

**MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM**

**ESTUDOS SOBRE A INSTABILIDADE
DO TERRENO NOS BAIROS
PINHEIRO, MUTANGE E BEBEDOURO, MACEIÓ (AL)**

**RESPOSTAS DO SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL
AOS QUESTIONAMENTOS DA BRASKEM**

Questões encaminhadas pela Braskem ao Serviço Geológico do Brasil na audiência com o Ministério Público Federal, em 3 de Junho de 2019, em Maceió, AL.

Rio de Janeiro, 17 de Junho 2019.

INTRODUÇÃO

No dia 3 de junho de 2019, durante audiência realizada no Ministério Público Federal em Maceió, Alagoas, foram apresentadas questões formuladas pela Braskem acerca do trabalho realizado pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM nos bairros do Pinheiro, Mutange e Bebedouro daquela capital.

As respostas a essas questões são apresentadas a seguir em detalhe. Aspectos teóricos, metodológicos, práticos e comerciais inerentes a procedimentos utilizados são apresentados para fomentar a compreensão de várias questões. Referências bibliográficas que embasam tópicos discutidos são também fornecidas.

Para facilitar a leitura, repetiu-se o conteúdo reunido pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM nos seguintes produtos: i) relatório *Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL) volume I – Relatório síntese dos resultados*, ii) *Volume II – Relatórios Técnicos*. Doravante, o primeiro passa a ser referido como **Relatório Síntese**. Os relatórios técnicos utilizados, por sua vez, serão citados fazendo-se menção ao volume, letra e tema relacionado; por exemplo, *volume II – Relatórios Técnicos: L. Geofísica – Sismologia* será citado como **L. Sismologia**.

Também foi utilizado material apresentado em palestras e apresentações proferidas pelos técnicos envolvidos nos estudos, além de figuras, até então não publicadas, e outros materiais.

Finalizando, reitera-se a disponibilidade do Serviço Geológico do Brasil – CPRM para elucidar dúvidas que por ventura ainda existam quanto ao trabalho realizado por mais de meia centena de seus pesquisadores, enriquecido pela contribuição de pesquisadores externos.

1. DESABAMENTO DAS CAVERNAS E REATIVAÇÃO DE FALHA GEOLÓGICA

1.1. Considerando-se que as minas 30 e 31 têm sonares íntegros em 2018 e que elas operaram entre 2015 e 2018 (o aumento de volume era esperado), a CPRM entende que precisa revisar a conclusão sobre o desabamento das mesmas?

O Serviço Geológico do Brasil entende que não foram apresentados, pela Braskem, dados que justifiquem a reavaliação das análises apresentadas no Quadro Síntese de Análise dos Sonares para as Minas 30D e 31D. Consideramos, também, que não tem respaldo a afirmação de “conclusão – por parte do Serviço Geológico do Brasil - sobre o desabamento das mesmas”, visto que essa análise foi apresentada como alternativa para explicar a elevação do fundo da mina proporcional a subida do topo da mina (apêndice 1.1.d), considerando, também, a ocorrência do sismo registrado pela rede sismográfica com epicentro coincidente em planta, com a projeção da Mina 30D. Conforme consta no Quadro Síntese de Análise dos Sonares, a Mina 30D teve avanço predominantemente vertical, com subida de 40 metros em um ano evidenciando que a lavra se aproximou do topo da camada de sal.

Na análise da Mina 31D são informadas diferentes datas em diferentes documentos ou parte de documentos (2014, 2015, 2017), o que impede uma análise mais consistente na afirmação da integridade dos dados. Como o processo de lavra não explica o conjunto de dados, as duas alternativas colocadas no Quadro Síntese. Finalizando, conclui-se que não existem ou não foram informados novos elementos que levem à reanálise.

Complementando a resposta acima, além da análise dos dados dos sonares fornecidos pela Braskem, se faz necessário apresentar e caracterizar os resultados dos levantamentos geofísicos obtidos pela CPRM, considerando, também, que eles fundamentarão respostas de outras questões.

A ocorrência de sismos, conforme apresentado na figura 1, mostra o epicentro (projeção na superfície do hipocentro) de seis microterremotos observados entre os dias 1º a 11 de fevereiro de 2019. Segundo os dados sismológicos eles são caracterizados por liberação gradual de energia e, algumas vezes, existência de múltiplos eventos com duração de até 20 segundos, e assinatura não típica de eventos sísmicos tectônicos tradicionais geralmente observados no NE do Brasil.

A figura 2, por sua vez, apresenta o resultado de interferometria, os epicentros dos quatro microterremotos ocorridos em terra e a posição das minas de sal. Tanto a mina M30 como a M31 estão localizadas nas zonas de afundamentos mostradas pela interferometria. Um dos

epicentros ocorreu na posição da mina M30. A mina M31, por sua vez, encontra-se entre as minas M30 e M28-M2, estas três com registro de tremores este ano.

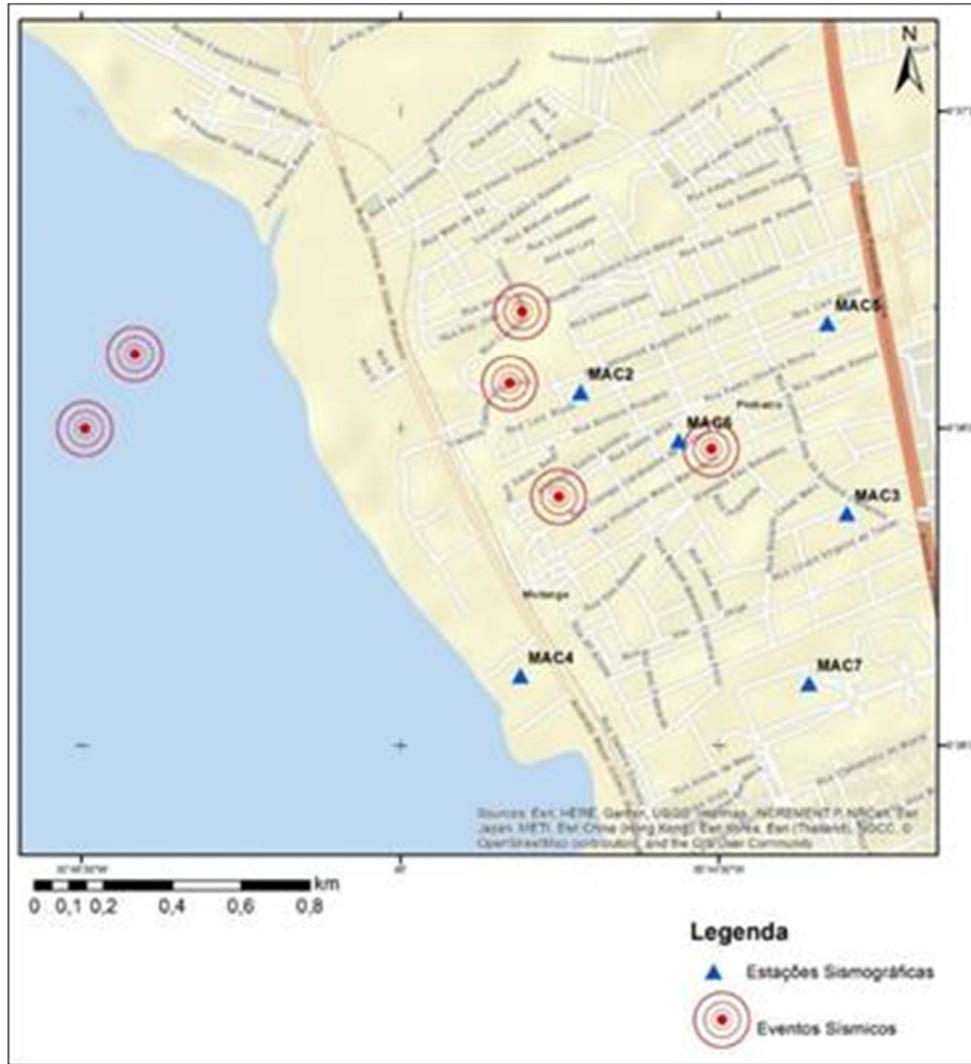


Figura 1 – Estações sismográficas instaladas no bairro do Pinheiro (triângulos azuis) e microterremotos (círculos vermelhos) (Relatório Síntese pág. 29, I. Sismologia pág. 16).

