



TERMO DE EXECUÇÃO DESCENTRALIZADA – TED No 017/CPRM/2020
"Estudos de caracterização da fonte dos fenômenos sismológicos
associados a rachaduras e afundamentos de terrenos em região
urbanizada em Maceió-AL, para subsidiar a consolidação das conclusões
até então obtidas pelo Serviço Geológico do Brasil SBG/CPRM e apoiar o
monitoramento do processo na região"

Relatório técnico final

março de 2022

1.0 – Introdução

1.1 – Contexto e antecedentes

Este relatório documenta os resultados associados ao TERMO DE EXECUÇÃO DESCENTRALIZADA – TED No 017/CPRM/2020 "Estudos de caracterização da fonte dos fenômenos sismológicos associados a rachaduras e afundamentos de terrenos em região urbanizada em Maceió - AL, para subsidiar a consolidação das conclusões até então obtidas pela CPRM e apoiar o monitoramento do processo na região".

A demanda deste TED nasceu após um evento sísmico de magnitude 2.1 Mw sentido em Maceió-AL em 03 de março de 2018 e que teve repercussão nacional. Muito embora tenha sido um evento de baixa magnitude, foi seguido de uma notável subsidência do solo que atingiu as casas de alguns bairros de Maceió-AL e, posteriormente, constatou-se que esta subsidência tem sido observada desde os últimos anos e prossegue até o momento presente. Tamanha é a dimensão do fenômeno que a evacuação de algumas áreas foi ordenada.

Um aspecto muito importante é que o local do afundamento fica sobre uma mina subterrânea de extração de sal, que estava em operação há cerca de 40 anos. Esse afundamento e suas consequências afetam diretamente cerca de 20 mil moradores e transeuntes. Através da portaria número 20, de 11 de janeiro de 2019, o SBG/CPRM foi designado para a investigação das causas do fenômeno responsável pelos danos gerados em imóveis e vias públicas localizados no bairro Pinheiro, posteriormente identificados nos bairros vizinhos do Mutange e Bebedouro, o que levou à necessidade da ampliação da investigação. Cabe ressaltar que em 26 de maio de 2019 foi decretado estado de calamidade pública nos bairros afetados, em função da constatação da evolução das fissuras e da contínua subsidência. Em decorrência da subsidência e suas consequências, naquela época, mais de 800 imóveis localizados na área mais crítica foram evacuados por intervenção preventiva da Defesa Civil Municipal. Segundo a Agência Senado¹, "... O processo de afundamento atingiu os bairros do Pinheiro, Mutange, Bebedouro e Bom Parto e provocou a remoção de cerca de 40 mil pessoas das suas casas ou pontos comerciais. Segundo estimativas, o afundamento chegou a comprometer 5,5% da área urbana da capital de Alagoas."

1.2 – Justificativas

Os estudos iniciais do SBG/CPRM foram finalizados em abril de 2019 e as conclusões foram apresentadas em audiência pública. Para o entendimento inicial das

causas desses processos se faz necessário considerar que, historicamente, o bairro Pinheiro, localizado no município de Maceió (AL), vem apresentando inúmeras fissuras, trincas, rachaduras e afundamentos em moradias e vias públicas. O fenômeno se intensificou com a forte chuva de verão em 15 fevereiro de 2018 e o evento sísmico de magnitude regional igual a 2,1 Mw, em 3 de março de 2018, ocorridos na região, que levaram inclusive à interdição de diversas moradias.

Através da Portaria nº 20, de 11 de janeiro de 2019, o SBG/CPRM foi designado para a investigação das causas dos fenômenos responsáveis pelos danos gerados em imóveis e vias públicas localizados no bairro Pinheiro, posteriormente identificados também nos bairros vizinhos do Mutange e Bebedouro, o que levou à extensão da investigação.

Na audiência pública do dia 8 de maio de 2019, o SBG/CPRM discutiu todos os eixos temáticos desenvolvidos e apresentou a seguinte conclusão (Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2019): *“Está ocorrendo desestabilização das cavidades provenientes da extração de sal-gema, provocando halocinese (movimentação do sal) e criando uma situação dinâmica com reativação de estruturas geológicas preexistentes, subsidência e deformações rúpteis em superfície, em parte dos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió-AL.”*

Assim, após a finalização dos estudos iniciais, que possibilitaram um entendimento inicial das causas dos processos danosos que estão ocorrendo nos bairros mencionados de Maceió, fazia-se necessário dar continuidade aos estudos para consolidar o conhecimento e a extensão dos processos geológicos, além de subsidiar com informações técnicas o estabelecimento de premissas e protocolos para o monitoramento das áreas afetadas, bem como ações de salvaguarda e proteção da população que habita aquelas regiões de Maceió. Assim, cabe ressaltar que apesar das conclusões obtidas nos trabalhos já realizados (v. Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2019), faz-se necessário uma melhor compreensão sobre a sismicidade da área e sua origem, quer seja ela de origem geológica-tectônica, seja de causa natural (reativação de estruturas), ou associada ao processo de extração de salgema na região.

1.3 – Objetivos

O presente instrumento visa possibilitar ao Serviço Geológico do Brasil SBG/CPRM estabelecer os meios formais, orçamentários/financeiros e jurídicos, para ter o apoio da equipe de geocientistas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte no desenvolvimento de estudos integrados, tratamento e interpretação de dados geológicos e geofísicos (sísmica, sismologia, métodos potenciais, interferometria de satélite e dados de terreno, além de outros) para subsidiar e ampliar o melhor

entendimento das causas dos afundamentos de terreno e sua possível correlação com os eventos sísmicos que ocorrem na área urbana de Maceió-AL.

1.4 – Envolvimento da equipe da UFRN na temática em tela

Registre-se que, embora o presente TED tenha sido formalizado no segundo semestre de 2020, a participação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte se deu desde o evento sísmico de 03 de março de 2018. Na ocasião, as estações sismográficas da Rede Sismográfica do Brasil (RSBR) foram utilizadas para uma caracterização inicial do referido evento sísmico.

A RSBR, através de estações sismográficas operada pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte e, à época, com custeio promovido pela CPRM, detectou um evento de 2,1 Mw próximo à cidade de Maceió no dia 03 de março de 2018 às 17h30 UTC (14h30, hora local). A estação mais próxima do epicentro está no município de Anadia—AL, a aproximadamente 60 km de distância do epicentro, conforme mostrado na Figura 1.1. Para se ter um comparativo da energia sísmica irradiada neste evento no Bairro de Pinheiro, Maceió—AL, os colapsos de cada uma das Torres Gêmeas do World Trade Center em 11 de setembro de 2001, provocaram magnitudes comparáveis de 2,1 e 2,3 M_L , magnitude local (Kim et al., 2001).

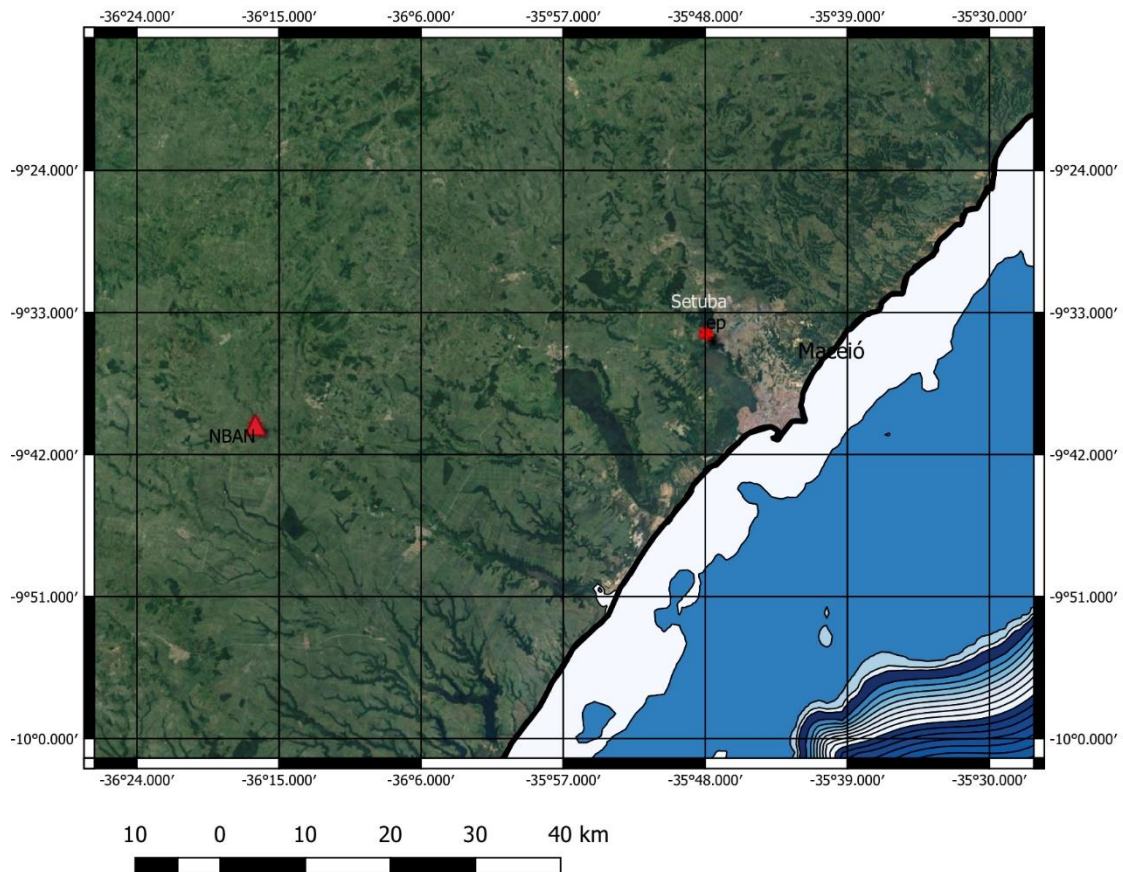


Figura 1.1: Mapa de localização da estação NBAL (triângulo vermelho) e epicentro preliminar (com pelo menos 5 km de erro epicentral).

A Figura 1.2 mostra o registro da estação NBAN (componente vertical do movimento) filtrado entre 1 e 5 Hz. Nesta figura estão marcadas as chegadas das ondas P, S e de superfície (Rg). A diferença de tempo entre a P e S é de aproximadamente 7 s, o que dá uma distância epicentral de 57 km, considerando uma velocidade média das ondas P e S na crosta de 6,0 km/s e 3,5 km/s, respectivamente (Shihadeh, 2015). A onda de superfície, segundo nossa marcação na Figura 2, chega 4,7 s após a onda S e viaja a velocidade de aproximadamente 2,7 km/s e é consistente com valores de tomografia obtidos independentemente por Dias et al. (2015).

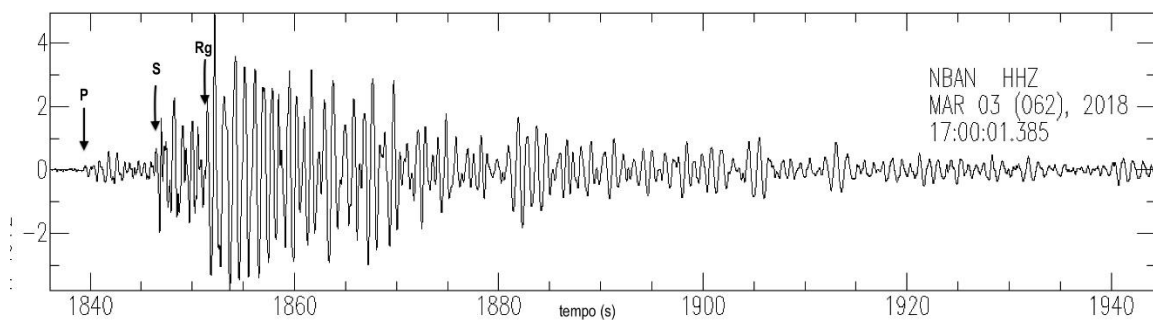


Figura 1.2: Sismograma (componente vertical) do evento ocorrido no Bairro do Pinheiro, em

03/03/2018, às 17h30 (UTC), 14h30 (hora local). A amplitude medida no eixo y é proporcional à velocidade do solo.

Pela presença majoritária de energia sísmica em forma de ondas de superfície, percebe-se claramente que a fonte sísmica estava próxima à superfície e não se tratou de um evento tectônico causado por uma falha no embasamento, por exemplo. Sismogramas com este tipo de assinatura são mais característicos de energia sísmica gerada por explosões próximas à superfície (detonação em pedreiras, por exemplo), colapsos de edificações (Kim et al., 2001) ou colapso de estruturas rasas (até 1 km) (e.g.: Teyssoneyre et al., 2002).

A estação NBCA (instalada em Caruaru—PE) também da RSISNE registrou o evento, conforme mostra a Figura 1.3. Esta estação está a 151 km de distância. Por conta da maior distância, as ondas de superfície são as que melhor aparecem no sismograma.

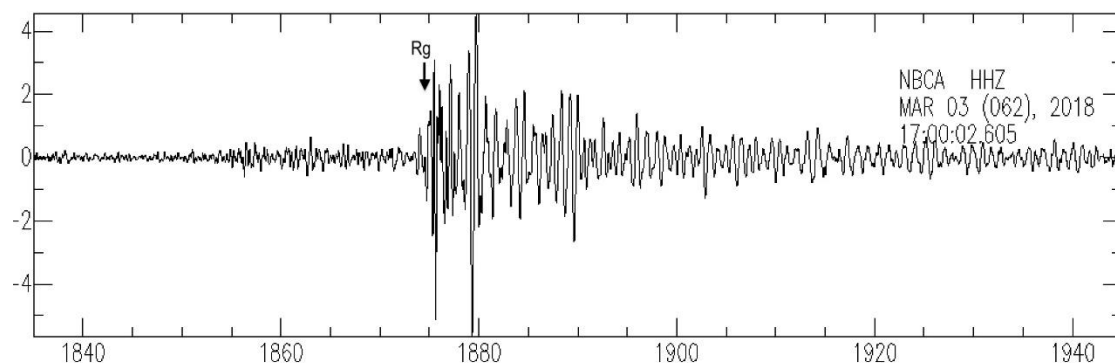


Figura 1.3: Sismograma (componente vertical) do evento ocorrido no Bairro do Pinheiro, em 03/03/2018, às 17h30 (UTC), 14h30 (hora local). A amplitude medida no eixo y é proporcional à velocidade do solo. O eixo x está em segundos. A clara chegada da onda de superfície é mostrada (Rg).

Nos demais registros das estações que foram analisados (alguns registros foram de estações a 415 km de distância), a conclusão é que as ondas de superfície dominam o sinal.

É sabido que maioria dos eventos no Brasil são de origem tectônica e superficiais (< 12 km de profundidade, e.g. Bezerra et al., 2011) no entanto, o evento de 03.03.2018 produziu uma assinatura com as amplitudes das ondas P e S muito menores do que as das ondas de superfície em várias estações da RSBR. Este fato não é observado em terremotos tectônicos como o mostrado na Figura 1.4.

Nas Figuras 1.4a, mostramos o registro (em preto) de evento tectônico ocorrido em Quixeramobim e registrado pela estação de NBMO (Morrinhos, Ceará). O evento ocorreu no dia 31.01.2016, às 00h11min. Na Figura 1.4b, mostramos o registro (em vermelho) do evento de Maceió (03.03.2018), registrado pela estação de NBAN (Anadia, Alagoas). A distância epicentral entre a estação NBMO e o evento sísmico da

Figura 1.4a é a mesma entre o evento de Maceió—AL e a estação NBAN (Figura 1b), ou seja, cerca de 60 km.

Ressaltamos que as estações NBPS e NBAN possuem o mesmo tipo de instrumentação e parâmetros de aquisição, e o evento registrado possui a mesma magnitude e os registros foram filtrados na mesma banda de frequência (passa-alta de 1 Hz).

Note que o evento de Maceió (Figura 1.4b) possui uma proporção muito maior de energia nas ondas de superfície que um terremoto tectônico, (no evento de Quixeramobim, é observada a presença da onda S se sobressaindo às demais e ondas de superfície pouco expressivas). A barra vertical azul nas Figuras 1.4a e 1.4b denotam a chegada da onda P em cada sismograma.

Na Figura 1.4c, mostramos o conteúdo de frequência do registro antes da chegada da onda P na estação NBMO (em preto) e na estação NBAN (em vermelho). Ambas possuem o mesmo nível de ruído de “background” na faixa de frequência mostrada na Figura 1.4c.

Na Figura 1.4d, mostramos agora o conteúdo de frequência para depois da chegada da onda P (ou seja, os eventos sísmicos de interesse), em que o gráfico em preto é o evento tectônico em Quixeramobim (registrado por NBMO) e o gráfico em vermelho é o evento de Maceió (registrado por NBAN).

Na Figura 1.4d, é possível ver que o evento tectônico (espectro em preto) possui um aspecto plano, entre 3 e 8 Hz e entre 8 e 50 Hz (abaixo de 3 Hz, a amplitude do espectro cai devido ao efeito do filtro passa banda). Ainda na Figura 1.4d, é possível observar que o evento em Maceió (espectro em vermelho, Figura 1.4d) possui um aspecto muito mais monocromático, distinto do evento tectônico e, em particular, há uma concentração de energia entre 6 e 7 Hz, referente à energia da onda de superfície deste evento, que são muito marcadas no sismograma.

Em resumo, eventos sísmicos tectônicos (como os da Figura 1.4a) não possuem uma assinatura tal qual a observada em Maceió no dia 03.03.2018. Inclusive, o aspecto dos sismogramas é completamente distinto.

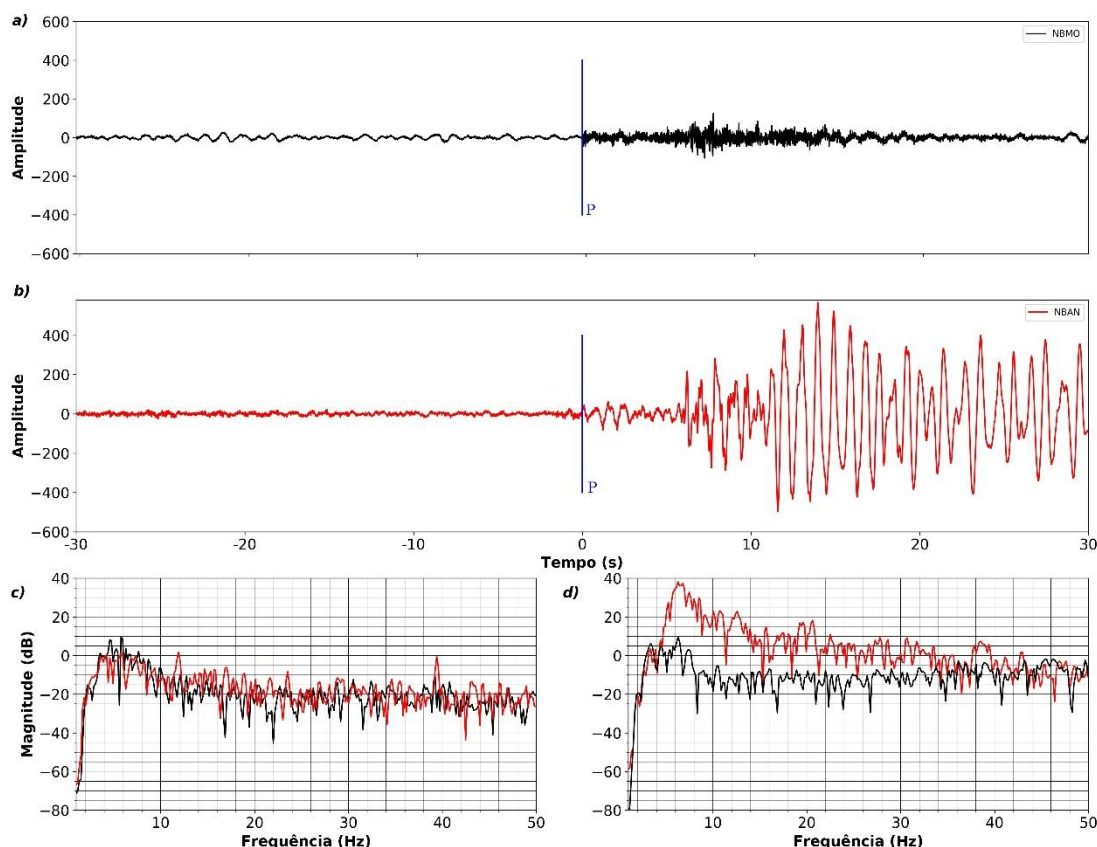


Figura 1.4: Sismogramas de evento tectônico (a) e evento em Maceió (b). (c) e (d) são os espectros de energia dos registros antes e depois da chegada da onda P em cada um dos sismogramas.

1.5 – Breve contextualização sobre o problema de subsidência associado à mineração por dissolução

A subsidência em áreas de exploração de sal por meio de dissolução é um problema de grande relevância para a sociedade, particularmente em áreas densamente povoadas. Além de ser um problema que afeta as pessoas que vivem em regiões afetadas, a indústria também é afetada (Bérest et al. 2005). A literatura registra vários exemplos de estudos onde o emprego de técnicas geofísicas, interferometria de satélite (InSAR), modelagem geomecânica foram utilizadas para promover um melhor entendimento dos processos que governam a subsidência neste tipo de ambiente (Satarugsa et al., 2011; Zhang et al., 2019; Kim et al., 2019; Vassileva et al., 2021).

Em particular, o monitoramento sismológico é uma técnica comumente empregada para investigar sismicidade que pode estar associada a atividades humanas (Grasso & Sornette, 1998; Foulger et al., 2018). Particularmente, a sismicidade induzida devido à mineração por dissolução é reconhecidamente uma atividade que pode modificar o estado de esforços de forma a provocar sismicidade (Hasegawa et al., 1989; Kang et al., 2019, Foulger et al., 2018).

A literatura registra ainda que a sismicidade em mineração é associada a: i – colapso do teto da caverna e ii – reativação de falhas pré-existentes devido ao rearranjo de esforços provocados pela sismicidade (Kinscher et al., 2014; Kinscher et al., 2016). Adicionalmente, há relatos em várias partes do mundo que o colapso (catastrófico ou não) de cavidades pode provocar eventos sísmicos de magnitude até maiores que a observada em Maceió em 03 de março de 2018 às 17h30 UTC (e.g., Li et al., 2007). A literatura também registra que sismicidade associada à mineração de sal por dissolução é uma questão relevante e, inclusive, o monitoramento (e.g. sismológico e deformação da superfície) durante todas as etapas de exploração.

Finalmente, o monitoramento deve ser utilizado como uma das ferramentas de gestão do risco da atividade da indústria (Bérest et al., 2005; Aronov et al., 2010; Cesca et al., 2011), uma vez que se sabe que há risco de dissolução das cavernas de sal nesse tipo de mineração (Warren, 2017).

1.6 – Perfil técnico da equipe da UFRN e outros condicionantes

A Universidade Federal do Rio Grande do Norte possui reconhecida excelência e expertise em temas geocientíficos (no caso em apreço nos domínios da Sismologia e Geologia Estrutural, dentre outros). A UFRN dispõe de laboratórios de geologia e geofísica (Sismologia, Interpretação Sísmica, Geoprocessamento e Levantamentos de Campo) com tecnologia que atendem aos estudos e pesquisa a serem desenvolvidos. Neste sentido, para a UFRN, há um retorno científico de grande valia uma vez que o fenômeno em tela é inédito numa área urbana brasileira, com implicações técnicas e sociais, além de oferecer para a UFRN a oportunidade de: (i) capacitação e aperfeiçoamento de recursos humanos (em nível de graduação e pós-graduação), quer sejam do SGB/CPRM ou da comunidade acadêmica (professores e alunos da UFRN); (ii) especialização da UFRN nos temas em pauta, que exigem conhecimentos geofísicos e geológicos estruturais, promovendo a internacionalização das atividades de pesquisa. É extremamente importante implantar um programa regular de intercâmbio com grupos de maior experiência no tema, em outros países, onde estes fenômenos também ocorrem com expressiva importância e já são objeto específico de protocolos e medidas de salvaguarda da população, nas áreas de maior risco.

Deve ser frisado que o problema é novo no contexto nacional, e a colaboração com grupos do exterior permitiria maior rapidez e segurança na transmissão do conhecimento específico, incluindo as ações de avaliação e prevenção requeridas.

A equipe de elaboração deste relatório é composta pelos pesquisadores elencados abaixo:

Nome	Órgão	Titulação – Função
Aderson Farias do Nascimento	UFRN	Doutorado – Coordenador
Emanuel Ferraz Jardim de Sá	UFRN	Doutorado – vice-coordenador
Carlos César Nascimento e Silva	UFRN	Doutorado – pesquisador
Fernando Antonio Pessoa Lira Lins	UFRN/FUNPEC	Doutorado – pesquisador
Pedro Xavier Neto	UFRN/FUNPEC	Doutorado – pesquisador
José Augusto Silva da Fonsêca	UFRN/FUNPEC	Mestre (doutorando) – pesquisador
Francisco Gabriel Ferreira de Lima	UFRN/FUNPEC	Mestre (doutorando) – pesquisador

Ana Carolina Chaves	UFRN/FUNPEC	Graduanda – pesquisadora
Heloísa França	UFRN/FUNPEC	Graduanda – pesquisadora
Yasmim Galvão	UFRN/FUNPEC	Graduanda – pesquisadora

A equipe combina expertises em sismologia, interpretação e processamento sísmico, geologia estrutural e sensoriamento remoto. Neste sentido o presente documento possui um viés de integração e inovação envolvendo essas diversas técnicas, refletindo esse perfil multidisciplinar e pluriferramental da equipe.

Registre-se também que todo o projeto foi realizado num contexto de pandemia do Covid-19, onde praticamente todo o trabalho da equipe foi feito em formato remoto. Por conta do contexto sanitário em voga, as visitas de campo e a vinda de pesquisador estrangeiro ao projeto não foram possíveis de serem realizadas.

Diante do exposto, o presente documento está dividido da seguinte forma: **Capítulo 2.0** – Banco de dados; **Capítulo 3.0** – Contexto Geológico – A Bacia Sergipe-Alagoas (BSA) e o contexto tectonoestratigráfico regional; **Seção 4.0** – Análise sísmológica; **Seção 5.0** – Interpretação sísmica com controle de poços; **6.0** – Considerações finais e recomendações; **7.0** – **Agradecimentos** e **8.0** – **Referências**.

2. Banco de dados

2.1 Contexto

Para o estudo dos fenômenos de subsidência do solo em Maceió, vários levantamentos geofísicos foram empregados (Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2019) e disponibilizados pelo SBG/CPRM para a elaboração do presente projeto. Adicionalmente, dados geológicos e cartográficos, além de diversos relatórios de empresas foram entregues. Esta diversificação de forma e quantidade de informações teve que ser manipulada e consultada para que pudéssemos atingir os objetivos acordados neste projeto.

O desenvolvimento e implementação de um banco de dados de um projeto multidisciplinar e pluriferramental é bastante complexo, principalmente quando estão envolvidas informações geoespaciais de naturezas bastante diversas. Nesse contexto, a utilização de um banco de dados espacial georreferenciado, permite uma visão holística do conjunto de dados nele armazenado, além de propiciar uma maior dinamicidade na interação banco-cliente/usuário.

Nesse contexto, optou-se por uma proposta de trabalho baseada em um Sistema de Informações Geográficas (o *ArcGIS*), que permite a implementação de um *geodatabase* robusto e de alto desempenho operacional. A visualização dos dados de forma integrada pode ser realizada remotamente através das ferramentas *ArcView* e/ou *ArcMAP*, ambas pertencentes à plataforma *ArcGIS* da ESRI.

Registre-se que a totalidade do projeto em tela foi realizado num contexto de pandemia do novo coronavírus e no âmbito das medidas de isolamento social, onde é imperativa a necessidade de acesso remoto dos diferentes usuários ao banco de dados. Para tanto, foi utilizado o serviço de armazenamento em nuvem de contas institucionais da UFRN, pela facilidade de compartilhamento com os demais integrantes da equipe.

2.2 – Reestruturação da Base de Dados

Como etapa inicial no processo de implementação do Banco de Dados, foi necessário fundir e realizar uma reestruturação dos conjuntos de dados fornecidos pela CPRM. Inicialmente, foram identificados alguns problemas na estruturação geral do banco fornecido, que envolviam desde a duplicidade e excesso de pastas a problemas de hierarquização dos dados (Figuras 2.1 e 2.2).

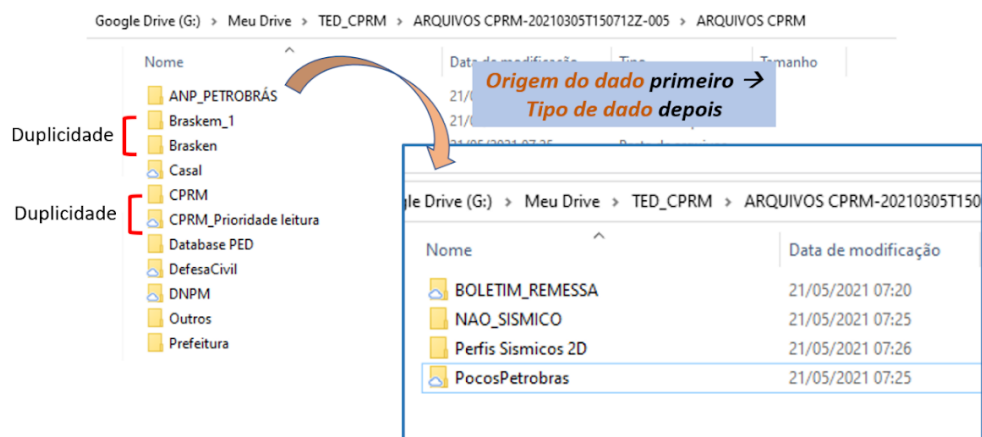


Figura 2.1: Problemas na estruturação geral do banco de dados original fornecido pelo SBG/CPRM: duplicidade de pastas e problemas de hierarquização que dificultavam o acesso aos dados.

