*, v. 97, no. 7, pp. 1071–1098. <http://dx.doi.org/10.1306/12051212011>

Campos Neto OPAC, Lima WS, Cruz FEG. 2007. Bacia de Sergipe-Alagoas. Bol. Geociências Petrobras 15 (2), 405-415

Chang HK, Kowsmann RO, Figueiredo AMF, Bender AA. 1992. Tectonics and Stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. Tectonophysics. 213: 97-138

Córdoba VC, Jardim de Sá EF, Sousa DC, Antunes AF. 2007. Bacia de Pernambuco-Paraíba. Bol. Geociências Petrobras 15 (2), 391-403

Fainstein R., Milliman JD. 1979. Structure and origin of three continental-margin plateaus, northeastern Brazil. AAPG Bull. 63 (2), 218-238

Feijó FJ. 1994. Bacias de Sergipe e Alagoas. Bol. Geociências Petrobras 8 (1), 149-216.

Fulthorpe CS, Schlanger SO. 1989. Paleo-oceanographic and tectonic settings of early Miocene reefs and associated carbonates of offshore Southeast Asia. AAPG Bull. 73, 729-756

Gomes PO, Gomes BS, Palma JJC, Jinno K, Souza JM. 2000. Ocean-continent Transition and Tectonic Framework of the Oceanic Crust at the Continental Margin of Northeast Brazil: Results of LEPLAC Project. In: Monography Series, 15. American Geophysical Union, pp. 261-291. <http://dx.doi.org/10.1029/GM115p0261>

Gomes PO, Kilsdonk B, Grow T, Minken J, Barragan, R. 2011. Tectonic evolution of the Outer High of Santos Basin, Southern São Paulo Plateau, Brazil, and implications for hydrocarbon exploration. in D. Gao, ed., Tectonics and sedimentation: Implications for petroleum systems: AAPG Memoir 100, p. 1 – 14

Koša E, Warrlich GMD, Loftus G. 2015. Wings, mushrooms, and Christmas trees: The carbonate seismic geomorphology of Central Luconia, Miocene– present, offshore Sarawak, northwest Borneo. AAPG Bull. v. 99, no. 11, pp. 2043–2075. <http://dx.doi.org/10.1306/06181514201>

Koutsoukos EAM. 1989. Mid to late cretaceous microbiostratigraphy, paleo-ecology and paleogeography of the Sergipe Basin, northeastern Brazil. 645 p. phd. thesis – Department of Geological Sciences of Polytechnics South West, Plymouth, 1989. (unpublished).

Kusumastuti A, Van Rensbergen P, Warren JK. 2002. Seismic sequence analysis and reservoir potential of drowned Miocene carbonate platforms in the Madura Strait, East Java, Indonesia. AAPG Bull. v. 86, no. 2, pp. 213–232

Kuznetsov VG. 1997. Oil and gas in reef reservoirs in the former USSR: Petroleum Geoscience, v. 3, p. 65–71. <http://dx.doi.org/10.1144/petgeo.3.1.65>

Lima MR and Pedrão, E. 1989. Análise palinológica de sedimentos da Bacia do Cabo, Cretáceo do Estado de Pernambuco, Brasil. An Acad Bras Cienc., 61(1):73-84

Lima Filho MF. 1998. Análise Estrutural e Estratigráfica da Bacia Pernambuco (Doctorate Thesis). Geosciences Institute, São Paulo University IAG-USP, São Paulo, 139 pp. (unpublished).

Long LE, Sial AN, Nekvasil H, Borba GS. 1986. Origin of Granite at Cabo de Santo Agostinho, Northeast Brazil, Contributions to Mineralogy and Petrology., 92: 341-350

Mabesoone JM, Alheiros MM. 1993. Evolution of the Pernambuco-Paraíba-Rio Grande do Norte Basin and the problem of the south Atlantic connection. Geol. Mijnb. 71, 351-362

Magalhães JR, Barbosa JA, Oliveira JTC, Lima Filho MF. 2014. Characterization of the ocean-continent transition in the Paraíba Basin and natal platform region, NE Brazil. Rev. Bras. Geofísica 32 (3), 481-496

Maia MFB. 2012. Revisão Estratigráfica do intervalo Aptiano-Albiano da Bacia de Pernambuco Nordeste do Brasil (Master Dissertation Thesis). Post-Graduation Program in Geosciences, Department of Geology, Federal University of Pernambuco, Recife e Brazil, 226 pp. (Unpublished).

Maia MFB, Barbosa JA, Lima Filho M, Mort HP, Santana FR. 2012. Características petrográficas e geoquímicas das formações siliciclásticas (Aptiano- Albiano) da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil. Estud. Geol. 22 (1), 55-75

Matos RMD. 1999. History of the northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break up between Brazil and west Africa. In: Cameron, N.R., Bate, R.H., Clure, V.S. (Eds.), The Oil and Gas Habitats of the South Atlantic, Geol. Soc. Spec. Pub., 153, pp. 55-73. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.153.01.04>

Melville P, Al Jeelani O, Al Menhali S, Grötsch J. 2004. Three-dimensional seismic analysis in the characterization of a giant carbonate field, onshore Abu Dhabi, United Arab Emirates. Seismic imaging of carbonate reservoirs and systems: AAPG memoir 81, p. 123-148.

Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, Brasil. Zoneamento Nacional de Recursos de Óleo e Gás. Atualização 2011 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2012

Nascimento MAL. 2003. Geologia, geocronologia, geoquímica e petrogênese das rochas ígneas cretácicas da província magmática do Cabo e suas relações com as unidades sedimentares da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil (Doctorate thesis). Post-Graduation Program in Geology and Geodynamics, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Brazil, 264 pp. (Unpublished).

Neves SP, Monié P, Bruguier O, Silva JMR. 2012. Geochronological, thermochronological and thermobarometric constraints on deformation, magmatism and thermal regimes in eastern Borborema Province (NE Brazil). J. s. am. Earth. Sci., 38: 129-146

Oliveira JTC. 2013. Análise integrada de dados geofísicos da transição crustal (continente-oceano) da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil (Master Dissertation Thesis, Post-Graduation Program in Geociences). Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil, 65 pp. (Unpublished)

Pletsch T, Erbacher J, Holbourn AEL, Kuhnt W, Moullade M, Oboh-Ikuenobede FE, Scoding E, Wagner T. 2001. Cretaceous separation of Africa and South America: the view from the West African margin (ODP Leg 159). *J. S. Am. Earth Sci.* 14, 147-174. [http://dx.doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00020-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00020-7)

Polônia JAP. 1997. Geometria e cinemática do Rifte do Cabo, litoral Sul do Estado de Pernambuco (Master Dissertation Thesis. Post-Graduation Program in Geology). Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 156 pp. (Unpublished).

Pomar L. 2001. Types of carbonate platforms: a genetic approach. *Basin Research*, 13, 313-334

Rand HM, Mabesoone JM. 1982. Northeastern Brazil and the final separation of South America and Africa. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.* 38 (3-4), 163-183. [http://dx.doi.org/10.1016/0031-0182\(82\)90002-5](http://dx.doi.org/10.1016/0031-0182(82)90002-5)

Rohrman M. 2007. Prospectivity of volcanic basins: trap delineation and acreage de-risking. *AAPG Bull.* 91 (6), 915-939. <http://dx.doi.org/10.1306/12150606017>.

Rosleff-Soerensen B, Reuning L, Back S, Kukla P. 2012. Seismic geomorphology and growth architecture of a Miocene barrier reef, Browse Basin, NW-Australia. *Marine and Petroleum Geology* 29 233-254. <http://10.1016/j.marpetgeo.2010.11.001>

Saller AH, Walden S, Robertson S, Nims R, Schwab J, Hagiwara H, Mizohata S. 2004. Three-dimensional seismic imaging and reservoir modeling of an Upper Paleozoic "Reefal" Buildup, Reinecke Field, West Texas, United States. *Seismic imaging of carbonate reservoirs and systems: AAPG memoir* 81, p. 107-122

Santos EJ, Van Schmus WR, Kozuch M, Brito Neves BB. 2010. The Cariris Velhos tectonic event in Northeast Brazil. *J. S. Am. Earth Sci.* 29 (1), 61-76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.003>

Sarg JFR, Weber LJ, Markello JR, Southwell JK., Thomson JM, Kmeck JJ, Christal ME, Tanaka Y. 1995, Carbonate sequence stratigraphy: A summary and perspective with case history, Neogene, Papua New Guinea, in *Proceedings of the International Symposium on Sequence Stratigraphy in SE Asia: Jakarta, Indonesia, Indonesian Petroleum Association*, p. 137-179

Skolotnev AA, Peyve EV, Ivanova IO, Murdmaa OV, Levchenko ME. 2012. New Data on Composition and Structure of the Pernambuco Seamounts, Brazil Basin, South Atlantic Region Bylinskaya. *Doklady Akademii Nauk*, 2012, Vol. 443, No. 3, pp. 330-336. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X12030294>

Sial AN, Long LE, Borba GS. 1988. Cretaceous Magmatic Province of Cabo, Pernambuco, Northeast Brazil. *Rev. Bras. Geociências* 4 (17), 667-673

Sun SQ, Esteban M. 1994. Paleoclimatic controls on sedimentation diagenesis and reservoir quality: lessons from Miocene carbonates. *AAPG Bull.* 78, 519-543

Van Schmus WR, Oliveira EP, Silva Filho AF, Toteu SF, Penaye J, Guimarães IP. 2008. Proterozoic links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African fold belt. In: Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., Brito Neves B.B., De Wit, M.J. (Eds.), *West Gondwana: Pre-cenozoic Correlations across the South Atlantic Region*, Geological Society, London, Special Publications, 294, pp. 69-99. <http://dx.doi.org/10.1144/SP294.5>

Wilson MEJ. 2002. Cenozoic carbonates in Southeast Asia: implications for equatorial carbonate development. *Marine Geology* 147, 295-428

Zampetti V, Schlager W, Konjienburg JH, Everts AJ. 2004. Architecture and growth history of a Miocene carbonate platform from 3D seismic reflection data: Luconia province, offshore Sarawak, Malaysia. *Marine and Petroleum Geology* 21, 517-534

CAPÍTULO 3 DISCUSSÃO A RESPEITO DA DISTINÇÃO ENTRE AS ESTRUTURAS VULCÂNICAS E SEDIMENTARES

Neste capítulo é realizada uma síntese dos resultados referentes aos capítulos anteriores em relação à metodologia utilizada pela pesquisa, com base na interpretação sísmica e na utilização dos dados magnéticos e gravimétricos para a distinção das estruturas vulcânicas e os *buildups* carbonáticos. Devido à similaridade de aspectos morfológicos entre estruturas montiformes, por exemplo, que podem representar tanto estruturas vulcânicas quanto *buildups* carbonáticos, especial ênfase foi dada ao auxílio dos perfis geofísicos 2D na interpretação realizada.