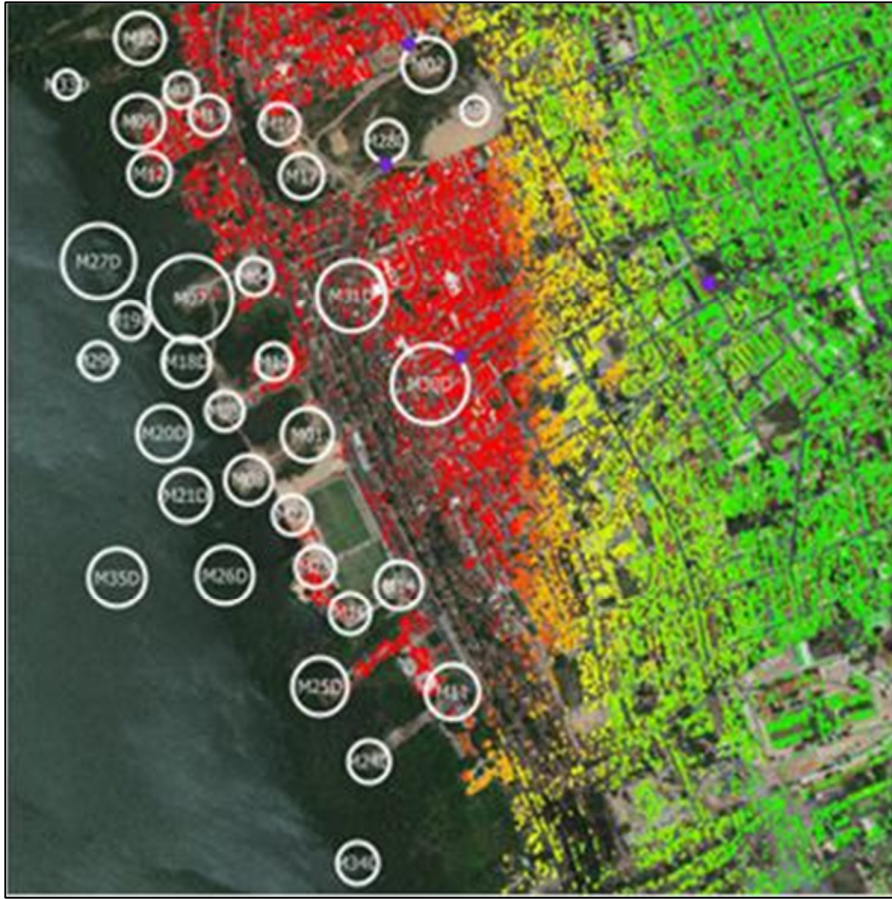


Figura 2 – Resultado da interferometria mostrando a posição das minas de sal (círculos brancos) e de microterremotos (círculo cheio roxo) (Audiência Pública 08/05/2019, Maceió, slide 32).

A figura 3 apresenta o mapa gravimétrico Bouguer com a posição das minas e das trincas mapeadas. Esse mapa permite a interpretação de falhas, sobretudo falhas gravitacionais (ou normais). A tendência gravimétrica negativa para sudeste é resultante do efeito somado do aumento da espessura da camada de sal e da perda de massa resultante da retirada de sal e sua substituição por salmoura no conjunto das minas. Além disto, como pode ser observado na figura 3, existe uma forte correlação entre a área de mineração e um alinhamento gravimétrico expressivo que foi interpretado como uma falha.

Finalmente, na figura 4 é apresentado o mapa com a distribuição de resistividades elétricas obtidas com o método audiomagnetotelúrico, para a profundidade de 900 metros, após a interpretação quantitativa computacional das medidas. Apenas zonas condutivas podem ser tomadas como indicativas da integridade de caverna porque estas, com salmoura, seriam condutivas (vermelho), mesmo contendo óleo (resistivo - azul) usado pela mineradora para ajudar na estabilidade da extração, porque a quantidade deste em cada mina é pequena em

comparação com a de salmoura de uma mina desenvolvida. Tanto as minas M30 como M31 coincidem com zona de resistividade intermediária (verde).

Em resumo, as minas M30 e M31 encontram-se em zona, do ponto de vista geofísica, compatível com situação de desabamento, talvez inicial, por conta da resistividade intermediária.

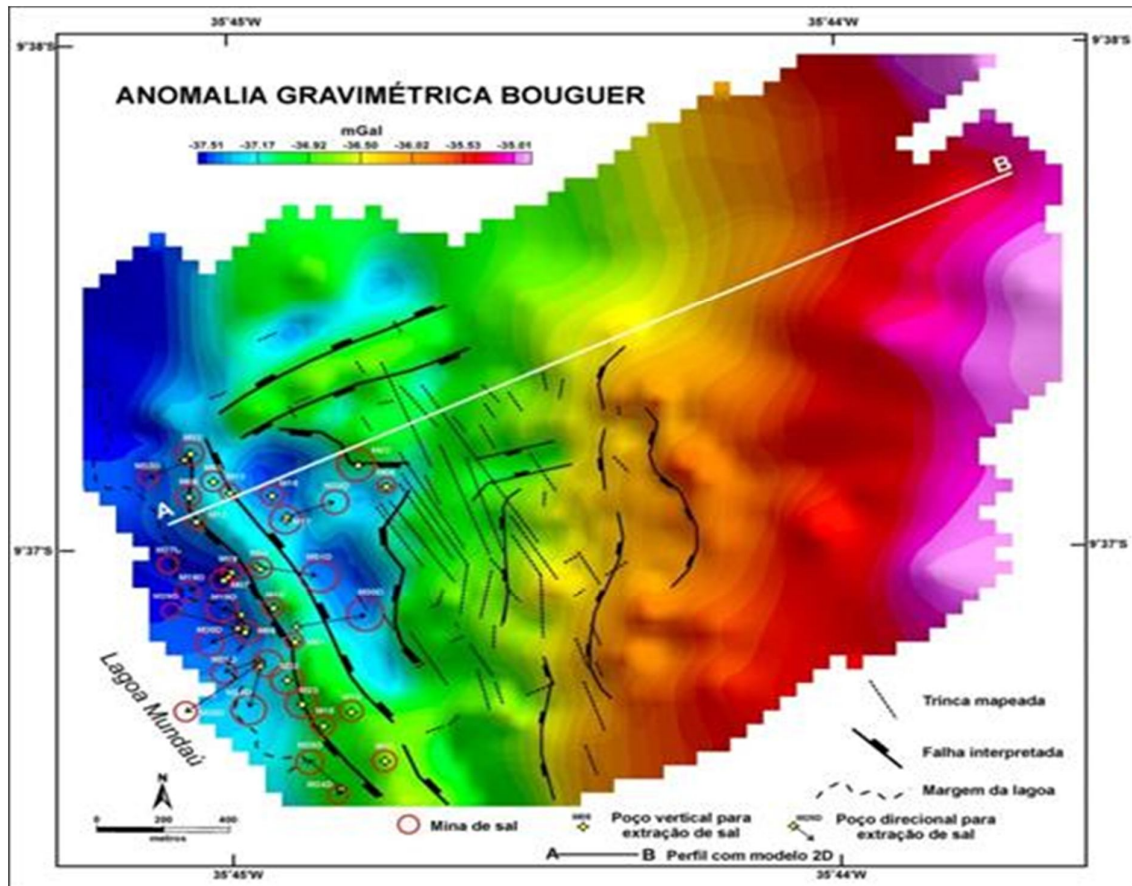


Figura 3 – Anomalia gravimétrica Bouguer com interpretações de falhas e sobreposição da localização dos poços usados para extração de sal e das trincas mapeadas. O traço branco A-B localiza o perfil gravimétrico utilizado na modelagem 2,5D (Relatório Síntese, página 26; J. Gravimetria, página 10).