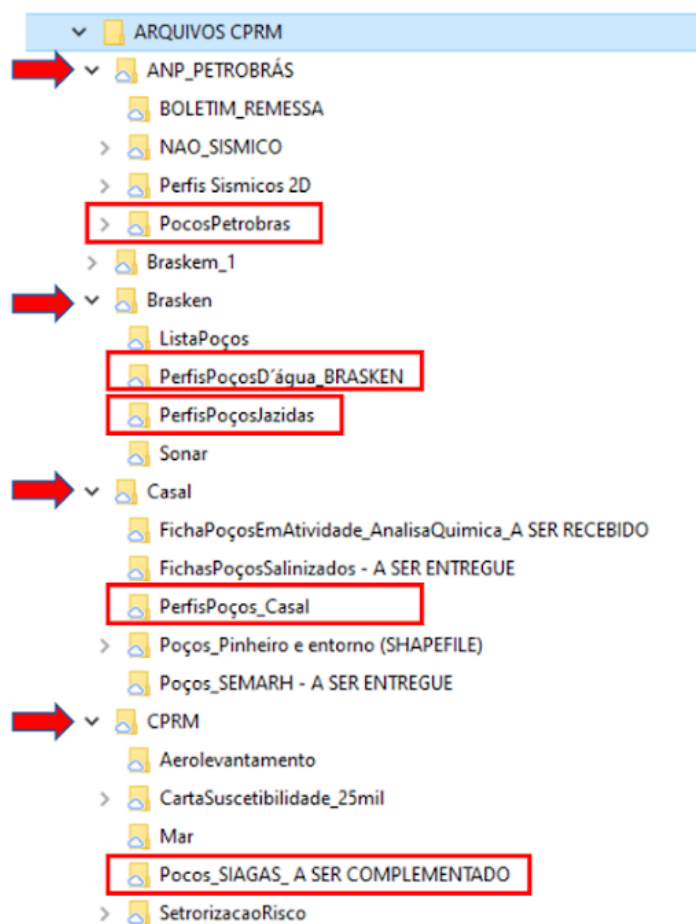


Figura 2.2: Problemas na estruturação geral do banco de dados original fornecido pelo SBG/CPRM: mesmo tipo de dados espalhados por diversas pastas, nomeados de formas diferentes e sem uma regra hierárquica comum.

Uma vez que o banco tem o objetivo de facilitar o acesso aos dados de diferentes áreas de estudo, que foram obtidos por diferentes técnicas/ferramentas e fornecidos ou coletados por diferentes fontes, optou-se por reordenar os diretórios e subdiretórios com a seguinte estruturação em nível:

Nível 1 - Áreas do conhecimento e outros (Dados geofísicos e Dados geológicos)

Nível 2 - Método/ferramenta (sismologia, sísmica, poços, potenciais, etc.)

Nível 3 - Origem do dado (UFF, ANP, ANP_PETROBRAS, BRASKEM, etc).

O **Nível 1** comporta quatro diretórios principais: “*Dados geofísicos*”, “*Dados geológicos*”, “*Dados SIG*” e “*Bibliografia, relatórios e apresentações*”. Nos dois primeiros estão armazenados os dados brutos e principais produtos gerados pelo processamento desses dados. Em Dados SIG, as informações contidas são de caráter essencialmente vetorial (*shapefile*), embora mapas georreferenciados e grids também tenham sido incorporados.

No **Nível 2** estão contidas informações provenientes dos diferentes métodos ou ferramentas utilizados nos estudos de superfície e subsuperfície. Essas informações estão organizadas nos subdiretórios do **Nível 3**, a partir de sua origem, normalmente o órgão que coletou ou forneceu o dado. A nova estruturação do Banco de Dados pode ser observada na Figura 2.3.

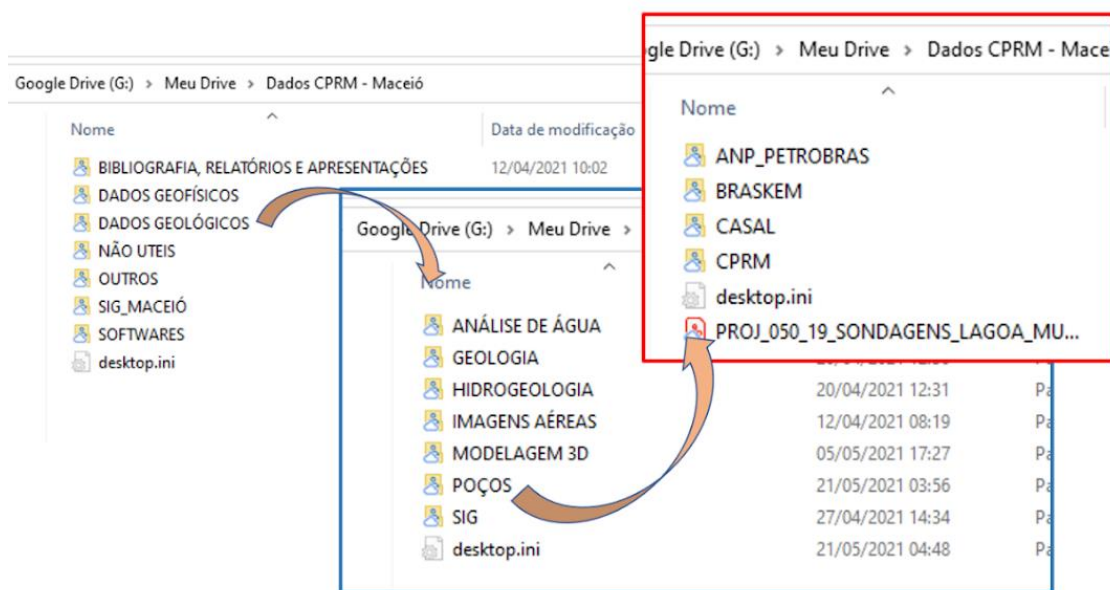


Figura 2.3: Nova estruturação do Banco de Dados em 3 níveis, de forma a facilitar o acesso aos dados, eliminando a redundância hierárquica e o excesso de subpastas.

2.3 – Banco de Dados Georreferenciado

Após a reestruturação do banco, iniciou-se a etapa de adequação da base de dados ao SIG. De forma geral, as bases cartográficas existentes foram convertidas e armazenadas no formato *gdb*, a fim de melhorar a performance do *geodatabase* na

plataforma de visualização (ArcView/ArcMAP) e propiciar uma maior integridade dos dados. Os dados foram incorporados ao banco e as informações foram dispostas de forma que os usuários de diferentes áreas pudessem cruzar espacialmente informações de métodos e fontes distintos (Figura 2.4).

Os diferentes tipos de dados foram convertidos em informações vetoriais do tipo ponto (e.g., poços, cidades), linha (e.g., levantamentos sísmicos) ou polígono (e.g., setores afetados). Ao clicar em determinada feição, uma janela é automaticamente aberta, mostrando um hiperlink para todas as informações existentes no *geodatabase* e que estão relacionadas àquele dado selecionado.

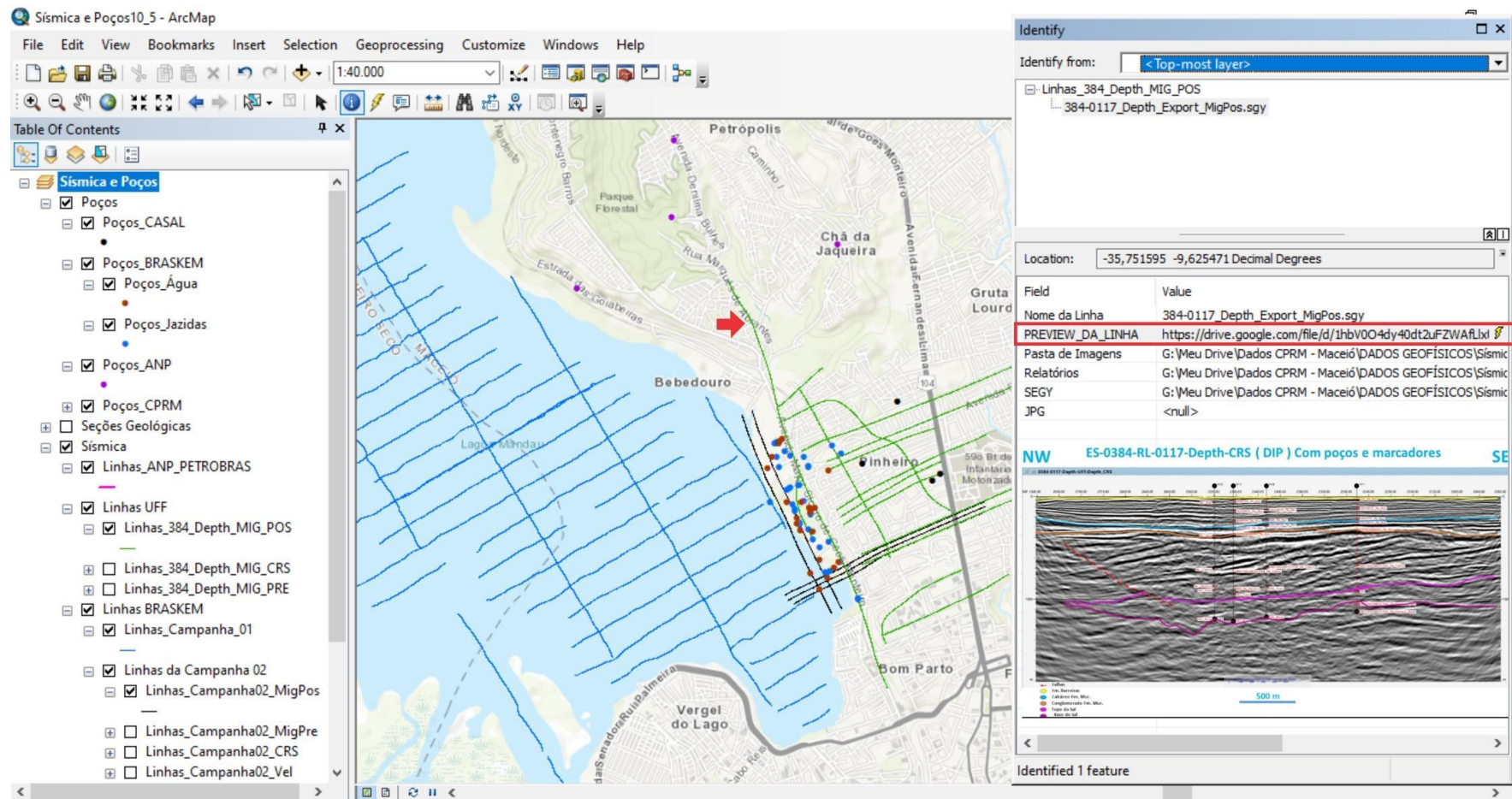


Figura 2.4: Visualização em ArcMAP do banco de dados reestruturado. O acesso às informações é efetuado pela localização espacial dos dados. Ao clicar em uma feição do mapa, é possível recuperar qualquer outra informação relacionada existente no banco de dados. A seta em vermelho indica uma linha sísmica selecionada. Todas as informações relacionadas a esta linha podem ser acessadas no menu 'Identify' do ArcMAP/ArcView a partir de um hiperlink.

2.4 – Recomendações

1 – Incorporar outros elementos do conjunto de dados ao *geodatabase* do ArcGIS, de forma a ampliar a gama de dados contemplados pelo banco que possam ser visualizados. Uma vez que o conjunto de dados é ampliado, novas classes (ou níveis) devem ser criadas, permitindo novas conexões entre as diferentes classes de dados, que devem ser corretamente endereçadas e relacionadas;

2 - Reestruturar do banco a partir de uma plataforma online, de forma a facilitar o acesso remoto aos dados por diferentes clientes com distintos níveis de acesso. Uma reestruturação do banco nesse sentido também pode contemplar um sistema de cadastramento de novos dados, facilitando a parametrização das informações e permitindo a atualização automática dos projetos de visualização de dados no ArcMAP.

3.0 – Contexto Geológico – A Bacia Sergipe-Alagoas (BSA) e o contexto tectonoestratigráfico regional

3.1 – A Bacia Sergipe-Alagoas no contexto geológico do Nordeste brasileiro

A geologia do Nordeste brasileiro envolve os terrenos pré-cambrianos da Província Borborema (afetados pela Orogênese Brasileira) e, a sul, do Cráton São Francisco, capeados por coberturas sedimentares cuja idade varia do Mesoproterozoico ao Recente (Almeida *et al.* 1977; Schobbenhaus *et al.* 1984); *vide* Figura 3.1.

As bacias sedimentares fanerozoicas (pós-Ciclo Brasileiro) do Nordeste compreendem dois grandes grupos (Asmus & Porto 1972,1980; Schobbenhaus & Campos, Asmus, *in* Schobbenhaus *et al.* 1984): (i) a Sinéclise do Parnaíba, ou Bacia Piauí-Maranhão, implantada durante o Paleozóico (a partir do Siluro-Devoniano); coberturas residuais correlatas (de idade Siluro-Devoniana a Neopermiana) estão preservadas no assoalho das bacias do Araripe, Jatobá-Tucano Norte e Sergipe-Alagoas (além de testemunhos remanescentes isolados), sugerindo uma maior extensão original destes depósitos, ou a ocorrência de outras calhas similares; (ii) as bacias interiores e da margem continental, relacionadas ao rifteamento que separou os continentes Sul-Americano e Africano, durante o Cretáceo Inferior; depósitos de idade Juro-Triássica ocorrem na base de parte dessas bacias (a sul do Lineamento Patos, no interior e na margem continental), sendo em geral interpretados como coberturas residuais de estilo *sag*, associados à *Depressão Afro-Brasileira* (Asmus & Porto 1980; Asmus, *in* Schobbenhaus *et al.* 1984; Mohriak 2003), precursora do rifteamento. Na margem continental Sul-Americana (e no caso em apreço, no Nordeste), são distinguidos o domínio da Margem Equatorial (ou Margem Norte, com as bacias Potiguar e Ceará) e o domínio da Margem Leste; as bacias Pernambuco-Paraíba e Sergipe-Alagoas fazem parte do segmento setentrional da Margem Leste (*inset* na Figura 3.1).

Na citada figura, a Bacia Sergipe-Alagoas encontra-se adjacente à Faixa Orogênica Sergipana, neoproterozoica (indistinta no mapa), uma unidade do *Domínio Meridional* da Província Borborema, que bordeja o Cráton São Francisco. A Bacia de Jacuípe (não representada), a sul de Sergipe-Alagoas, ocorre sobre o substrato cratônico. A Bacia Pernambuco-Paraíba, a norte da BSEAL, está localizada sobre o *Maciço Pernambuco-Alagoas* e, mais para norte, atravessa o *Domínio da Zona Transversal* e finaliza na porção oriental do *Domínio Setentrional* da Borborema.

No continente e plataforma rasa, a Sub-bacia de Alagoas (SBAL) limita-se, a norte, com a Bacia Pernambuco-Paraíba (especificamente a Sub-bacia de Pernambuco), através do Alto de Maragogi (Feijó 1994a; Mohriak 2003). A oeste, a bacia é delimitada por uma zona de falhas segmentada, doravante e simplificada

referida como *falha de borda*.

A Bacia Sergipe-Alagoas faz parte do contexto da margem continental Leste brasileira, tendo sido estruturada durante o episódio de rifteamento entre as placas Sul-Americana e Africana, no Cretáceo Inferior. A calha do rifte então implantado é alongada na direção NE, paralela à borda do continente, sendo margeada pelo embasamento cristalino correspondente à Faixa Sergipana, exposta a oeste; as estruturas NW dessa faixa são truncadas em alto ângulo pelas falhas do rifte, neste domínio. A BSEAL ainda preserva unidades neopaleozóicas (Neocarbonífero e Eopermiano) de um estágio de sinéclise do Gondwana, bem como depósitos pré-rifte juro-triássicos. Por fim, as seqüências de margem ativa capeiam os depósitos precedentes, dominando os afloramentos da bacia na sua porção centro-sul sergipana.

3.2 – Limites e compartimentação interna da Bacia Sergipe-Alagoas

3.2.1 – Dados Geológicos

O Mapa Geológico da Bacia Sergipe-Alagoas e Compartimentos Estruturais

A Figura 3.1 deste Relatório apresenta uma versão simplificada do Mapa Geológico do Setor Emerso da BSA, originalmente compilado em escala 1:500.000 (Projeto Bacia Sergipe-Alagoas). A Figura 3.2 traduz em maior detalhe a geologia de superfície no domínio de maior interesse deste estudo. O embasamento pré-cambriano e a SBAL são recobertos por coberturas cenozoicas, em especial da Formação/Grupo Barreiras. As unidades eocretáceas aflorantes são mais jovens no extremo NE da SBAL, e unidades mais antigas, até juro-triássicas, afloram sucessivamente no sentido SE. A porção apresentada na Figura 3.2 e outros exemplos, adiante, ilustra a subdivisão deste domínio da SBAL em blocos estruturais delimitados pelas falhas principais NE, predominantemente de rejeito normal (assim definindo altos e baixos do tipo *horst* e *graben*), preenchidos pelas seqüências rifte. Este arcabouço foi definido principalmente a partir de dados gravimétricos/magnéticos e linhas sísmicas.

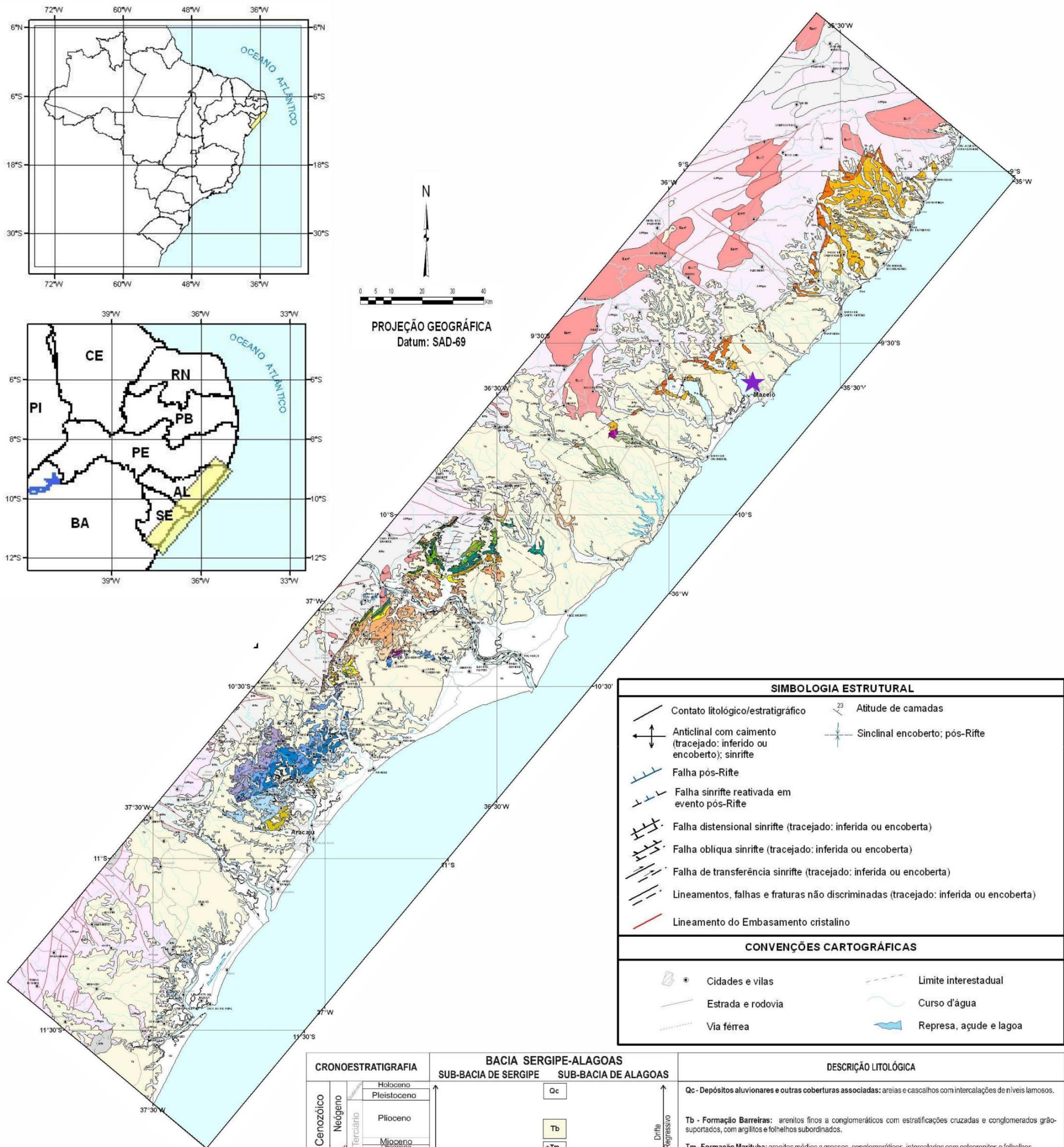
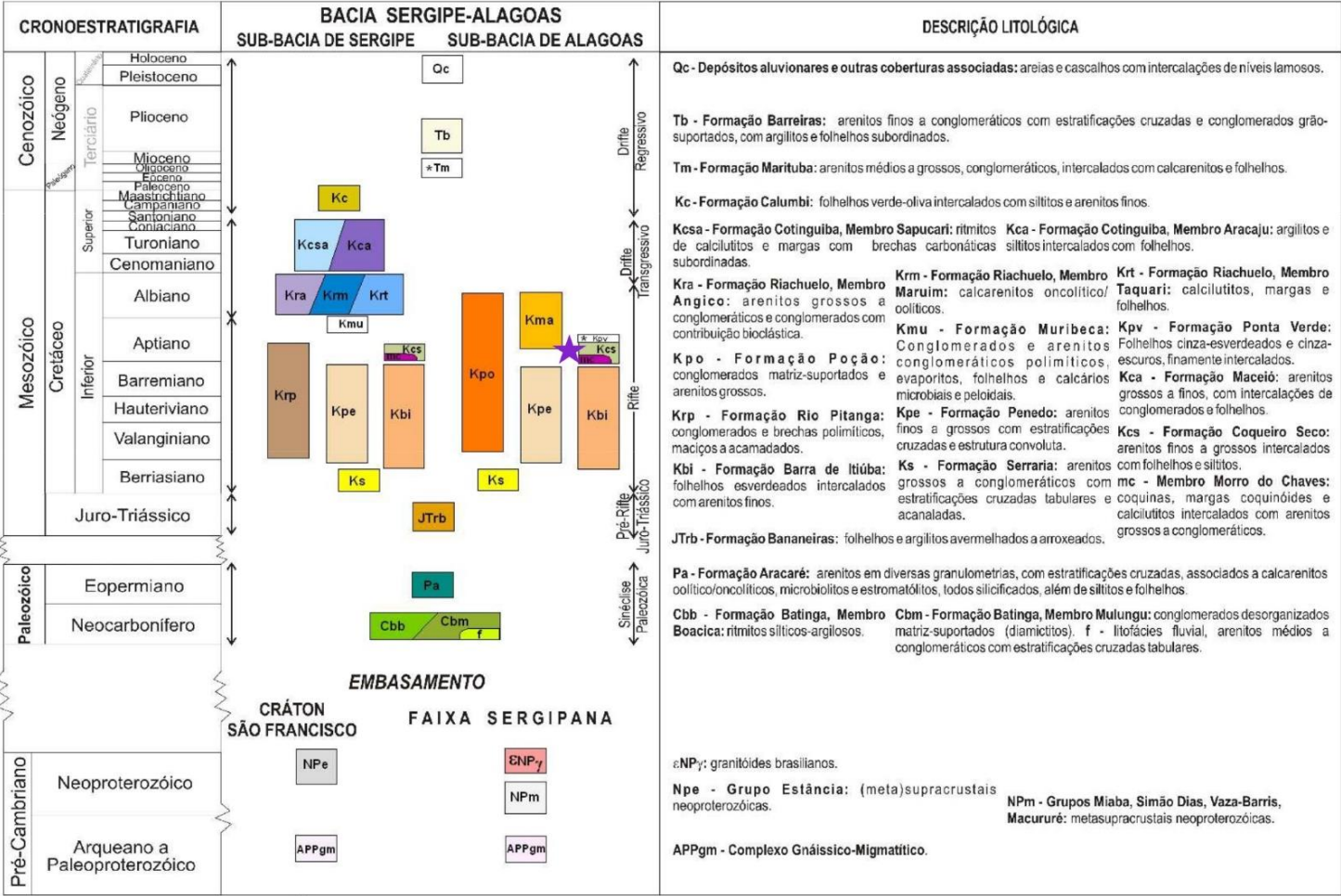


Figura 3.1: Mapa Geológico da Bacia de Sergipe-Alagoas (BSEAL). Modificado a partir de PETROBRAS /DNPM (1975) e mapas geológicos de Sergipe e Alagoas – CPRM, no âmbito do Projeto de Pesquisa ANP/UFRN/PPGG/LGGP “Revisão Geológica e Reavaliação dos Sistemas Petrolíferos da Bacia Sergipe-Alagoas”.



Obs: * em branco, ocorrência em subsuperfície.

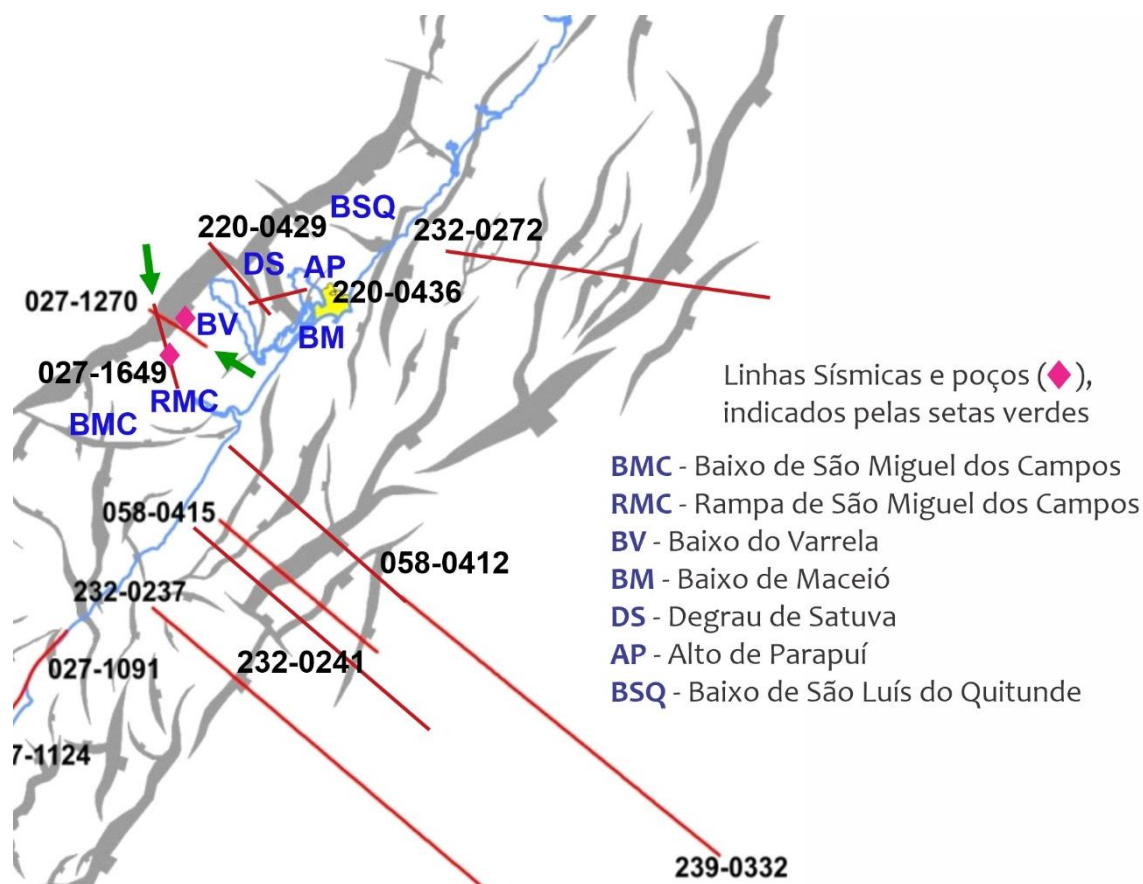
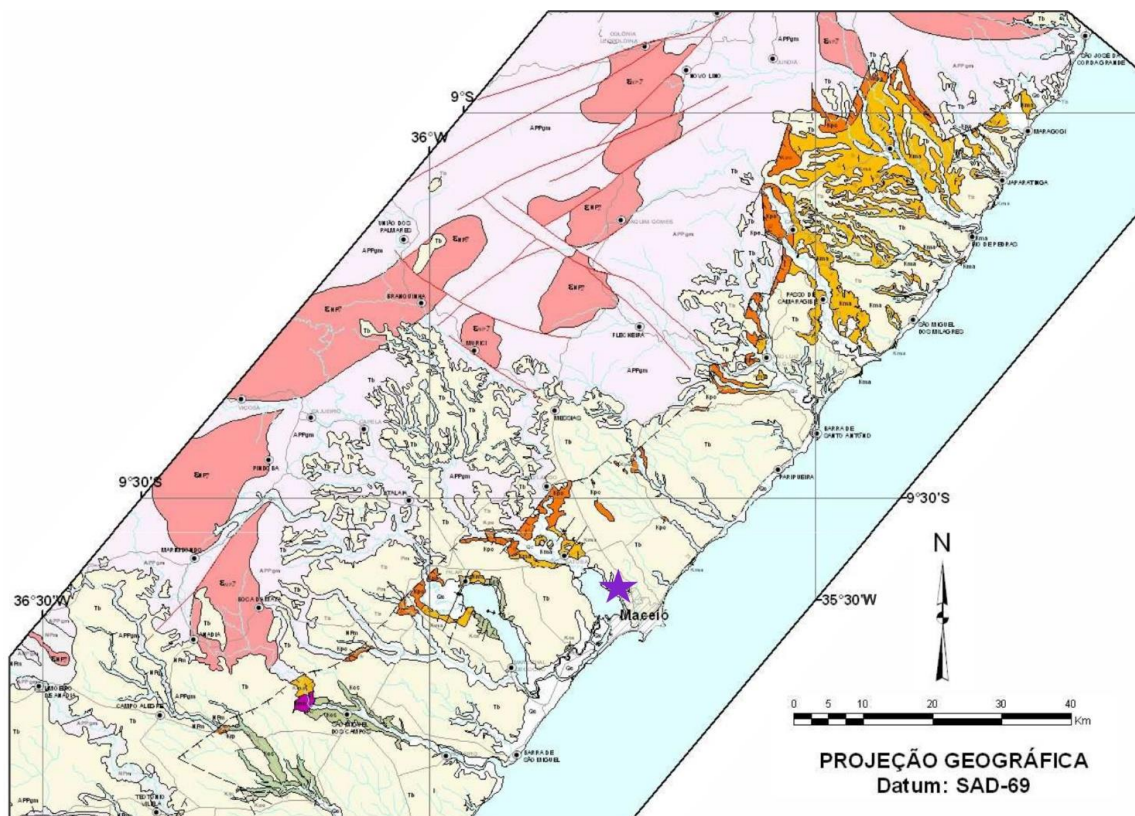


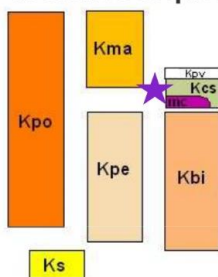
Figura 3.2: Mapa da porção centro-norte da Sub-bacia de Alagoas, com a cartografia sísmica das principais falhas e compartimentos estruturais na região. Extraído do Projeto de Pesquisa ANP/UFRN/LGGP “Revisão Geológica e Reavaliação dos Sistemas Petrolíferos da Bacia Sergipe-Alagoas.” Seleção de linhas sísmicas e poços com dados relevantes para a geologia desta parte da bacia.