3.1 Resultados do estudo das estruturas vulcânicas pós-rifte da Bacia de Pernambuco

A análise detalhada dos dados sísmicos revelou a abundância de estruturas extrusivas e intrusivas que afetaram as rochas sedimentares do Cretáceo Superior e Cenozóico na região do Platô de Pernambuco (vide Capítulo 2). Os edifícios vulcânicos apresentam magnitude e morfologia diferentes, com diâmetros variando de 450 m a 12 km e alturas variando de 0,03 a 0,6 s (TWT), e foram classificados em dois diferentes grupos: vulcões do tipo escudo (*shield volcanoes*) e vulcões de edifício cônico, tanto de origem monogenética quanto de origem composta.

A pesquisa sugere que as rochas vulcânicas da região costeira da bacia, que datam do Albiano Superior, e as rochas vulcânicas da região do platô, foram principalmente geradas pela ação diacrônica de um *hotspot*. A atividade do *hotspot* Santa Helena teria formado um alinhamento de áreas com alta concentração de intrusões na direção NW-SE, enquanto a placa Sul Americana se movia de forma rotacional em direção oeste. Apesar da quantidade e qualidade dos dados sísmicos usados neste trabalho terem sido insuficientes para analisar de forma mais detalhada a relação entre os processos do rifteamento e do vulcanismo presentes na região do platô, pôde-se observar a presença de vulcões e soleiras sobre falhas do rifte e portanto pode-se afirmar que há indícios que as falhas relacionadas ao rifteamento da bacia teriam atuado como condutos para o magma que ascendeu através do pacote sedimentar.

Foram observados dois principais intervalos com a presença de corpos vulcânicos, que considerando a extrapolação cronoestratigráfica, pertencem ao Santoniano - Maastriquitiano e ao Oligoceno - recente. Também foi observado que existem duas áreas de maior influência magmática na região do platô: a região na borda nordeste e a da região central do platô,

referentes ao Alto de Itamaracá e ao Alto de Gaibu, respectivamente (Fig. 14). Ambas as estruturas representam altos externos do embasamento do platô e suas origens ainda carecem de mais estudo. É possível que esses altos estejam associados com processos de domamento magmático ou representem simplesmente heterogeneidades crustais que permaneceram topograficamente elevadas durante o processo de estiramento crustal (Magalhães et al., 2014).

3.2 Identificação dos *Buildups* carbonáticos do estágio pós-rifte da Bacia de Pernambuco

Durante a análise dos dados sísmicos, observou-se a ocorrência de estruturas que apresentam aspectos morfológicos semelhantes aos edifícios vulcânicos. Porém, a utilização de critérios adotados pela pesquisa (Vide tópico 3.3) permitiu a identificação dessas estruturas como sendo construções carbonáticas - plataformas isoladas e *buildups* recifais.

Três tipos de *buildups* carbonáticos, todos desenvolvidos no estágio pós-rifte, foram identificados com base em sua morfologia e local de formação na porção *offshore* da bacia (Figs. 14 e 15): 1) recifes de margem de plataforma (*shelf margin reefs*), que se localizam na borda leste do Alto do Maracatu e apresentam comprimento variando de 1,2 km a 13 km e altura variando de 0,2 a 0,39 s (TWT); 2) *patch reefs* que se desenvolveram na porção mais proximal em relação aos recifes de margem de plataformas, também em cima do Alto do Maracatu e possuem comprimento variando de 4 a 9,5 km e altura média de 0,23 s (TWT); e 3), plataformas carbonáticas isoladas localizadas na região do platô, que apresentam comprimento variando de 4 a 26 km. As estruturas carbonáticas, assim como as estruturas vulcânicas, ficaram concentradas em duas sequências deposicionais, cujas idades inferidas são: Campaniano-Maastriquitiano e Paleoceno-Mioceno Médio. Estas idades se mostram semelhantes às idades encontradas por Skolotnev et al. (2012) para carbonatos desenvolvidos sobre montes submarinos, cujos topos encontram-se atualmente em profundidade de aproximadamente 2400 m abaixo do nível do mar, ao norte do Platô de Pernambuco. A datação dessas rochas, dragadas a partir de cruzeiros científicos, com base no estudo de microfósseis, indicaram idade Campaniana-Maastriquitiana e Turoniana-Santoniana. Isto indica que da mesma forma que os montes submarinos, que formavam altos topográficos, os altos externos na região do Platô de Pernambuco também alcançaram condições climáticas e oceanográficas que permitiram a formação de depósitos carbonáticos.

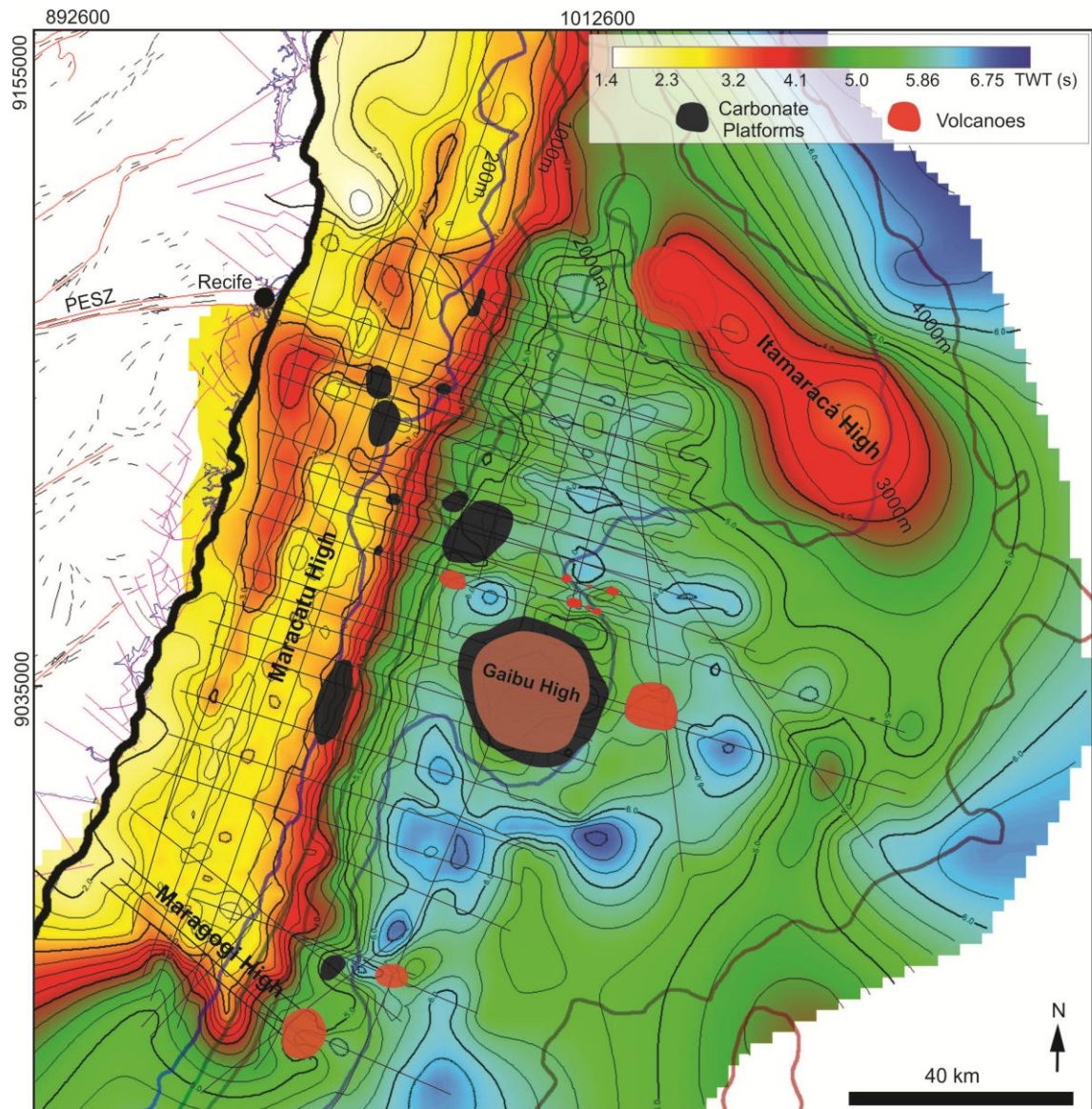
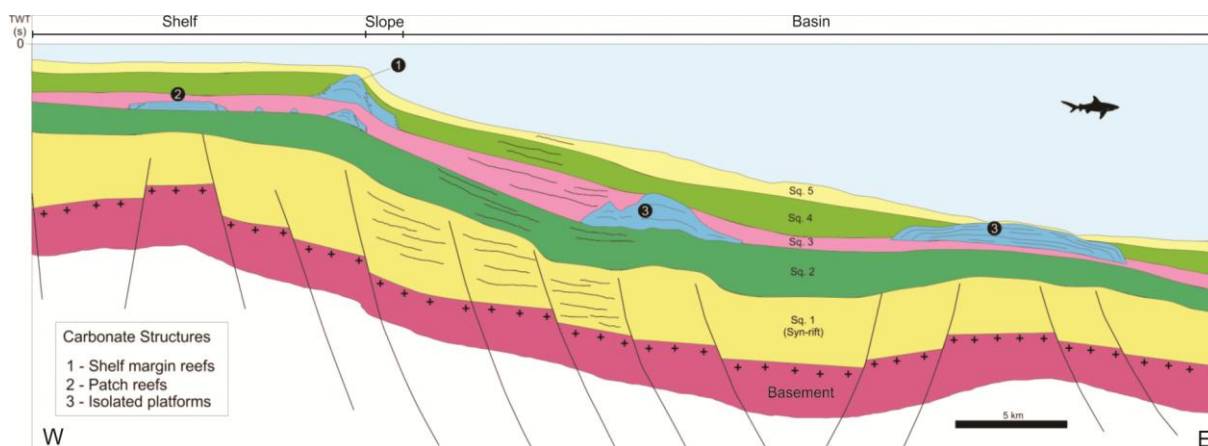


Figura 14 - Mapa do embasamento sísmico da região *offshore* da Bacia de Pernambuco, com a localização das seções sísmicas selecionadas para esta pesquisa, e a localização das principais estruturas carbonáticas e vulcânicas interpretadas neste trabalho.