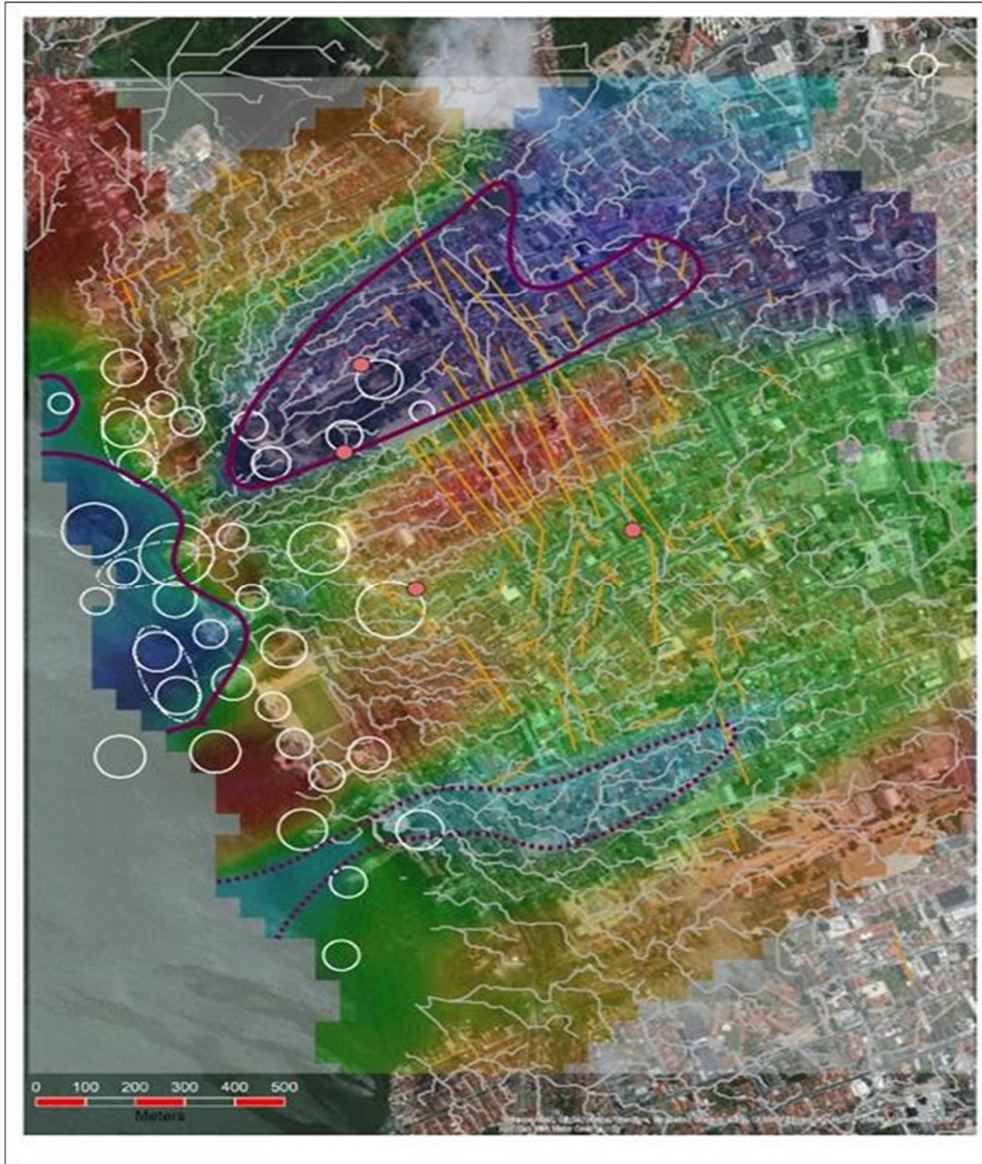


Figura 4 – Seção horizontal a 900 metros de profundidade. Círculos brancos: poços de extração de sal-gema. Pontos vermelhos: microterremotos ocorridos este ano. Linhas laranja: trincas. Linhas cinza: gradiente obtida a partir dos dados da interferometria. (K. Audiomagnetotelúrico, página 14).

1.2. Considerando-se que o aumento de volume das minas 20/21 foi em função da operação das mesmas até 2008 e que apesar de elas estarem juntas as minas se encontram dentro do sal e estão íntegras no último sonar, por que a CPRM concluiu que as minas 20/21 teriam desabado?

Conforme consta no Quadro Síntese de Análise dos Sonares as Minas 20D e 21D e na figura (Fig.5) parcialmente reproduzida a partir de dados fornecidos pela Braskem, têm representação em planta muito maior do que o sonar realizado em 1989 onde é possível visualizar a união das cavernas (M20D e M21D) através da dissolução dos pilares, o que evidencia a ocorrência de desabamentos e descontrole do processo de mineração.

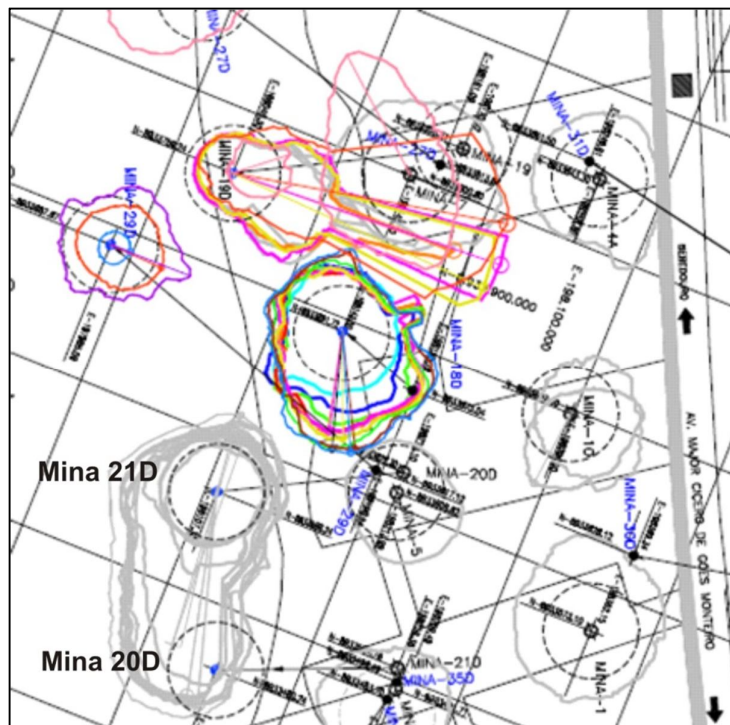


Figura 5 – União das Minas 20D e 21D (figura fornecida pela Braskem e parcialmente reproduzida).

A resposta deve ser complementada com base nos resultados dos levantamentos geofísicos obtidos pela CPRM que mostram que a mina M20D e, especialmente, a M21D e de elevada resistividade elétrica (Fig. 4), indicativos de sua instabilidade. Essas minas ocorrem no setor que se estende a oeste por debaixo da lagoa que, como mostra a figura 6, construída com os resultados da batimetria, corresponde a uma zona de provável afundamento (zona verde assinalada com círculo tracejado), central e em frente ao Pinheiro.

O aumento de volume das Minas 20D e 21D e sua união, por si só, apontam para uma situação favorável à instabilidade do maciço.

Além disso, os últimos sonares das minas 20/21 foram em 2005 e 2007, respectivamente, e ambas fornecem apenas uma direção de visada, não permitindo controle tridimensional adequado sobre a morfologia das cavidades.

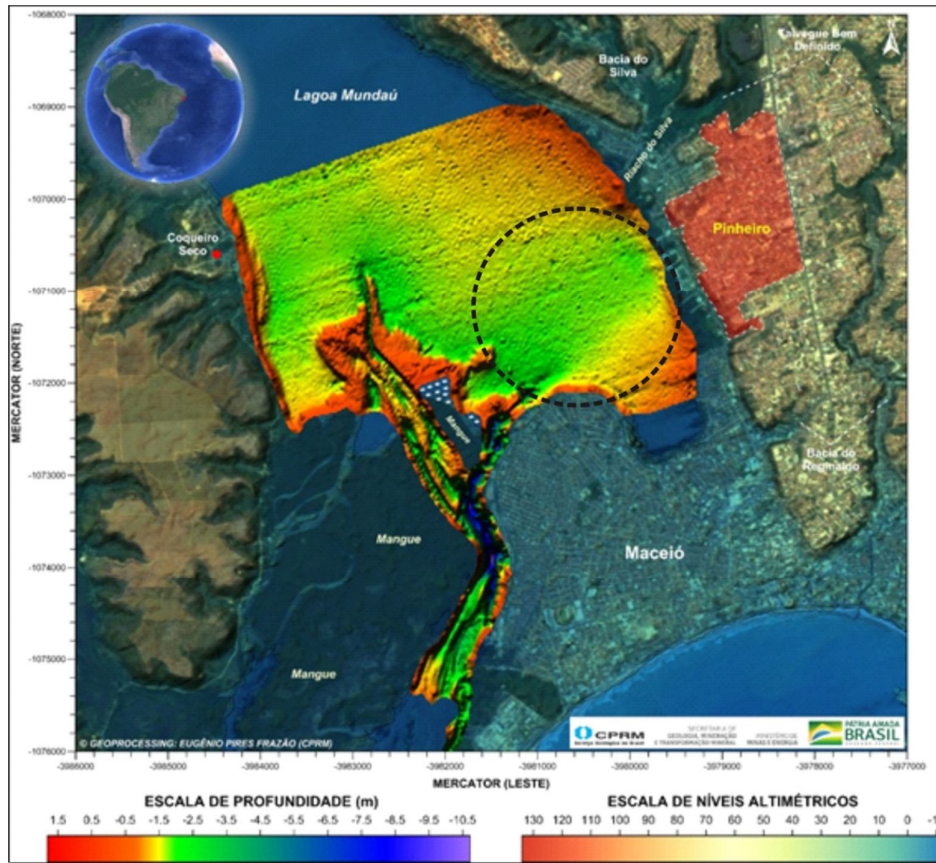


Figura 6 – Resultado da batimetria (Relatório Síntese, página 27; Volume II-H Batimetria, página 30).

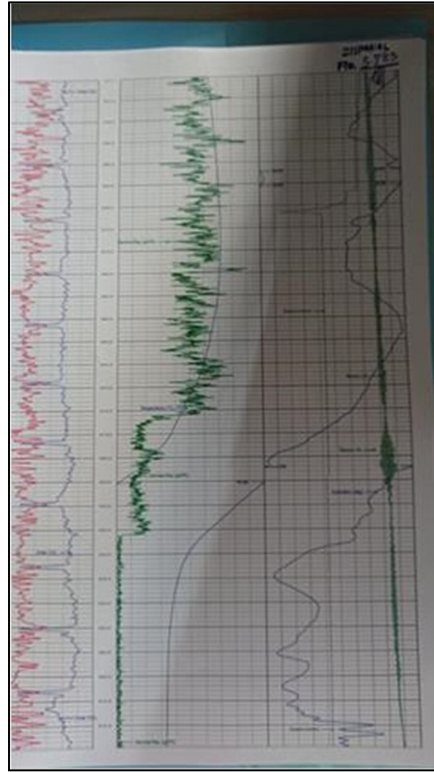


Figura 8 – Documento integrante do processo da ANM página 3.783 – Raio gama da Mina 27.