3.2.2 – Aspectos Tectônicos

A BSEAL (com maior interesse à SBAL, neste estudo; Figura 3.2) é limitada do embasamento cristalino pré-cambriano, a oeste, por sistemas de falhas distensionais e estruturas associadas (Figuras 3.1, 3.2 e 3.4; ver também outras figuras adiante). Em trechos restritos, o pacote sedimentar capeia o embasamento cristalino em não conformidade. No segmento *offshore*, o embasamento cristalino, tectonicamente afinado e capeado pelo prisma de rochas sedimentares, é sucedido pela crosta oceânica em direção a águas ultraprofundas.



Tectonossequência Riffe



Kpo - Formação Poção: conglomerados matriz-suportados e arenitos grossos.

Kpe - Formação Penedo: arenitos finos a grossos com estratificações cruzadas e estrutura convoluta.

Ks - Formação Serraria: arenitos grossos a conglomeráticos com estratificações cruzadas tabulares e acanaladas.

Kpv - Formação Ponta Verde: Folhelhos cinza-esverdeados e cinza-escuros, finamente intercalados.

Kma - Formação Maceió: arenitos grossos a finos, com intercalações de conglomerados e folhelhos.

Kcs - Formação Coqueiro Seco: arenitos finos a grossos intercalados com folhelhos e siltitos.

mc - Membro Morro do Chaves: coquinas, margas coquinóides e calcilitos intercalados com arenitos grossos a conglomeráticos.

Figura 3.3: A Sub-bacia de Alagoas (Segmento centro-norte). A estrela roxa assinala o corpo de sal na Lagoa de Mundaú (Maceió) e sua posição na carta estratigráfica (ver também a Figura 1). Projeto de Pesquisa ANP/UFRN/LGGP “Revisão Geológica e Reavaliação dos Sistemas Petrolíferos da Bacia Sergipe-Alagoas”. Base geológica modificada pelo citado Projeto a partir de PETROBRAS/DNPM (1975) e mapas geológicos de Sergipe e Alagoas – CPRM.

3.2.3 – O Alto de Maragogi e o Limite Norte da BSEAL/Sub-Bacia de Alagoas

Conforme previamente referido, a Sub-bacia de Alagoas (SBAL) está delimitada, a norte, com a Sub-bacia de Pernambuco (SBPE), pelo *Alto de Maragogi*. Em terra, este alto estrutural é marcado pela exposição do embasamento cristalino pré-cambriano (em especial, granitóides brasileiros e gnaisses paleoproterozoicos e arqueanos) do Maciço Pernambuco-Alagoas, que alcança o litoral (Figuras 3.1 e 3.2). No Alto de Maragogi, a Formação Barreiras, próximo daquela cidade, capeia diretamente o embasamento. Ainda no setor norte da SBAL, a Formação Barreiras também capeia a Formação

Maceió (ou a Formação Poção; ambas são unidades do Estágio Rifte, de idade eocretácea) em discordância angular. A transição da SBAL para o Alto de Maragogi está bem marcada pelo traçado da falha normal de borda, com *trend* NE, que de uma localização no interior do continente (20 a 30 km da linha de costa) é *transferida* para a região litorânea (Figuras 3.1 e 3.2). Neste setor, o limite da SBAL com o Alto de Maragogi, no continente, é marcado por uma linha NW definida por uma falha de transferência ou uma rampa de revezamento (Figura 3.2), que se interliga com as falhas normais principais com direção NE.

Cabe ressaltar a grande semelhança da Formação Poção e da Formação Maceió com as fácies proximal e mediana-distal, respectivamente, da Formação Cabo na Sub-bacia de Pernambuco (Jardim de Sá *et al.* 2003a; Cruz *et al.* 2003,2004). Nestes termos, é importante citar a ocorrência local de seixos de rochas vulcânicas (muito provavelmente, representantes da Suíte Ipojuca, que na Sub-bacia de Pernambuco ocorre intercalada com a Formação Cabo; *vide* referências), em afloramentos de arenitos conglomeráticos próximos à cidade de Maragogi. Datações $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Jardim de Sá *et al.* 2003b,2004) permitem considerar um lapso entre 105 e 100 Ma para o pico de geração das rochas magmáticas da Suíte Ipojuca e, conseqüentemente, uma idade meso a neo-albiana para a seção superior da Formação Cabo. Esse contexto ainda implica em que, no presente caso, a seção da Formação Maceió exposta nas proximidades de Maragogi corresponda ao topo desta formação. Este quadro tem boa correspondência com o intervalo de tempo representado para a Formação Maceió, na carta estratigráfica da SBAL (Figuras 3.1 e 3.2), e suporta o conceito da migração temporal do rifte em direção norte, rumo à Bacia Pernambuco-Paraíba.

3.3 – Síntese da estratigrafia da Bacia Sergipa-Alagoas e suas tectonosequências

A Figura 3.4 apresenta o mapa geológico do setor emerso da Bacia Sergipe-Alagoas (BSEAL), bem como a sua carta estratigráfica, que ilustra as diferenças na ocorrência das unidades litoestratigráficas nas duas sub-bacias.

O modelo estratigráfico da bacia é fortemente alicerçado nos dados da PETROBRAS e em numerosas contribuições de pesquisas acadêmicas. Sínteses importantes foram produzidas por Feijó (1994a), Mohriak *et al.* (1997,1998), Azambuja Filho *et al.* (1998) e Souza-Lima *et al.* (2002), além de outros mais recentes. Estes autores reconhecem, na coluna estratigráfica da BSEAL, a ocorrência de cinco tectonosequências e respectivos estágios de evolução tectônica: Sinéclise, Pré-Rifte, Rifte, Transicional e Drifte (Figura 3.1; ver também a Figura 3.4A). Em um contexto regional e cronológico mais amplo, a BSEAL, definida quando do evento de rifteamento Sul-Atlântico, preserva registros parciais de duas bacias interiores precedentes: (i) uma

sinéclise neopaleozóica e (ii) uma sinéclise de idade jurássica ou juro-triássica (*vide* Andrade da Silva *et al.* 2006), designada de “depressão periférica”, ou *Depressão Brasileira*, por Estrella (1972) e Asmus & Porto (1980), esta última circundando uma grande área soerguida e com vulcanismo ativo, centrada na atual região leste/sudeste brasileira. Embora comumente citada como exemplo de um dos registros sedimentares mais completos, na Margem Atlântica Leste, a coluna estratigráfica da BSEAL comporta importantes hiatos (erosão e/ou não deposição), que podem envolver intervalos de tempo de até dezenas de milhões de anos (Souza-Lima *et al.* 2002), entre as seqüências da Margem Atlântica (Rifte + Transicional + Drifte) e aquelas das sinéclises precedentes (Juro-Triássica e Neopaleozóica). Neste texto, não é abordada a ocorrência, na SBSE, de uma seqüência sedimentar neoproterozóica a cambriana, o Grupo Estância (bacia de antepaís da Faixa Sergipana), amostrado em poços da PETROBRAS e nomeado em colunas vigentes (Feijó 1994a; Figura 4.1.3 de Souza-Lima *et al.* 2002). Neste texto, optamos por considerar simplificadamente o Grupo Estância como parte do embasamento da bacia, estando melhor representado na área da Plataforma de Estância.

O Projeto de Pesquisa ANP/UFRN/LGGP “*Revisão Geológica e Reavaliação dos Sistemas Petrolíferos da Bacia Sergipe-Alagoas*” propôs várias modificações na carta estratigráfica da BSEAL. Tendo em vista os objetivos deste relatório, não entraremos em detalhe sobre essas modificações. Chamamos atenção que a carta compreende as tectonossequências de Sinéclise Neopaleozoica, Pré-Rifte Juro-Triássica, Rifte Eocretácea e Drifte Neocretácea a Neógena (Figuras 3.1, 3.2 e 3.4). A Figura 3.4A também ilustra a relação das unidades sinrifte contemporâneas à falha de borda (exceto a Formação Serraria, que iniciou a deposição numa etapa inicial/precoce do rifteamento, não exibindo feições de tectonismo sindeposicional). A seção sísmica interpretada na Figura 3.4B ilustra o estilo de deposição sintectônica predominante na Tectonossequência Rifte, expressa pelo espessamento das camadas em direção às falhas de borda, e o balizamento dessas falhas pelos leques conglomeráticos da Formação Poção. Essa carta também abandonou o uso do termo *Seqüência Transicional*, cujos depósitos salíferos passaram a serem considerados como uma etapa tardia do Estágio Rifte (Sequência Rifte 4; Figura 3.4B). Embora divergindo das cartas estratigráficas mais recentes (Feijó 1994a; Mohriak *et al.* 1997; Souza-Lima *et al.* 2002), estas mudanças possuem versões precursoras na literatura.

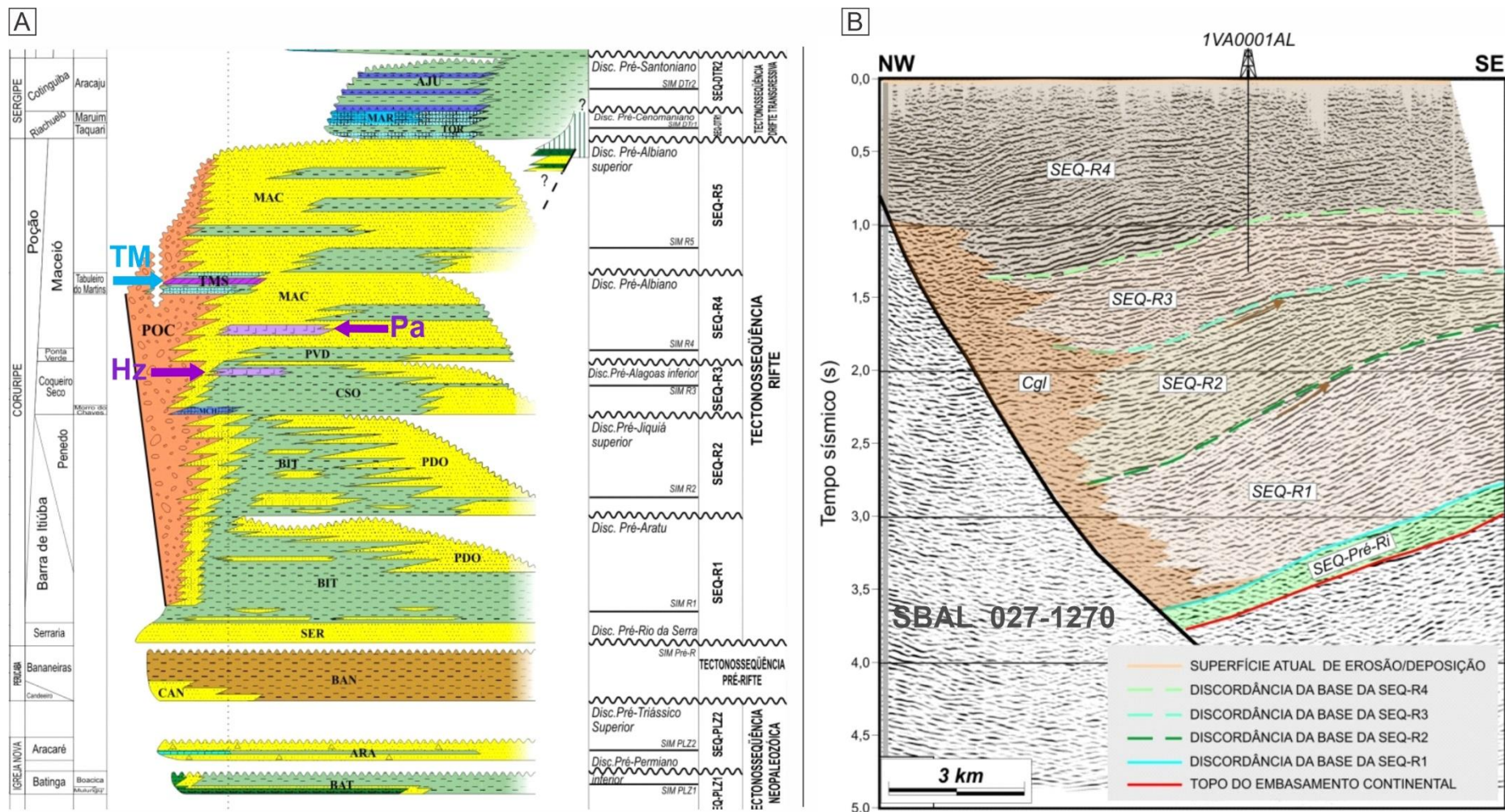


Figura 3.4: (A) Carta estratigráfica com ênfase na Sequência Rift e camadas guias de sal (Paripueira, Horizonte) a o Membro Tabuleiro dos Martins. (B) Linha sísmica ilustrando a falha de borda a oeste de Maceió (BV). Observar a superfície lístrica, os conglomerados sintectônicos da Formação Poção e o espessamento das seções, o roll-over e o sinclinal de “arrasto” (...de propagação de falha). O poço e a qualidade da linha permitiram fatiar a SEQ-R, sobreposta a camadas paleozoicas inferidas. Fonte: Projeto de Pesquisa “Revisão Geológica e Reavaliação dos Sistemas Petrolíferos da Bacia Sergipe-Alagoas”.

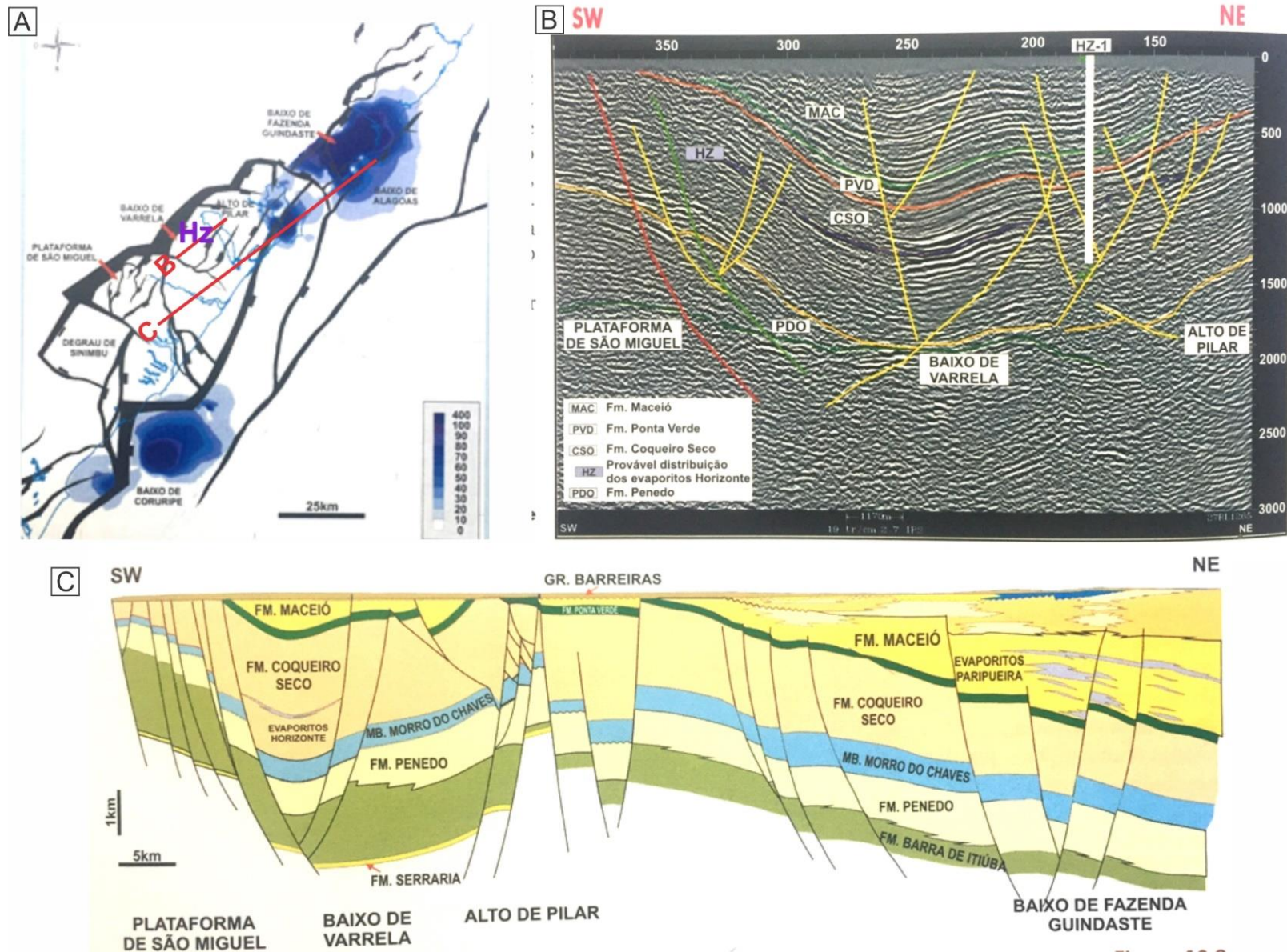
3.4 – Síntese do arcabouço estrutural da Bacia Sergipe-Alagoas

O conhecimento atual sobre a estrutura da bacia está fortemente embasado em mapeamento sísmico e dados gravimétricos em sua maioria de caráter inédito/confidencial. À parte de contribuições mais focalizadas, o conhecimento estrutural regional, no continente, ainda é influenciado por interpretações como as de Milani *et al.* (1988) e Lana (1985,1990), também alicerçadas no conhecimento de subsuperfície (sísmica e poços). No Projeto de Pesquisa ANP/UFRN/LGGP “*Revisão Geológica e Reavaliação dos Sistemas Petrolíferos da Bacia Sergipe-Alagoas*”, a abordagem empregada integrou dados de campo, dados de métodos potenciais (em especial, gravimetria) e dados sísmicos e de poços. Os dados de campo foram utilizados para aperfeiçoar o mapa geológico do setor emerso da Bacia Sergipe-Alagoas (Figuras 3.1 e 3.2), compondo um modelo geométrico e cinemático para o arcabouço e a evolução estrutural da bacia. Este relatório também ilustra linhas sísmicas e seções geológicas delas interpretadas, com apoio da gravimetria (Figuras 3.5 e 3.6). Ao longo do texto, o arcabouço estratigráfico é referido em termos das tectonosseqüências, seqüências deposicionais ou unidades litoestratigráficas, de acordo com as Figuras 3.1 e 3.4A.

A Bacia Sergipe-Alagoas é delimitada do embasamento cristalino, a oeste/NW, por falhas normais com *trend* geral NE e mergulho para SE (zona de falhas segmentada, simplificada como a *falha de borda*). Outras falhas, sintéticas e antitéticas, são demarcadas no seu interior, seja em superfície ou subaflorantes. A Figura 3.4 (ver também as Figuras 3.5 e 3.6) ilustra uma versão do arcabouço de falhas e compartimentos estruturais (*horst* e *graben*) na porção centro-norte da SBAL.

Conforme já referido, o limite norte da BSEAL é feito pelo Alto de Maragogi (Figura 3.2), separando-a da Bacia Pernambuco-Paraíba (Sub-bacia de Pernambuco). O limite sul é tomado na zona de falhas do Vaza-Barris ou de Itaporanga, que define a borda norte da Plataforma de Estância, limite com a Bacia do Jacuípe (Figura 3.1). A Tectonosseqüência Drifte Transgressiva domina a área aflorante da porção centro-sul da Sub-bacia de Sergipe (SBSE), adentrando Alagoas ao longo da faixa litorânea (mas capeada por coberturas neógenas) e da plataforma continental, seguindo um *trend* NE. Excetuando a Formação Barreiras e coberturas mais jovens, a Tectonosseqüência Rifte domina a área aflorante na Sub-bacia de Alagoas (SBAL) e no norte de Sergipe. Na borda ocidental da bacia, em ambas as margens do Rio São Francisco, afloram as tectonosseqüências de Sinéclise Neopaleozóica e Pré-Rifte Juro-Triássica; esta região constitui um alto estrutural que delimita, no continente, as duas sub-bacias, de Sergipe e de Alagoas (ver Figura 3.1). Esta região tem sido referida na literatura como o Alto de Japoatã-Penedo ou Japoatã-Palmeira Alta, a qual ainda inclui o Domo (ou Alto) de Igreja

Nova. Esses altos são coletivamente referidos como de Japoatã-Penedo-Palmeira Alta, ou como os *altos medianos*. Essas estruturas de primeira ordem (sub-bacias e altos medianos) acomodam altos e baixos estruturais de menor escala (ver exemplos nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6).



Fiaura 10.8

Figura 3.5: (A) Distribuição dos Evaporitos Paripueira na Sub-bacia de Alagoas. (B) linha sísmica strike (0027-1265) passando pelo Baixo de Varrela e pelo poço 1-HZ-1-AL. No corte geológico NE-SW em (C), observar as intercalações dos Evaporitos Horizonte na Formação Coqueiro Seco, e dos Evaporitos Paripueira na Formação Maceió. As linhas vermelhas no mapa de subsuperfície (com destaque para as falhas principais e profundidade de depocentros) indicam a localização da seção sísmica (B) e do corte geológico (C). Adaptado de Souza-Lima (2008) em Mohriak et al. (2009).

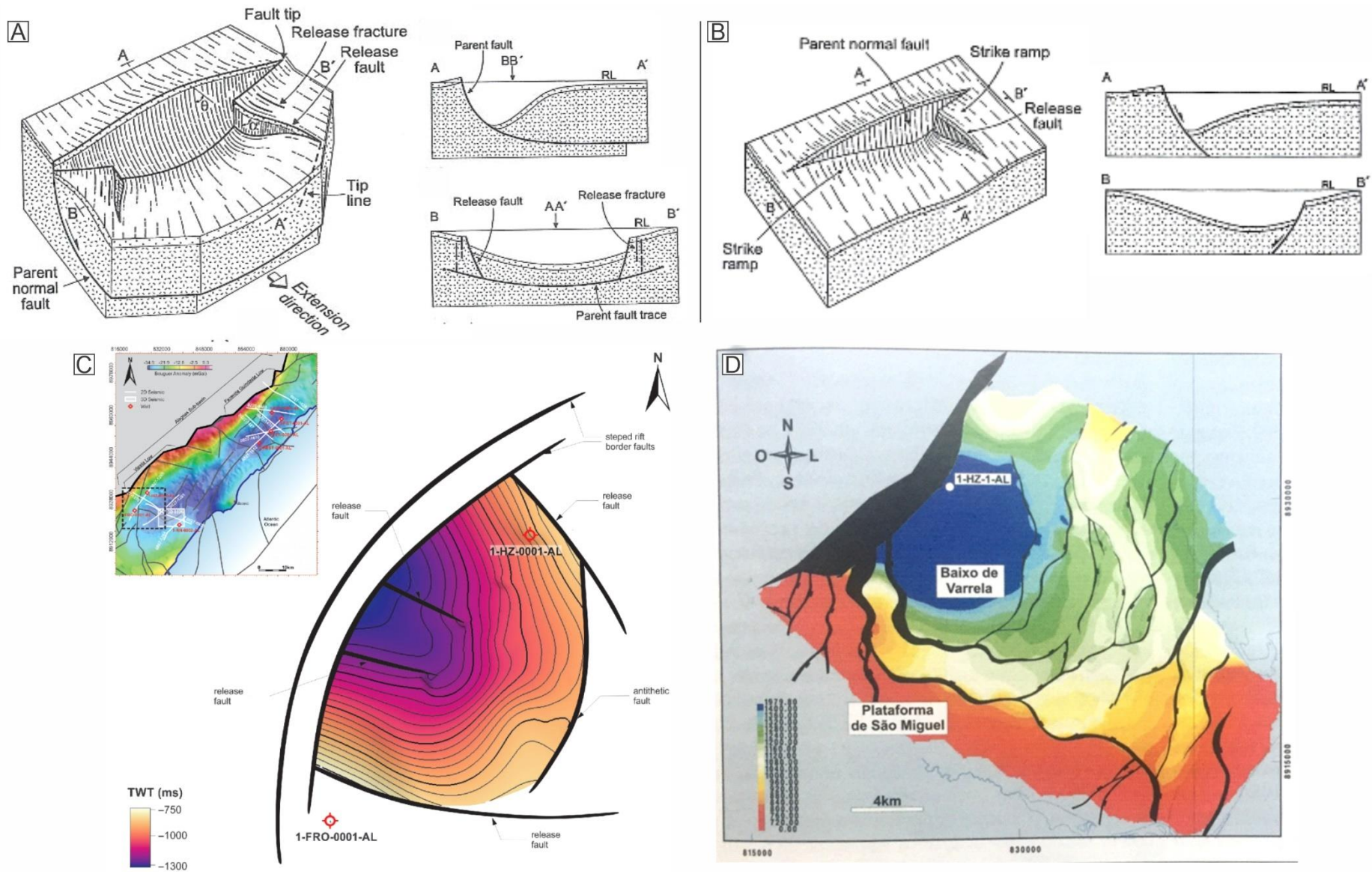


Figura 3.6: Interpretações estruturais no Baixo de Varrela, com destaque para as falhas transversais (A,B, release faults, Destro 1995), bem como a ocorrência e profundidade dos Evaporitos Horizonte nos mapas sísmicos (C,D, Martins et al., 2019; Souza-Lima, 2008).

As falhas da bacia são em geral consideradas como de rejeito normal, mesmo apresentando-se segmentadas em diferentes orientações, formando um mosaico de altos e baixos estruturais, o que implicaria em um quadro cinemático complexo. Além das falhas de borda, destacam-se as falhas que definem a *Charneira Alagoas*, esta já na porção *offshore* da BSEAL, também acompanhando o *trend* geral NE e separando um setor continental, no qual o embasamento cristalino é mais raso, do setor oceânico, no qual o embasamento se aprofunda e o pacote sedimentar (incluindo as tectonosseqüências dos estágios Rifte e Drifte) é mais espesso. A Tectonosseqüência Rifte apresenta mergulhos predominantemente para NW ou para SE (também no sentido NE ou SW, no caso de rampas laterais ou falhas normais transversais), a depender das falhas principais mais próximas (efeitos de basculamento ou arrasto, incluindo dobras distensionais; Figuras 3.4, 3.5 e 3.6). Por outro lado, o mergulho para SE predomina no caso das seqüências mais jovens (Estágio Drifte), como observado na porção centro-sul sergipana. Mergulhos em outras direções ocorrem em setores mais localizados.

Vários modelos estruturais foram empregados na BSA, com alcance regional ou mais localizados. Duas linhas principais de interpretação tectônica podem ser reconhecidas:

(i) Modelos que privilegiam um estilo distensional (visão dominante na literatura) consideram que a tectônica de falhas normais da BSEAL (Destro 1995; Guimarães 1988) e da Bacia do Recôncavo-Tucano-Jatobá, mais a oeste (Milani & Davison 1988; Magnavita 1992,1996), operaram ao longo de um ou dois pulsos (distensão E-W precoce, sucedida por distensão NW a partir do Aptiano, ou em cronologia oposta). Na integração com a margem continental hoje ancorada na África, as falhas normais foram interpretadas em associação com zonas de descolamento de escala crustal (Ussami *et al.* 1986; Castro Jr. 1987,1988; Guimarães 1988; Hamsi Jr. 1998), com segmentos e/ou zonas de transferência delimitando setores nos quais o mergulho dos descolamentos (ou do piso de semi-*grabens*) é oposto (Castro Jr. 1987; Bradley & Fernandez 1992);

(ii) Modelos que concedem significativa importância a falhas com componente de rejeito direcional sinistral, atuantes em um estágio precoce na evolução da bacia, acomodando a rotação horária da Placa Sul-Americana (ou da *Microplaca Sergipana*) em relação à Placa Africana, durante o rifteamento (Szatmari *et al.* 1984; Milani *et al.* 1988; Lana 1990). A partir da análise de seções sísmicas e mapas de isópacas, Falkenhein (1986) e os autores acima identificaram um sistema de falhas normais escalonadas com direção N-S, mais antigo (Hauteriviano-Eoaptiano), sucedido pela implantação, no Meso/Neo-Aptiano, de um enxame de falhas normais NE que definem a *Charneira Alagoas* e a borda da bacia. Lana (1990) interpreta as falhas N-S como escalonadas em relação a zonas de rejeito direcional sinistral NE, na borda e ao longo

do eixo da bacia, o que pode ser observado no mapa da Figura 3.2.

3.4.1 – Estruturas Pré-Cambrianas

Neste texto, as estruturas pré-cambrianas são referidas em razão do seu controle (por vezes evidentes) nas falhas do rifte eocretáceo (acompanhar no mapa da Figura 3.1). O limite sul da Sub-bacia de Sergipe é visualizado como uma zona de falhas de transferência, a Falha de Itaporanga. Essa estrutura de *trend* NW corresponde a uma reativação do contato sul da Faixa Sergipana, a falha de empurrão do Rio Jacaré, e/ou de outras falhas pré-cambrianas mais a norte – em especial, a zona transcorrente do Vaza-Barris. A Plataforma de Estância, um alto estrutural definido a partir do Eocretáceo, tem como embasamento as rochas de alto grau metamórfico do Cráton São Francisco, estruturadas no *trend* NNE e capeadas (em parte) pelas rochas sedimentares (ou anquimetamórficas) do Grupo Estância, subhorizontais ou com mergulhos suaves; este conjunto corresponde ao Domínio Estância, a borda sul da Faixa Sergipana, no limite com o cráton.

Na sua porção sul, até o paralelo de Carmópolis (aproximadamente), o embasamento da SBSE deve corresponder, em sua maior extensão, aos metassedimentos de baixo grau da Faixa Sergipana, e seu substrato gnáissico paleoproterozóico a arqueano; este domínio representa uma extensão, para norte, da infraestrutura de alto grau do Cráton São Francisco. A deformação brasileira afeta os metassedimentos e retrabalha o substrato gnáissico; os planos de foliação e falhas/zonas de cisalhamento mergulham predominantemente para N/NE, em ângulo médio a forte.

Mais a norte na SBSE, o embasamento corresponde aos micaxistos e outros litotipos associados do Grupo Macururé (Domínio Macururé). Neste caso, os planos de foliação apresentam orientação mais diversificada, embora dominem o *trend* NW e mergulhos de baixo ângulo.

A Sub-bacia de Alagoas deve estar embasada, em sua maior parte, por rochas de alto grau e granitóides, filiados ao setor norte do Domínio Macururé ou, alternativamente, ao Maciço Pernambuco-Alagoas. O limite norte dos altos de Igreja Nova e de Palmeira Alta, no limite das duas sub-bacias, deve estar próximo ou ainda a sul da zona de sutura principal da Faixa Sergipana.