3.3 Metodologia aplicada para a distinção entre edifícios vulcânicos e *buildups* carbonáticos

É importante destacar que em algumas bacias sedimentares a distinção entre *buildups* carbonáticos e outras estruturas, quando a pesquisa exploratória dispõe apenas de dados indiretos, representa uma tarefa desafiadora. Isto se deve às semelhanças morfológicas que frequentemente se apresentam entre essas construções e outras estruturas, por exemplo, corpos de rochas vulcânicas (Burgess et al., 2013; Posamentier et al., 2014).

Uma das primeiras abordagens a serem feitas para a identificação de determinadas estruturas cuja gênese espera-se estar ligada à deposição carbonática, em áreas com limitação de dados, é verificar se a região apresentou fatores favoráveis à formação de sedimentos carbonáticos durante sua evolução. Apesar da existência de produção carbonática em altas latitudes, com pouca luminosidade e água com baixas temperaturas (Rao, 1981; James, 1997; Roberts et al., 2006), essas regiões não permitem, normalmente, o desenvolvimento de grandes plataformas carbonáticas isoladas e *buildups* (Schlager, 2005). Ao passo que regiões de baixas latitudes, com águas quentes e alta luminosidade (James & Kendall, 1992; Pomar, 2001), oferecem condições para ampla formação e acúmulo de carbonatos. Também é sabido que durante períodos transgressivos e de nível de mar alto, devido à inundação dos altos topográficos e à redução do aporte de siliciclastos, ocorre o favorecimento da formação de carbonatos (Catuneanu, 2006; Nalin et al., 2010). Do mesmo modo, certos intervalos geológicos, por exemplo o Devoniano e o Mioceno, representam períodos favoráveis à

proliferação da fábrica carbonática, devido à aspectos oceanográficos e biológicos que predominaram em ambientes plataformais rasos desses intervalos do tempo geológico (Tucker & Wright, 1990; Greenlee & Lehmann, 1993; Kiessling et al., 1999). Apesar da Bacia de Pernambuco apresentar fatores favoráveis à formação de depósitos carbonáticos, como a paleogeografia, estes não auxiliam a distinguir de forma efetiva as estruturas carbonáticas, devido à falta de dados diretos. A abundância de estruturas vulcânicas sempre impõe a possibilidade de erro, induzido pela identificação baseada apenas na morfologia.

Embora as características sísmicas das construções carbonáticas sejam bastante variadas (Eberli et al., 2004), ocorrem aspectos comuns que podem auxiliar em sua identificação. Por exemplo, a litificação precoce e desenvolvimento de depósitos dominados por granulometria maior nos estratos que formam os flancos de plataformas isoladas (Pomar, 2001; Burgess et al., 2013) e que permitem uma elevada inclinação destes.

Praticamente todas as estruturas carbonáticas na área de estudo apresentam reflexões sísmicas associadas ao topo da estrutura com forte amplitude, possivelmente devido ao forte contraste de impedância acústica entre as rochas carbonáticas e as rochas capeadoras, que possivelmente representam folhelhos marinhos. Burgess et al. (2013) propuseram que a presença de hidrocarbonetos em estruturas carbonáticas e a presença de rochas com alta porosidade, podem fazer com que a forte amplitude normalmente associada ao delineamento do topo dessas feições não esteja presente. Ainda, outros critérios ajudam a distinguir os edifícios carbonáticos de outras estruturas, como dobras tardias, que são as terminações dos refletores sísmicos em forma de *onlap* nos flancos da estrutura carbonática e a presença de feições do tipo "*pull-ups*", que estão relacionadas ao aumento das velocidades sísmicas associadas ao corpo de rochas carbonáticas. Além disso, podem ocorrer estruturas denominadas de asas deposicionais (*depositional wings*), relacionadas à intercalação de sedimentação carbonática na margem da plataforma e sedimentação pelágica. Este processo de intercalação pode impedir o desenvolvimento dos flancos com alta inclinação, mascarando assim os *onlaps* ao longo dos flancos (Fig. 16). Estas feições ainda podem ser interpretadas como rochas vulcanoclásticas associadas à formação de edifícios vulcânicos (Burgess et al., 2013). Acontece que embora recorrentes e de fácil identificação, os parâmetros citados acima também podem estar associados com estruturas vulcânicas e desta forma estes não representam parâmetros definitivos ou determinantes, na identificação de estruturas carbonáticas.

Nesse contexto, de limitação de dados de subsuperfície, o emprego de metodologias baseadas no tratamento de métodos geofísicos potenciais (sinal analítico da anomalia

magnética e a primeira derivada da anomalia Bouguer) (Figs. 16 e 17), podem fornecer importantes subsídios para a identificação das estruturas vulcânicas e de outros tipos de estruturas sedimentares (*buildups* carbonáticos, domos, diápiros de sal, etc.). Espera-se que rochas magmáticas, que compõem corpos intrusivos ou extrusivos, forneçam anomalia magnética, podendo também haver anomalia gravimétrica positiva associada a eles. Já a ausência de anomalia magnética é um indicativo de que a estrutura se trate de um corpo de natureza sedimentar, ainda que anomalia gravimétrica positiva possa estar associada à presença de rochas carbonáticas. Esta pesquisa utilizou com sucesso a modelagem de perfis 2D, tanto de dados gravimétricos quanto de dados magnéticos levantados sobre seções sísmicas nas quais foram identificadas estruturas de interesse, como possíveis *buildups* carbonáticos ou estruturas formadas por rochas ígneas e piroclásticas (Figs. 16 e 17). No entanto, é importante destacar que o fato dos dados terem sido levantados por navios, e de que as estruturas interpretadas se localizam na parte mais superior da coluna sedimentar, favoreceram a distinção da assinatura magnética de corpos ígneos rasos. A utilização de levantamentos aéreos, ou mesmo de satélite, apresentam maior dificuldade na identificação de feições tão pontuais, devido à influência regional de fontes magnéticas profundas e de maior porte.

A análise permitiu verificar que a maioria das estruturas carbonáticas está associadas aos altos estruturais encontrados no platô. Desta forma, a presença de anomalias positivas (gravimétricas e magnetométricas) nos dados geofísicos, não exclui a possibilidade da natureza carbonática, mas a falta dessas anomalias, localmente, aumenta de forma significativa a probabilidade de a estrutura representar uma construção carbonática.

Apesar da análise ter sido realizada com dados sísmicos regionais (resolução sísmica menor), o fato de algumas estruturas delineadas apresentarem corpos alongados de topo plano, representa mais um indicativo de que a feição possa se tratar de uma estrutura carbonática (Fig. 18).

Alguns aspectos estratigráficos também devem ser considerados para que a interpretação sísmica possa adquirir maior robustez, como foi possível realizar no presente estudo em relação à interpretação de uma estrutura apresentada na Fig. 17. Neste caso, observa-se a presença de três estruturas com formato cônico próximas entre elas, que foram inicialmente interpretadas como paleovulcões submarinos formados abaixo do nível de ação das ondas, uma vez que o formato de cone dos edifícios encontra-se preservado (Oreiro, 2006; Posamentier et al. 2014). De acordo com o posicionamento estratigráfico de suas bases, é possível interpretar a ordem de desenvolvimento das estruturas separadamente. Neste caso, é

possível perceber que caso se tratassem de *buildups* carbonáticos, como por exemplo recifes em forma de pináculos (*pinnacle reefs*), para que houvesse a criação das estruturas mais novas, o rebaixamento do nível do mar teria implicado na erosão do topo das estruturas mais antigas. Além disso, associado com edifícios vulcânicos há a presença de sismofácies tipicamente relacionadas à formação de depósitos vulcanoclásticos e à formação de soleiras, como discutido por Buarque et al. (2016a).