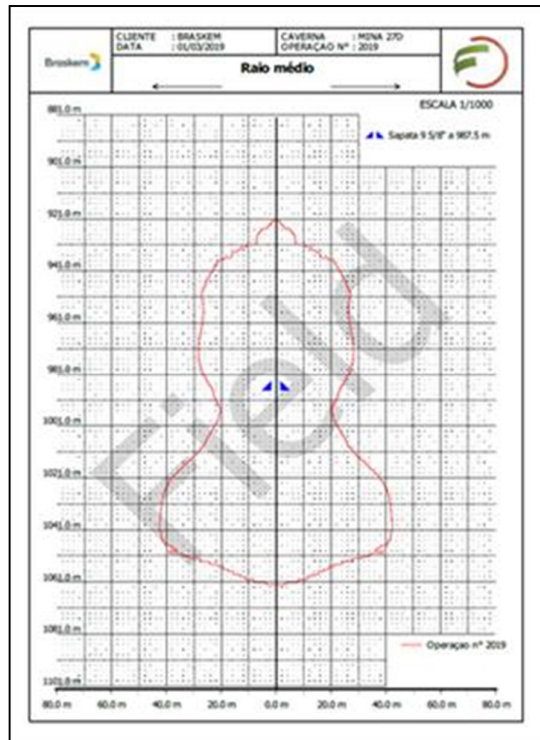


Figura 9 – Sonar da Mina 27 (ano 2019).

1.4. A CPRM determinou a energia necessária para reativar uma falha geológica? Foi calculado se a instabilidade de uma caverna seria suficiente para gerar este nível de energia?

Até agora não há nenhum método conhecido que calcule exatamente a energia necessária para reativar uma falha geológica, uma vez que não é possível conhecer todas as variáveis que condicionam a estabilidade de uma falha. Se soubéssemos estas condições e soubéssemos como se dá a evolução dessas condições, poderíamos, por exemplo, prever terremotos (Leary, 1997).

No entanto, já se sabe e é consenso na literatura que a atividade humana pode estar associada a atividades sísmica, mesmo quando mudanças locais do padrão de esforços são alteradas em pequenas quantidades (Grasso & Sornette, 1998; Foulger *et al.*, 2018). Em particular, a sismicidade induzida por mineração por dissolução é reconhecidamente uma atividade que pode alterar o estado de esforços, de forma a provocar sismicidade (Hasegawa *et al.*, 1989; Kang *et al.*, 2019, Foulger *et al.*, 2018).

A literatura demonstra que a sismicidade em mineração por dissolução é associada em várias partes do mundo 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).

Além disso, há relatos em várias partes do mundo que o colapso (catastrófico ou não) de cavidades (pode provocar eventos sísmicos de magnitude até maiores que as observadas em Maceió em 3 de março de 2018 às 17h30 UTC (Li *et al.*, 2007).

1.5. Como garantir a qualidade dos dados de Audiomagnetotélúrico se na área de mineração tem linhas de alta tensão que alimentam uma subestação 13.8 kV e não foi solicitado o desligamento da mesma, condição colocada como importante pela própria CPRM?

Foram realizados testes de aquisição em diversas localidades para avaliar o nível de ruído aos quais as medidas estariam sujeitas, já que o método se apresenta sensível a ruído cultural de origem antrópica (linhas de transmissão elétrica, antenas, máquinas, geradores e trânsito de veículos). Os testes ocorreram nos três primeiros dias de trabalho, permitindo constatar que o nível de ruído produzido pelas linhas de transmissão e fornecimento de energia para o bairro seria muito alto para diversas estações, decidindo-se, portanto, pela interrupção desse serviço, como acordado previamente com a empresa concessionária – ELETROBRÁS.

O “*near-field effect*” (efeito de fonte próxima) se manifesta quando uma fonte de sinal eletromagnético artificial se encontra muito próxima, cerca de até três vezes o “*skin-depth*”.

Foi feito um planejamento cuidadoso do desligamento de todas as linhas de transmissão elétrica próximas às medidas, em uma distância estimada como sendo suficiente para que o efeito de fonte próxima não fosse sentido pelas medidas audiomagnetotéluricas. O trabalho de campo contou com o apoio de pessoal da ELETROBRAS bem como da Defesa Civil para evitar também movimento de veículos no entorno das áreas medidas.

Os trabalhos foram iniciados em 8 de fevereiro e terminados dia 10 de março de 2019. Não foram paralisados nem em fins de semana e nem no carnaval, por conta da agilidade que a situação exigia. Apenas entre os dias 17 e 24 de fevereiro houve paralisação provocada pela reprogramação do desligamento da rede de fornecimento de energia elétrica (baixa e média tensão) realizada pela ELETROBRAS com o intuito de melhorar a qualidade dos dados que estavam sendo adquiridos, o que pode ilustrar o cuidado tomado na obtenção dos dados.

A eficácia dessas medidas de desligamento da transmissão elétrica e bloqueio de trânsito pôde ser notada na qualidade da maioria das estações, e foi também baseada na alta qualidade das estações medidas ao longo e na beira da Lagoa Mundaú, inclusive em área da Braskem.

O “*near-field effect*” se manifesta com a curva de resistividade aumentando de valor a um gradiente de 45 graus e a fase tendendo a zero (Chave & Jones, 2012).

Foram adquiridas 100 estações, mas na interpretação por meio de inversão foram usadas apenas aquelas que não mostraram comportamento indicativo de “*near-field effect*”. Apenas 10 das 100 estações apresentaram este efeito bem definido e não foram utilizadas.

2. MINERAÇÃO X FALHA DO MUTANGE

2.1. Considerando que a CPRM identificou a falha do Mutange usando somente os métodos indiretos (Audiomagnetotelúrico e Gravimetria), tais resultados não deveriam ter sido comparados com as informações fornecidas pelas seções geológicas construídas com os dados dos poços?

O emprego de métodos indiretos é um procedimento comum utilizado pelos cientistas para acessar informações que não estão disponíveis pelos métodos diretos. Por exemplo, a maioria das estruturas tectônicas da Bacia Sergipe-Alagoas foi identificada por meio de métodos geofísicos (p.ex. Souza-Lima, 2008). A Geofísica é um método indireto no sentido que a partir de efeitos detectados nos campos físicos ou na propagação de ondas (as medidas de campo), ela busca encontrar a causa (a distribuição da propriedade física em subsuperfície, no caso) que os provocou.

A Falha do Mutange foi interpretada por meio de dois métodos geofísicos: o gravimétrico (Fig. 3) e o audiomagnetotelúrico (Fig. 4). Estes dois métodos permitiram acessar duas propriedades petrofísicas importantes das rochas que são, respectivamente, a densidade e a resistividade elétrica (Telford *et al*, 1990). A combinação dos dois métodos demonstrou a existência de um importante alinhamento com direção NNW-SSE que tem forte correlação espacial com a escarpa do Mutange e a margem da Lagoa do Mundaú na região da mineração de sal. Foi considerado que estes dados forneceram indícios indiretos muito fortes para a interpretação de uma estrutura tectônica no local.

Os dados de interferometria (Fig. 2), contudo, forneceram a melhor evidência para a identificação de falha na região do Mutange, sobretudo por causa da introdução da informação do fator tempo no problema. Dados da literatura científica demonstraram que movimentos de falhas são identificados por padrões de subsidência associados a rejeitos de falhas com as mesmas características daqueles observados nos dados de interferometria (p.ex. Cowie *et al.*, 2000; Cuenca, 2013).

Outro aspecto que favorece a existência de falhas na região da mineração são as deformações sofridas pelas tubulações de acesso às minas de sal (slides 39, 40, 41, 42, 43 e 44 da apresentação “INFORMAÇÕES DA BRASKEM” de abril/2019). As deformações foram encontradas em três diferentes níveis de profundidade (200-330 metros, 350-400 metros, 600-700 metros, slide 39) e com 11 diferentes sentidos de empenos identificados entre 200 e 400 metros (170° Az, 220° Az, 235° Az, 190° Az, 355° Az, 320° Az, 230° Az, 260° Az, 150° Az, 330° Az, 290° Az, setas vermelhas no slide 44). A imagem apresentada no slide 44 (Fig. 10) indica a atuação de um sistema complexo de deformação do subsolo da área de mineração, com grande probabilidade da ação de falhas.



Figura 10 – Deformações de tubulações de poços da Braskem encontradas entre 200 e 400 metros com 11 sentidos diferentes de empenos (slide 44 da apresentação “INFORMAÇÕES DA BRASKEM” de abril/2019).