Deve ser notado que as estruturas principais da Faixa Sergipana, de direção NW/WNW e variando para ENE/NE mais a norte, foram seccionadas em alto a médio ângulo pelas falhas normais do rifte eocretáceo, que definem a arquitetura da BSEAL. Apenas no setor norte-alagoano (**Figura 2) é que a borda da bacia pode estar parcialmente controlada por estruturas dúcteis ou dúcteis-frágeis brasileiras, que neste setor exibem *trend* NE. Por outro lado, as estruturas NW da bacia, que correspondem

principalmente a zonas de transferência, devem ter uma herança do *fabric* principal e das zonas de cisalhamento da Faixa Sergipana.

3.4.2 – Eventos deformacionais e erosionais da Bacia Sergipe-Alagoas: correlação com marcadores estratigráficos

Os trabalhos de campo do Projeto ANP/UFRN/LGGP “*Revisão Geológica e Reavaliação dos Sistemas Petrolíferos da Bacia Sergipe-Alagoas*” confirmam o estilo de falhas normais com direção NE e eixo de distensão máxima NW, como o regime principal responsável pelo arcabouço estrutural da BSA. Este modelo coincide com algumas das propostas encontradas na literatura (Castro Jr. 1987; Guimarães 1988; Destro 1995, e outros). Existem interpretações alternativas, com sugestão de um evento precoce com distensão E-W, sucedido por distensão NW (Magnavita 1992,1996), ou em cronologia oposta (Guimarães 1988), e em especial a atuação de um componente importante de movimento direcional sinistral ao longo do eixo da bacia (Milani *et al.* 1988; Lana 1990). Por outro lado, a correlação com os marcadores cronológicos, em especial as discordâncias e seqüências deposicionais, demonstra a ocorrência de eventos deformacionais mais jovens, que afetam as tectonosseqüências Drifte, Transgressiva (DTr) e Regressiva (DRe). Em campo, a superposição desses diferentes eventos é consistente com a ocorrência de *slickenlines* sucessivos ou cruzados, com marcadores e assinatura cinemática específicas, observadas em planos de falhas; filmes e fibras argilosas muito finas caracterizam as falhas e movimentos mais jovens, possivelmente de contexto neotectônico.

Analisando o registro estrutural em diferentes seqüências (definidas na carta estratigráfica, Figura 3.4), o Projeto Bacia SEAL (ANP/UFRN/LGGP) descreveu um contexto de relativa complexidade:

(i) As tectonosseqüências pré-Rifte (Neopaleozóica e Juro-Triássica) e Rifte são afetadas por um grupo de estruturas compatíveis entre si, todas associadas com um regime cinemático de distensão NW, aliado a um componente transcorrente sinistral pelo menos em alguns setores. Salvo por reativações, as estruturas (i) são truncadas pelas unidades sobrepostas da Tectonosseqüência Drifte Transgressiva (DTr), sendo que várias dessas estruturas também são truncadas pela Sequência Rifte 5, mais antiga, em discordância angular. Discordâncias angulares intrarrifte, de caráter local, indicam que este regime cinemático operou em pulsos.

(ii) As tectonosseqüências Drifte, e em parte as unidades sotopostas da Sequência Rifte e mais antigas, são afetadas por reativações normais das falhas sinrifte, em especial na borda da bacia, afetando principalmente a Formação Riachuelo; ainda ocorrem falhas normais (sub)transversais ao eixo da bacia, afetando a Sequência Rifte, neste caso podendo correspondendo a rampas laterais com componente oblíquo e

mergulhos opostos (Figuras 3.5 e 3.6). Também são observadas falhas peliculares, predominantemente normais mas também incluindo exemplos inversos, associadas a processos de deslizamento gravitacional; estas últimas afetam principalmente a Formação Calumbi, em *offshore*.

(iii) Estruturas halocinéticas deformam a Sequência Drifte Transgressiva (DTr) e (novamente mediante observação em seções sísmicas) a porção inferior Regressiva (DRe); as estruturas halocinéticas em *offshore* podem estar relacionadas no mesmo contexto controlado por deslizamentos gravitacionais e colapso das rochas sedimentares na porção distal da plataforma continental.

(iv) A Formação Barreiras, bem como as exposições restritas da Formação Calumbi, em Sergipe, registram uma deformação de idade neógena, com distensão em alto ângulo com respeito ao eixo da bacia, analogamente ao conjunto (ii) acima citado.

Várias discordâncias, erosionais e/ou angulares, são reconhecidas e utilizadas na subdivisão da Tectonossequência Rife nas Sequências Rife 1 a Rife 5, esta última equivalente à antiga *Sequência Transicional*, na SBSE. No tocante às sequências pré-Rife, não foi possível evidenciar relações de discordância angular entre elas; deste modo, os limites superiores das sequências Neocarbonífera e Eopermiana provavelmente correspondem a discordâncias erosionais.

O limite inferior da Tectonossequência DTr é representado por uma discordância com grande expressão em área e no significado tectônico. A mesma apresenta-se seja como uma discordância erosional (especialmente quando observada numa escala mais detalhada, em campo ou em detalhe numa linha sísmica), seja como uma discordância angular (quando observada regionalmente), na dependência da estruturação das unidades subjacentes, constituindo-se, em ambos os casos, numa candidata a materializar a *discordância de final de rife*, ou *rife-drifte*. Por outro lado, uma discordância angular proeminente, em especial no setor *offshore* da bacia, ocorre na base da Sequência Rife 5, marcando o início da etapa final de assoreamento dos semi-*grabens* e depocentros mais amplos (em estilo *sag*) do Estágio Rife; neste sentido, tal discordância, designada como *Discordância Pré-Alagoas superior*, tem sido considerada, por vários autores, como a discordância de final de rife (*break-up unconformity*).

No continente, outra marcante discordância angular está preservada em afloramentos que expõem o contato entre a base da Formação Barreiras e a Formação Cotinguiba (Drifte Transgressivo), com prévio basculamento desta última. Esta discordância pós-data os eventos deformacionais que afetam essa sequência e a porção (inferior, no continente) da porção Regressiva. A estes eventos (citados em ii e iii, acima) é atribuída uma idade mínima aproximadamente equivalente à base do

Neógeno, levando em conta datações geocronológicas que permitem fixar uma idade mesomiocênica para a Formação Barreiras, pelo menos no Rio Grande do Norte e Ceará (Jardim de Sá *et al.* 2005; Vasconcelos 2005; Lima *et al.* 2007). Por outro lado, a idade máxima para estes eventos é estimada pelas evidências sísmicas de falhas sindeposicionais na Formação Riachuelo. Tendo em vista a escassez de afloramentos da SEQ-DRe e as várias superfícies erosivas que ocorrem na base ou internamente a essa tectonossequência, a correta avaliação desta discordância só pode ser feita em linhas sísmicas. Em campo, esta discordância pode corresponder a uma superfície composta na qual coincidem a base da SEQ-DRe (Formação Barreiras) e uma ou mais das outras superfícies precedentes.

No extremo jovem da escala de tempo, um último evento, com distensão N-S a NE, está registrado por falhas sin a pós-deposicionais que afetam a Formação Barreiras e unidades mais antigas, a exemplo da Formação Calumbi. Contrastando com a dominância dos platôs horizontalizados, os sítios falhados parecem ser mais frequentes ao longo das drenagens transversais ao eixo da bacia; todavia, a deformação é de pequena magnitude. Um evento análogo está registrado ao longo de toda a Bacia Pernambuco-Paraíba (Jardim de Sá *et al.* 2003,2004b), que pode estar relacionado ao campo de tensões dominante na Placa Sul Americana, compressão E-W e distensão N-S, a partir do final do Cretáceo.

3.5 – Dados estruturais no mapa geológico de superfície

O mapa geológico da BSEAL (Figura 3.1) incorpora dados de falhas na forma usual da direção e mergulho da estrutura, sendo que a ornamentação do tipo de falha (p.ex., uma falha normal) está orientada de acordo com a atitude média dos *slickenlines* em cada localidade, ou inferida da mais próxima. Nesse mapa as falhas foram discriminadas em duas gerações principais: (i) estruturas sinrifte, de idade eocretácea; (ii) estruturas pós-rifte, de idade neocretácea a neógena. Tendo em vista a ausência de marcadores apropriados (excetuando a Formação Barreiras, as tectonossequências Drifte não afloram na SBAL e no norte da SBSE), a cartografia das estruturas pós-rifte (grupo ii) fica prejudicada nesses setores. Em alguns casos, foram indicadas falhas sinrifte reativadas no Estágio Drifte, a exemplo da falha de borda na porção sul da SBSE, incluindo o limite com a Plataforma de Estância, através da Falha de Itaporanga. Conforme discutido no Item precedente, as falhas pós-rifte englobam tipos distintos do ponto de vista da idade e mecanismo gerador; todavia, este tipo de detalhe não pôde ser cartografado sistematicamente. A magnitude da deformação (rejeito das falhas) registrada na Formação Barreiras (atividade neotectônica) parece ser, até o momento, relativamente subordinada e sem implicações exploratórias (ou de risco sísmico, no caso de sedimentos ou rochas sedimentares com fraca litificação) na bacia.

3.5 – Aspectos estruturais, relações tectono-estratigráficas e sismicidade

Bacias rifte são caracterizadas por um relacionamento estreito entre as feições estratigráficas, os eventos de deformação e seu estilo geométrico-cinemático, que podem formar um arcabouço complexo mas passível de equacionamento. Em princípio, a compatibilidade cinemática entre estruturas de diferentes orientações é bastante comum, decorrente da geometria 3D dos compartimentos.

De um modo geral na BSEAL, as falhas NE apresentam cinemática normal/distensional, que em campo se traduz por *slickenlines* de alto *rake*. Falhas NW sincrônicas devem constituir rampas laterais, neste caso com rejeito oblíquo e *slickenlines* de *rake* mediano ou mesmo baixo; a depender de sua localização em relação à falha normal “principal”, seu rejeito pode alternar entre componentes dextral ou sinistral. Estruturas que distoam desses padrões podem constituir casos mais específicos ou restritos, a exemplo de sítios de transpressão ou transtração. Para a análise da deformação eocretácea, existem (devem existir !) bons conjuntos de dados, o que demanda etapas de trabalho de campo e interpretação de imagens de sensores remotos.

No caso da sismicidade, a qualidade e quantidade dos registros pode (ou não) permitir soluções de mecanismos focais, que obviamente seriam os mais importantes para o conhecimento e monitoramento da sismicidade e seus riscos para as cidades e a população. Por outro lado, a localização de falhas importantes, eocretáceas ou cenozoicas, tem também grande interesse pela facilidade com que essas estruturas podem ser reativadas e assim produzir sismos, geologicamente jovens. Este seria o domínio dos estudos da Neotectônica, que também podem ser comparados com estruturas sin ou pós-deposicionais associadas às encaixantes sedimentares do Estágio Drifte (estas bem expostas na SBSE), e deste modo serem datadas em relação à idade cronoestratigráfica das mesmas. Fica aqui o alerta para o cuidado de interpretar falhas antigas como geradoras de sismicidade recente; é necessário provar a sua reativação com dados estruturais e a sua localização em relação às falhas em subsuperfície, com sismos distribuídos no seu arcabouço 3D. Este relatório apresenta dados pertinentes e levanta a discussão da localização de sismos ao longo de falhas sinrifte, corroborando a sua reativação recente.

A Falha do Mutange, com direção NW pode constituir uma rampa lateral de idade eocretácea (todavia, não podendo ser descartada uma falha de idade neocretácea a cenozoica), com reativação atual/recente (talvez precedida por vários outros episódios), hospedando o enxame de sismos na margem NW da Lagoa de Mundaú (Figuras 3.2, 3.7 e 3.8). Por outro lado, as falhas normais NE, de idade eocretácea, são ainda pouco

conhecidas, seja geologicamente em afloramentos, seja em possíveis exemplos em *offshore*. Estudos de linhas sísmicas porventura existentes (ou a serem adquiridas, na hipótese de constatação de sismicidade costeira), podem prover dados importantes seja para entender o fenômeno, seja para a análise de risco sísmico na região.

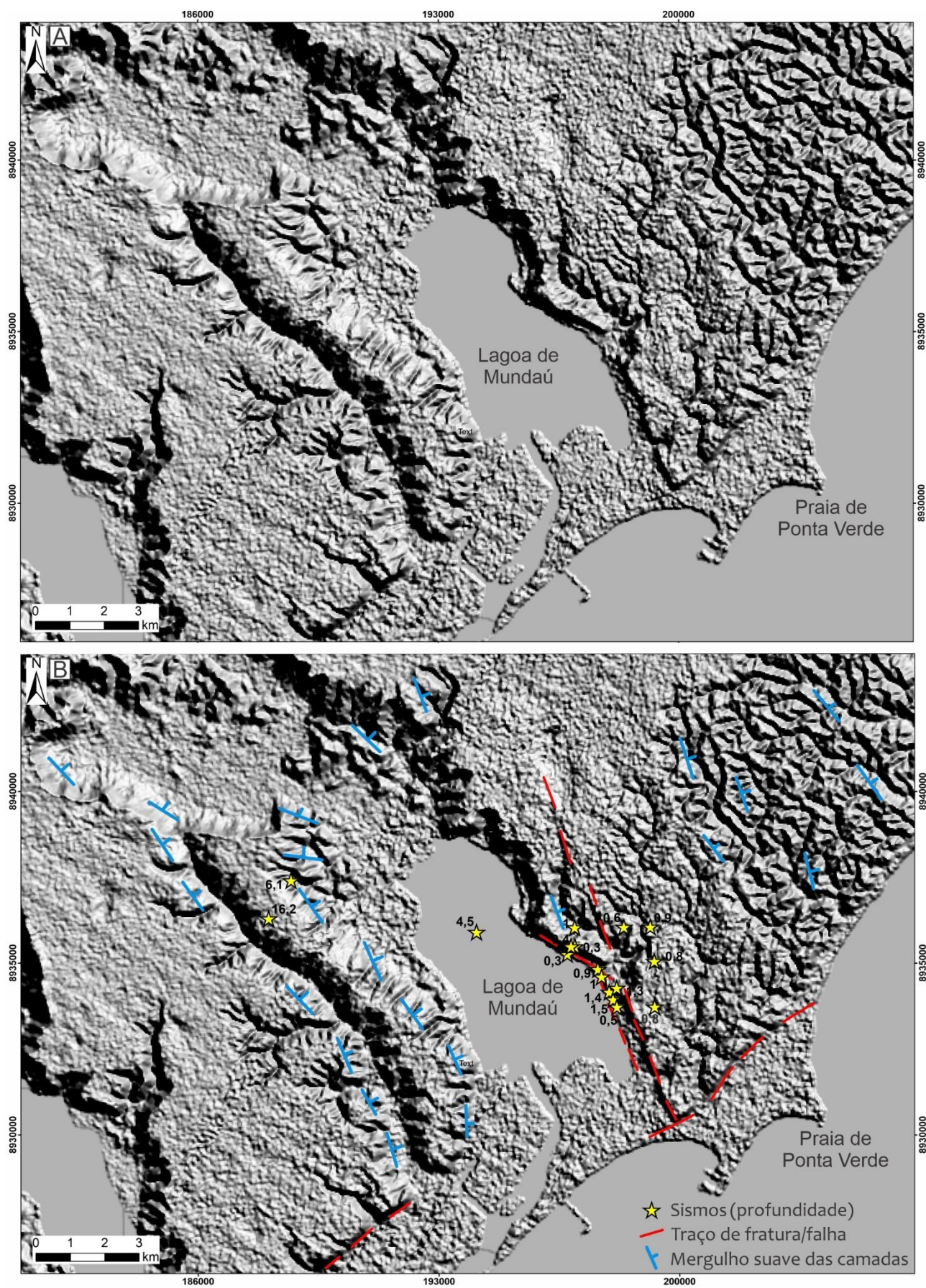


Figura 3.7: Imagens de relevo sombreado geradas a partir de SRTM (aproximadamente 30 metros de resolução) com iluminação de 45° Az. A profundidade dos sismos é dada em quilômetros.

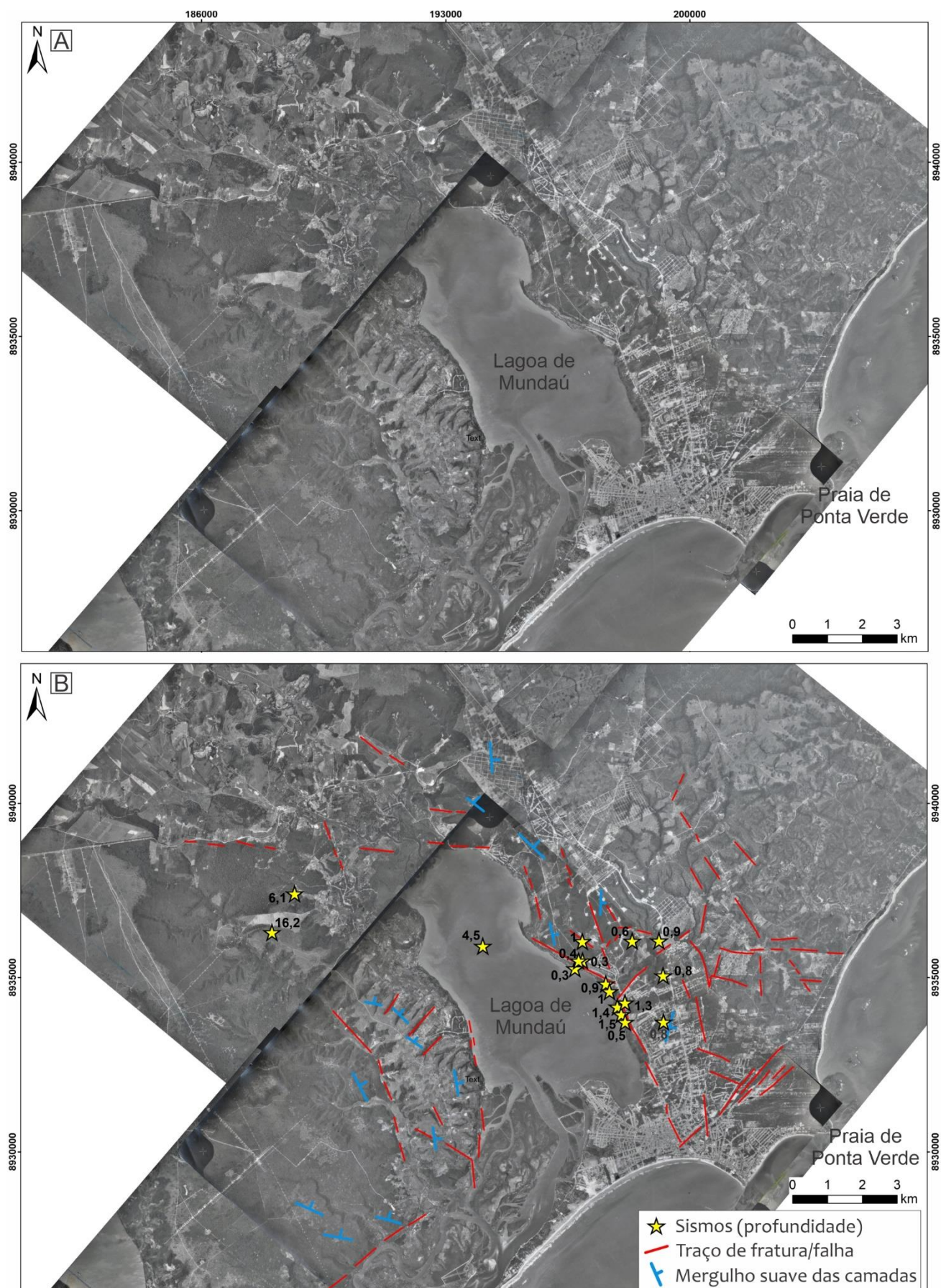


Figura 3.8: Fotografias aéreas convencionais nos arredores da Lagoa de Mundaú. (A) Fotografias não-interpretadas. (B) Fotografias com fraturas, falhas e mergulhos de camadas interpretados a partir da estereoscopia das imagens. A profundidade dos sismos, os mesmos da Figura 4.7, é dada em metros.

4.0 – Análise sismológica

4.1 – Rede sismográfica

Foi implementada uma rede sismográfica no bairro do Pinheiro e arredores, no município de Maceió-AL, no intuito de contribuir para o seu monitoramento de subsidência e subsidiar informações dos eventos sísmicos decorrentes desse processo geológico através da elaboração de um catálogo sísmico, Figura 4.1. A rede foi composta por 9 estações tri-axiais de período curto, medindo aceleração e velocidade do solo (a depender da estação), registrando-os em três direções distintas (Norte-Sul, Leste-Oeste e Vertical), e operando a uma taxa de amostragem de 500 Hz dentre o período de 29 de janeiro de 2019 a 02 de dezembro de 2019, Figura 4.2.

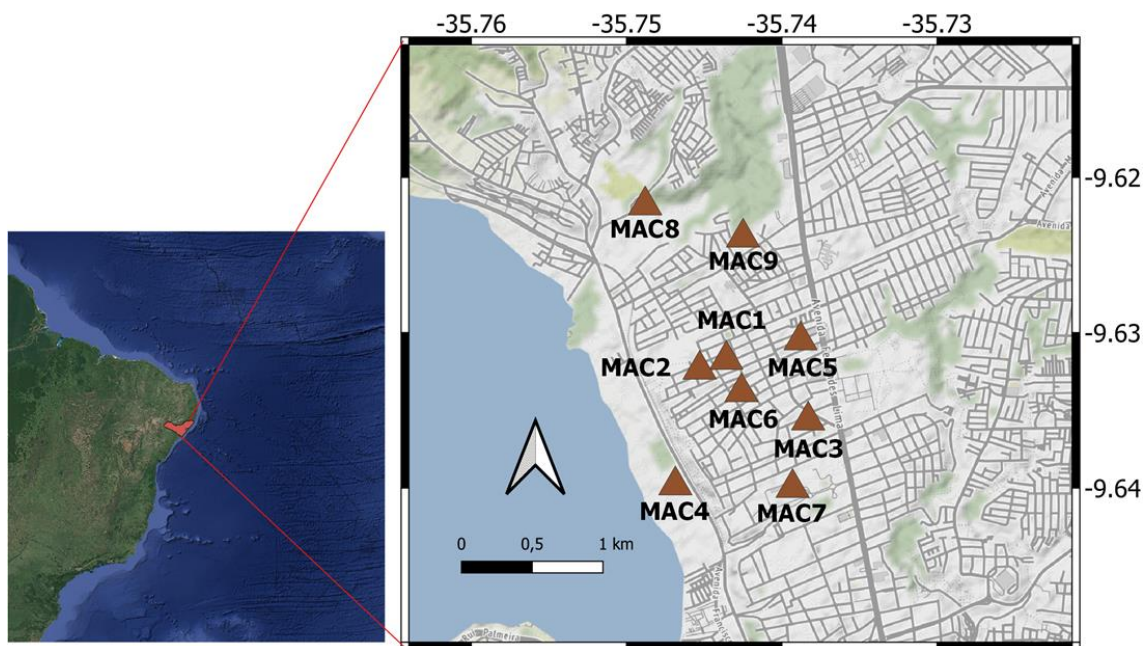


Figura 4.1: Disposição da rede sismográfica utilizada para a aquisição dos dados sismológicos reportados neste relatório. A posição de cada estação é representada pelos triângulos vermelhos acompanhados pelos códigos que os nomeiam.

A Figura 4.2 mostra, além do período total de aquisição de dados da rede sismográfica, os períodos de funcionamento de cada estação, representados por linhas horizontais coloridas contínuas. Inicialmente, 6 estações (MAC2, MAC3, MAC4, MAC5, MAC6 e MAC7) compuseram o arranjo da rede sismográfica até 01 de abril, e a partir de então o número de estações ativas foi gradativamente decrescendo até restarem as estações MAC4 e MAC6, que operaram juntas até 04 de novembro. Por fim, a partir de 05 de novembro até o fim do período de aquisição de dados, MAC4 permaneceu em funcionamento conjuntamente com 3 novas estações (MAC1, MAC8 e MAC9). Os dados foram processados de acordo com a disponibilidade de registros ao longo do período de aquisição e serão discutidos na seção seguinte.

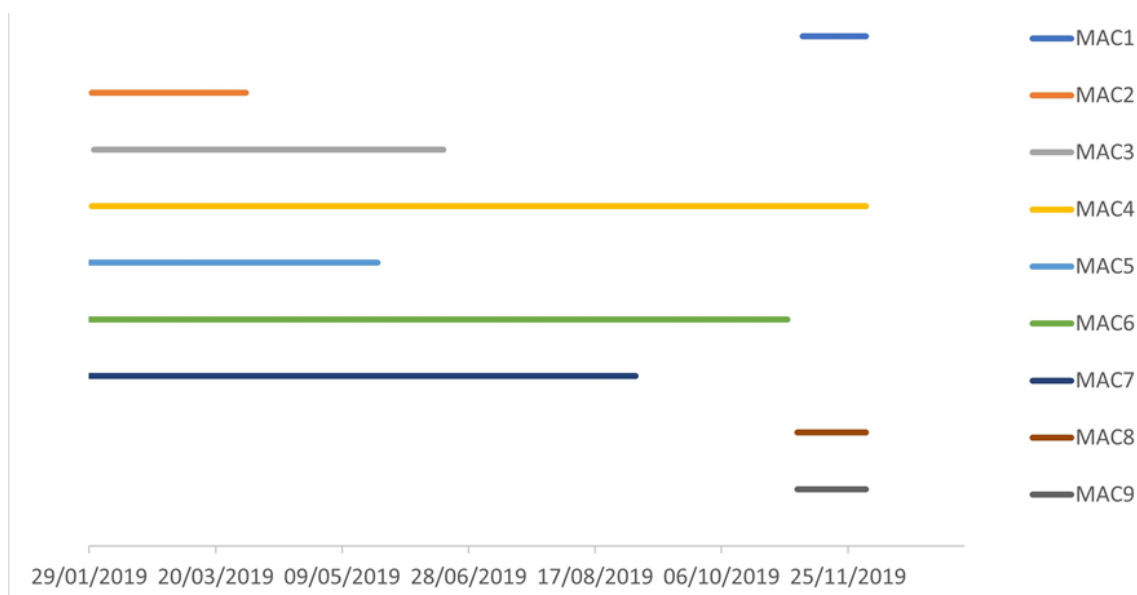


Figura 4.2: Gráfico da completude das estações que compõem a rede sismográfica utilizada neste relatório. O período de funcionamento de cada estação é representado pelas linhas horizontais contínuas coloridas indicadas pela legenda.

4.2 – Processamento dos dados

O processamento dos dados colhidos pela rede sismográfica consistiu em: 1) inspeção visual dos sismogramas, de duração de 1h, em conjunto com a aplicação de técnicas de melhoria da relação sinal/ruído, e identificação dos eventos sísmicos; 2) estimativa das localizações hipocentrais e 3) Elaboração do catálogo sísmico. Todas as etapas foram processadas com o auxílio do *software* de análise sísmica SEISAN (Ottemöller et al., 2021).

4.2.1 – Identificação dos eventos sísmicos

Cada arquivo de 1h de duração, contendo todos os sismogramas coletados por cada sensor de cada estação da rede sismográfica, foi visualmente inspecionado com a aplicação de filtros de frequência a fim de melhorar a relação sinal/ruído e, consequentemente, realçar as formas de onda emitidas pelos eventos sísmicos. A Figura 4.3 ilustra um exemplo de um evento sísmico identificado nos sismogramas, após ser filtrado entre 1 e 10 Hz (sinal com grande amplitude demarcado pelo retângulo vermelho).

Após a identificação de cada evento sísmico, foram marcados (processo usualmente chamado de “picagem” ou *picking*), quando claramente visualizados, os tempos de chegada das ondas P e S, que por sua vez são essenciais para as estimativas de localização hipocentral. A Figura 4.4 mostra o mesmo evento identificado na Figura 4.3, também o mais bem registrado pela rede, porém com as marcações das fases sísmicas visualmente identificadas. Nessa Figura, cada sismograma corresponde aos registros de cada componente que cada estação dispõe (HNZ/HHZ - componente

vertical do acelerógrafo/sismômetro, respectivamente; HNE/HHE - componente Leste-Oeste do acelerógrafo/sismômetro, respectivamente; HNN/HHN - componente Norte-Sul do acelerógrafo/sismômetro, respectivamente). Apesar das formas de onda oriundas desse evento sísmico terem sido identificadas em todas as estações, observa-se que as fases sísmicas não são claramente identificadas na estação MAC7, fazendo com que suas picagens fossem descartadas. Esse procedimento foi adotado como padrão para a análise de todos os eventos processados. Assim, somente as fases sísmicas visualmente claras foram utilizadas para as estimativas de localização hipocentral.

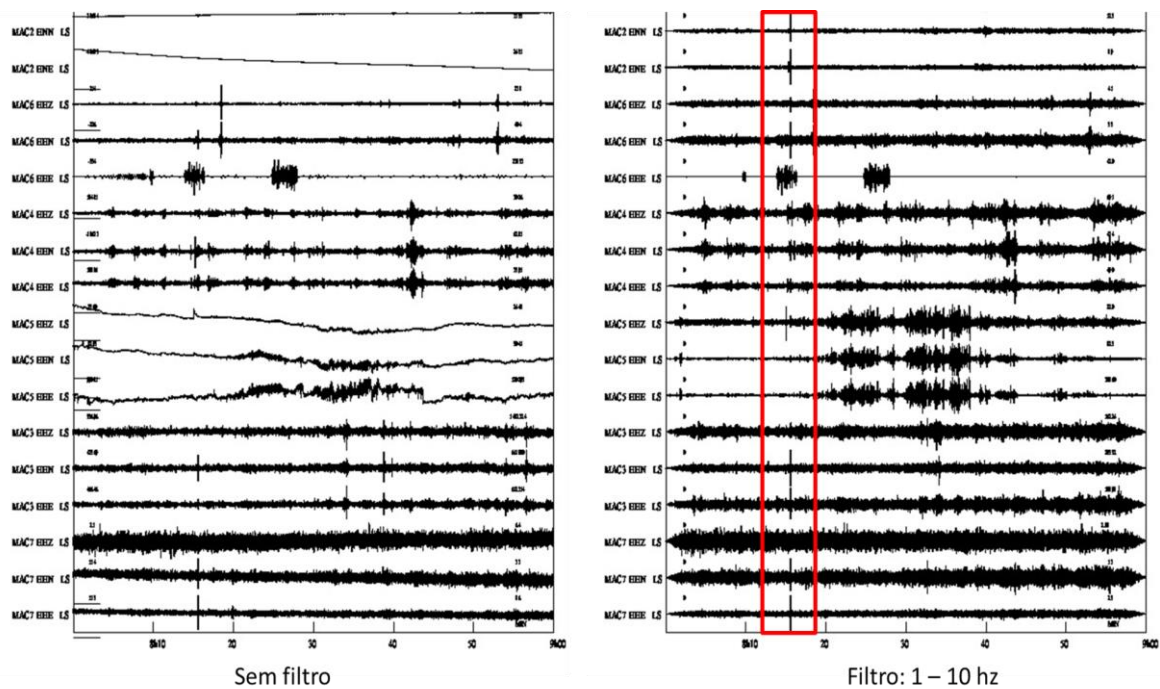


Figura 4.3: Exemplo de um evento sísmico visualmente identificado nos sismogramas, ocorrido na área de estudos às 08:15 h do dia 06 de fevereiro de 2019. O painel à esquerda mostra os sismogramas não filtrados, enquanto o painel à direita ilustra os mesmos registros, porém filtrados entre 1 e 10 Hz. Observa-se o realce das amplitudes do evento sísmico, após ser filtrado entre 1 e 10 Hz (sinal com grande amplitude demarcado pelo retângulo vermelho).