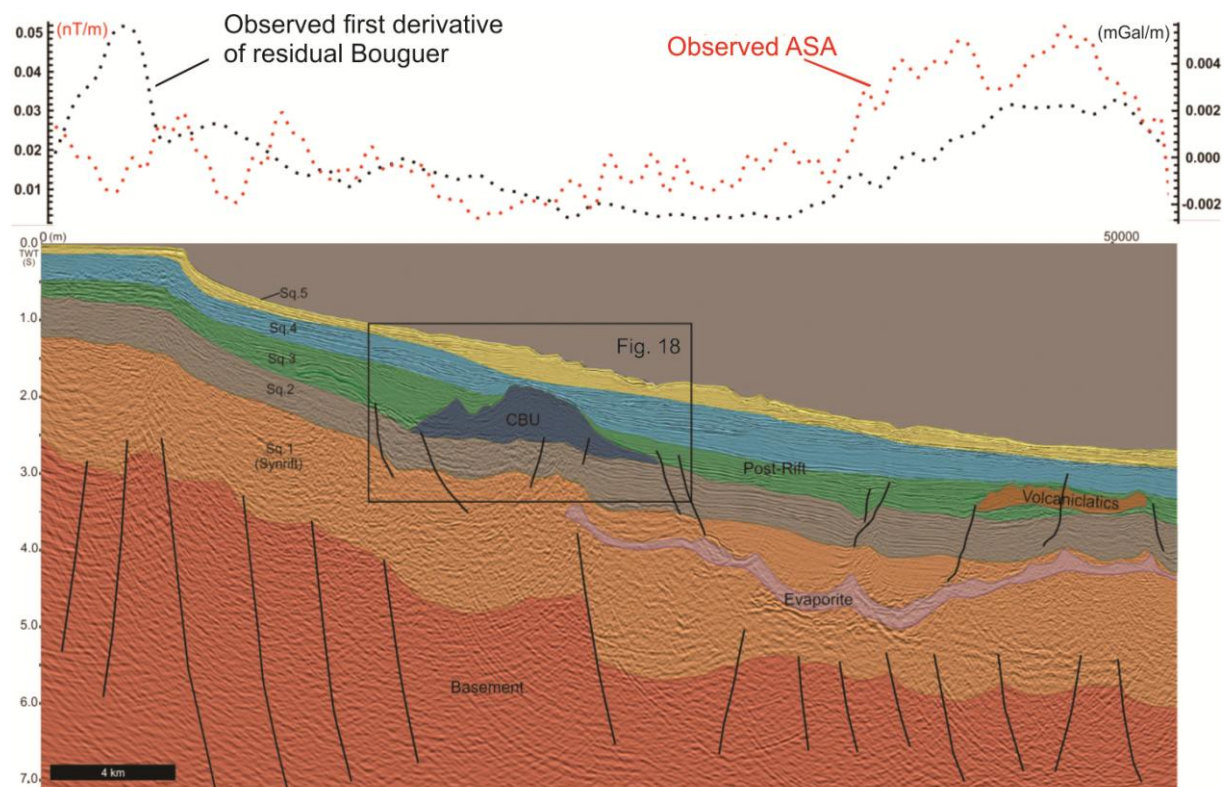


Figura 16 - Sessão sísmica mostrando um *buildup* carbonático (CBU), uma camada de evaporitos e rochas vulcanoclásticas na Bacia de Pernambuco. A modelagem de perfis magnéticos e gravimétricos serviu de apoio à interpretação dos dados sísmicos. Notar a ausência de anomalia magnética positiva relacionada à estrutura carbonática, como é o caso observado para o corpo interpretado como depósitos vulcanoclásticos. O topo do CBU encontra-se modelado na Figura 18 e para localização e detalhamento das sequências, vide artigo do tópico 2.2 deste trabalho.

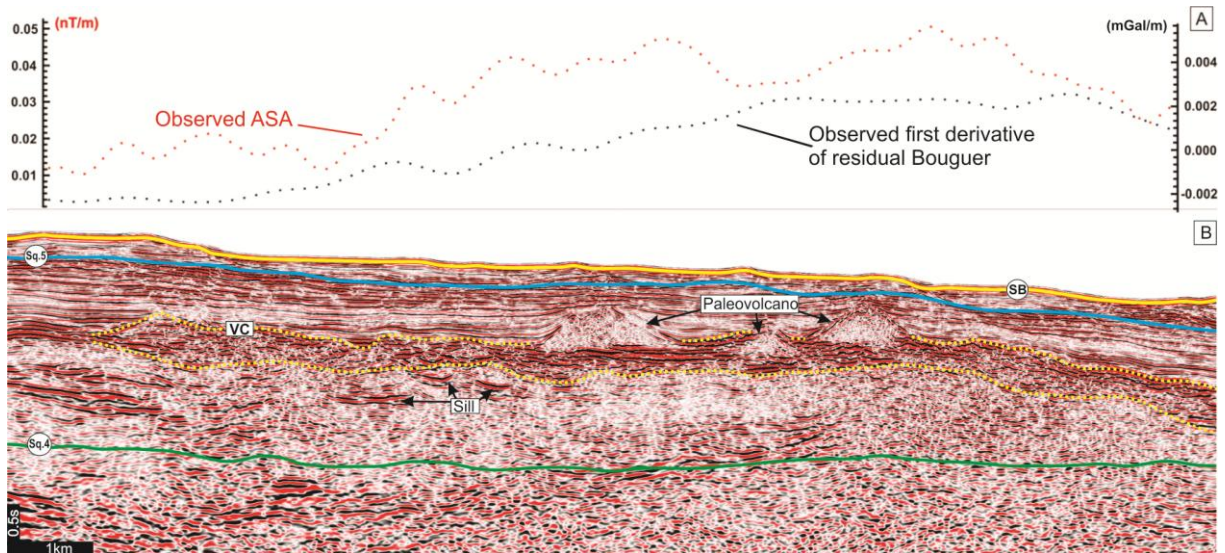


Figura 17 - A) A modelagem de perfis magnéticos e gravimétricos serviu de apoio à interpretação dos dados sísmicos. B) Sessão sísmica mostrando uma série de estruturas magmáticas e depósitos adjacentes interpretados como sequências vulcanoclásticas (VC). Foram interpretadas soleiras (*sills*) e edifícios vulcânicos (os números 01, 02, 03 indicam a ordem de formação das estruturas). Notar anomalia magnética positiva associada à sequência vulcanoclásticas, às soleiras e edifícios vulcânicos. Para localização da seção sísmica e detalhamento das sequências, vide artigo do tópico 2.1 deste trabalho.

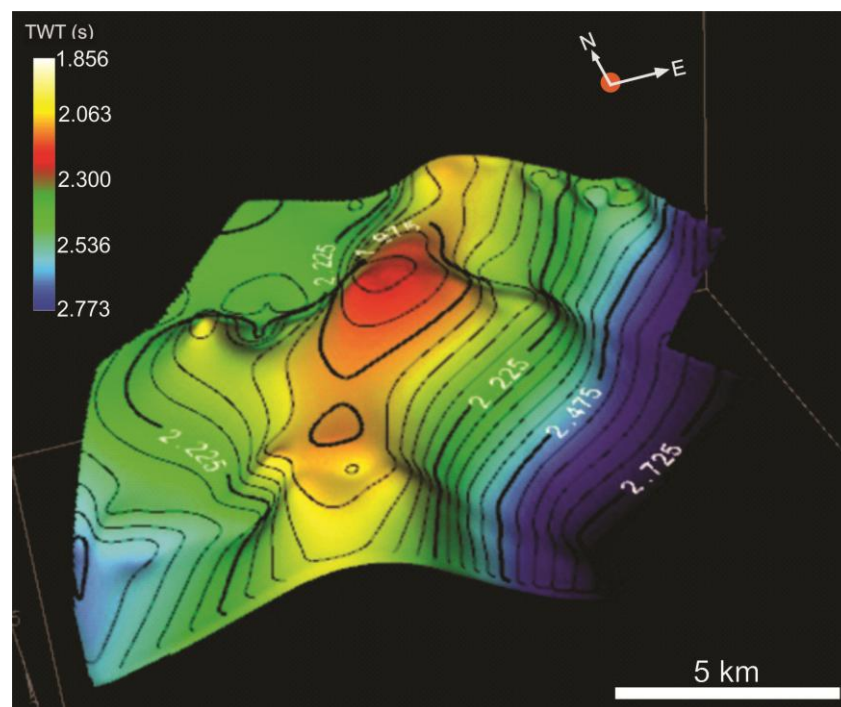


Figura 18 - Modelagem do topo de um *buildup* carbonático encontrado na Bacia de Pernambuco. Para localização da estrutura, vide artigo do tópico 2.2 deste trabalho.

3.4 Rochas evaporíticas e depósitos de turbiditos na Bacia de Pernambuco

Durante a interpretação das seções sísmicas, também observou-se a presença de rochas evaporíticas e de algumas superfícies erosionais sobre as quais possivelmente ocorreu a formação de massas de depósitos turbidíticos na região do platô. A interpretação dos dados permitiu inferir a ocorrência desses depósitos e também verificar que estes podem gerar alguma dificuldade de distinção em relação a ocorrência de depósitos de origem vulcanoclástica. Devido à morfologia dos complexos turbidíticos e dos fluxos piroclásticos (empilhamento e morfologia de leques), e a característica das sismofácies associadas a ambos os depósitos, é possível haver dificuldade na distinção entre estes.

Apesar da limitação dos dados 2D não ter permitido um mapeamento detalhado das sucessões de depósitos turbidíticos, observou-se que na região norte do platô, há vários complexos e estruturas montiformes, possivelmente associadas ao empilhamento de fluxos turbidíticos, que ocorrem relacionados a uma superfície de discordância importante. A discordância marca o topo da sequência Sq.2 (Buarque et al., 2016a), de possível idade Maastrichtiana. A sucessão de depósitos turbidíticos parece estar associada a um forte evento regressivo que ocorreu no início do Cenozóico. Apesar dos corpos turbidíticos apresentarem sismofácies semelhantes ao que se observa para os fluxos piroclásticos, dominados por padrão caótico a convoluto, é possível distinguir os pacotes de depósitos turbidíticos devido a sua relação com a estratificação adjacente, também à associação com a feição erosiva do topo do Maastrichtiano e a aspectos como a continuidade lateral e a espacialidade em relação aos edifícios vulcânicos. Também no caso dos pacotes de depósitos turbidíticos, o uso de métodos geofísicos potenciais se faz bastante útil na sua distinção em relação às rochas vulcânicas e vulcanoclásticas, conforme a abordagem já descrita nesta pesquisa (Figs. 16 e 17).

A presença de rochas evaporíticas na região do platô está associada aos depocentros da bacia. Conforme a interpretação desta pesquisa, a camada de evaporitos foi depositada sobre a sucessão sedimentar da primeira fase rifte, com possível idade Aptiana. Dessa forma, as rochas evaporíticas são mais antigas do que as estruturas vulcânicas interpretadas neste trabalho. De forma geral, as fácies sísmicas associadas ao corpo de rochas evaporíticas permitem sua distinção em relação às estruturas vulcânicas. A interpretação das sismofácies revelou que a camada de evaporitos exibe comumente ausência de reflexões sísmicas (padrão *free*). Além disso, a camada evaporítica possui uma continuidade lateral mais expressiva do que as demais estruturas investigadas. Também foi possível verificar que a camada de

evaporitos propiciou a formação de várias estruturas relacionadas à halocinese/tectônica salífera – domos e diápiros (Fig. 16).

CONCLUSÕES

Métodos básicos de interpretação sísmica e procedimentos de pós-processamento, incluindo o uso de filtros de frequência, foram aqui aplicados em um conjunto de 143 seções sísmicas 2D que cobrem grande parte da região *offshore* da Bacia de Pernambuco, no nordeste do Brasil. Esta pesquisa teve como objetivo identificar e caracterizar estruturas vulcânicas e carbonáticas que ocorrem dentro da sucessão sedimentar da bacia. De forma complementar, a modelagem de um conjunto de dados geofísicos potenciais auxiliou na interpretação das estruturas e na confirmação de sua natureza geológica.