Os resultados da interpretação quantitativa dos dados gravimétricos comparados com as seções geológicas construídas com dados de poços e a observação da modelagem 3D demonstram existência de rejeitos entre unidades litológicas que variam entre 10 e 15 metros, associados à Falha do Mutange (Fig. 11).

Para a construção do modelo geológico 3D foram utilizados todos os dados de poços disponíveis na região, totalizando 62 poços e uma metragem de 52.692.76 metros de perfuração. Além disso, para a obtenção de maior precisão espacial, foram realizados novos levantamentos topográficos, utilizando estação total e GPS diferencial em todas as bocas dos poços e furos de sonda utilizados no modelo. Os métodos geofísicos serviram para corroborar e aprimorar o modelo geológico melhorando a resolução nas regiões com pouca informação. O arranjo estrutural foi definido a partir dos dados estruturais de superfície, lineamentos obtidos através do relevo sombreado e mapeamento das evidências do evento de subsidência no bairro Pinheiro (trincas e rachaduras). A partir destes houve projeção das estruturas em subsuperfície, inserindo os mergulhos e valores de rejeitos das falhas através da disposição das camadas e furos de sondagem.

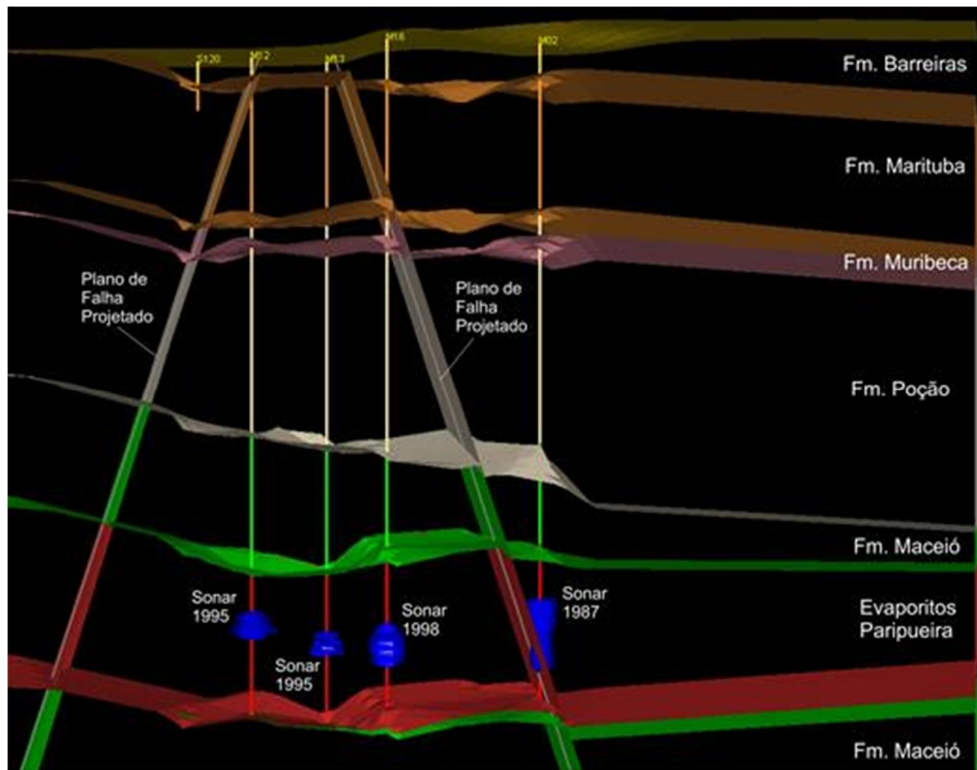


Figura 11 – Modelo 3D construído com os softwares Strat3D e Studio3 demonstrando a existência de rejeitos entre unidades litológicas que variam entre 10 e 15 metros associados com a Falha do Mutange. Dados geológicos e de sonar nas minas fornecidos pela Braskem.

Para corroborar os resultados aqui apresentados e para identificar existência de estruturas em profundidade associadas com o importante alinhamento geofísico com direção NNW-SSE que ocorre na área da mineração de sal, foi efetuada uma modelagem inversa 3D dos dados gravimétricos por meio da plataforma Voxi do Oasis Montaj (Geosoft). O modelo 3D de densidades obtido pelo processo de modelagem definiu que o alinhamento gravimétrico tem expressão em profundidade e deve representar uma zona de falha (Fig. 12). Esta zona de falha está localizada na área de mineração de sal e tem correlação com a região de subsidência observada nos dados de interferometria. O emprego de modelagens gravimétricas 3D é uma ferramenta importante para a localização de estruturas tectônicas em bacias sedimentares (p.ex. Castro & Castelo Branco, 1999).

Os resultados 3D obtidos com o método Audiomagnetotelúrico por meio de inversão, mostrados na figura 4, fatiado em 900 metros de profundidade, bem como na figura 13, para duas outras profundidades (100 e 500 metros), mostram também a falha atravessando toda a subsuperfície.

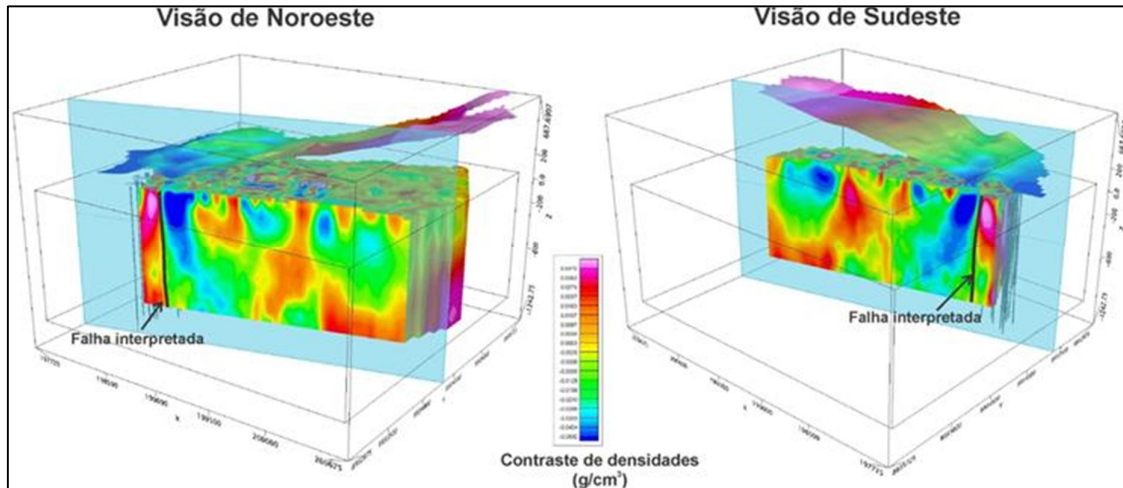


Figura 12 – Modelo de densidades 3D obtido por modelagem inversa dos dados gravimétricos. A distribuição de densidades permitiu a interpretação em profundidade de uma zona falha. Esta zona de falha identificada nos dados de anomalia Bouguer está localizada na área de mineração de sal e tem correlação com a região de subsidência observada nos dados de interferometria. (Relatório Síntese, pág. 24; J.Gravimetria, pág.14).

Além do exposto, antes mesmo da apresentação do relatório da CPRM em maio/2019, a Braskem já havia interpretado falhas na área de mineração de sal. Na apresentação denominada “INFORMAÇÕES DA BRASKEM” de abril/2019, no slide 16, os dados de poços indicaram a existência de falha entre os poços M08 e M22, e outra entre os poços M31 e M28 (Fig. 14). Na mesma apresentação (slide 19), os dados de poços sugeriram a ocorrência de falhas entre os poços M32 e M09, M09 e M12 e, M22 e M23 (Fig. 15). Foi também identificada a “Falha Riacho do Silva”, com 240° Az (Fig. 16) com mesma direção de falhas interpretadas pela gravimetria. Considerando então que a existência de falhas na área da mineração de sal integra a apresentação acima referida, surpreende que as interpretações baseadas em dados de poços para a apresentação no Ministério Público Federal de Alagoas do dia 03/06/2019 não continham indicação de falhas na área da mineração (slides 16 e 17 da apresentação da BRAKEM – “REUNIÃO MPF/CPRM” – dia 03/06/2019).