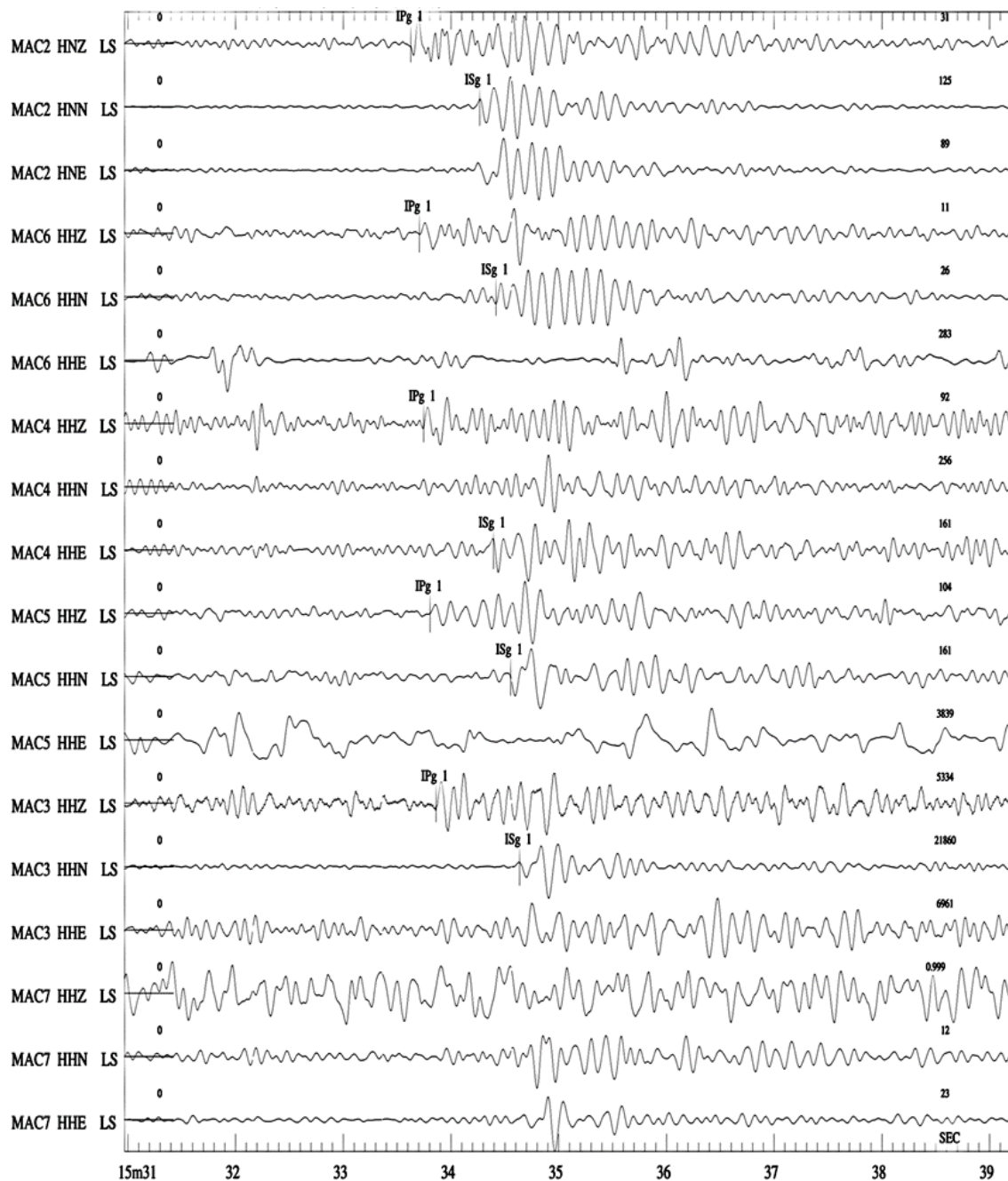


Figura 4.4: Exemplo do evento sísmico mais bem registrado pela rede sismográfica, ocorrido na área de estudos às 08:15 h do dia 06 de fevereiro de 2019. Cada sismograma corresponde aos registros de cada componente que cada estação dispõe (HNZ/HHZ - componente vertical do acelerógrafo/sismômetro, respectivamente; HNE/HHE - componente Leste-Oeste do acelerógrafo/sismômetro, respectivamente; HNN/HHN - componente Norte-Sul do acelerógrafo/sismômetro, respectivamente). As marcações das ondas P e S diretas são representadas pelos traços verticais "IPg" e "ISg", respectivamente. Somente MAC7 não possui picagens, devido a não clareza na visualização das fases sísmicas.

Todos os eventos sísmicos distribuíram-se esparsamente durante o período de aquisição de dados (Figura 4.5). Esta Figura mostra a quantidade de sismos com respeito ao tempo (data juliana), onde é possível observar que ao decorrer do tempo a sismicidade torna-se mais fraca, com intervalos de recorrência relativamente maiores.

Adicionalmente, poucos são os dias em que foram registrados mais de 1 evento sísmico, porém é possível notar que esses dias são relativamente mais frequentes no período inicial do monitoramento.

Essas observações conjuntamente com o decréscimo da quantidade de estações ativas motivou a concentração dos esforços de identificar e localizar eventos sísmicos até 31 de junho de 2019, período que possui maior quantidade e concentração de eventos.

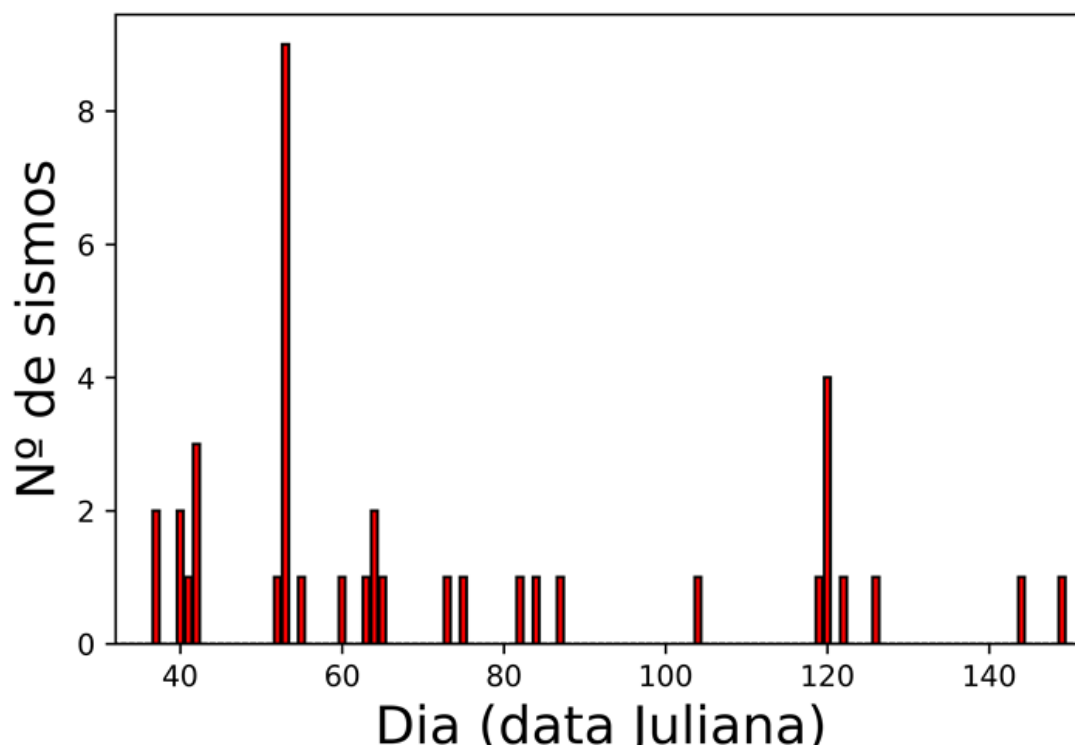


Figura 4.5: Atividade sísmica proveniente dos dados colhidos da rede sismográfica. Quantidade de sismos com respeito ao dia (data juliana). O tamanho de cada barra indica a quantidade de terremotos registrados.

4.2.2 – Análise de ruído

Adicionalmente, foi realizada uma análise de ruído, contido nos registros da rede sismográfica utilizada por este relatório. Para isso, foi selecionada a estação MAC2, cujos registros dos sinais sísmicos são visualmente mais claros, e separou-se os dados de 02 de fevereiro de 2019 até 06 de fevereiro de 2019 em arquivos de uma hora de duração para cada componente (HNE, HNN e HNZ). Sobre cada arquivo foram removidas as médias e tendências e aplicados filtros “taper” com 5% de amortecimento no início e final de cada hora. Após esses procedimentos, foram coletadas as amplitudes médias de cada componente em cada hora e, por fim, calculou-se a média das amplitudes médias das componentes HNE, HNN e HNZ como representativo para cada hora. Em outras palavras, obteve-se para cada hora do dia uma amplitude média dos sismogramas, onde tal amplitude é a média das amplitudes médias de HNE, HNN e

HNZ.

Complementarmente, reuniu-se todos os eventos localizados, cujos registros são visualmente claros em 3 ou mais estações e verificou-se o tempo de origem em que cada evento sísmico ocorreu.

A Figura 4.6 mostra o histograma da quantidade de eventos sísmicos em função da hora do dia (horário UTC) no painel superior, e as amplitudes médias calculadas para a estação MAC2 em função da hora do dia (horário UTC) no painel inferior. Pode-se observar que no período da madrugada a amplitude média (ruído) é cerca de 7 vezes menor do que durante o dia. Concomitantemente, a quantidade de sismos localizados concentra-se predominantemente durante esse período. Ressalta-se aqui que isso não implica dizer que os sismos detêm preferência temporal de ocorrência, mas que há um forte indicativo de que o ruído é um fator de significativa importância para a detecção dos sismos, bem como para as suas estimativas de localização.

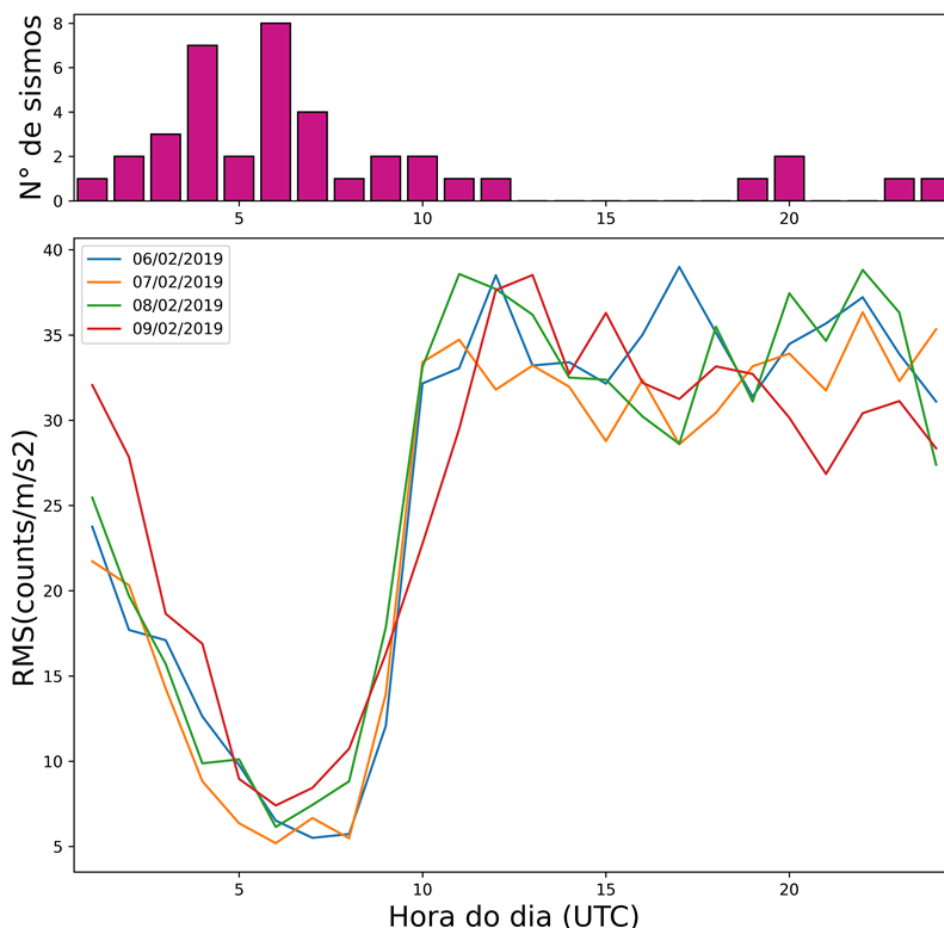


Figura 4.6: Painel superior: histograma da quantidade de eventos sísmicos em função da hora do dia (horário UTC). Painel inferior: ruído estimado pelas amplitudes médias utilizando a estação MAC2 em função da hora do dia (horário UTC).

4.2.3 – Localização hipocentral e catálogo sísmico

Para esse procedimento, foi utilizado o *software* HYPOCENTER (Lienert, 1986), embutido no programa SEISAN, que utiliza os princípios da metodologia clássica de

Geiger para inverter os tempos de chegada das fases sísmicas, marcados em pelo menos 3 estações, através da minimização entre essas observações e um modelo de velocidades proposto de camadas horizontais plano-paralelas. Para isso, considera-se o meio entre cada camada como sendo homogêneo e isotrópico.

Dentre alguns modelos de velocidade dispostos na base dados (capítulo 2 deste relatório: Banco de dados), foi escolhido aquele que mais efetivamente reduziu as imprecisões hipocentrais (erros na longitude, latitude, profundidade e RMS) de cada evento, conforme ilustrado na Tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1: Modelo de velocidade utilizado para a estimativa das localizações hipocentrais. “Vp” e “Prof.” indicam a velocidade de onda P (em km/s) e a espessura da camada geológica, respectivamente. A razão entre as velocidades das ondas P e S que acompanha esse modelo é considerada igual a 2,00.

Vp (km/s)	Prof. (km)
1,40	0,00
1,75	0,07
2,10	0,16
2,70	0,27
3,20	0,54
3,45	0,86
3,70	2,10

Os resultados das localizações obtidas através desse método são mostrados em mapa na Figura 4.7 abaixo. Um total de 39 eventos sísmicos foram localizados com $RMS \leq 0,0$ s, onde a maioria dos sismos concentram-se na margem da lagoa do Mundaú alinhados ao longo de uma extensão de aproximadamente 3,9 km na direção NW-SE.

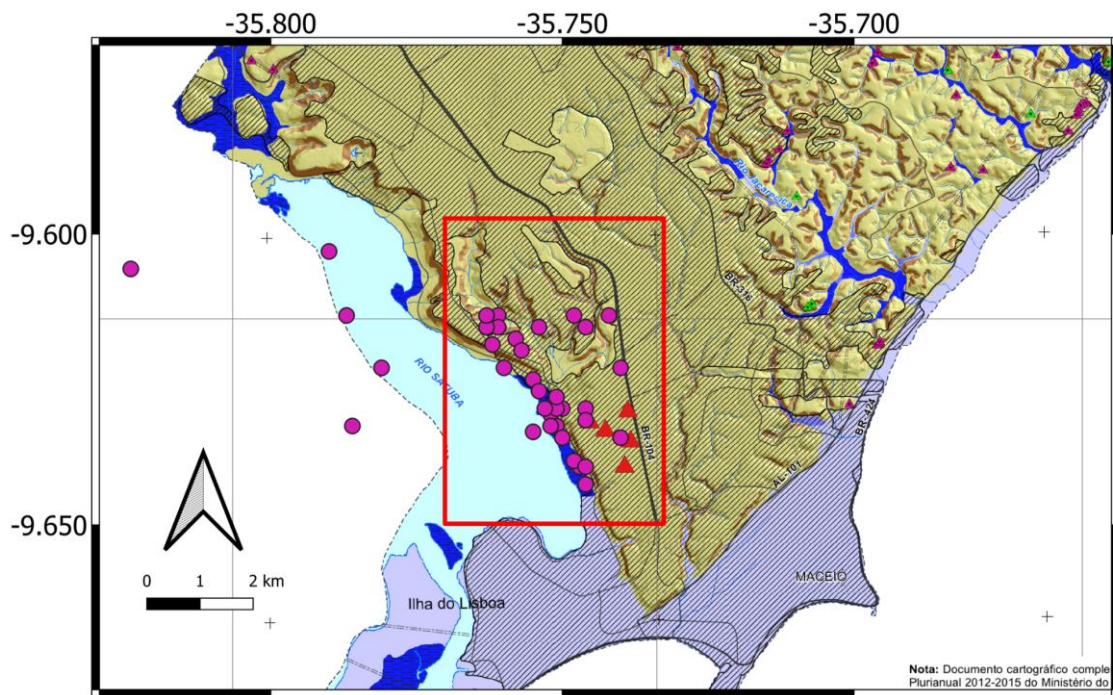


Figura 4.7: Mapa epicentral. Círculos em rosa indicam os epicentros, enquanto as estações em vermelho representam as posições das estações utilizadas para a localização dos terremotos. O retângulo em vermelho indica a área de plotagem das Figuras 4.8 e 4.9.

Como resultado, todos os 39 sismos localizados foram catalogados quanto a: 1) tempo de origem (ano, mês, dia, hora, minuto e segundos); 2) latitude (°); 3) longitude (°); 4) profundidade (km); 5) quantidade de estações utilizadas para a localização hipocentral (Nº estações); 6) RMS (s); 7) GAP (°). Essas informações são apresentadas na Tabela 4.2 abaixo. Ressalta-se aqui que, devido à ausência de informações dos arquivos de resposta instrumental das estações que compõem a rede sismográfica aqui utilizada, não foi possível calcular as magnitudes dos eventos sísmicos.

Tabela 2: Catálogo sísmico dos 39 eventos localizados.

Ano	Dia/mês	HR:MM	Segundos	Lat. (°)	Lon. (°)	Prof. (km)	Nº est.	RMS (s)	GAP (°)
2019	06/fev	08:15	33.0	-9.625	-35.755	0.9	6	0.0	315
2019	06/fev	08:15	33.1	-9.627	-35.754	1.0	6	0.0	310
2019	09/fev	02:07	53.2	-9.611	-35.842	16.2	5	0.0	354
2019	09/fev	02:08	41.6	-9.623	-35.740	0.8	4	0.0	323
2019	10/fev	18:23	38.4	-9.601	-35.836	6.1	4	0.0	355
2019	11/fev	05:39	59.6	-9.634	-35.755	1.2	4	0.0	317
2019	11/fev	05:40	8.5	-9.631	-35.752	1.4	4	0.0	300
2019	11/fev	05:40	11.8	-9.633	-35.751	1.5	3	0.0	295
2019	21/fev	05:20	28.7	-9.614	-35.787	4.5	4	0.0	346
2019	22/fev	03:07	58.2	-9.614	-35.742	0.6	3	0.0	351
2019	22/fev	03:23	5.4	-9.614	-35.748	0.7	3	0.0	347
2019	22/fev	03:37	26.1	-9.614	-35.761	1.0	3	0.0	346

2019	22/fev	03:52	59.6	-9.616	-35.761	0.7	3	0.0	345
2019	22/fev	04:38	4.4	-9.619	-35.762	0.3	3	0.0	343
2019	22/fev	05:11	58.2	-9.616	-35.763	0.7	3	0.0	345
2019	22/fev	05:27	14.9	-9.614	-35.763	0.7	3	0.0	346
2019	22/fev	06:16	18.3	-9.618	-35.758	0.3	3	0.0	343
2019	22/fev	06:46	23.9	-9.616	-35.754	0.3	3	0.0	344
2019	24/fev	19:45	5.6	-9.635	-35.750	0.5	3	0.0	302
2019	01/mar	06:53	40.9	-9.630	-35.750	1.3	6	0.0	290
2019	04/mar	19:16	1.5	-9.640	-35.747	1.1	3	0.0	263
2019	05/mar	04:30	55.6	-9.630	-35.746	1.3	3	0.0	337
2019	05/mar	09:35	28.9	-9.633	-35.752	1.4	3	0.0	299
2019	06/mar	00:32	44.7	-9.635	-35.740	0.8	3	0.0	240
2019	14/mar	11:26	39.9	-9.620	-35.757	2.0	4	0.0	337
2019	16/mar	09:53	1.0	-9.619	-35.762	4.4	4	0.0	331
2019	23/mar	10:49	40.6	-9.606	-35.824	1.0	4	0.0	352
2019	25/mar	06:17	34.4	-9.616	-35.746	0.7	3	0.0	347
2019	28/mar	07:30	49.7	-9.632	-35.746	0.6	4	0.0	290
2019	14/abr	02:08	16.4	-9.603	-35.790	1.0	3	0.0	356
2019	29/abr	22:45	54.7	-9.623	-35.781	1.9	4	0.0	347
2019	30/abr	01:55	26.4	-9.630	-35.751	0.9	4	0.0	322
2019	30/abr	01:55	34.0	-9.630	-35.753	0.4	3	0.0	343
2019	30/abr	05:23	35.5	-9.621	-35.860	3.9	4	0.0	355
2019	30/abr	23:52	24.4	-9.633	-35.786	1.0	4	0.0	349
2019	02/mai	05:15	53.4	-9.628	-35.751	1.0	3	0.0	345
2019	06/mai	03:19	24.1	-9.643	-35.746	1.2	4	0.0	313
2019	24/mai	03:45	44.9	-9.639	-35.748	1.9	3	0.0	309
2019	29/mai	03:23	0.5	-9.640	-35.746	1.9	3	0.0	302

4.2.4 – Incertezas

A Figura 4.8 mostra, em mapa (painel superior esquerdo), os epicentros ocorridos dentro do retângulo vermelho na Figura 4.7, com projeções verticais orientadas nas direções NE-SW (painel superior direito) e NW-SE (painel inferior esquerdo). Também são plotados em cada epicentro (círculos em rosa) os erros em suas respectivas localizações.

É possível observar que os eventos ocorridos na porção noroeste do mapa possuem barras de erros maiores (centenas de metros até 1km) do que aqueles localizados mais a sudeste (algumas centenas de metros), mais próximos às estações sismográficas que os registraram. Não obstante, esse comportamento é também observado nos perfis verticais com uma tendência geral de redução das barras de erro das profundidades dos sismos mais a sudeste. No entanto, os sismos localizados na porção noroeste possuem incertezas ainda maiores em suas profundidades, algumas

unidades de km.

Vários fatores controlam as incertezas presentes na localização de eventos sísmicos como imprecisões das marcações dos tempos de chegada das fases sísmicas, pobre conhecimento do modelo de velocidades, posições das fontes sísmicas com respeito à rede sismográfica, quantidade de estações utilizadas na estimativa dos parâmetros hipocentrais, etc.

O primeiro desafio relaciona-se ao fato de que, uma vez que os sismos se concentram na margem ou dentro da lagoa do Mundaú, não foi possível instalar uma rede sismográfica que cercasse a região epicentral, o que contribui para uma menor acurácia nas estimativas das profundidades. Além disso, a ocorrência de microterremotos em uma região urbana (ambiente com maior proporção de ruído) promove não só a diminuição do nível de detecção de microterremotos como também obscurece suas fases sísmicas. Por fim, a complexidade do meio geológico também concorre para maiores discrepâncias dos parâmetros hipocentrais, visto que a aproximação por um modelo simplista, de camadas homogêneas, isotrópicas, horizontais e plano-paralelas, como o aqui utilizado, pode não ser representativo para a região marcada por subsidência em um ambiente sedimentar, podendo, portanto, ser necessária a implementação de um modelo mais complexo.

No entanto, grandes imprecisões não são predominantes em todas as localizações calculadas. Como discutido no parágrafo anterior, os sismos mais próximos às estações sismográficas que os registraram possuem maior acurácia (erros em latitude, longitude e profundidade na ordem de algumas centenas de metros). Estes são utilizados, no capítulo seguinte, para a correlação com dados sísmicos.

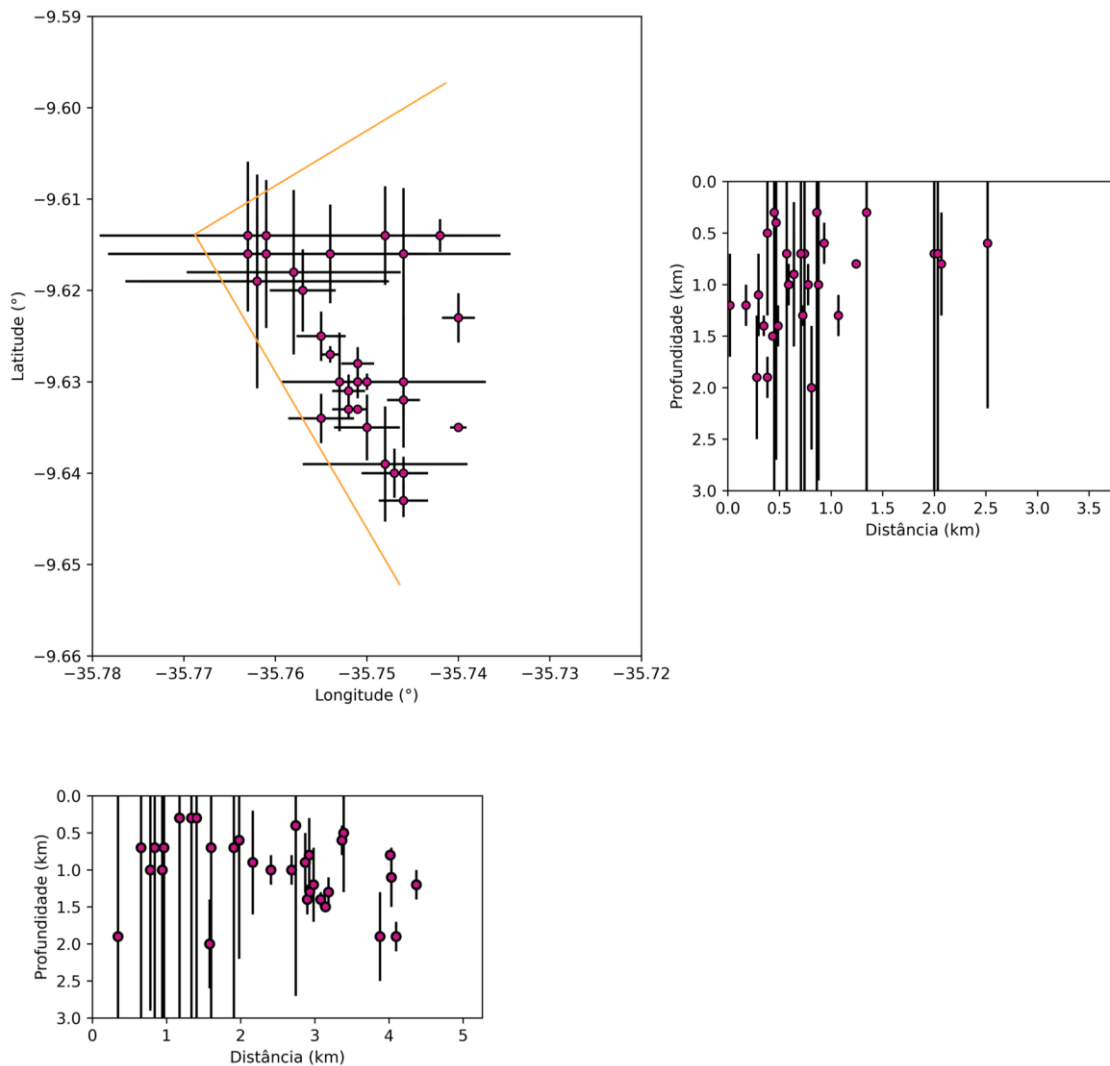


Figura 4.8: Painel superior esquerdo: mapa epicentral dos sismos ocorridos dentro do retângulo vermelho na Figura 4.7. Painel superior direito: projeção vertical orientada na direção Nordeste-Sudoeste. Painel inferior esquerdo: projeção vertical orientada na direção Noroeste-Sudeste (painel inferior esquerdo). Também são plotados em cada epicentro (círculos em rosa) os erros em suas respectivas localizações.

4.3 – Resultados

Por fim, apesar das condicionantes até aqui discutidas, algumas correlações, ainda que simplistas, podem ser feitas com o propósito de melhor relacionar a sismicidade com a subsidência ocorrida na área de estudo. A Figura 4.9 mostra em seu painel superior esquerdo a evolução temporal da sismicidade dentro do retângulo na Figura 4.7. Enquanto isso, os painéis superiores direito e inferior esquerdo mostram as projeções verticais orientadas nas direções NE-SW (painel superior direito) e NW-SE (painel inferior esquerdo). Também é plotado, no painel inferior direito, o histograma da quantidade de sismos com respeito a profundidade (em km).

Os eventos sísmicos são plotados em cores associadas a sua ordem cronológica de ocorrência, onde, a partir do ponto de vista em mapa, nota-se uma aparente migração

da sismicidade no sentido NW-SE e ao longo da margem da lagoa do Mundaú. No tocante às profundidades, observa-se em ambas as projeções verticais que a atividade sísmica, em geral, não aparenta possuir nenhum tipo de *trend* ou mergulho. Dessa forma, os sismos tendem a concentrar-se em profundidades tipicamente na faixa de 0,5 a 1,5 km, com maior adensamento em torno de 1 km de profundidade.