Vulcões, soleiras, *vents* e sequências vulcanoclásticas, ligadas aos edifícios vulcânicos, foram identificados nos domínios da Bacia de Pernambuco. Observou-se que os vulcões diferem em termos morfológicos, apesar de suas fácies sísmicas apresentarem padrões similares. Os vulcões foram classificados em dois grupos, um relacionado aos vulcões do tipo escudo (*shield volcanoes*) e o outro que representa vulcões com formato em cone e sub-cone (*cone-shaped*). Soleiras ocorrem abaixo de edifícios vulcânicos e caracterizam-se por reflexões sísmicas de alta amplitude e curta extensão lateral, apresentando interrupção abrupta. As sequências vulcanoclásticas, associadas aos edifícios vulcânicos, são caracterizadas por reflexões sísmicas de alta amplitude e sismofácies caóticas, como resultado da intercalação de derrames de lava, fluxos piroclásticos e sedimentos. Estruturas associadas à migração de fluídos hidrotermais do tipo *Vents* devem apresentar associação com soleiras. Estas estruturas apresentam de forma geral, a parte superior de sua extensão no formato de cratera ou de olho (*eye-shaped*).

Em contraste com a idade do magmatismo que é bem documentado na região costeira da bacia, cuja idade é Albiana, esta pesquisa sugere que uma abundante quantidade de rochas vulcânicas encontradas na região do platô foi formada durante o Cretáceo Superior e Cenozóico. Com base na interpretação sismoestratigráfica, sugere-se que estas rochas se formaram em dois intervalos distintos: Santoniano-Maastrichtiano e Oligoceno - recente. Esses resultados corroboram com a possibilidade já discutida anteriormente de que o magmatismo na região da bacia de Pernambuco está ligado à influência de uma anomalia termal do manto, possivelmente identificada como o *Hotspot* de Santa Helena. Isto sugere que

à medida que a placa se deslocava em relação à anomalia térmica, o *swell* produzido por sua ascensão continuou afetando a região de placa continental estirada do Platô de Pernambuco.

A metodologia aplicada, que envolveu a integração de dados sísmicos e potenciais, permitiu além da caracterização das estruturas vulcânicas, a identificação de abundantes *buildups* carbonáticos. Estas feições foram classificadas em três tipos principais, conforme sua morfologia e posição estratigráfica-estrutural: recifes de margem de plataforma, desenvolvidos na borda do Alto do Maracatu; *patch reefs*, formados sobre a plataforma do Alto do Maracatu, atrás dos recifes de margem de plataforma; e plataformas carbonáticas isoladas, desenvolvidas na região do platô, associados com paleoaltos topográficos - altos externos do embasamento, diápiros de sal e possivelmente edifícios magmáticos.

Os *buildups* carbonáticos descritos no trabalho foram formados durante a deposição das sequências pós-rifte da bacia. Considerando as idades inferidas para a interpretação das sismo-sequências, essas estruturas apresentam dois intervalos principais de formação: Campaniano - Maastrichtiano e Paleógeno - Mioceno Médio. Sugere-se que a formação dessas estruturas carbonáticas na região distal da bacia, deve ter sido controlada pela formação do platô, que possivelmente criou condições paleotopográficas e oceanográficas locais, que favoreceram a expressiva deposição de sedimentos carbonáticos.

A abordagem levada a cabo por esta pesquisa permitiu que com a integração de dados indiretos, sísmicos e potenciais, em uma região ainda pouco conhecida, fosse possível a identificação e caracterização de estruturas sedimentares e magmáticas dentro da sucessão sedimentar *offshore* da Bacia de Pernambuco.

Os resultados apresentados aqui trazem importante contribuição para o entendimento da evolução da Bacia de Pernambuco e para o entendimento da abertura do Atlântico Sul nessa região. Estas informações também são importantes para futuras avaliações do potencial petrolífero da bacia, com implicações na identificação de *plays* e de intervalos estratigráficos de interesse.

BIBLIOGRAFIA

- Adam, C., Vidal, V., Escartín, J. 2007. 80-Myr history of buoyancy and volcanic fluxes along the trails of the Walvis and St. Helena hotspots (South Atlantic). *Earth and Planetary Science Letters*, 261(3-4): 432-442. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.005>
- Alheiros, M.M., & Ferreira, M.G.V.X. 1989. Considerações sedimentológicas e estratigráficas sobre a Formação Cabo, Pernambuco. *Revista Brasileira de Geociências*, 19 (1): 17-24
- Almeida, F.F., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sciences Review*, 17: 1–29
- Almeida, J.A. C. 2000. Calcários Recifais eocênicos da Formação Maria Farinha na Sub-Bacia de Alhandra, Paraíba: Aspectos Taxionômicos, Paleoecológicos, Paleoambientais e Estratigráficos. MasterDissertation, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 164 pp.
- Almeida, C.B., Cruz, L.R., Jardim de Sá, E.F., Vasconcelos, P.M.P., Medeiros, W.E. 2005. Tectônica e relações estratigráficas na Sub-bacia de Pernambuco, NE do Brasil: contribuição ao conhecimento do rifte Atlântico Sul. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 13(2): 167-180
- Almeida, Y.B., Juliá, J., Frassetto, A. 2015. Crustal architecture of the Borborema Province, NE Brazil, from receiver function CCP stacks: Implications for Mesozoic stretching and Cenozoic uplift. *Tectonophysics*, 649: 68-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2015.03.001>
- Alves, E. C., Costa, M. P. A. 1986. Interpretação sismo-estratigráfica da porção norte do platô de Pernambuco e suas possíveis correlações com a Bacia de Pernambuco-Paraíba. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 34. Goiânia, Atas, v. 1, 286-297
- Alves, T.M., Omosanya, K., Gowling, P., 2015. Volume rendering of enigmatic highamplitude anomalies in southeast Brazil: a workflow to distinguish lithologic features from fluid accumulations. *Interpretation* 3 (2), A1 e A14. [http:// dx.doi.org/10.1190/INT-2014-0106.1](http://dx.doi.org/10.1190/INT-2014-0106.1)
- Antobreh, A.A., Faleide, J.I., Tsikalas, F., Planke, S. Rift-shear architecture and tectonic development of the Ghana margin deduced from multichannel seismic reflection and potential field data. 2009. *Marine and Petroleum Geology*, 26: 345-368
- Antunes, A.F., Jardim de Sá, E.F., Brito, A.F., Araripe, P.T. 2007. Halocinese na Sub-bacia de Pernambuco (Bacia Pernambuco-Paraíba, NE do Brasil). In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 11, Natal. *Boletim de Resumos*, 325-328
- Araujo, 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. <http://dx.doi.org/10.1111/ter.12084>
- Archanjo, C.J., Hollanda, M.H., Rodrigues, S.W.O., Brito Neves, B.B., Armstrong, R. 2008. Fabrics of pre- and syntectonic granite plutons and chronology of shear zones in the Eastern Borborema Province, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, 30: 310-326

Aslanian, D., Moulin, M., Olivet, J., 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. & Carvalho, J.C. 1978. Condicionamento tectônico da sedimentação nas bacias marginais do Nordeste do Brasil (Sergipe/Alagoas e Pernambuco/ Paraíba). In: PETROBRAS Aspectos estruturais da margem continental leste e sudeste do Brasil. Rio de Janeiro, Petrobras/Cenpes/Dintep, 7-24 (Projeto Remac 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: p. 287-306

Barbosa, J.A., Neumann, V.H., Lima Filho, M., Souza, E.M., Moraes, M.A. 2007. Estratigrafia da faixa costeira Recife-Natal (Bacia da Paraíba e Plataforma de Natal), NE Brasil. *Estudos Geológicos*, 17(2): 3-30

Barbosa, J.A., Moraes, D.M.F., Neto, J.C.J. 2008a. 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

Barbosa, J.A., Moraes, D.M.F., Neto, J.C.J. 2008b. 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

Barbosa, J.A., Lima Filho, M., Jesus Neto, J.C., Neumann, V.H., Ribeiro, F.S., Batista, A.P. 2009. Depósitos Albianos da faixa costeira da Bacia de Pernambuco: proposição de uma nova unidade estratigráfica, a Formação Suape. In: 5º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Fortaleza. *Boletim de resumos em CD ROM*

Barbosa, J.A., Maia, M.F.B., Lima Filho, M., Magalhães, J.R., Correia, O. 2014. Seismic stratigraphy of the onshore portion of Pernambuco Basin: evidence of break-up during Middle Albian for the South Atlantic Rift in Northeast Brazil. In: AAPG Annual Conference and Exhibition, Houston, Search and Discovery Article #30324 (2014)

Bezerra, F.H.R., Takeya, M.K., Sousa, M.O.L., Nascimento, A.F. 2007. Coseismic reactivation of the Samambaia Fault, Brazil. *Tectonophysics*, 430: 27-39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2006.10.007>

Bezerra, F.H.R., Nascimento, A.F., Ferreira, J.M., Nogueira, F.C., Fuck, R.A., Neves, B.B.B., Sousa, M.O.L. 2011. Review of active faults in the Borborema Province, Intraplate South America — Integration of seismological and paleoseismological data. *Tectonophysics*, 510: 269-290. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2011.08.005>