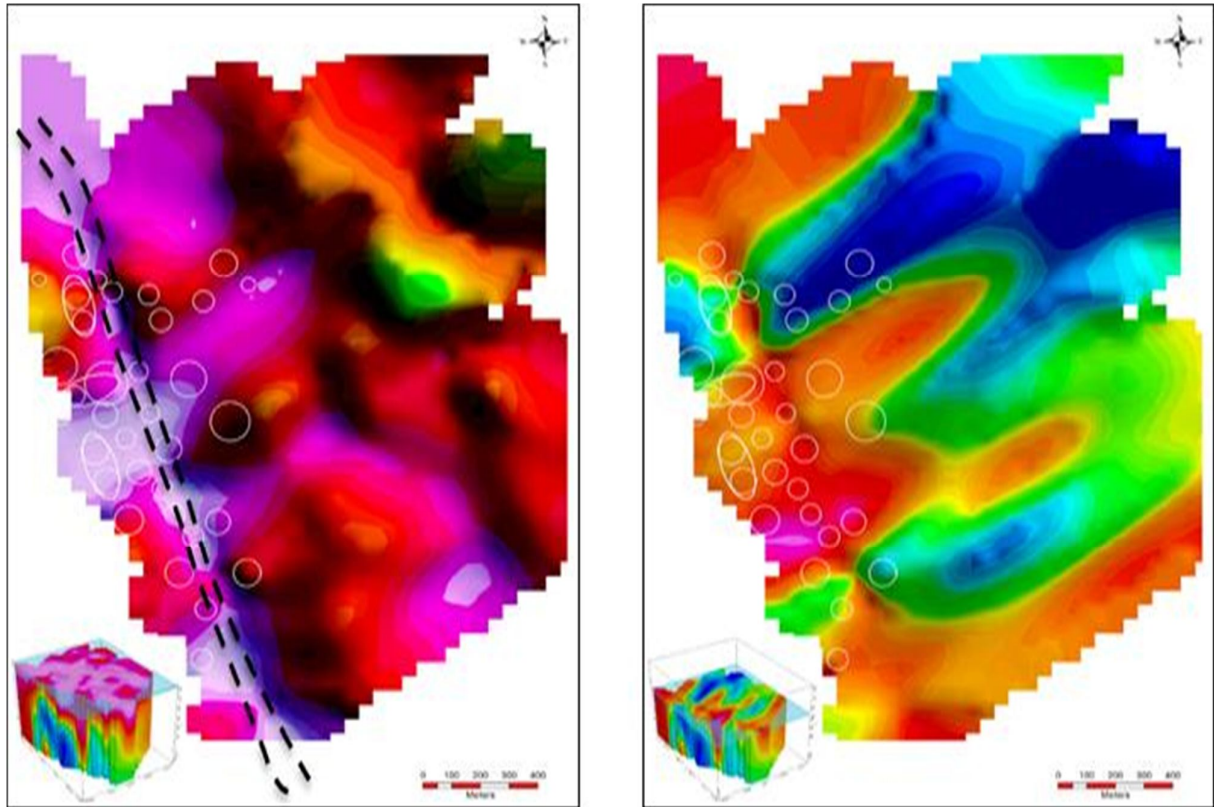


Figura 13. Distribuição de resistividade a 100 (lado esquerdo) e a 500 (lado direito) metros de profundidade. Canto esquerdo inferior das figuras: modelo 3D obtido por inversão indicando a profundidade da seção. Círculos brancos: poços da extração de sal-gema. Tracejado: falhas interpretadas, disposta só em um dos resultados para facilitar seu acompanhamento em outras profundidades. (Relatório Síntese, pág. 24; K.Audiomagnetotélúrico, pág.16).

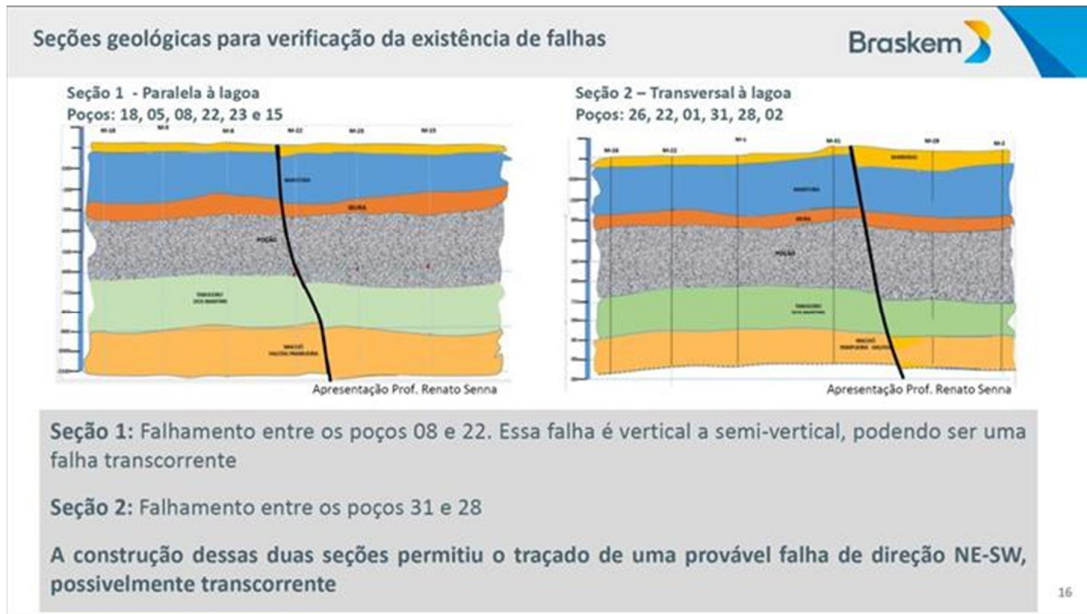


Figura 14 – Verificação da existência de falhas na área da mineração de sal. Fonte: slide 16 da apresentação “INFORMAÇÕES DA BRASKEM” de abril/2019.

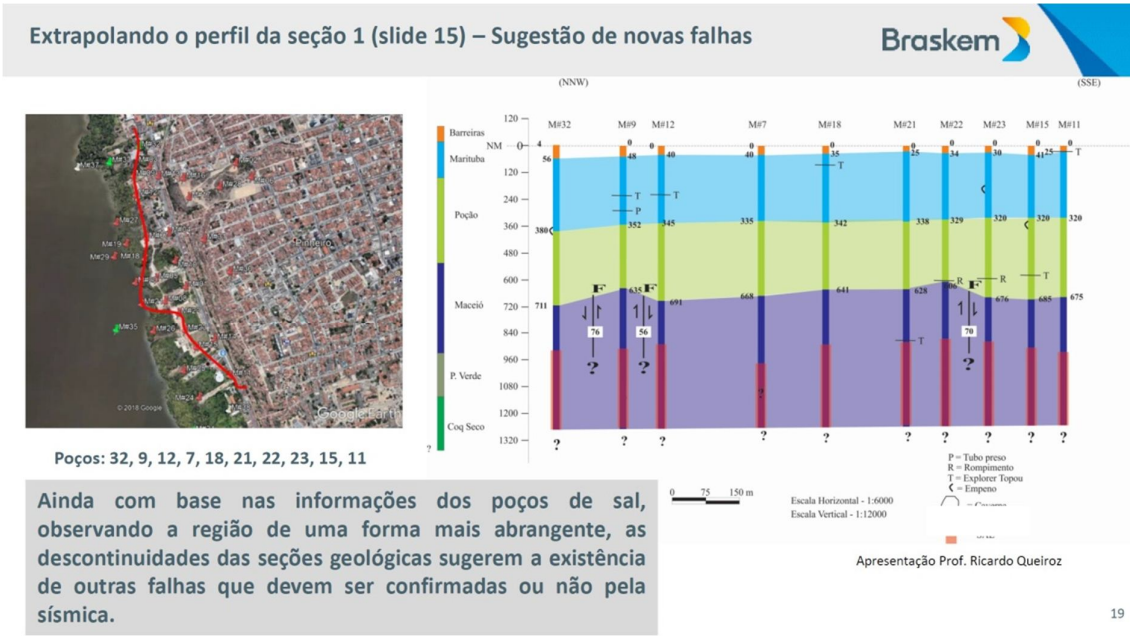


Figura 15 – Sugestão de novas de falhas na área da mineração de sal. Fonte: slide 19 da apresentação “INFORMAÇÕES DA BRASKEM” de abril/2019.



Figura 16 – Identificação da Falha Riacho do Silva com 240° Az. Esta falha possui registro no piso do Colégio Bom Conselho localizado nas proximidades da área de mineração e tem a mesma direção de falhas identificadas pelo método gravimétrico. Fonte: slide 27 da apresentação “INFORMAÇÕES DA BRASKEM” de abril/2019.

2.2. Como foram identificados rejeitos de falha com aproximadamente 200m nas chamadas falhas do Mutange? Foram utilizados os perfis dos poços 12, 13, 16 e 02?

A falha a qual esta pergunta se refere está interpretada no modelo de densidades obtido pela modelagem direta 2,5D dos dados de anomalia Bouguer (J. Gravimetria, pág. 13). Entretanto, a camada com densidade de $2,2 \text{ g/cm}^3$ afetada pela falha tem variação na espessura normal em torno de 100 metros, um valor diferente do que sugere a pergunta (Fig.17). Este modelo foi construído empregando a plataforma GMSYS do Oasis Montaj (Geosoft) por meio do ajuste iterativo do perfil calculado (a partir do modelo de densidades) aos dados observados. Este tipo de modelagem é muito conhecido pela comunidade científica e muito empregado no estudo de bacias sedimentares (p.ex. Molina *et al.*, 1989; Fernandes & Chang, 2002). Neste caso é importante enfatizar que a ferramenta principal são os dados gravimétricos. Os dados geológicos foram considerados como vínculos no modelo. Entre eles, os dados de superfície, tais como alinhamentos topográficos e fraturas mapeadas, bem como as informações geológicas existentes sobre os poços 12, 13, 16 e 02 e seções geológicas como aquela que foi apresentada no slide 17 da apresentação “Do Geral Para o Particular, Do Regional Para o Detalhe” feita pela Braskem no Senado Federal (Fig. 18).