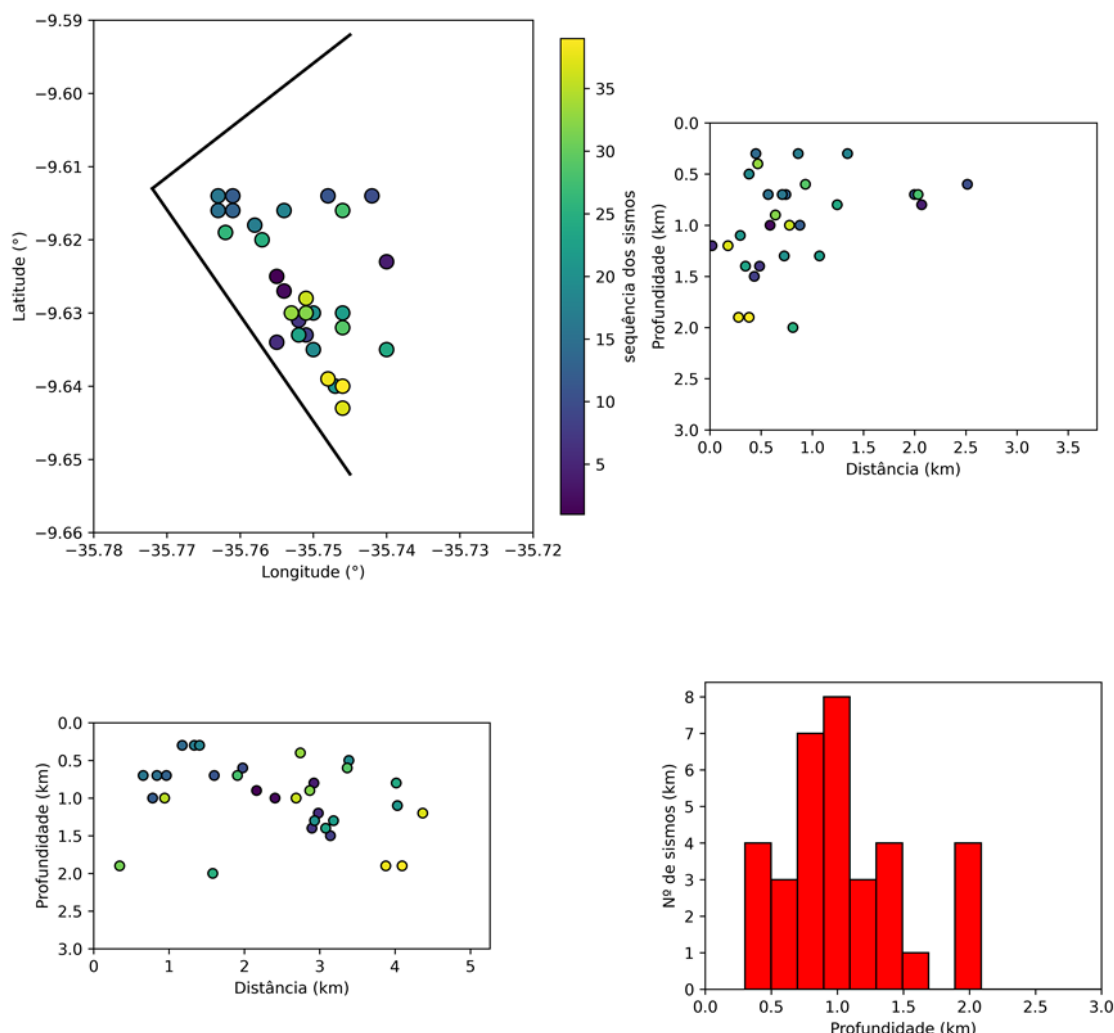


Figura 4.9: Painel superior esquerdo: evolução temporal da sismicidade dentro do retângulo na Figura 4.7. Painel superior direito: projeção vertical orientada na direção Nordeste-Sudoeste. Painel inferior esquerdo: projeção vertical orientada na direção Noroeste-Sudeste (painel inferior esquerdo). Painel inferior direito: histograma da quantidade de sismos com respeito a profundidade (em km).

4.4 – Discussões e recomendações

Neste item do relatório, foram apresentados os resultados obtidos através do levantamento sismológico utilizando uma rede sismográfica composta por 9 estações triaxiais, cujos registros foram provenientes de medições de acelerógrafos e sismômetros de período curto. Não houve, durante o período de aquisição de dados, nenhum intervalo com o funcionamento simultâneo de todas as estações, tendo somente, durante os 6 primeiros meses, uma quantidade substancial de estações

disponíveis (6 estações, Figura 4.2). Em adição, devido a ocorrência predominante de microssismos (Figura 4.4) e baixa relação sinal/ruído (Figura 4.6), o nível de detecção dos eventos sísmicos foi fortemente comprometido, reduzindo assim a quantidade de dados para análise.

Técnicas de filtragem comuns surtiram efeito no intuito de realçar os sinais sísmicos, porém quando estes, em sua maioria, ocorreram em períodos de menor nível de ruído (Figura 4.6) e/ou emitiram maior energia. Ressalta-se aqui que a quantidade de eventos catalogados bem como a aparente diminuição da sismicidade (Figura 4.5) não corroboram necessariamente para o seu fim ou até mesmo para um período quiescente, mas, conforme mostra a Figura 4.6, que pode ser um indicativo de que o ruído é um forte fator contribuinte para a sua detecção, o que é esperado para ambientes urbanos.

Dessa forma, sugere-se o desenvolvimento de uma análise específica sobre atenuação de ruído na área de estudos para assim reavaliar a análise aqui desenvolvida com o propósito de não só sobrelevar os sinais sísmicos, mas aumentar o nível de detecção de microssismos. Além disso, preconiza-se o contínuo monitoramento sísmico, uma vez que os processos de subsidência permanecem, utilizando assim estações sismográficas que dispõem de respostas instrumentais no intuito de estimar as magnitudes de cada evento catalogado. Assim, munido de uma maior quantidade de dados conjuntamente com formas de ondas mais claras, poderá melhor avaliar a subsidência através de medições indiretas do regime de esforços local como o cálculo de mecanismos focais.

Não obstante, devido às condicionantes inerentes da área de estudo assim como aqueles supracitados, não foi possível obter estimativas de localizações hipocentrais de alta precisão. Fatores como imprecisões das marcações dos tempos de chegada das fases sísmicas, pobre conhecimento do modelo de velocidades, posições das fontes sísmicas com respeito à rede sismográfica, quantidade de estações utilizadas na estimativa dos parâmetros hipocentrais, etc favorecem para uma menor acurácia em suas localizações. De fato, a localização hipocentral é geralmente um problema mal-posto (no sentido de Haddamard), onde a obtenção de seus parâmetros passa necessariamente pela necessidade de claras chegadas das ondas sísmicas nos sismogramas em uma quantidade suficiente de estações. Essas premissas baseiam o tradicional método de Geiger. No entanto, em um contexto em que tais informações são limitadas, mesmo a ampliação de uma rede sismográfica e/ou a utilização de um modelo de velocidades mais complexo não serão suficientes para obter coordenadas hipocentrais mais precisas.

Dessa maneira, é desejável a utilização de um método alternativo ao descrito

acima, que prescinde da clareza da identificação visual das ondas P e S. Uma dessas metodologias utiliza empilhamento de energia e modificação do tempo relativo das ondas no sismograma, denominado Source Scanning Algorithm (SSA) (Kao & Shan, 2004). Nesta metodologia, a posição (x, y, z) do hipocentro é sistematicamente avaliada em todo espaço discretizado que se busca a solução, utilizando-se uma função “brilho”. Essa função “brilho” é maximizada quando, num dado conjunto de parâmetros de um modelo de velocidades, o hipocentro e sua hora de origem estão corretos. Logo, a implementação desse método poderia auxiliar no aperfeiçoamento da acurácia dos hipocentros.

5.0 – Interpretação sísmica com controle de poços

O presente capítulo deste relatório objetiva descrever os métodos, processos, resultados obtidos e principais considerações acerca do uso de dados sísmicos de reflexão, integrados com informações geológicas diversas, sobretudo aquelas provenientes de dados de poços, na caracterização do substrato rochoso da região de estudo, nas cercanias de Maceió, Alagoas. Os referidos dados sísmicos representam diferentes processamentos efetuados em 19 linhas sísmicas 2D (Figura 5.1) adquiridas na área de estudo, fruto de 1552 registros sísmicos com fonte AWD (em inglês, *Accelerated Weight Drop*), equidistantes a 20 metros, por sua vez associados a canais de recepção com espaçamento de 10 metros (Spectrageo, 2019). Os dados sísmicos foram devidamente processados por empresa especializada, utilizando fluxos de processamento com migrações pós-empilhamento e pré-empilhamento em tempo (PSTM), apesar de outras versões estarem disponíveis após processamento específico, como é o caso da versão CRS (do inglês, *Common Reflection Surface*) ou a sua versão convertida para profundidade (UFF, 2020), sendo todas as versões disponibilizadas para análise.

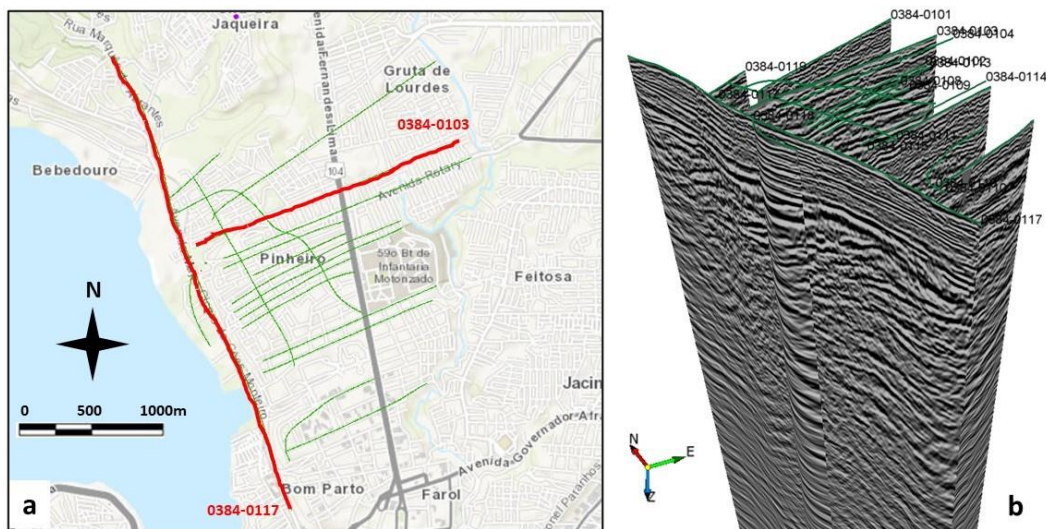


Figura 5.1: Disposições espaciais em mapa (a) e em perspectiva (b) da malha sísmica disponibilizada, com destaque às linhas 0384-0117 e 0384-0103. Ressalta-se o uso das vias já existentes na área para a aquisição do dado geofísico.

Dando suporte ao trabalho de interpretação sísmica, destacado mais adiante, as informações dos poços existentes foram cruciais para a identificação dos refletores de interesse, bem como para o delineamento da trama estrutural, das feições de abatimento ou das cavidades identificadas, por exemplo. Há um grande número de poços na área (Figura 5.2), perfurados com as mais diversas finalidades e ao longo do tempo. Dentre estes, merecem destaque aqueles executados para a exploração de camadas de sal, os quais apresentam descrições litoestratigráficas satisfatórias para o

processo de amarração poço-sísmica.

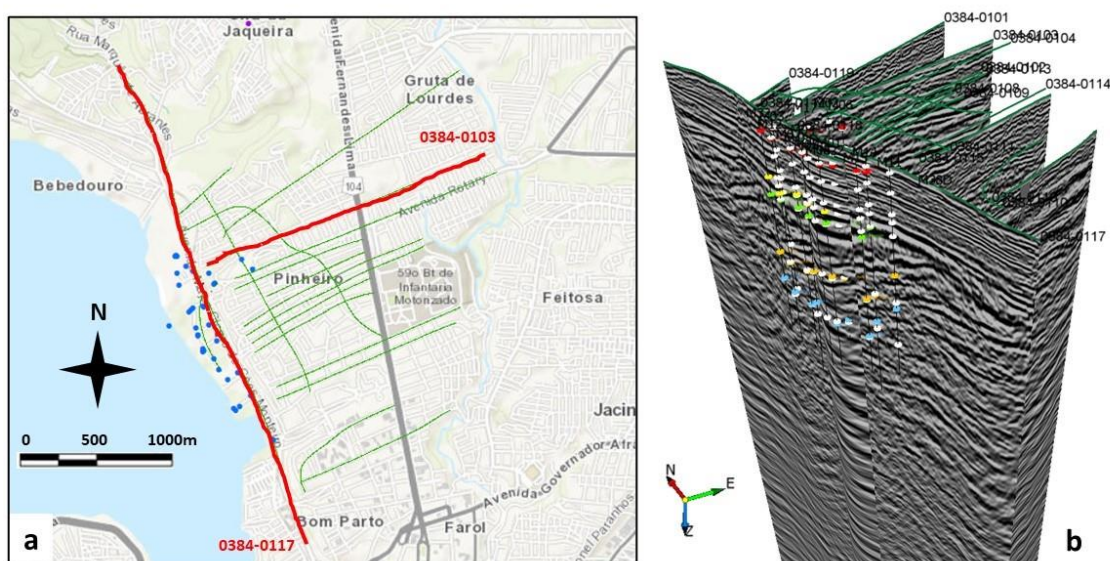


Figura 5.2: Disposições espaciais em mapa (a) e em perspectiva (b) da malha sísmica disponibilizada, com destaque às linhas 0384-0117 e 0384-0103 superposta aos poços perfurados na área de estudo (pontos em azul em (a)). É importante informar que as perfurações foram realizadas em distintos períodos e, com isto, o grau de detalhamento da informação é contrastante, bem como importantes horizontes podem ter a sua posição modificada em função da própria exploração salífera, desta forma podendo dificultar o próprio processo de correlação de dados.

5.1 – Métodos de trabalho

O trabalho de interpretação sísmica foi realizado preponderantemente no software OpendTect, versões 6.4.6 e 6.6.4, sistema operacional Windows, da Empresa dGB Earth Sciences. Este software, apesar de apresentar plugins específicos de uso comercial e não disponibilizados a este projeto, tem uma versão gratuita que é utilizada por grandes companhias petrolíferas ao redor do planeta para análise de dados sísmicos, fornecendo atrativos benefícios interpretativos com excelente razão custo-benefício. Diversos aspectos importantes neste projeto de pesquisa, tal como a análise integrada de dado sísmico na forma de diagrama de cerca com os poços existentes, pôde ser realizada no OpendTect. De forma inovadora, tratado aqui ao final deste capítulo, informações de dados sismológicos puderam ser manipuladas para integração aos demais dados geofísicos e geológicos.

Para o trabalho efetivo de interpretação sísmica, há a necessidade de obedecer um fluxo de trabalho criterioso e que envolve, em diversas ocasiões, parametrizações extremamente específicas, baseadas muitas vezes em algoritmos matemáticos sofisticados, cujo detalhamento foge ao escopo do presente relatório. De forma resumida, o fluxo de trabalho envolvido para a escolha do trabalho de interpretação está ilustrado na Figura 5.3.

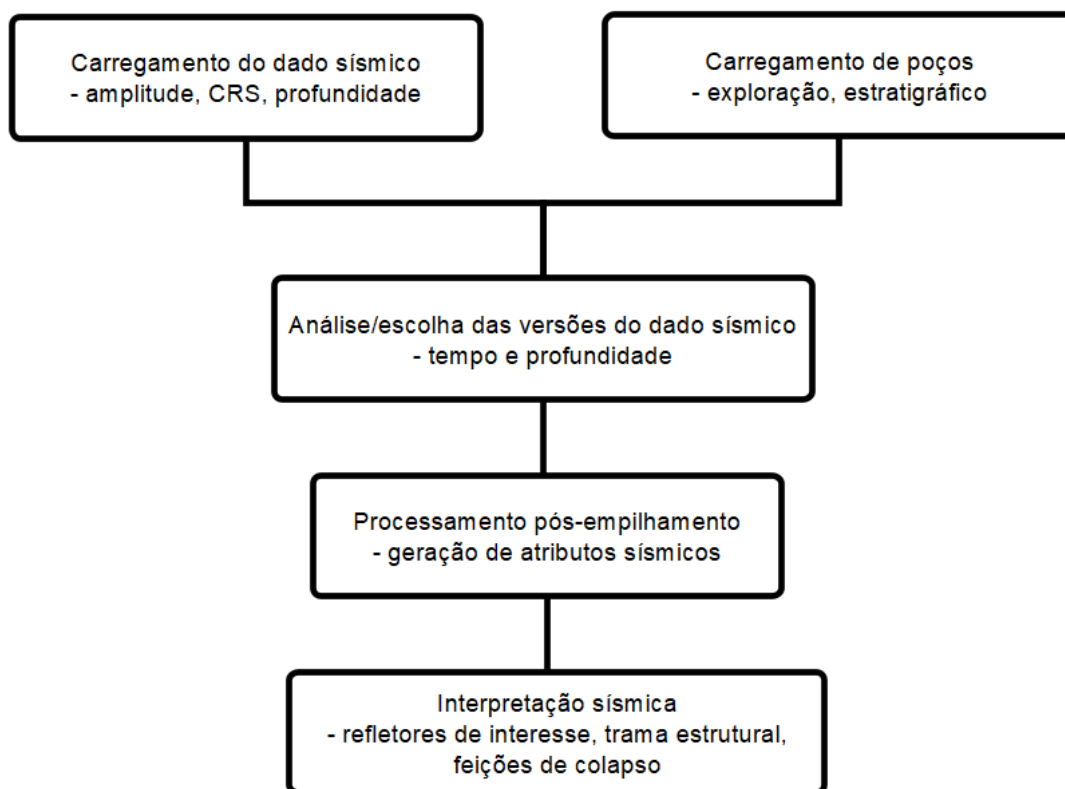


Figura 5.3: Fluxo de trabalho resumido para o trabalho de interpretação sísmica.

5.1.1 – Carregamentos sísmico e de poços e escolha de dado

O fluxo de trabalho ilustrado na Figura 5.3 indica que o dado disponibilizado se apresenta em diversas versões quanto ao fluxo de processamento adotado e em dimensões verticais distintas, tempo e profundidade. Diante a estas características, o *software* adotado ao trabalho de interpretação não permite o uso simultâneo das versões em tempo e em profundidade no mesmo projeto, desta forma exigindo ao intérprete sísmico a escolha daquele dado com a dimensão mais adequada. Uma alternativa, seria trabalhar com ambos os dados, em tempo e profundidade, em projetos distintos. Com a análise da imagem da malha sísmica disponível, optou-se por fazer uso da versão em profundidade. Apesar desta versão já contemplar um procedimento de conversão da dimensão original em tempo, podendo com isto apresentar inconsistência na imagem resultante em decorrência, por exemplo, de anomalias no campo de velocidades utilizado para tal processo, este tipo de dado permite a amarração direta dos dados de poços, os quais também têm a escala vertical em profundidade. Dentre outros aspectos, na inspeção visual do dado em profundidade foram procuradas formas geométricas espúrias nos refletores que poderiam estar associadas a anomalias no campo de velocidades utilizado. Este tipo de inconsistência não foi observado, permitindo presumir que o processo de conversão tempo-profundidade foi adequado.

A Figura 5.4 exemplifica o dado sísmico escolhido, PSTM convertido em profundidade. Nesta seção, 0384-0117, a visualização em duas paletas distintas (5.4a

em tons de cinza e 5.44b na paleta *seismics*, com tons variando de vermelho a azul) apresenta o dado em amplitude, destacando em ambas, através do evento marcado pela dupla seta em azul, uma expressiva discordância angular aproximadamente horizontal que separa, ao topo, interfaces indicativas de extratos relativamente plano-horizontais (ao menos neste corte 2D NNW-SSE), de interfaces mergulhantes para NNW em suposta estruturação de grábens basculados ao longo de falhas com vergência para SSE. Nesta imagem, podem ser traçados estes alinhamentos estruturais, bem como outros. Contudo, para facilitar o trabalho do leitor, estas e outras feições de interesse serão indicadas em figuras comparativas mais adiante, com aspecto superior de realce.

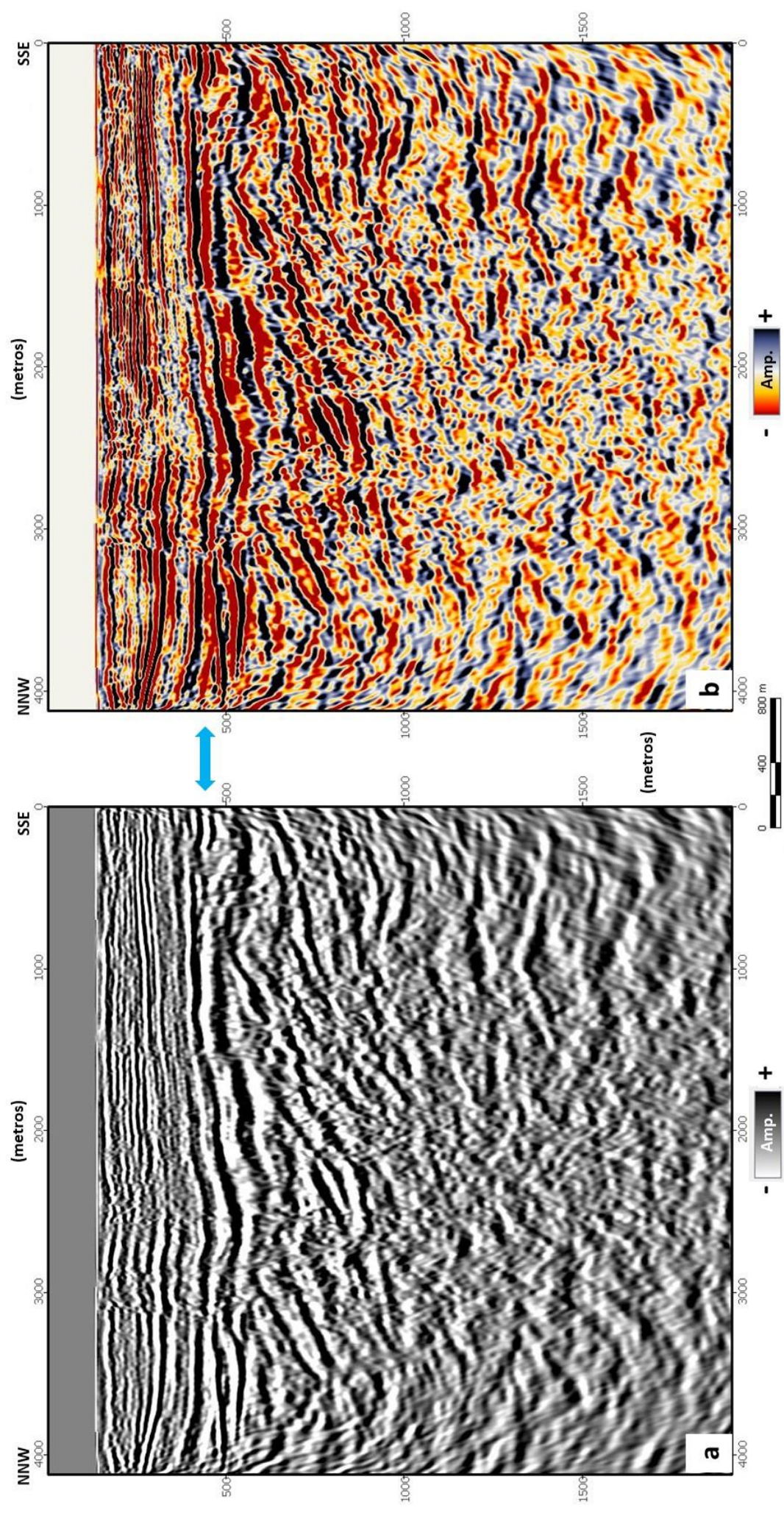


Figura 5.4: Seção sísmica 0384-0117 (vide localização na Figura 5.1) na versão PSTM, convertida em profundidade, ilustrando em duas paletas de amplitudes distintas ((a), tons de cinza e (b), seismic) o caráter sísmico do dado disponibilizado nesta versão. Apesar de alguns elementos estratigráficos e estruturais poderem ser traçados, ainda não são visualizados elementos característicos importantes. Exagero vertical: 2,2x.

5.1.2 – Processamento pós-empilhamento: atributos sísmicos

O processamento pós-empilhamento aqui discutido envolve as etapas executadas no dado sísmico escolhido para melhoria da imagem sísmica no que tange à identificação de feições de interesse geológico. Segundo Sheriff (2002), o atributo sísmico envolve uma medida derivada do dado sísmico, usualmente decorrente das informações básicas do tempo, da amplitude, da frequência e/ou da atenuação, com a função de detalhar ou realçar aspectos de interesse, na grande maioria das vezes, imperceptíveis no dado original.

Em acordo com Brown (1999), os atributos sísmicos não são mutuamente independentes e diferem uns dos outros pelas distintas maneiras de apresentação e análise da "informação básica". Desta forma, entende-se que, por fazer uso de operações matemáticas no próprio traço sísmico, o número de atributos passíveis de ocorrer é, teoricamente, infinito. Desta forma, a experiência do intérprete é crucial para fazer uso daqueles atributos que realmente sejam eficientes ao realce das feições de interesse, envolvendo aqui as próprias características geológicas da área trabalhada, bem como na composição ponderada de um ou mais atributos, gerando com isto, meta-atributos ou atributos compostos. Por outro lado, o uso incorreto, além de não fornecer o resultado esperado do ponto de vista interpretativo, pode prejudicar a análise do dado a partir do mascaramento das informações visualizadas inicialmente no dado de origem.

A etapa de melhoria da imagem sísmica por uso de atributos sísmicos se mostrou, do ponto de vista interpretativo, a mais intensa e exaustiva, uma vez que o dado original, em suas diversas versões, apresentava na grande maioria dos casos baixa razão sinal-ruído. Em termos gerais, essa baixa razão sinal-ruído representa um dado sísmico no qual o nível mais alto de sinal correlacionável com informações geológicas reais está superposto de forma severa a elementos diversos e não confiáveis. Portanto, atributos comumente utilizados para o realce das feições estratigráficas e estruturais de interesse, após aplicados e rigorosamente parametrizados, não mostravam imagens sísmicas satisfatórias.

Um caso típico de uso não satisfatório de atributo, foi a da decomposição espectral. Este atributo, desenvolvido por Huang et al. (1998), decompõe o traço sísmico em séries temporais ou, descrito de outra forma, diversas faixas de frequências, cada qual representante de uma característica geológica/geofísica específica. Da mesma forma, atributos instantâneos, quando aplicados como resultado final, também não se mostraram eficazes. Este tipo de atributo representa a variação instantânea de diversos parâmetros a partir do traço sísmico complexo (Taner et al. 1979) tais como fase, frequência ou amplitude. Geralmente são úteis para a representação de elevados

contrastes de impedância (no contexto geológico, topo ou base do sal, por exemplo), efeitos de anomalias de amplitude pela presença de camadas delgadas ou variações no ambiente deposicional, bem como indicadores de zonas de fraturas desde que estas estruturas ocorram nas faixas de baixas frequências.

Por sua vez, a análise intensa dos atributos sísmicos permitiu fazer uso de outras informações básicas ou, alternativamente, outros processos e combinações destas informações, permitindo gerar imagens sísmicas satisfatórias, em alguns casos elucidativos, aos fins das interpretações estratigráfica e estrutural. Neste contexto, os atributos com resultados mais promissores são os seguintes:

- **semblance:** este atributo mede o nível de coerência lateral, retornando um determinado valor denominado "coeficiente de semblance". Basicamente, é uma medida do grau de semelhança entre traços vizinhos ao longo de uma janela previamente definida pelo usuário. Este atributo calcula o coeficiente de semelhança e retornará um valor entre "0" (baixo grau de semelhança) e "1" (semelhante).
- **similaridade:** à exemplo do semblance, é uma forma de "coerência" utilizada para expressar o quanto dois ou mais segmentos de traço se assemelham. A similaridade "1" significa que os segmentos de traço são completamente idênticos quanto à forma de onda e à amplitude; similaridade "0" significa que os segmentos de traços são completamente diferentes. Contudo, o algoritmo utilizado pelo OpendTect, privilegia uma abordagem diferente fazendo uso do cálculo do grau de semelhança a partir de informações de mergulho, desta forma inserindo condições de contorno geológico-geofísicas, facilitando, assim, a medição do grau de similaridade entre traços adjacentes. A diferença básica entre a similaridade e o semblance, discutido anteriormente, é que o primeiro funciona comparando pares em determinadas posições, enquanto o semblance usa todos os pontos dentro da janela de análise para criar o grau de equivalência.
- **pseudo-relevo:** este atributo, originalmente denominado de Técnica Volume de Amplitude, em inglês TecVA (Bulhões e Amorim, 2005) calcula a média quadrática (RMS, em inglês) em uma janela dinâmica em tempo (aqui, aplicada em profundidade) do dado empilhado. Ele é computado em duas etapas distintas: (a) o cálculo da média RMS estimando a amplitude instantânea e (b) a Transformada de Hilbert

empregada para a rotação de fase do traço em (a). Este atributo é amplamente útil para identificar descontinuidades, tais como falhas e fraturas, bem como verificar as variações laterais de sismofácies.

A Figura 5.5 ilustra um detalhe da linha 0384-0117 (vide linha completa na Figura 5.4), até a profundidade de 1.230m, já contemplando o deslocamento vertical aplicado à toda malha sísmica, da ordem de - 135m, visando a correlação mais apropriada com os dados de poços, evidenciando o resultado do processamento pós-empilhamento na forma de atributos sísmicos. Na Figura 5.5a, na seção em amplitude original, percebe-se boa continuidade dos refletores, seccionados esporadicamente por feições subverticalizadas, ainda incipientes do ponto de vista interpretativo. Nas Figuras 5.5b e 5.5c, respectivamente os atributos sísmicos de semblance e similaridade aplicados em 5.5a, diversas descontinuidades estruturais já podem ser visualizadas. Aprimorando a visualização de algumas descontinuidades, bem como o contexto estratigráfico das reflexões, a Figura 5.5d representa a visualização do atributo de pseudo-relevo aplicado ao dado em amplitude (Figura 5.5a).

Da mesma forma que na Figura 5.5, a Figura 5.6, representando a linha 0384-0103, apresenta os atributos amplitude (5.6a), semblance (5.6b), similaridade (5.6c) e pseudo-relevo (5.6d). O diagrama de cerca na Figura 5.6 enfatiza a localização desta linha.