- 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(3-4): 275-278. [http://dx.doi.org/10.1016/S0899-5362\(02\)00025-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0899-5362(02)00025-8)
- Buarque, B.V., Barbosa, J.A., Magalhães, R.G., Oliveira, J.T.C., Correia Filho, O. 2016a. Post-rift volcanic structures of the Pernambuco Plateau, northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 70 (2016) 251-267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2016.05.014>
- Buarque, B.V., Barbosa, J.A., Oliveira, J.T.C., Correia Filho, O., Magalhães, R.G. 2016b. Carbonate Buildups in the Post-Rift Sequence of the Pernambuco Basin, NE Brazil: Oil Play Implications. In: AAPG Annual Conference and Exhibition, Calgary, Search and Discovery Article #10854 (2016)
- Bueno, G.V. 2004. Diacronismo de eventos no rifte Sul-Atlântico. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 12(2): 203-229
- Burgess, P.M., Winefield, P., Minzoni, M., Elders, C. 2013. Methods for identification of isolated carbonates buildups from seismic reflection data. *AAPG Bull.* 97 (7), 1071-1098. <http://dx.doi.org/10.1306/12051212011>
- Castro, D.L., Bezerra, F.H.R., Sousa, O.L., Fuck, R.A. 2012. Influence of Neoproterozoic tectonic fabric on the origin of the Potiguar Basin, Northeast Brazil and its links with West Africa based on gravity and magnetic data. *Journal of Geodynamics*, 54: 29-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2011.09.002>
- Catuneanu, O. 2006. *Principles of Sequence Stratigraphy*. Elsevier Science, 1st Edition, 386 pp. ISBN: 9780444515681
- Chang, H.K; Kowsmann, R.O.; Figueiredo, A.M.F.; Bender, A.A. 1992. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. *Tectonophysics*, 213 (1992) 97—138. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam
- Chen, Z., Huo, Y., Li., J., Ge, Z., Zhang, Z., Liu, B. 1999. Relationship Between Tertiary Volcanic Rocks and Hydrocarbons in the Liaohe Basin, People's Republic of China. *AAPG Bulletin*, 83(6): 1004-1014
- Conceição, J.C.J., Zal_an, P.V., Dayan, H. 1993. Deformações em rochas sedimentares induzidas por intrusões magmáticas: classificação e mecanismos de intrusão. *Bol. Geociências Petrobras* 7 (1-4), 57-91
- Córdoba, V.C., Jardim de Sá, E.F., Sousa, D.C., Antunes, A.F. 2007. Bacia de Pernambuco-Paraíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 391-403
- Dantas, E.L., Souza, Z.S., Wernick, E., Hackspacher, P.C., Martin, H., Xiaodong, D., Li, J. 2013. Crustal Growth in the 3.4-2.7 Ga São José de Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. *Precambrian Research*, 227: 120-156. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2012.08.006>
- Davison, I. 2007. Geology and tectonics of the South Atlantic Brazilian salt basins. *Geol. Soc. Spec. Pub.* 277: 345-359

- Dickson, W., Fryklund, R.E., Odegard, M., Green, C.M. 2003. Constraints for plate reconstruction using gravity data-implications for source and reservoir distribution in Brazilian and West African margin basins. *Marine and Petroleum Geology*, 20: 309-322
- Eberli, G. P., J. L. Masafferro, and J. F. R. Sarg. 2004. Introduction, in G. P. Eberli, J. L. Masafferro, and J. F. R. Sarg, eds. *Seismic imaging of carbonate reservoirs and systems: AAPG Memoir 81*, p. 1–9
- Fainstein, R. & Milliman, J.D. 1979. Structure and origin of three continental-margin plateaus, Northeastern Brazil. *AAPG Bulletin*, 63(2): 218–238
- Fairhead, J.D. and Binks, R.M. 1991. Differential opening of the Central and South Atlantic Oceans and the opening of the West African rift system. *Tectonophysics*, 187: 191-203
- Feijó, F. J. 1994. Bacias de Sergipe e Alagoas. *B. de Geoci. da Petrobras*, , v. 8, n. 1, p 149-16, jan./mar. 1994
- Feng, Z. 2008. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: A case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China. *Marine and Petroleum Geology*, 25(4-5): 416-432. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.01.008>
- Ferreira, J.M., Bezerra, F.H.R., Sousa, M.O.L., Nascimento, A.F., Sá, J.M., França, G.S. 2008. The role of Precambrian mylonitic belts and present-day stress field in the coseismic reactivation of the Pernambuco lineament, Brazil. *Tectonophysics*, 456: 111-126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2008.01.009>
- Fjeldskaar, W., Helset, H.M., Johansen, H., Grunnaleite, I., Horstad, I. 2008. Thermal modelling of magmatic intrusions in the Gjallar Ridge, Norwegian Sea: implications for vitrinite reflectance and hydrocarbon maturation. *Basin Research*, 20(1): 143-159. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2117.2007.00347.x>
- Galushkin, Y.I. 1997. Thermal effects of igneous intrusions on maturity of organic matter: a possible mechanism of intrusion. *Organic Geochemistry*, 26(11-12): 645-658. [http://dx.doi.org/10.1016/S0146-6380\(97\)00030-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0146-6380(97)00030-2)
- Gandini, R., Rossetti, D.F., Netto, R.G., Bezerra, F.H.R., Góes, A.M. 2014. Neotectonic evolution of the Brazilian northeastern continental margin based on sedimentary facies and ichnology. *Quaternary Research*, 82(2): 462-472. <http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2014.07.003>
- Golonka, J. & Bocharova, Y.B. 2000. Hot spot activity and the break-up of Pangea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 161: 49-69
- 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. <http://dx.doi.org/10.1029/GM115p0261>

- Greenlee, S. M., and P. J. Lehmann. 1993. Stratigraphic framework of productive carbonate buildups, in R. G. Loucks and J. F. Sarg, eds., Carbonate sequence stratigraphy: Recent development and applications: AAPG Memoir 57, p. 43–62
- Gries, R.C., Clayton, J.L., Leonard, C. 1997. Geology, thermal maturation and source rocks geochemistry in a volcanic covered basin: San Juan sag, South-Central Colorado. AAPG Bulletin, 81(7): 1133-1160
- Gu, L., Ren, Z., Wu, C., Zhao, M., Qiu, J. 2002. Hydrocarbon reservoirs in a trachyte porphyry intrusion in the eastern depression of the Liaohe Basin, Northeast China. AAPG Bulletin, 86(10): 1821-1832
- Gunn, P.J. 1997. Quantitative methods for interpreting aeromagnetic data: a subjective review. AGSO J. Aust. Geol. Geophys. 17 (2), 105-113
- Gurgel, S.P.P., Bezerra, F.H.R., Correa, A.C.B., Marques, F.O., Maia, R.P. 2013. Cenozoic uplift and erosion of structural landforms in NE Brazil. Geomorphology, 186: 68-84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.023>
- Hansen, D.M. 2006. The morphology of intrusion-related vent structures and their implications for constraining the timing of intrusive events along the NE Atlantic margin. J. Geol. Soc. 163, 789-800. <http://dx.doi.org/10.1144/0016-76492004-167>
- Hansen, D.M., Redfern, J., Federici, F., Biasse, D., Bertozzi, G. 2008. Miocene igneous activity in the Northern Subbasin, offshore Senegal, NW Africa. Mar. Pet. Geol. 25 (1), 1-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.04.007>
- Hawlander, H.M. 1990. Diagenesis and reservoir potential of volcanogenic sandstones - Cretaceous of the Surat Basin, Australia. Sedimentary Geology, 66(3-4): 181-195. [http://dx.doi.org/10.1016/0037-0738\(90\)90059-3](http://dx.doi.org/10.1016/0037-0738(90)90059-3)
- Hou, L., Yang, C., Yang, F., Lou, X., Wei, Y. 2015. Petroleum geology of Carboniferous volcanic weathered crust in northern Xinjiang, China. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 63(2): 171-191
- Huafeng, T., Phiri, C., youfeng, G., yulong, H. Weihua, B. 2015. Types and characteristics of volcanostratigraphic boundaries and their oil-gas reservoirs significance. Acta Geologica Sinica, 89(1): 163-174. <http://dx.doi.org/10.1111/1755-6724.12402>
- Jackson, M.P.A., Cramez, C., Fonck, J. 2000. Role of subaerial volcanic rocks and mantle plumes in creation of South Atlantic margins: implicatins for salt tectonics and source rocks. Marine and Petroleum Geology, 17(4): 477-498. [http://dx.doi.org/10.1016/S0264-8172\(00\)00006-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0264-8172(00)00006-4)
- James, N. P., and A. C. Kendall. 1992. Introduction to carbonate and facies models, in R. G. Walker and N. P. James, eds., Facies models: Response to sea level change: Newfoundland, Geological Association of Canada, p. 265– 275
- James, N. P. 1997. The cool-water carbonate depositional realm, in N. P. James and J. A. D. Clarke, eds., Coolwater carbonates: SEPM Special Publication 56, p. 1–20

- Jamtveit, B., Svensen, H., Podladchikov, Y., Planke, S. 2004. Hydrothermal vent complexes associated with sill intrusions in sedimentary basins. In: Breitzkreuz, C., Petford, N. (Eds.), *Physical Geology of High-level Magmatic Systems*, Geological Society, London, Special Publications, 234, pp. 233-241. [http:// dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.234.01.15](http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.234.01.15)
- Jelinek, A.R., Chemale Jr., F., Van deer Beek, P.A., Cupertino, J.A., viana, A. 2014. Denudation history and landscape evolution of the northern East-Brazilian continental margin from apatite fission-track thermochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 54: 158-181
- Jin, Q., Shousheng, X., Lu, P. 1999. Catalysis and hydrogenetaion: volcanic activity and hydrocarbon generation in rift basins, eastern China. *Applied Geochemistry*, 14(5): 547-558. [http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927\(98\)00086-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927(98)00086-9)
- Jin, C., Pan, W., Qiao, D. 2013. Volcanic facies and their reservoirs charactersitics in Eastern China basins. *Journal of Earth Science*, 24(6): 935-946. <http://dx.doi.org/10.1007/s12583-013-0380-8>
- Jinglam, L., Chengli, Z., Zhihao, Q. 1999. Volcanic reservoir rocks: a case study of the Cretaceous Fenghuadian Suite, Huanghua Basin, Eastern China. *Journal of Petroleum Geology*, 22(4): 397-415. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-5457.1999.tb00476.x>
- Jiyan, L., Xuanlong, X., Zhe, S., Xiaoting, X., Yu, R. 2014. Thermal simulation of basic volcanic fluid influence on different source rocks. *Chinese Journal of Geochemistry*, 33: 168-172. <http://dx.doi.org/10.1007/s11631-014-0673-3>
- Kawamoto, T. 2001. Distribution and alteration of the volcanic reservoir in the Minami-Nagaoka gas field. *Journal of Japanese Association for Petroleum Technology*. 66(1): 46-55
- Kiessling, W., E. Fluegel, and J. Golonka. 1999. Paleoreef maps: Evaluation of a comprehensive database on Phanerozoic reefs: *AAPG Bulletin*, v. 83, p. 1552–1587
- Klarnar, A., Ujetz, B., Fontana, R.L. 2008. Enhanced depositional and AVO models for lithologically complex sandstones in the Santos Basin, offshore Brazil. *Pet. Geosci.* 14 (3), 235-243. <http://dx.doi.org/10.1144/1354-079308-760>
- Knesel, K.M., Souza, Z.S., Vasconcelos, P.M., cohen, B. E., Silveira, F.V. 2010. Young volcanism in the Borborema Province, NE Brazil, shows no evidence for a trace of the Fernando de Noronha plume on the continent. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(1-2): 38-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.036>
- Lee, G.H., Kwon, Y.I., Yoon, C.S., Kim, H.J., Yoo, H.S. 2006. Igneous complexes in the eastern Northern South Yellow Sea Basin and their implications for hydrocarbon systems. *Marine and Petroleum Geology*, 23(6): 631-645. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2006.06.001>

Leite, P.R.B., Bertrand, J., Lima E.S., Leterrier, J. 2000. Timing of granitic magmatism in the northern Borborema Province, Brazil: a U±Pb study of granitoids from the Alto Pajeu Terrain. *Journal of South American Earth Sciences*, 13: 549-559.