O resultado final é um modelo de densidades da área de estudo (Fig. 17) vinculado aos dados geológicos conhecidos. Contudo, a concepção geológica inserida como vínculo inicial foi modificada para se ajustar aos dados gravimétricos observados. Como consequência, no resultado final as interfaces de contrastes de densidades não corresponderam exatamente com as interfaces geológicas estabelecidas pelos dados dos poços, revelando um arcabouço mais complexo do que esperado pelos dados geológicos.

Para verificar se o modelo geológico (sem falhas) apresentado pela Braskem na reunião do MPF de Alagoas (slide 15 da apresentação “REUNIÃO MPF/CPRM” – dia 03/06/2019) seria compatível com os dados gravimétricos, foi feita a modelagem direta inserindo como vínculo a seção geológica 3 (Fig. 18) que coincide com uma parte do perfil gravimétrico modelado. Para tornar o modelo geológico mais realista quanto ao balanço de massa da região, foram adicionadas cavidades preenchidas com salmoura ($d=1,20 \text{ g/cm}^3$) na camada de sal. Apesar da seção geológica (Fig. 19) não incluir uma camada de sal associado ao poço M-2, nela foi inserida também uma cavidade, pois a seção geológica da figura 2 (slide 18 da apresentação da Braskem no Senado Federal) indica a existência de uma cavidade e o relatório “Reestudo Geológico e Reavaliação das Reservas de Sal” (Sal Gema Mineração Ltda., 1989) apresenta uma espessa camada de sal neste local.

O resultado, apresentado na figura 20, demonstra que o modelo calculado a partir das informações geológicas da seção 3 da Braskem (Fig. 19) apresenta um grande desajuste em relação aos dados gravimétricos observados. Considerando estes resultados obtidos pode-se afirmar que as interpretações dos perfis de poços apresentados pela Braskem no slide 15 da apresentação “REUNIÃO MPF/CPRM” – dia 03/06/2019 não consegue evidenciar toda a complexidade do arcabouço geológico-tectônico da área de mineração.

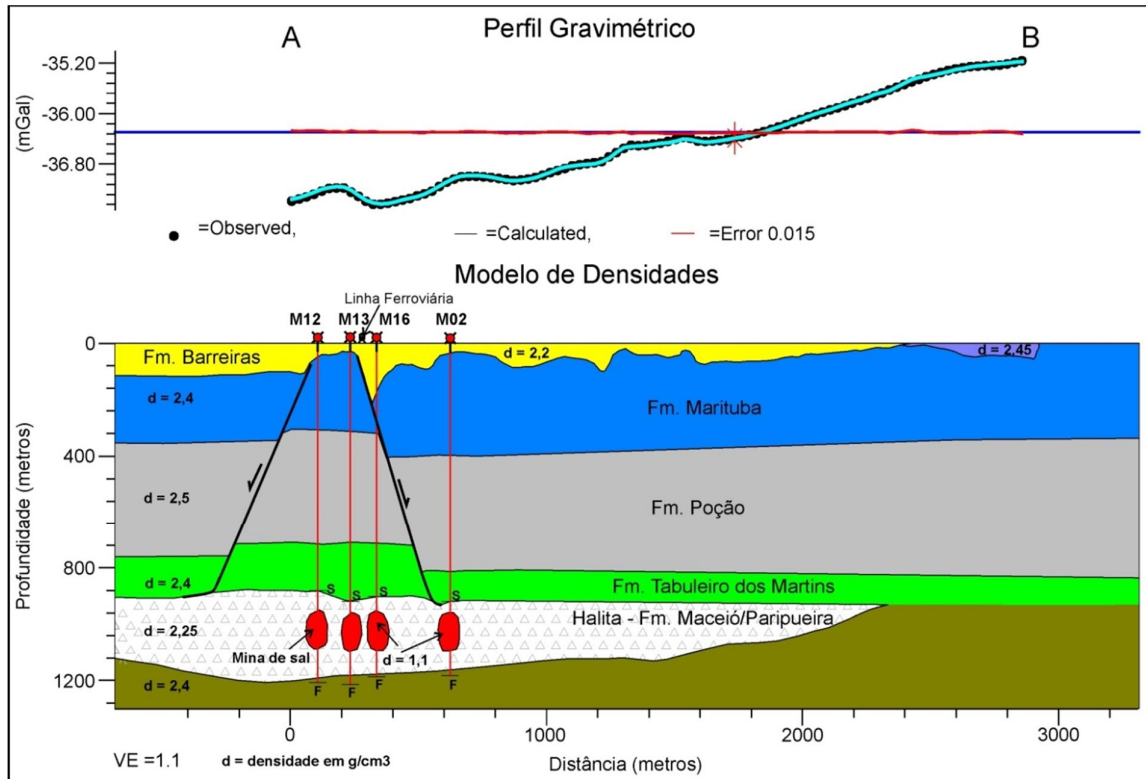


Figura 17 – Modelo de densidades obtido pela modelagem direta dos dados gravimétricos. Observe que o modelo de densidades produz um bom ajuste com erro mínimo entre os dados observados e calculados.

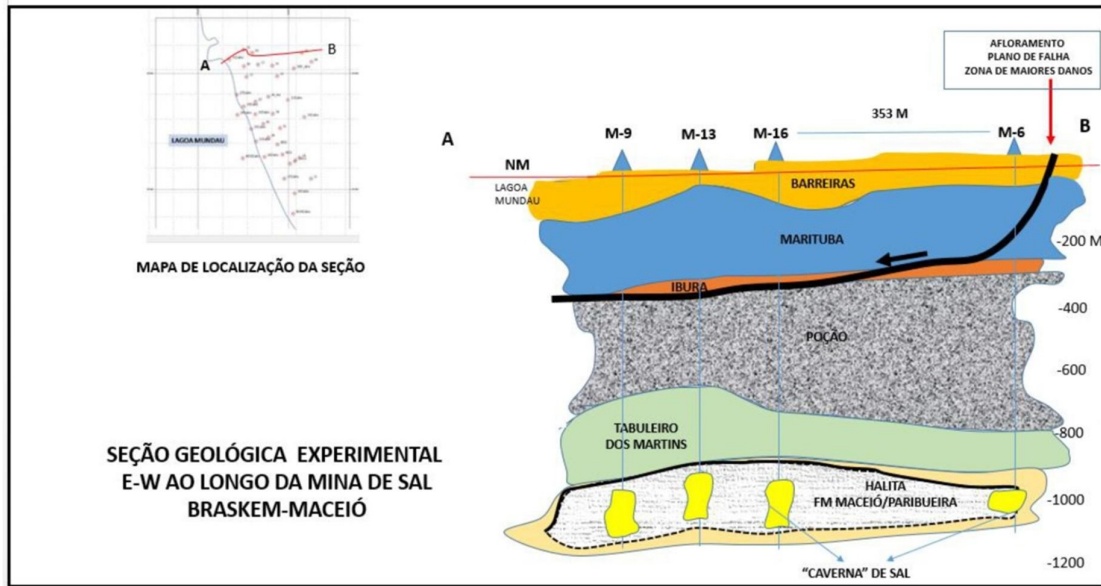


Figura 18 – Seção geológica apresentada no slide 17 da apresentação da Braskem no Senado Federal. Observe que esta seção apresenta variações expressivas nas espessuras das formações geológicas que não são observadas na seção apresentada na Figura 3. É importante informar com relação à Figura 15 que os poços M-6 e M-2 são vizinhos, bem como, os poços M-9 e M-12.