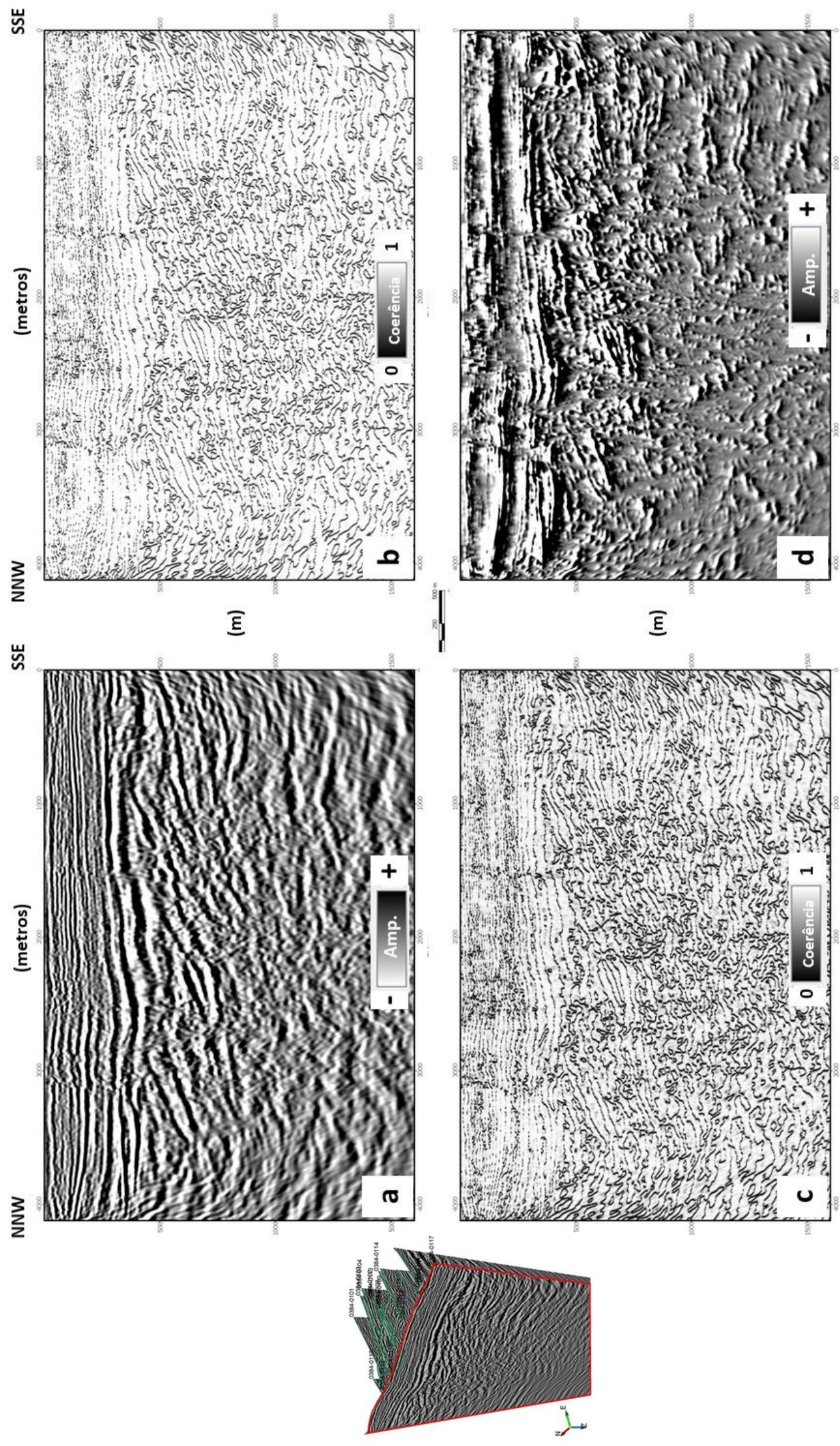


Figura 5.5: Destaque da seção sísmica 0384-0117 na versão PSTM, convertida em profundidade, ilustrando os atributos sísmicos: (a) amplitude (dato original), (b) semblance, (c) similaridade e (d) pseudo-relevância. Exagero vertical: 1,7x.

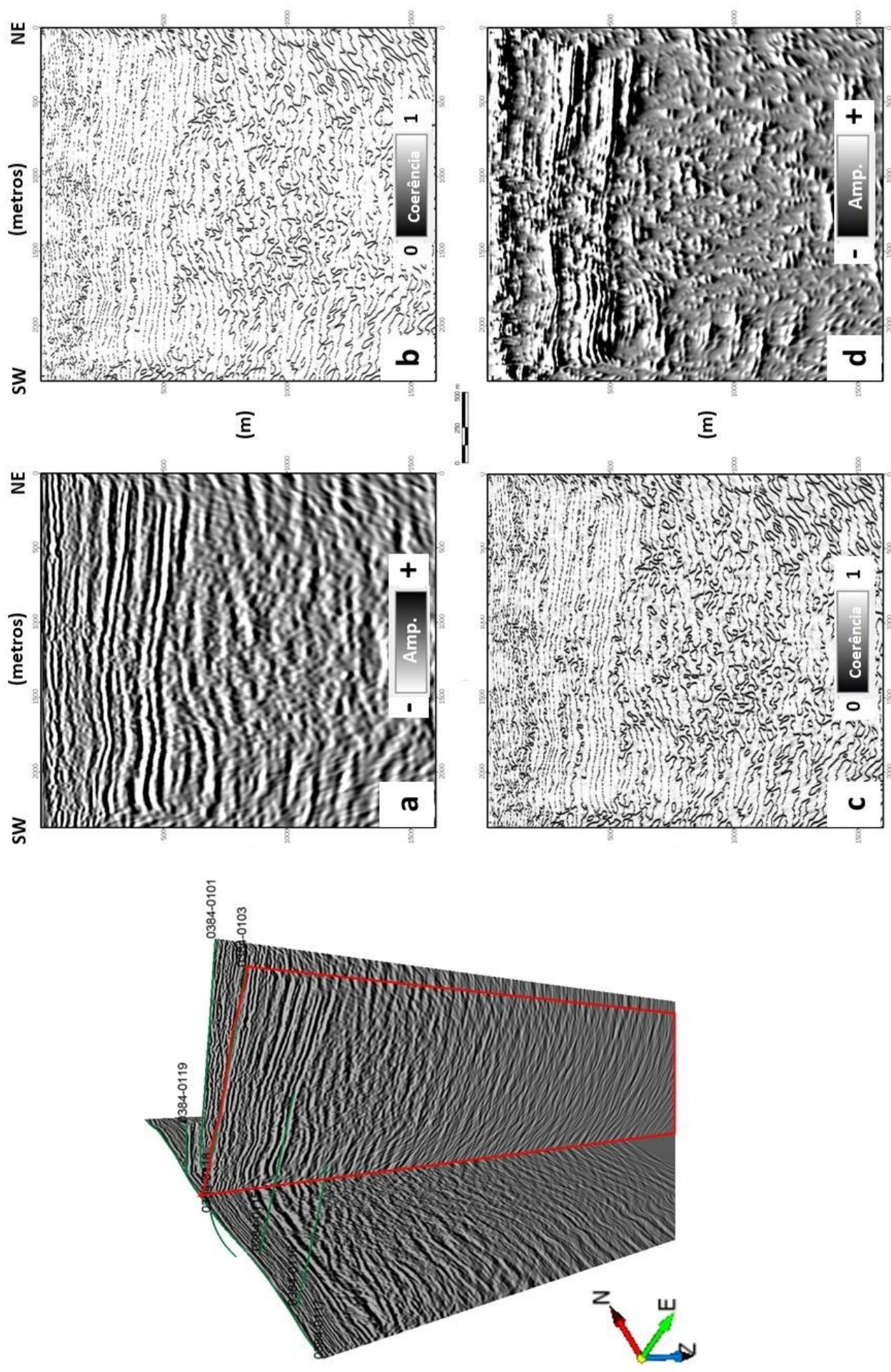


Figura 5.6: Seção sísmica 0384-0103 na versão PSTM, convertida em profundidade, ilustrando os atributos sísmicos: (a) amplitude (dado original), (b) semblance, (c) similaridade e (d) pseudo-relevo. Exagero vertical: 1,7x. A sua localização se dá pelo destaque em vermelho no diagrama de cerca ilustrado à esquerda.

Percebe-se, contudo, que algumas feições podem ser mais bem interpretadas no dado em amplitude original, enquanto outras feições, notadamente aqueles com caráter anisotrópico, são mais facilmente interpretadas nos dados de coerência. Com o intuito de ter ambas as informações na mesma sísmica, o dado geofísico foi exaustivamente trabalhado para compor meta-atributos, originados da combinação ponderada em dois ou mais atributos. A principal vantagem no meta-atributo é facilitar o trabalho do intérprete, unindo informações de diferentes naturezas interpretativas, desde aquelas relacionadas aos próprios processos deposicionais das camadas ao longo do tempo geológico, até as feições associadas aos eventos tectônicos que afetaram os litotipos presentes. Neste contexto, podem ser enfocados diversos processos de interesse direto, tais como: (a) discordâncias geológicas; (b) anisotropias estruturais e a sua propagação ao longo de todo o dado sísmico; (c) cavidades; (d) feições de abatimento; dentre outros.

A Figura 5.7 apresenta, de forma resumida, o fluxograma de trabalho adotado para a composição de alguns meta-atributos escolhidos. Nesta imagem, percebe-se que o elemento central é o dado em amplitude PSTM convertido em profundidade (destacado em cinza), o qual, ao receber o processamento adequado, deriva-se em inúmeros atributos (em verde). Por sua vez, estes atributos gerados, quando parametrizados de forma adequada, e combinados entre si, geram os denominados meta-atributos (em marrom). Por fim, estes meta-atributos ainda podem ser parametrizados para gerar uma nova sequência de atributos, em um nível mais complexo de combinação (em azul).

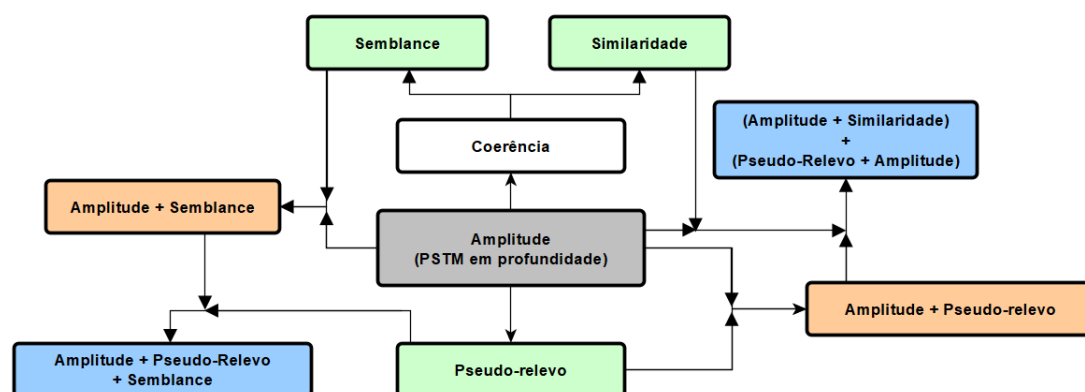


Figura 5.7: Fluxograma resumido da composição de atributos (em verde), meta-atributos (em marrom) e atributos em novo nível de combinações (em azul), todos derivados do dado original escolhido para trabalho (amplitude PSTM migrado em profundidade, destacado em cinza). Ressalta-se que a combinação destes atributos envolve uma complexa parametrização quanto ao peso de cada um, individualmente, na equação utilizada para gerar a imagem final.

A Figura 5.8 evidencia o resultado do trabalho no uso de atributos e os diferentes níveis de meta-atributos discutidos no fluxograma anterior. Nesta sucessão de imagens,

o ponto de realce equivale à conjunção de feições estratigráficas e estruturais que vão sendo compostas em uma mesma imagem, culminando na Figura 5.8d, a qual representa, para o trabalho aqui apresentado, a união coerente de uma imagem sísmica equilibrada, a qual pode ser utilizada tanto para a interpretação de feições estratigráficas, quanto ao mapeamento das descontinuidades estruturais de interesse.

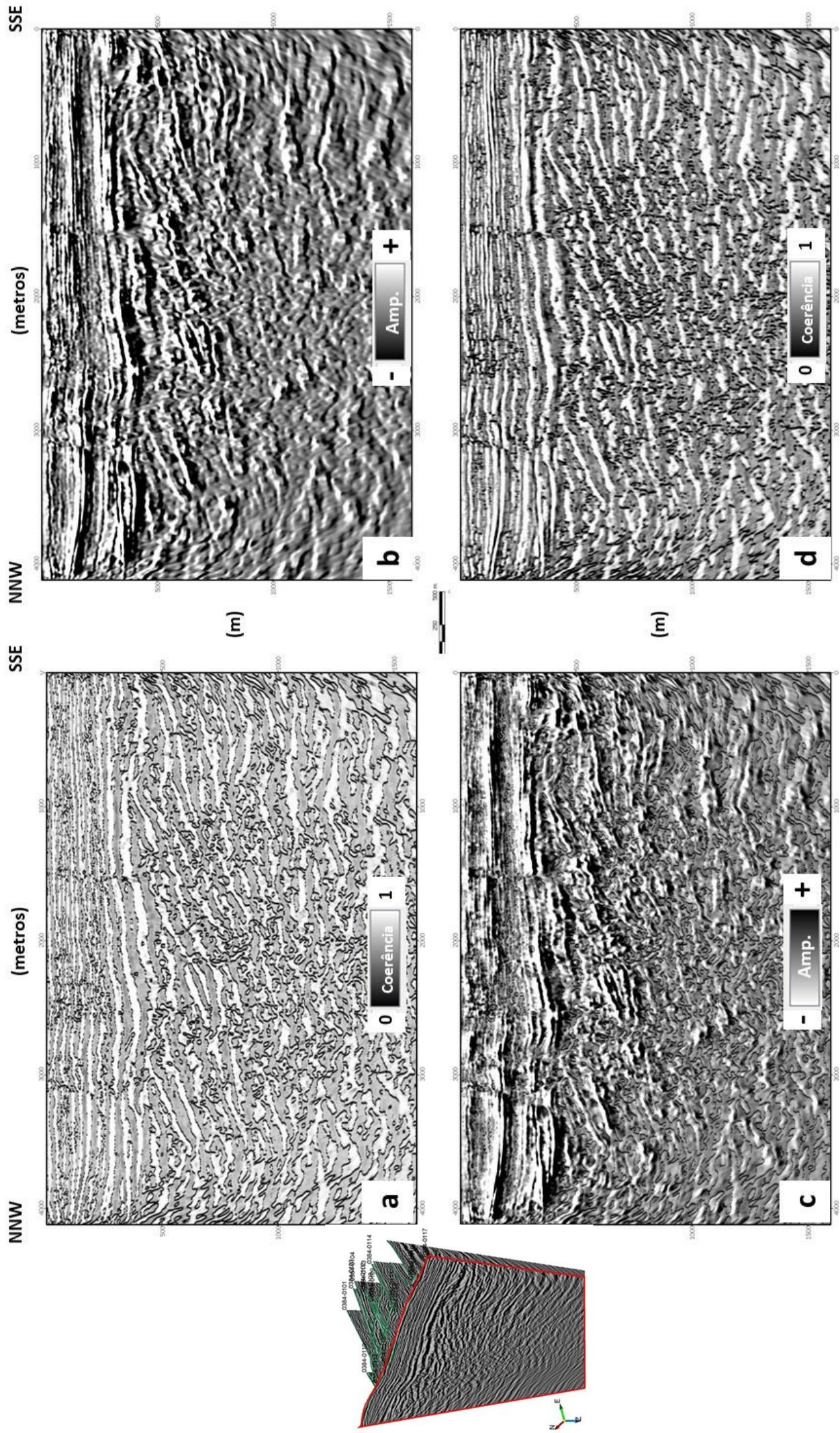


Figura 5.8: Seção sísmica 0384-0117 visualizada na forma de meta-atributos: (a) (amplitude + semblance); (b) (amplitude + pseudo-relevé); (c) (amplitude + pseudo-relevé + semblance); (d) [(amplitude + similaridade) + (pseudo-relevé + amplitude)]. Destaca-se, à medida que segue de (a) até (d), que continuamente o dado sísmico é ressaltado pela facilidade na interpretação de informações de estruturas de cunho estratigráfico com aquelas de cunho estrutural. Exagero vertical: 1,7x.

5.1.3 – Interpretação dos dados sísmicos

De posse dos dados sísmicos devidamente tratados, bem como dos dados de poços disponíveis, foi possível interpretar a geometria dos principais refletores, indicativos em alguns momentos de feições estratigráficas e, em outros, de feições notadamente tectônico-estruturais, por vezes seccionando toda a seção litológica apresentada. Na Figura 5.9, é possível visualizar a seção sísmica 0384-0117 em suas versões não interpretada (5.9a) e interpretada (5.9b) para a combinação de meta-atributos "[(amplitude + similaridade) + (pseudorelevo + amplitude)]" (para visualizar o ganho no caráter sísmico, compare com a Figura 5.4). Foram interpretados os principais topos estratigráficos, ressaltando-se os topos dos membros Ibura e Carmópolis, regionalmente marcando o topo da Formação Muribeca, ou o topo da seção rifte. Abaixo destes refletores, os horizontes apresentam forte mergulho para NNW, possivelmente basculado em função de uma falha normal com caimento para NNE, em típica geometria de semi-grábens assimétricos. Acima desta discordância, refletores relativamente plano-horizontais, apesar de já serem evidenciados inflexões localizadas, por vezes próximas a descontinuidades estruturais. Estas descontinuidades, em uma primeira análise, encontram-se mais evidentes na seção rifte. É possível observar que há falhas geológicas que seccionam o corpo de sal interpretado (topo e base), apesar da qualidade sísmica àquele nível estratigráfico não permitir visualizar rejeitos consideráveis.

Mais especificamente aos fins deste projeto, envolvendo feições estratigráficas e estruturais que venham a se correlacionar com eventos de colapso do terreno, a Figura 5.10 representa um detalhe da seção 0384-0117 indicando descontinuidades enraizadas profundamente e que afetam os refletores mais próximos à superfície de diferentes formas. À princípio, é possível verificar feições de abatimento do terreno próximas à superfície, as quais estão diretamente conectadas por descontinuidades enraizadas, em macro escala, com feições do próprio rifte. Este tipo de feição pode, por exemplo, ser explicada pela reativação de falhas antigas que se propagam até a superfície ou, alternativamente, serem reflexo de cavidades situadas a diferentes profundidades, as quais funcionariam como o propagador de abatimento desde níveis mais profundos até a própria superfície do terreno. A conectividade de feições profundas com aquelas situadas mais próximas à superfície é notada pelo rejeito provocado na própria discordância do topo do rifte. Esta anisotropia em particular, é importante pela possibilidade de rompimento de camadas com características selantes, capaz de permitir o fluxo vertical de fluidos de diferentes naturezas, sobretudo a própria propagação à superfície de possíveis cavidades criadas, originalmente, em níveis mais profundos. Na Figura 5.10 é possível observar zonas de sismofácies caóticas, que

podem ser interpretadas como regiões fortemente deformadas, incoesas e, portanto, passíveis de ocorrência de cavidades de diferentes dimensões. Ressalta-se neste contexto, a correlação ou superposição de zonas falhas e fraturas com as sismofácies caóticas.

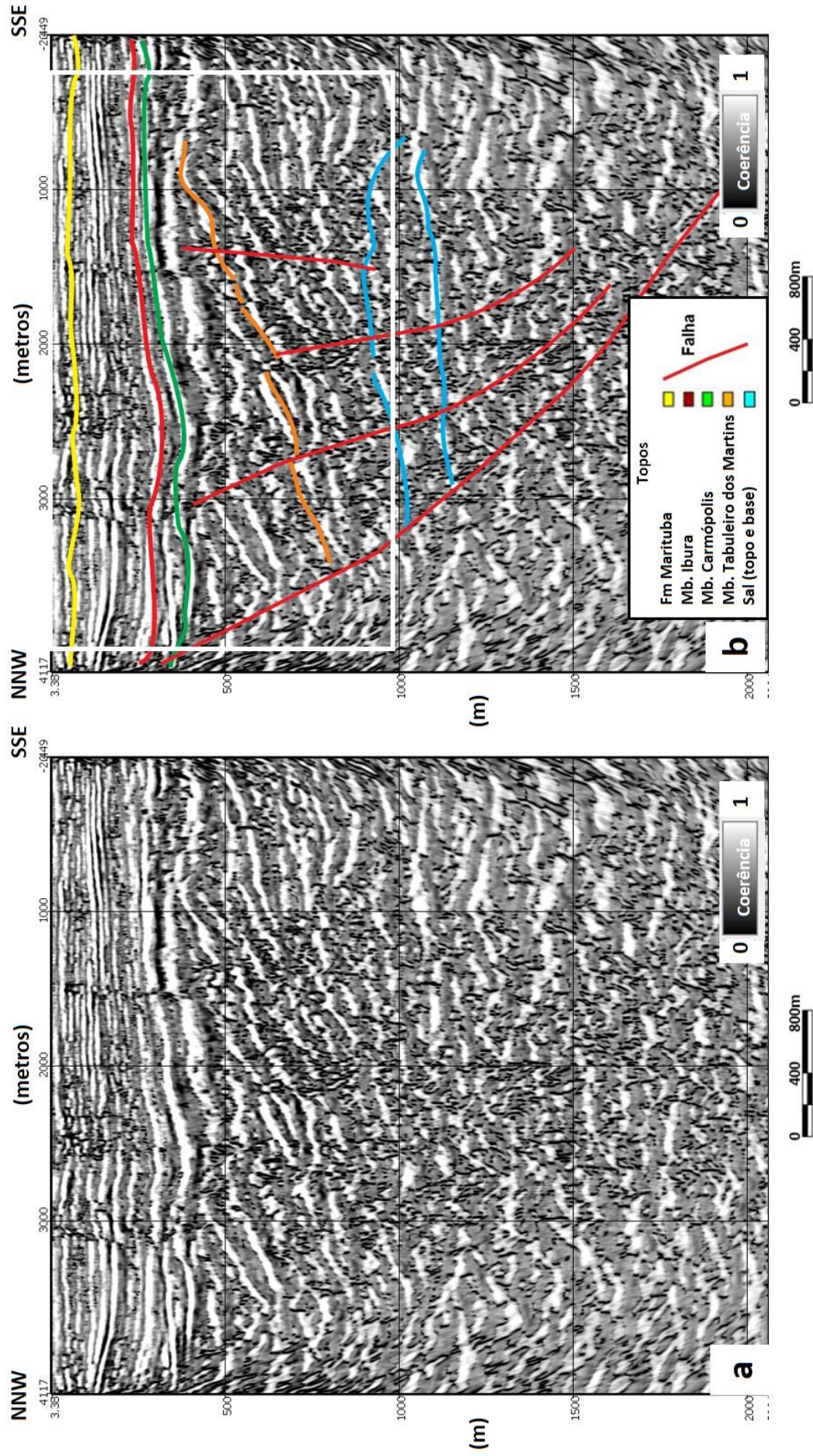


Figura 5.9: Seção sísmica 0384-0117 na versão PSTM, convertida em profundidade, com aplicação da combinação de meta-atributos "[$(\text{amplitude} + \text{similaridade}) + (\text{pseudorelev} + \text{amplitude})^2$]"'. (a) não interpretada e (b) interpretada. Exagero vertical: 2,2x. O quadro branco representa o zoom da Figura 5.10. Detalhes no corpo de texto.

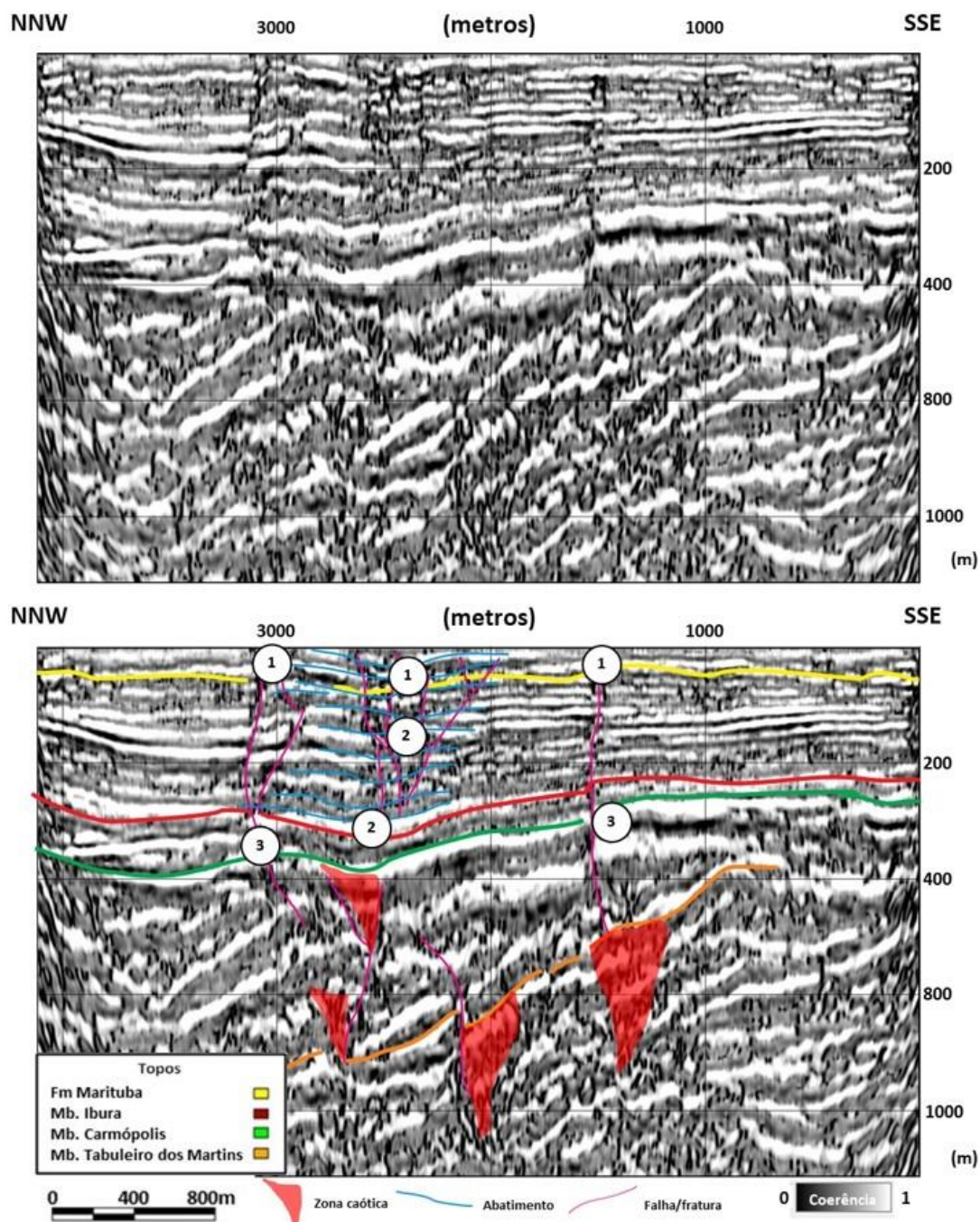


Figura 5.10: Detalhe da seção 0384-0117 (vide posição na Figura 5.9b), combinação de meta-atributo "[$(\text{amplitude} + \text{similaridade}) + (\text{pseudorelevo} + \text{amplitude})$]", ilustrando principais feições estratigráficas, estruturais e de abatimento presentes na área. (1) Abatimento afetando interfaces próximas à superfície; (2) Abatimentos em níveis mais profundos, afetando inclusive o topo do rifte; (3) Falhas e fraturas que afetam sobremaneira possíveis rochas selantes. Destaque, em vermelho, para zonas caóticas provavelmente indicando regiões fortemente deformadas, com alta probabilidade de ocorrência de cavidades de diferentes dimensões.

5.2 – Integração com dados sismológicos

Um dos objetivos deste projeto de pesquisa é analisar, através de uma rede sismológica instalada, os eventos sísmicos da região, os quais podem ter diferentes origens, desde tectônicas (naturais) ou mesmo, decorrentes de ação antrópica. De

maneira inovadora e de posse do catálogo sísmico disponível, foi possível correlacionar os hipocentros de alguns eventos registrados, com boa margem de precisão (erros de localização menores ou iguais a 200 m), aos dados sísmicos trabalhados.

A Tabela 5.1 representa os dados sismográficos que foram correlacionados aos dados sísmicos. Inicialmente, foi realizado um trabalho de filtragem das informações para que as mesmas pudessem ser correlacionadas à malha sísmica disponível e à profundidade máxima de investigação do método sísmico.

*Tabela 5.1: Catálogo de eventos sísmicos filtrados conforme disposição espacial da malha sísmica disponível e respectiva profundidade de investigação máxima. Aqueles sismos com * são os eventos que foram extrapolados à linha 0384-0117, com deslocamento máximo horizontal de 400m.*

Sismo	UTM X	UTM Y	Profundidade (km)
1*	197613,85 m E	8934832,14 m S	0,9
2*	197725,47 m E	8934611,66 m S	1,0
3	199259,66 m E	8935066,72 m S	0,8
4*	197948,71 m E	8934170,70 m S	1,4
5*	198060,32 m E	8933950,22 m S	1,5
6	199141,85 m E	8936061,98 m S	0,9
7	198372,96 m E	8936055,82 m S	0,6
8	196945,00 m E	8936044,35 m S	1,0
9	196949,46 m E	8935490,93 m S	0,3
10*	196731,56 m E	8935267,80 m S	0,3
11	196839,62 m E	8935490,05 m S	0,4
12*	198171,94 m E	8933729,73 m S	0,5
13	198167,49 m E	8934283,15 m S	1,3
14	199270,29 m E	8933738,55 m S	0,8
15	197389,72 m E	8935383,79 m S	2,0
16	190017,39 m E	8936873,48 m S	0,9
17	198265,78 m E	8935722,90 m S	0,9
18	193750,50 m E	8937125,41 m S	0,9

A Figura 5.11 ilustra a disposição espacial das linhas sísmicas 2D e os eventos sísmicos descritos na Tabela 5.1 na forma de mapa (Figura 5.11a) e perspectiva (Figura 5.11b). É possível verificar que a extrapolação dos sismos na linha sísmica 0384-0117 apresenta boa tolerância, 400 m.