Lenhardt, N. and Götz, A. 2011. Volcanic settings and their reservoir potential: An outcrop analog study on the Miocene Tepoztlán Formation, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 204: 66-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.03.007>

Lentini, M.R., Fraser, S., Summer, H.S., Davies, R. 2010. Geodynamics of the South Atlantic conjugate margins: implications for hydrocarbon potential. *Petroleum Geosciences*, 16: 217-229

Leslie, S.C., Moore, G.F., Morgan, J.K., Hills, D.J. 2002. Seismic stratigraphy of the frontal Hawaiian Moat: implications for sedimentary processes at the leading edge of an oceanic hotspot trace. *Mar. Geol.* 184 (1-2), 143-162

Levin, L.E. 1995. Volcanogenic and volcanoclastic reservoir rocks in Mesozoic-Cenozoic island arcs: examples from the Caucasus and the NW Pacific. *Journal of Petroleum Geology*. 18(3): 267-288. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-5457.1995.tb00906.x>

Lima Filho, M.F. 1998. *Análise Estrutural e Estratigráfica da Bacia Pernambuco*. Unpublished doctorate Thesis, Geosciences Institute, São Paulo University IAG-USP, São Paulo. 139 pp.

Lima Filho, M.F. & Szatmari, P. 2002. Ar-Ar geochronology of volcanic rocks of the Cabo magmatic province (CMP) – Pernambuco Basin. In: SIMPÓSIO SOBRE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 2002, Belém. Sociedade Brasileira de Geologia, 2002, n. 2, p. 59.

Lima Filho, M.F. & Barbosa, J.A. 2010. The peculiar tectono-stratigraphic evolution of the eastern margin of Northeast Brazil, and its African Counterpart. In *Conjugate Margins II*, Lisbon. Extended abstracts v. VIII, p. 304-308. ISBN 978.989.96923.1.2

Long, L.E., Sial, A.N., Nekvasil, H., borba, G.S. 1986. Origin of Granite at Cabo de Santo Agostinho, Northeast Brazil. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 341-350

Luo, J., Morad, S., Liang, Z., Zhu, Y. 2005. Controls on the quality of Archean metamorphic and Jurassic volcanic reservoir rocks from the Xinglongtai buried hill, Western depression of Liaohe Basin, china. *AAPG Bulletin*, 89(10): 1319-1346. <http://dx.doi.org/10.1306/05230503113>

Mabesoone, J. M. & Aleheiros, M. M. 1993. Evolution of the Pernambuco-Paraíba-Rio Grande do Norte Basin and the problem of the South Atlantic connection. *Geologie en Mijnbouw*, Kluwer Academic Publishers. 71: 351-362

Magalhães, J.R., Barbosa, J.A., Oliveira, J.T.C., Lima Filho, M.F. 2014. Characterization of the ocean-continent transition in the Paraíba Basin and Natal Platform region, NE Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 32(3): 481-496

Magalhães, J.R.G. 2015. Compartimentação tectono-sedimentar da bacia da Paraíba, a partir da integração de métodos potenciais e interpretação sísmica de dados offshore. Master Dissertation Thesis, Post-Graduation Program in Geosciences, Department of Geology, Federal University of Pernambuco, Recife - Brazil, 86 pp.

Magee, C., Hunt-Stewart, E., Jackson, C.A.L. 2013. Volcano growth mechanisms and the role of sub-volcanic intrusions: insights from 2D seismic reflection data. *Earth Planet. Sci. Lett.* 373, 41e53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.04.041>

Magee, C., Duffy, O.B., Purnell, K., Bell, R.E., Jackson, C.A.-L., Reeve, M.T. 2015. Fault-controlled fluid flow inferred from hydrothermal vents imaged in 3D seismic reflection data, offshore NW Australia. *Basin Res.* 1-20. <http://dx.doi.org/10.1111/bre.12111>

Maia, M.F.B. 2012. Revisão Estratigráfica do intervalo Aptiano-Albiano da Bacia de Pernambuco Nordeste do Brasil (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-graduação em Geociências, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife - Brasil, 226 pp.

Maia, M.F.B., Barbosa, J.A., Lima Filho, M., Mort, H.P., Santana, F.R. 2012. Características petrográficas e geoquímicas das formações siliciclásticas (Aptiano- Albiano) da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil. *Estud. Geol.* 22 (1), 55-75

Mango, F.D. 1992. Transition metal catalysis in the generation of petroleum and natural gas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(1): 553-555. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90153-A](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(92)90153-A)

Marotta, G.S., França, G.S., Monico, J.F.G., Bezerra, F.H.R., Fuck, R.A. 2015. Strain rates estimated by geodetic observations in the Borborema Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 58: 1-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2014.12.006>

Matos, R.M. D. 1999. History of the northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break up between Brazil and west África. In: N.R. Cameron, R.H. Bate & V.S. Clure, (eds). *The oil and gas habitats of the South Atlantic*. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 153: 55-73

Medeiros, V.C., Medeiros, W.E., Sá, E.F.J. 2011. Utilização de imagens aerogamaespectrométricas, Landsat 7 ETM+ e aeromagnéticas no estudo do arcabouço crustal da porção central do domínio da Zona Transversal, Província Borborema, NE do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(1): 83-97

Mello, S.L.M., Costa, M.P.A., Miranda, C.A., Boa Hora, M.P.P. 1988. Modelagem gravimétrica do limite crosta continental/oceânica na região do Platô de Pernambuco. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 35, Belém. *Anais*, v. 4, 1647-1656

Milani, E.J., Rangel, H.D., Bueno, G.V., Stica, J.M., Winter, W.R., Caixeta, J.M., Neto, O.C.P. 2007. Bacias sedimentares brasileiras - Cartas Estratigráficas - Introdução. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*. 15(2): 183-205

Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, Brasil. Zoneamento Nacional de Recursos de Óleo e Gás. Atualização 2011 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2012

Morais Neto, J.M., Hegarty, K.A., Karner, G.D., Alkmim, F.F. 2008. Timing and mechanism for the generation and modification of the anomalous topography of Borborema Province, Northeast Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 26(7): 1070-1086

Moreira, J.B.P., Esteves, C.A., Rodrigues, J.J.G., Vasconcelos, C.S. 2006. Magmatism, sedimentation and stratigraphy of the northern region of the Santos Basin. *Bol. Geociências Petrobras* 14 (1), 161-170

Moulin, M., Aslanian, D., Unternehr, P. 2010. A new starting point for the south and Equatorial and Atlantic Ocean. *Earth-Science Reviews*, 98: 1-37

Nascimento, M.A.L. 2003. Geologia, geocronologia, geoquímica e petrogênese das rochas ígneas cretácicas da província magmática do Cabo e suas relações com as unidades sedimentares da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil. Doctorate Thesis, Post-Graduation Program in Geology and Geodynamics, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Brazil, 264 pp.

Neves, S.P. and Mariano, G. 1999. Assessing the tectonic significance of a large-scale transcurrent shear zone system: Pernambuco Lineamento, Northeastern Brazil. *Journal of Structural Geology*, 21: 1639-1383

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(4): 1-14. <http://dx.doi.org/10.1029/2001TC001352>

Neves, S.P., Bruguier, O., Silva, J.M.R., Bosch, D., Alcantara, V.C., Lima, C.M. 2009. The age distributions of detrital zircons in metasedimentary sequences in eastern Borborema Province (NE Brazil): Evidence for intracontinental sedimentation and orogenesis? *Precambrian Research*, 175: 187-205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2009.09.009>

Neves, S.P., Monié, 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

Neves, S.P., Lages, G., Brasilino, R.G., Miranda, A.W.A. 2015. Paleoproterozoic accretionary and collisional processes and the build-up of the Borborema Province (NE Brazil): Geochronological and geochemical evidence from the Central Domain. *Journal of South American Earth Sciences*, 58: 165-187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2014.06.009>

Ngako, V., Njonfang, E., Aka, F.T., Affaton, P., Nnange, J.M. 2006. The north-south Paleozoic to Quaternary trend of alkaline magmatism from Niger-Nigeria to Cameroon: complex interaction between hotspots and Precambrian faults. *Journal of African Earth Sciences*. 45(3): 241-256. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2006.03.003>

Nogueira, F.C.C., Marques, F.O., Bezerra, F.H.R., Castro, D.L., Fuck, R.A. 2015. Cretaceous intracontinental rifting and post-rift inversion in NE Brazil: Insights from the Rio do Peixe Basin. 2015. *Tectonophysics*, 644-645: 92-107

Ólavsdóttir, J., Andersen, M.S., Boldreel, L.O. 2015. Reservoir quality of intrabasalt volcanoclastic units onshore Faroe Islands, Norht Atlantic Igneous Province, Northeast Atlantic. AAPG Bulletin, 99(3): 467-497. <http://dx.doi.org/10.1306/08061412084>

Oliveira, J.T.C. 2013. Análise integrada de dados geofísicos da transição crustal (continente-oceano) da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil. Master Dissertation Thesis, Post-Graduation Program in Geociences, Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil, 65 pp.

Oreiro, S.G. 2006a. Interpretação sísmica dos eventos magmáticos Pós-aptianos no Alto de Cabo Frio, Sudeste do Brasil, gênese e relação com os lineamentos pré-sal (Doctorate Thesis, Post-Graduation Program in Basin Analysis and Mobile Belts). State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 160 pp.