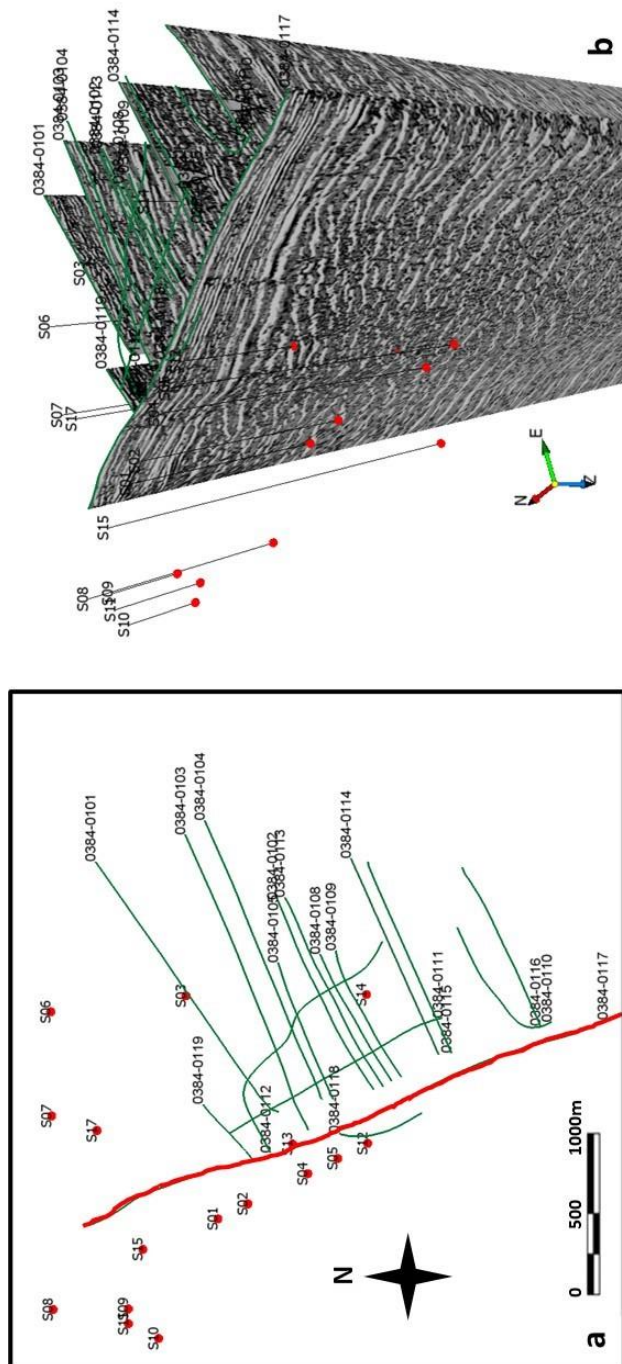


Figura 5.11: Distribuições espaciais dos eventos sísmológicos e da malha sísmica trabalhada. Em (a), os hipocentros estão extrapolados verticalmente no terreno; em (b), estão dispostos junto ao dado sísmico na forma de perspectiva. Ressalta-se nesta imagem na distância máxima de extrapolação do dado sísmológico no dado sísmico, visualizado na Figura 5.11, da ordem de 400m (distância horizontal).

A Figura 5.12 é a reprodução da Figura 5.9a, neste caso superpondo os eventos sísmicos na seção. Nesta figura, é possível observar que os sismos 10, 01, 02, 04 e 05 se justapõem desde o nível mais superficial ao mais profundo à principal falha normal interpretada. Muito provavelmente, este é um aspecto de grande relevância, podendo ser interpretado como o diagnóstico de reativação neotectônica de diversos segmentos desta falha normal. Por sua vez, o sismo 12 pode indicar o sismo provocado pelo abatimento em zona de colapso, uma vez que está associado a sismofácies caótica, imediatamente acima de zona de falha/fratura.

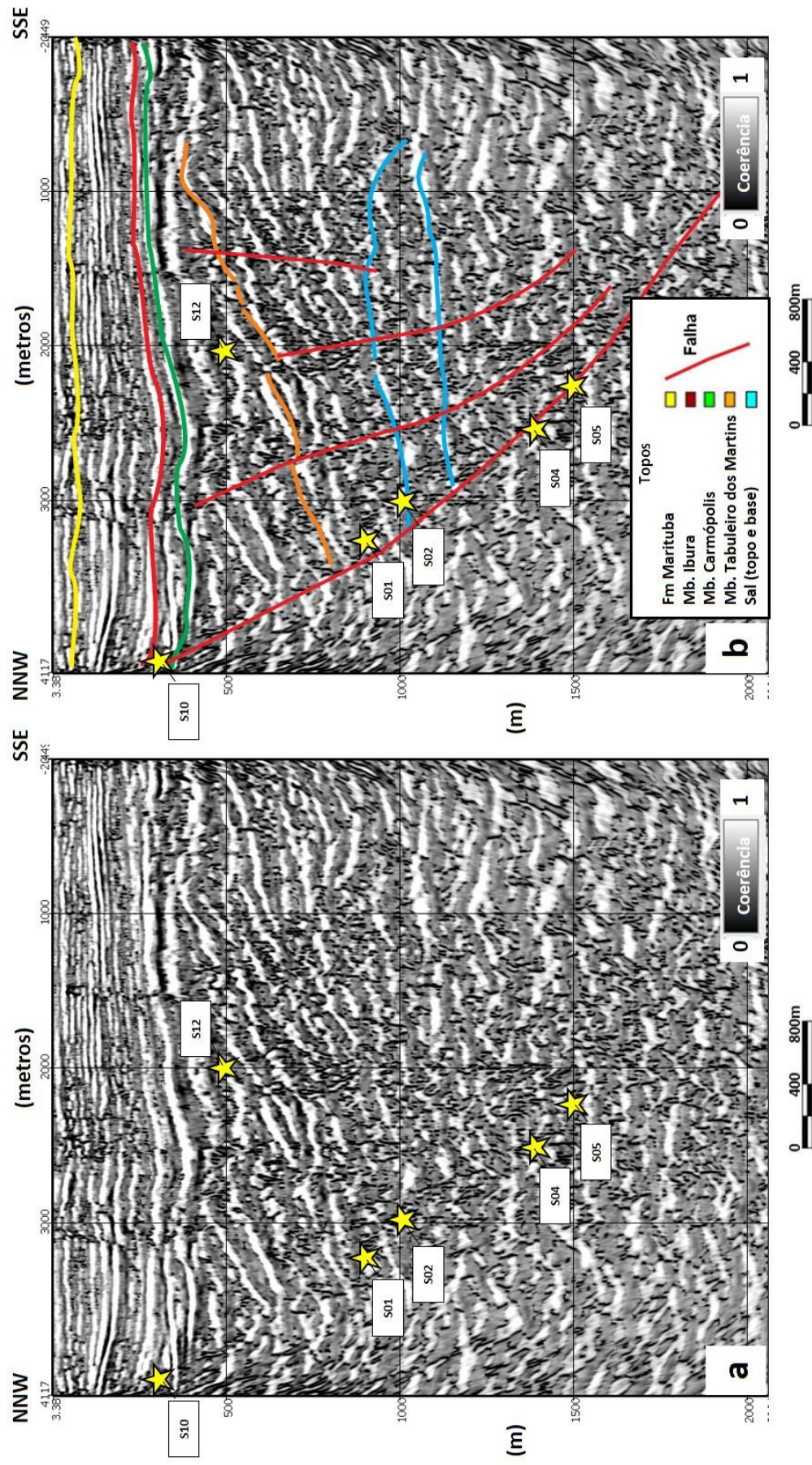


Figura 5.12: Superposição entre dados sísmicos e sismológicos (estrelas) para a linha 0384-0117 em suas versões não interpretada (a) e interpretada (b). Para verificar a linha sem elementos sismológicos ou geológicos, vide a Figura 5.9a; para a representação em mapa dos sismos e malha sísmica, vide a Figura 5.10. É possível observar a correlação marcante entre os sismos 10, 01, 02, 04 e 05 com a zona de falha na seção rífte. Além disto, verifica-se que o sismo 12 encontra-se imediatamente acima de zona de falha/fratura, em região de sismofácies caótica. Detalhes no texto. Exagero vertical 2,2x.

5.3 – Considerações

Em acordo com o descrito neste capítulo, verificou-se que a interpretação sísmica de feições que denotem a fonte dos efeitos de abatimento do terreno da região de Maceió não é tarefa fácil. Boa parte do trabalho interpretativo está associado diretamente à capacidade dos métodos geofísicos, atrelados às mais diferentes fontes de informações, em imagear o substrato rochoso com acurácia e resolução. Contudo, em função de diversos aspectos que vão desde a aquisição do dado geofísico, envolvendo aqui aspectos inerentes à disposição espacial do dado, ou mesmo a sua parametrização, até o próprio trabalho de processamento executado, por vezes a resolução sísmica não é compatível ao objeto de estudo.

Percebeu-se que o processamento pós-empilhamento do dado com vistas à geração de atributos sísmicos foi crucial ao trabalho interpretativo. A inspeção visual do dado original em amplitude, embora com diversas versões de processamento, permitiu verificar que a razão sinal-ruído e a resolução sísmica eram incompatíveis ao nível de interpretação solicitado. Com isto, foi empregado um tempo substancial ao tratamento do dado com a função de realçar as feições estratigráficas e estruturais de interesse. Além disto, também foi verificado que o simples procedimento em gerar atributos sísmicos não era suficiente ao correto imageamento do substrato.

Com isto, uma inovadora estratégia foi utilizada, a de gerar meta-atributos compostos pela junção ponderada de diversos outros atributos, embasados em critérios técnico-científicos robustos. Evidentemente, para chegar ao resultado final de menos de uma dezena de atributos confiáveis, diversas dezenas de combinações foram testadas sem o alcançar o resultado almejado. Contudo, isto já era esperado uma vez que cada processo de combinação de atributos tem por atrelado uma rigorosa parametrização de inúmeras variáveis. Ou seja, a combinação destes atributos está associada a um grande número de testes exaustivos até chegar a um resultado satisfatório.

Desta forma, foi identificada uma combinação que permitiu extrair as informações mais importantes dos atributos empregados isoladamente. A continuidade do atributo de amplitude, a descontinuidade dos atributos de coerência e a ênfase do atributo de relevo, combinados com determinadas ponderações isoladas permitiu gerar o meta-atributo "[(amplitude + similaridade) + (pseudorelevo + amplitude)]". Com isto, em uma mesma imagem sísmica, foi possível interpretar feições de caráter estratigráfico ou estrutural. Além disto, feições antes não claras nos dados tradicionais, como a propagação de descontinuidades profundas, até níveis no substrato subsuperficiais puderam ser identificadas. Feições de abatimento de terreno, que certamente têm relação com estruturas tectônicas, também puderam ser imageadas. Pelo incremento de resolução neste meta-atributo gerado, também foi possível identificar rejeitos de

camadas selantes, não visualizadas até o momento. Por fim, o mapeamento de zonas caóticas favorece a identificação de severas descontinuidades no substrato, as quais são passíveis de contemplar cavidades de diferentes dimensões e assemelhados.

Por fim, também com caráter inovador, a união das informações sismológicas e as sísmicas permitiu identificar, muito provavelmente, zonas sísmicas ativas. Estas zonas têm representatividade direta com zona de falha expressivas, segundo a qual diferentes setores aparentam estar ativas em função de causas diversas, desde o próprio contexto geológico-tectônico natural, até fruto da ação antrópica, por exemplo, da exploração de sal da região, resultante, talvez, da alteração do fluxo natural de fluídos no substrato. Apesar da correlação entre dados sísmicos e sismológicos ser clara, indicando que descontinuidades geológicas estão ativas, indicar se a sua movimentação decorre de efeitos naturais e da ação antrópica ainda carece de estudos mais detalhados. É marcante, contudo, que os dados sísmicos indicam que diversas feições de abatimento superficiais têm enraizadas estruturas geológicas interpretáveis e imageadas com os dados geofísicos disponíveis.

5.4 – Sugestões

Para trabalhos futuros, sugere-se alguns procedimentos a adotar:

- levantamento sísmico 2D + Tempo: aquisição sísmica com parametrização de aquisição semelhante àquela utilizada, bem como fluxo de processamento idêntico ao realizado, de modo a avaliar a dimensão tempo no que diz respeito ao imageamento do substrato. Com isto, pode-se fazer análise comparativa entre as duas imagens sísmicas do mesmo local, desta forma analisando a progressão das feições geológicas com o tempo
- levantamento de geofísica rasa: ocupar as posições no terreno em que as feições sísmicas interpretadas chegam próximas à superfície. Desta forma, pode-se fazer um trabalho de correlação entre técnicas de diferentes níveis de resolução, mas em uma situação de relativo controle
- integração com dados de interferometria: da mesma forma que no caso da integração com dados de geofísica rasa, integrar as informações de dados geofísicos diversos com feições de abatimento mensuradas na escala milimétrica, caso a resolução vertical da interferometria assim permita
- mapeamento geológico de superfície: associado à própria interpretação dos dados geofísicos, inspecionar o terreno com critério geológico na tentativa de saber se as descontinuidades interpretadas estão aflorando ou,

alternativamente, mostram aspectos indiretos do terreno que permite tal correlação

6.0 – Considerações finais e recomendações

Considerações:

→ O presente projeto realizou um imageamento dedicado (utilizando atributos) para fraturas (recentes);

→ Esse imageamento permitiu a identificação de estruturas "abauladas", associadas com breccias de colapso;

→ O imageamento permitiu inferir que há conexão hidráulica da superfície até maiores profundidades, que facilita a dissolução indesejada de camadas de sal em subsuperfície que podem provocar colapso de tetos de cavernas e diminuir o esforço normal efetivo em estruturas pré-existentes, promovendo sismicidade;

→ A sismicidade é consistente com falhas associadas à subsidência direta e falhamentos preexistentes;

→ Sismos por colapsos são possíveis, uma vez que estas estruturas são compatíveis com a interpretação sísmica realizada;

Recomendações

→ levantamento sísmico 2D + Tempo;

→ levantamento de geofísica rasa;

→ integração com dados de interferometria – InSAR;

→ uso de outras técnicas para melhoria na localização hipocentral;

→ utilizar interferometria sísmica de ruído ambiental para melhoria dos parâmetros de modelo de velocidades e verificação de variações temporais associadas à sismicidade e/ou alteração do substrato geológico da região devido à subsidência;

→ mapeamento geológico integrado com mapa de dados nas estruturas civis da região afetada.

→ manutenção das atividades de pesquisa e inovação entre a UFRN e CPRM no tema do TED;

→ Incorporar outros elementos do conjunto de dados ao *geodatabase* do ArcGIS, de forma a ampliar a gama de dados contemplados pelo banco que possam ser visualizados;

→ Reestruturar do banco a partir de uma plataforma online, de forma a facilitar o acesso remoto aos dados por diferentes clientes com distintos níveis de acesso

→ expansão da atual capacidade técnica criada a partir deste TED para aprofundamento dos estudos e capacitação de recursos humanos adicional na temática em tela.

7.0 – Agradecimentos

→ Serviço Geológico do Brasil—CPRM, em particular à sua equipe que desde o início da repercussão apoiou as iniciativas da equipe;

→ Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Estudos Tectônicos (INCET-ET/CNPq) pelo financiamento de viagens de campo que permitiram a instalação dos primeiros sismógrafos em Maceió-AL;

→ À Pró-Reitoria de Planejamento da UFRN (Proplan/UFRN);

→ À Fundação Norte-Riograndense de Pesquisa e Cultura (FUNPEC/UFRN);

→ À toda equipe do Laboratório Sismológico, em particular a Eduardo Alexandre Santos de Menezes e Marconi Alves de Oliveira;

→ A Thales Sampaio (SBG/CPRM)

→ À Maria Adelaide Mansini Maia (SBG/CPRM)

8.0 – Referências

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 Sul-Atlântico. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **13**:167-180.

Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B. B., Fuck R. A. 1977. Províncias estruturais brasileiras. *In*: Simpósio de Geologia do Nordeste, 8, Campina Grande, SBG/ Nordeste, *Boletim*, p. 363-391.

Andrade da Silva D.R., Mizusaki A.M.P., Milani E.J., Tassinari C.C.G. 2006. Idade deposicional da Formação Bananeiras (Bacia de Sergipe-Alagoas): uma aplicação do método radiométrico Rb-Sr em rochas sedimentares. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **14**(2):235-245.

Aronov, A., Paskaleva, I., Aronova, T., Dimitrova, S., & Dimitrova, L. Features of manifestations of induced seismicity in mining regions of Potassium salt deposits in Starobin (Belarus) and Provadia (Bulgaria).

Asmus H.E. 1984. Geologia da Margem Continental Brasileira. *In*: C. Schobbenhaus, D.A. Campos, G.R. Derze, H.E. Asmus (eds.) *Geologia do Brasil - Texto Explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da Área Oceânica Adjacente incluindo Depósitos Minerais*, escala 1:2.500.000. DNPM, Ministério das Minas e Energia, p. 443-472.

Asmus H.E. & Porto R. 1972. Classificação das bacias sedimentares brasileiras segundo a tectônica das placas. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 26, Belém, SBG, *Anais*, vol. 2, p. 67-90.

Asmus H.E. & Porto R. 1980. Diferenças nos estágios iniciais da evolução tectônica da margem continental leste brasileira: possíveis causas e implicações. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 31, Camboriú, SBG, *Anais*, vol.1, p. 225-239.

BARRY R. LIENERT, E. B. (1986). HYPOCENTER: AN EARTHQUAKE LOCATION METHOD USING CENTERED, SCALED, AND ADAPTIVELY DAMPED LEAST SQUARES. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 771-783.

Berest, P., Diamond, B., Duquesnoy, A., Durup, G., Feuga, B., & Lhoff, L. (2005, November). Salt and brine production methods in France: main conclusions of the international group of experts (IEG) commissioned by the French regulatory authorities. In Post-mining conference (pp. 16-17).

Bezerra, F. H., do Nascimento, A. F., Ferreira, J. M., Nogueira, F. C., Fuck, R. A., Neves, B. B. B., & Sousa, M. O. (2011). Review of active faults in the Borborema Province, Intraplate South America—Integration of seismological and paleoseismological data. *Tectonophysics*, 510(3-4), 269-290.

Bradley C.A. & Fernandez M.N. 1992. Early Cretaceous paleogeography of Gabon/ Northeastern Brazil: A tectonic-stratigraphic model based on propagating rifts. In: R. Curnelle (ed.) *Géologie Africaine*. Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine, Libreville, Gabão, p.17-30. (*Mémoire 13*).

Brito I.M., Quadros L.P. & Cardoso T.R.M. 1985. A idade das formações Batinga e Aracaré da Bacia de Sergipe-Alagoas. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **57**(2): 209-215.

Brown, A. 1999. Interpretation of three-dimensional seismic data. 5ª edição, Memoir da AAPG, SEG, 9, 514p. ISBN: 0891813527.

Bueno G.V. 2004. Diacronismo de eventos no rifte Sul-Atlântico. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **12**(2):203-229.

Bulhões, E. M. e Amorim, W. N., 2005. Princípio da sismocamada elementar e sua aplicação à Técnica Volume de Amplitudes (TecVA), In: 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. DOI: 10.1190/sbgf2005-275.

Castro Jr. A.C.M. 1987. The northeastern and Gabon basins: a double rifting system associated with multiple crustal detachment surfaces. *Tectonics*, **6**(6):727-738.

Castro Jr. A.C.M. 1988. *Structural evolution of the Sergipe-Alagoas Basin, Brazil*. Tese de Doutorado, Rice University, Houston, Texas, 183p.

Cesca, S., Dahm, T., Becker, D., Hainzl, S., Stammer, K., Kaiser, D., ... & Manthei, G. (2011). MINE, Mining Environments: continuous monitoring and simultaneous inversion.

Science Report, 3.

Chang H.K., Kowsmann R.O., Figueiredo A.M.F. 1990. Novos conceitos sobre o desenvolvimento das bacias marginais do Leste brasileiro. *In* G.P. Raja Gabaglia & E.J. Milani (eds.) *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. PETROBRAS, Rio de Janeiro, p. 269-289.

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**:97-138.

Córdoba V.C., Jardim de Sá E.F., Sousa D.C., Antunes A.F., Matos R.M.D. 2007. Nova carta estratigráfica para a Bacia Pernambuco-Paraíba. *In*: Simpósio de Geologia do Nordeste, 22, Natal, SBG/Nordeste, *Boletim*, p. 30.

Córdoba V.C., Jardim de Sá E.F.J., Sousa D.C., Antunes A.F., Cruz L.R. 2008. Bacia Pernambuco-Paraíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **15**(2), no prelo.

Destro N. 1995. Release fault: a variety of cross fault in linked extensional fault systems in the Sergipe-Alagoas Basin, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, **17**:615-629.

Dias, R. C., Julià, J., & Schimmel, M. (2015). Rayleigh-wave, group-velocity tomography of the Borborema Province, NE Brazil, from ambient seismic noise. *Pure and Applied Geophysics*, 172(6), 1429-1449.

Estrella G.O. 1972. O estágio Rift nas bacias marginais do Leste brasileiro. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 26, Belém, SBG, *Anais*, vol. 3: 29-34.

Falkenhein F.U.H. 1986. Análise da Bacia Sergipe-Alagoas. CENPES/DEPEX/PETROBRAS, *Relatório interno*, 210 p.

Feijó F.J. 1994a. Bacias de Sergipe e Alagoas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **8**(1):149-161.

Foulger, G. R., Wilson, M. P., Gluyas, J. G., Julian, B. R., & Davies, R. J. (2018). Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*, 178, 438-514.

Guimarães P.T.M. 1988 *Basin analysis and structural development of the Sergipe-Alagoas basin, Brazil*. Tese de Doutorado, University of Texas at Austin, 171 p.

Hamsi Jr. G.P. 1998. *Investigação sobre a extensão litosférica da Bacia Sergipe-Alagoas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais da Escola de Minas, UFOP, 180p.

Hasegawa, H. S., Wetmiller, R. J., & Gendzwill, D. J. (1989). Induced seismicity in mines in Canada—an overview. *Pure and Applied Geophysics*, 129(3-4), 423-453.

Kang, J. Q., Zhu, J. B., & Zhao, J. (2019). A review of mechanisms of induced earthquakes: from a view of rock mechanics. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 5(2), 171-196.

Kim, W. Y., Sykes, L. R., Armitage, J. H., Xie, J. K., Jacob, K. H., Richards, P. G., ... & Du, W. X. (2001). Seismic waves generated by aircraft impacts and building collapses at World Trade Center, New York City. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82(47), 565-571.

Kim, J. W., Lu, Z., & Kaufmann, J. (2019). Evolution of sinkholes over Wink, Texas, observed by high-resolution optical and SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 222, 119-132.

Jardim de Sá E.F. (coord.). 2003. *Avaliação do Potencial Petrolífero da Bacia Pernambuco-Paraíba*. Projeto ANP/FUNPEC/UFRN, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, UFRN, 302 p.

Jardim de Sá E.F., Vasconcelos P.M.P., Kohn B., Matos R.M.D., Nascimento M.A.L., Souza Z.S. 2004a. Datações Ar/Ar do Magmatismo Ipojuca e a Idade do Rifteamento na Sub-bacia de Pernambuco, Nordeste do Brasil. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 32, Araxá, SBG, *Anais*, S32.399.

Jardim de Sá E.F., Souza Z.S., Vasconcelos P.M.P., Saadi A., Galindo A.C., Lima M.G., Oliveira M.J.R. 2005. Marcos temporais para a evolução cenozóica do Planalto da Borborema. *In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, 10, Curitiba, *Boletim*, p. 160-162.

Kao, Honn, Shan, Shao-Ju, 2004. The source-scanning algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space. *Geophys. J. Int.* 157 (2), 589–594.

<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02276.x>.

Kinscher, J., Bernard, P., Contrucci, I., Mangeney, A., Piguët, J. P., & Bigarre, P. (2014). Location of microseismic swarms induced by salt solution mining. *Geophysical Journal International*, 200(1), 337-362.

Kinscher, J., Cesca, S., Bernard, P., Contrucci, I., Mangeney, A., Piguët, J. P., & Bigarre, P. (2016). Resolving source mechanisms of microseismic swarms induced by solution mining. *Geophysical Journal International*, 206(1), 696-715.

Lana M.C. 1985. *Rifteamento na Bacia de Sergipe-Alagoas, Brasil*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais da Escola de Minas, UFOP, 124 p.

Lana M.C. 1990. Bacia de Sergipe-Alagoas: uma hipótese de evolução tectono-sedimentar. In: G.P.R. Gabaglia & E.J. Milani (eds.) *Origem e Evolução das Bacias Sedimentares*. PETROBRAS, Rio de Janeiro, p. 311-332.

Li, T., Cai, M. F., & Cai, M. (2007). A review of mining-induced seismicity in China. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(8), 1149-1171.

Lima M.G., Vasconcelos P.M., Farley L., Jardim de Sá E.F. 2007. Datação do intemperismo impõe limites na idade da Formação Barreiras, Bacia Potiguar Nordeste do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Estudos Quaternário, 11, Belém, *CD-Rom*.

Magnavita L.P. 1992. *Geometry and kinematics of the Recôncavo-Tucano-Jatobá Rift, NE Brazil*. Tese de Doutorado, University of Oxford, 493 p.

Matos R.M.D. 1992. The Northeast Brazilian Rift System. *Tectonics*, 11:766-791.

Matos R.M.D. 1999. History of the northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break-up between Brazil and West Africa. In: N. R. Cameron, R. H. Bate, V. S. Clure (eds.) *The oil and gas habitats of the South Atlantic*. Geological Society, p. 55-73. (*Special Publication*, 153).

Matos R.M.D. 2000. Tectonic evolution of the Equatorial South Atlantic. In: W. Mohriak & M. Talwani (eds.) *Atlantic Rifts and Continental Margins*. Geophysical Monograph, vol.

115, p. 331-354.

Mohriak W.U. 2003 Rift architecture and salt tectonics in the South Atlantic – implications for deep water petroleum exploration. *In: W.U. Mohriak (ed.) *Rifted sedimentary basins of the South Atlantic: turbidite reservoir, sedimentation and tectonic processes*. PETROBRAS/UERJ, Rio de Janeiro, CD-Rom.*

Mohriak W.U. 2004. Recursos energéticos associados à ativação tectônica mesozóica-cenozóica da América do Sul. *In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito Neves (eds.) *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca Produções Culturais Ltda., p. 293-318.*

Mohriak W.U., Rabelo J.H.L, Matos R.M.D., Barros M.C. 1995. Deep seismic reflection profiling of sedimentary basins offshore Brazil: geological objectives and preliminary results in the Sergipe Basin. *Journal of Geodynamics*, **20**:515-539.

Mohriak W.U., Bassetto M., Vieira I.S. 1997. Observações sobre a carta estratigráfica e a evolução tectono-sedimentar das bacias de Sergipe e Alagoas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **11**(1/2):84-115.

Mohriak W.U., Bassetto M., Vieira I.S. 1998. Crustal architecture and tectonic evolution of the Sergipe-Alagoas and Jacuípe basins, offshore northeastern Brazil. *Tectonophysics*, **288**:199-220.

Mohriak W.U., Mello M.R., Bassetto M., Vieira I.S., Koutsoukos E.A.M. 2000. Crustal architecture, sedimentation and petroleum systems in the Sergipe-Alagoas Basin, Northeastern Brazil. *In: M.R. Mello & B.J. Katz (eds.) *Petroleum systems of South Atlantic margins*. Tulsa, Oklahoma, AAPG, p. 273-300. (Memoir, 73).*

Ottemöller, L., Voss, P.H. and Havskov J. (2021). SEISAN Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, Linux and MacOSx, Version 12.0. 607 pp. University of Bergen. ISBN 978-82-8088-501-2, URL <http://seisan.info>.

Rabêlo Cruz L. 2008. *Caracterização Tectono-Estratigráfica da Seqüência Transicional na Sub-bacia de Sergipe*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, UFRN, 166 p.

Satarugsa, P., Youngmee, W., & Meesawat, S. (2011, December). The lessons learnt from geophysical investigation of sinkholes in rock salt in Thailand. In International Conference on Geology, Geotechnology and Mineral Resources of Indochina (GEOINDO 2011) (pp. 1-3).

Schaller H. 1970. Revisão estratigráfica da Bacia de Sergipe/Alagoas. *Boletim Técnico da Petrobras*, **12**(1):21-86.

Serviço Geológico do Brasil-CPRM. 2019. Estudos sobre a Instabilidade do Terreno nos Bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL). Ação Emergencial no Bairro Pinheiro, Relatório Síntese dos Resultados Nº 1, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Brasília, Volume I, 40p. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/impressa/pdf/relatoriosintese.pdf>

Schobbenhaus C. & Campos D.A. 1984. A Evolução da Plataforma Sul-Americana no Brasil e suas principais concentrações minerais. In: C. Schobbenhaus, D.A. Campos, G.R. Derze, H.E. Asmus (eds.) *Geologia do Brasil, Texto Explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da Área Oceânica Adjacente incluindo Depósitos Minerais, escala 1:2.500.000*. DNPM, Ministério das Minas e Energia, p. 93-53.

Sheriff, R.E. 2002. Encyclopedic dictionary of applied geophysics. SEG, 13. ISBN: 9781560801184.

Shihadeh, H. L. (2015). Utilização de sismos regionais para a determinação de um modelo 1D de velocidades da onda P na Província Borborema-NE do Brasil (Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).

Spectrageo, 2019. Relatório técnico Braskem, número 082019/003, contrato 4600020434, volume 31, parte 1.

Souza-Lima W. 2005. Evolução tectono-sedimentar da bacia de Sergipe-Alagoas. *Phoenix*, 58 p.

Souza-Lima W. & Hamsi Jr. G. 2003. Bacias sedimentares brasileiras: Bacias da margem continental. *Phoenix*, **50**:1-4.

Souza-Lima,W., Albertão G.A., Lima F.H.O. 2003. Bacias sedimentares brasileiras:

Bacia de Pernambuco-Paraíba. *Phoenix*, **55**:1-5.

Souza-Lima W., Andrade E. J., Bengtswon P., Galm P.C. 2002. A Bacia de Sergipe-Alagoas: evolução geológica, estratigrafia e conteúdo fóssil. *Phoenix*, 34p.

Szatmari P., Conceição J.C.J., Lana M.C., Milani E.J., Lobo A.P. 1984. Mecanismo tectônico do rifteamento Sul-atlântico. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 33, Rio de Janeiro, SBG, *Anais*, vol. 4, p. 1589-1601.

Taner, M.T., Koehler, F. and Sheriff, R., 1979. Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, 44(6), 1041–1063. doi: /10.1190/1.1440994.

Teyssoneyre, V., Feignier, B., Šíleny, J., & Coutant, O. (2002). Moment tensor inversion of regional phases: Application to a mine collapse. In *The Mechanism of Induced Seismicity* (pp. 111-130). Birkhäuser, Basel.

UFF, 2020. Estudo sobre o fenômeno associado a rachaduras e afundamentos de terrenos em região urbanizada em Maceió-AL, através de estudos geológicos e geofísicos. Workshop de acompanhamento. 172p.

Ussami N., Karner G.D., Bott M.H.P. 1986. Crustal detachment during South Atlantic rifting and formation of the Tucano-Gabon basin system. *Nature*, **322**:629-632.

Van Der Ven P.H., Cainelli C., Fernandes G.J.F. 1989. Bacia de Sergipe-Alagoas: Geologia e Exploração. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **3**(4):307-319.

Vassileva, M., Al-Halbouni, D., Motagh, M., Walter, T. R., Dahm, T., & Wetzel, H. U. (2021). A decade-long silent ground subsidence hazard culminating in a metropolitan disaster in Maceió, Brazil. *Scientific reports*, 11(1), 1-13.

Warren, J. K. (2017). Salt usually seals, but sometimes leaks: Implications for mine and cavern stabilities in the short and long term. *Earth-science reviews*, 165, 302-341.

Zhang, G., Wang, Z., Wang, L., Chen, Y., Wu, Y., Ma, D., & Zhang, K. (2019). Mechanism of collapse sinkholes induced by solution mining of salt formations and measures for prediction and prevention. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(3), 1401-1415.