Oreiro, S.G. 2006b. Magmatismo e sedimentação em uma área na plataforma continental de Cabo Frio, Rio de Janeiro, no intervalo Cretáceo Superior - Terciário. Bol. Geociências Petrobras 14 (1), 95-112

Othman, R., Arouri, K.R., Ward, C.R., McKirdy, D.M. 2001. Oil generation by igneous intrusions in the northern Gunnedah Basin, Australia. Organic Geochemistry, 32(10): 1219-1232. [http://dx.doi.org/10.1016/S0146-6380\(01\)00089-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0146-6380(01)00089-4)

Peulvast, J., and Bétard, F. 2015. A history of basin inversion, scarp retreat and shallow denudation: The Araripe Basin as a keystone for understanding long-term landscape evolution in NE Brazil. Geomorphology, 233: 20-40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.009>

Planke, S., Rasmussen, T., Rey, S.S., Myklebust, R. 2005. Seismic characteristics and distribution of volcanic intrusions and hydrothermal vent complexes in the Vøring and Møre basins. In: Dor_e, A.G., Vining, B.A. (Eds.), Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives, Proceedings of 6th Petroleum Geology Conference, pp. 833-844

Polônia, J.A.P. 1997. Geometria e cinemática do Rifte do Cabo, litoral Sul do Estado de Pernambuco. Master Dissertation Thesis. Post-Graduation Program in Geology, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 156 pp.

Pomar, L. 2001. Types of carbonate platforms: a genetic approach. Basin Research, 13, 313-334

Posamentier, H., Aydemir, V., Sipahioglu, €O., Korucu, €O., Stanley, R., Abriel, W., Nantais, P., Welch, R. 2014. Volcanic deposits in the Black Sea e seismic recognition criteria for differentiating volcanics from carbonates. In: AAPG Annual Convention and Exhibition, Houston. Search and Discovery Article #90189

Ramachandran, K., Babu, V., Behera, B.K., Harinarayana, T. 2013. Source rock analysis, thermal maturation and hydrocarbon generation using rock-eval pyrolysis in parts of Krishna-Godavari basin, India: a case study. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 3(1): 11-20. doi: 10.1007/s13202-012-0041-y

Rand, H. M. and Mabesoone, J. M. 1982. Northeastern Brazil and the final separation of South America and Africa. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology, 38(3-4): 163-183. doi: 10.1016/0031-0182(82)90002-5

- Rao, C. P. 1981. Criteria for Recognition of Cold-Water Carbonate Sedimentation: Berriedale Limestone (Lower Permian), Tasmania, Australia. *Journal of Sedimentary Petrology* Vol. 51 (1981)No. 2. (June), Pages 491-506
- Raymond, A.C. and Murchison, D.G. 1988. Development of organic maturation in the thermal aureoles of sills and its relation to sediment compaction. *Fuel*, 67(12): 1599-1608. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-2361\(88\)90202-5](http://dx.doi.org/10.1016/0016-2361(88)90202-5)
- Reis, G.S., Mizusaki, A.M., Roisenberg, A., Rupert, R. 2014. Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira. *Pesquisas em Geociências*, 41(2): 155-168
- Roberts, J. M., Wheeler, A.J., Freiwald, A. 2006. Reefs of the Deep: The Biology and Geology of Cold-Water Coral Ecosystems. *Science* Vol. 312, Issue 5773, pp. 543-547. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1119861>
- Rohrman, M. 2007. Prospectivity of volcanic basins: Trap delineation and acreage de-risking. *AAPG Bulletin*, 91(6): 915–939. <http://dx.doi.org/10.1306/12150606017>
- Rossetti, D.F., Bezerra, F.H.R., Góes, A.M., Brito Neves, B.B. 2011. Sediment deformation in Miocene and post-Miocene strata, Northeast Brazil: evidence for paleoseismicity in a passive margin. *Sedimentary Geology*, 235(3-4): 172-187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.02.005>
- Sá, J.M., Bertrand, J.M., Leterrier, J., Macedo, M.H.F. 2002. Geochemistry and geochronology of pre-Brasiliano rocks from the Transversal Zone, Borborema Province, Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(8): 851-866. [http://dx.doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00081-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00081-5)
- Santos, E.J., & Medeiros, V.C. 1999. Constraints from granitic plutonism on Proterozoic crustal growth of the Transverse Zone, Borborema Province, NE Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*. 29(1): 73-84
- Santos, E.J., Van Schmus, W.R., Kozuch, M. Brito Neves, B.B. 2010. The Cariris Velhos tectonic event in Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(1): 61-76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.003>
- Schlager, W. 2005. Carbonate sedimentology and sequence stratigraphy: SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology Series 8, 200 p.
- Schutter, S.R. 2003. Occurrence of hydrocarbons in and around igneous rocks. *In*: Petford, N and McCaffrey, K.J.W. (eds), *Hydrocarbons in crystalline rocks*. Geological Society, Special Publication, 214: 35-68
- Seemann, U., and Scherer, M. 1984. Volcaniclastics as potential hydrocarbon reservoirs. *Clay Minerals*, 19(9): 457-470
- Sial, A.N., 1976. The post-Paleozoic volcanism of northeast Brazil and its tectonic significance. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 48(supl.): 299–311

Sial, A.N., Long, L.E., Derleide, A.R., Kawashita, K. 1981. Potassium-Argon ages and strontium isotope geochemistry of Mesozoic and Tertiary basaltic rocks, Northeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 53(1): 115-122

Sial, A.N., Long, L.E., Borba, G.S. 1988. Cretaceous Magmatic Province of Cabo, Pernambuco, Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, (17)4: 667-673

Skolotnev, A.A., Peyve, E.V., Ivanova, I.O., Murdmaa, O.V., Levchenko, M.E. 2012. New Data on Composition and Structure of the Pernambuco Seamounts, Brazil Basin, South Atlantic Region Byinskaya. *Doklady Akademii Nauk*, 2012, Vol. 443, No. 3, pp. 330–336. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X12030294>

Smallwood, J., Maresh, J. 2002. The Properties, Morphology and Distribution of Igneous Sills: Modelling, Borehole Data and 3D Seismic from the Faroe-shetland Area. In: *Geological Society of London, Special Publication*, 197, pp. 271-306. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.197.01.11>

Sruoga, P. and Rubinstein, N. 2007. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina. *AAPG Bulletin*, 91(1): 115-129. <http://dx.doi.org/10.1306/08290605173>

Tucker, M., and V. P. Wright. 1990. *Carbonate sedimentology*: Oxford, United Kingdom, Blackwell Scientific Publications, 482 p.

Van Schmus, W.R., Oliveira, E.P., Silva Filho, A.F., Toteu, S.F., Penaye, J., Guimarães, I.P. 2008. Proterozoic links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African Fold Belt. In: Pankhurst, R.J., Trouw, R.A. J., Brito Neves, B.B. & De Wit, M.J. (eds) *West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. Geological Society, London, Special Publications, 294: 69-99. <http://dx.doi.org/10.1144/SP294.5>

Vaucher, A., Neves, S.P., Caby, R., Corsini, M., Egydio-Silva, M., Arthaud, M., Amaro, V. 1995. The Borborema shear zone system, NE Brazil. *Journal of South American earth Sciences*, 8(3-4): 247-266

Vernik, L. 1990. A new type of Reservoir rock in volcanoclastic sequences. *AAPG Bulletin*, 74(6): 830-836. <http://dx.doi.org/10.1306/0C9B23A3-1710-11D7-8645000102C1865D>

Wang, P., and Chen, S. 2015. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, Northeast China. *AAPG Bulletin*, 99(3): 499-523. <http://dx.doi.org/10.1306/09041413095>

Watton, T.J., Wright, K.A., Jerram, D.A., Brown, R.J. 2014. The petrophysical properties of hyaloclastite deposits: implications for petroleum exploration. *AAPG Bulletin*, 98(3) 449-463. <http://dx.doi.org/10.1306/08141313029>

Wilson, M. and Guiraud, R. 1992. Magmatism and rifting in Western and Central Africa, from Late Jurassic to Recent times. *Tectonophysics*, 213(1-2): 203-225. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90259-9](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(92)90259-9)

- Wu, C., Gu, L., zhang, Z., Ren, Z., chen, Z., Li, W. 2006. Formation mechanisms of hydrocarbon reservoirs associated with volcanic and subvolcanic intrusive rocks: examples in Mesozoic-cenozoic basins of eastern China. AAPG Bulletin, 90(1): 137-147. <http://dx.doi.org/10.1306/07130505004>
- Wu, X., Liu, T., Su, L., Su, J. 2010. Lithofacies and reservoir properties of Tertiary igneous rocks in Qikou depression, East China. Geophysical Journal International, 181(2): 847-857. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04559.x>
- Xiao, Q., He, S., Yang, Z., He, Z., Furong, W., Li, S., Tang, D. 2010. Petroleum secondary migration and accumulation in the central Jungar Basin, Northwest China: insights from basin modeling. AAPG Bulletin, 94(7): 937-955. <http://dx.doi.org/10.1306/12090909002>
- Xiao-Yin, T., Gong-Cheng, Z., Jian-She, L., Shu-Chun, Y., Song, R., Sheng-Biao, H. 2014. Modelling of thermal effects of igneous intrusions on the temperature field and organic maturity in the Changchang Sag, Qiongdongnan Basin, South China Sea. Chinese Journal of Geophysics, 57(2): 219-229. <http://dx.doi.org/10.1002/cjg2.20098>
- Yulong, H., Pujun, W., Shuming, C. 2009. Distribution and characteristics of volcanic reservoirs in China. Global Geology, 12(2): 64-79. <http://dx.doi.org/10.13069/jlissn1167329736120091021002>
- Zhang, K., Marfurt, K.J. 2011. Seismic attribute illumination of an igneous reservoir in China. Lead. Edge 30 (3), 266e270. <http://dx.doi.org/10.1190/1.3567256>
- Zou, C., Qu, W., Jia, C., Zhu, R., Zhang, G., Zhao, X., Yuan, X. 2008. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China. Pet. Explor. Dev. 35 (3), 257e271. [http://dx.doi.org/10.1016/S1876-3804\(08\)60071-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1876-3804(08)60071-3)
- Zu, D., Jin, Z., Hu, W., Song, Y., Gao, X. 2007. Effect of igneous activity on hydrocarbon source rocks in Jiyang sub-basin, Eastern China. Journal of Petroleum Science and Engineering, 59(3-4): 309-320. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2007.05.002>