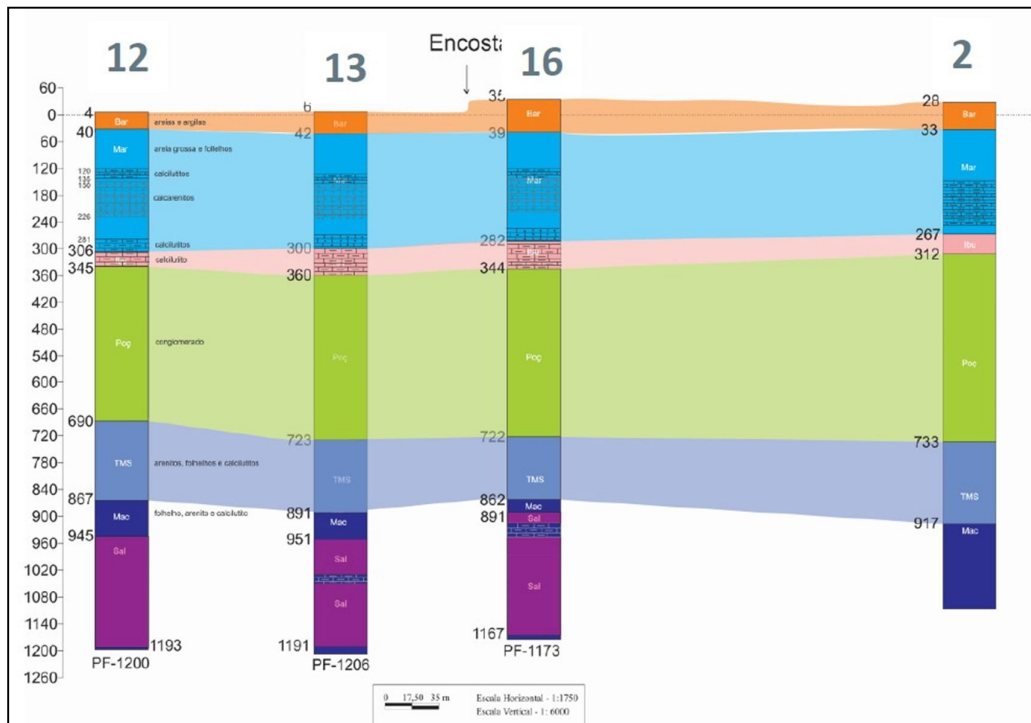


Figura 19 – Seção geológica sem falhas apresentada pela Braskem no MPF de Alagoas (slide 15). Observe que a Braskem exagerou a escala horizontal em relação à escala vertical, gerando um modelo geológico deformado. É importante informar com relação à Figura 14 que os poços M-6 e M-2 são vizinhos, bem como, os poços M-9 e M-12.

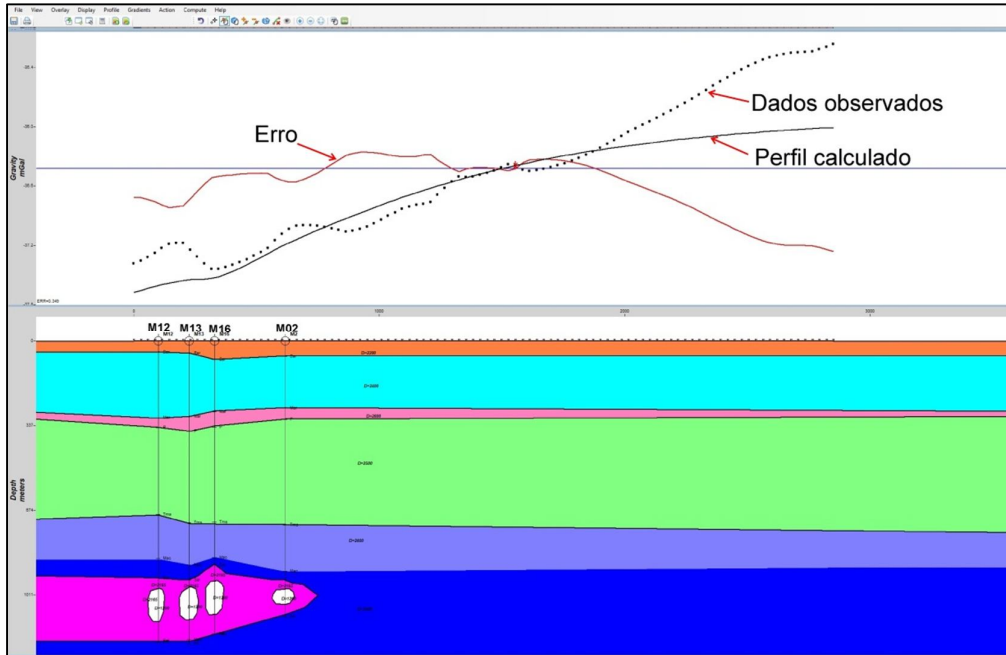


Figura 20 – Modelo de densidades obtido pela modelagem direta dos dados gravimétricos empregando a seção geológica sem falhas apresentada pela Braskem (Fig. 15). Para tornar o modelo geológico mais realista quanto ao balanço de massa da região foram adicionadas cavidades preenchidas com salmoura ($d=1,20 \text{ g/cm}^3$) na camada de sal. Observe que o modelo de densidades construído apenas com os vínculos desta seção geológica não consegue ajustar os dados gravimétricos observados (erros muito grandes) e nem esclarecer a complexidade do arcabouço geológico-tectônico da área de mineração.

2.3. Foram utilizados perfis de sondagem/geofísicos para fazer a amarração dos dados de Gravimetria e AMT? Se sim, quais foram eles?

Os resultados da interpretação dos dados gravimétricos e audiomagnetotelúricos foram comparados com as seções geológicas construídas com dados de poços disponíveis na região, conforme anteriormente mencionado, totalizando 62 poços e uma metragem de 52.692,76 m de perfuração. Para a análise desses dados foram realizados novos levantamentos topográficos, utilizando estação total e GPS Diferencial em todas as bocas dos poços e furos de sonda utilizados no modelo. Os métodos geofísicos serviram para corroborar e aprimorar o modelo geológico melhorando a resolução nas regiões com pouca informação.

Especificidades do método audiomagnetotelúrico (AMT) serão tratadas no item 2.5.

2.4. Foram adquiridos dados de Gravimetria nas regiões da mineração e regiões submersas à lagoa, ou os resultados apresentados para essa área foram feitos por extrapolação da malha de gridagem? Se sim, como foi feito?

Sim, foram levantadas estações gravimétricas na área da mineração de sal, com a autorização para o levantamento dada pela Braskem nos dias 01 e 02/04/2019. A figura 21 mostra que muitas estações gravimétricas foram levantadas nas proximidades dos poços e na área de projeção das minas em superfície.

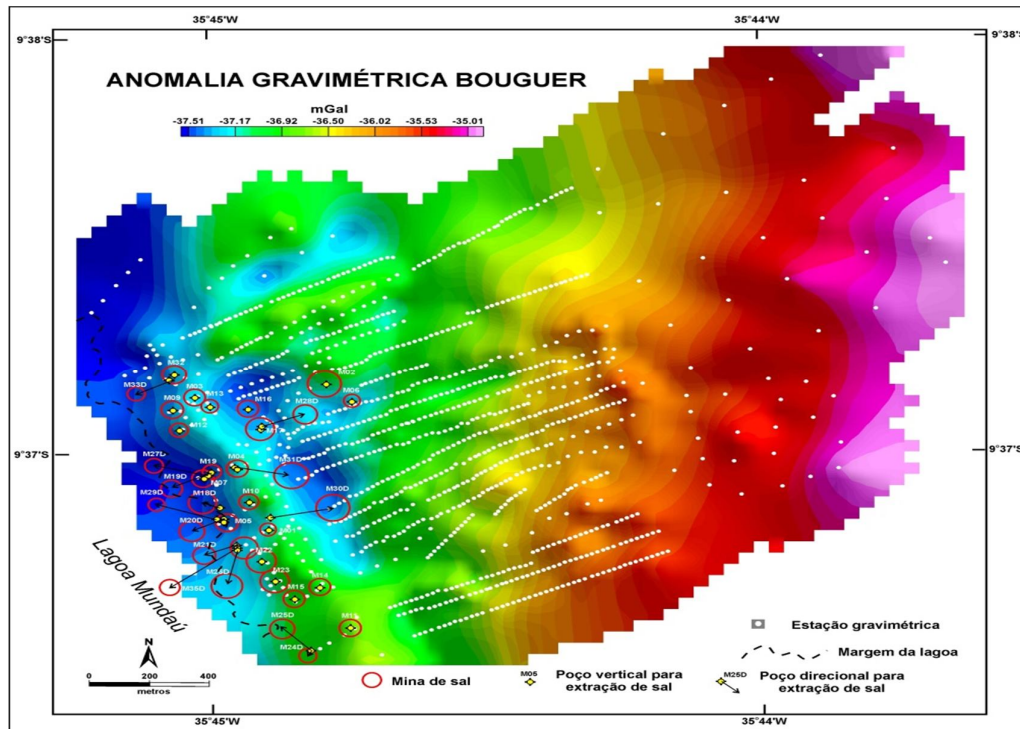


Figura 21 – Anomalia gravimétrica Bouguer com localização das 1000 estações gravimétricas empregadas para a interpolação dos dados pelo método da mínima curvatura em uma malha de 50 m x 50 m.

Foi efetuada uma expansão matemática da área de interpolação dos dados em torno de toda a área de trabalho e não apenas na região da margem da Lagoa Mundaú. A colocação das estações sobre o resultado da interpolação (Fig. 21) indica a honestidade do processador dos dados, pois permite que qualquer observador perceba que houve uma expansão matemática. O método utilizado foi o de mínima curvatura.

O método de interpolação por mínima curvatura, segundo os procedimentos desenvolvidos por Briggs (1974) e Swain (1976), é baseado na generalização do conceito matemático de *spline*.

Considere u o deslocamento produzido por forças (f_n) atuando em determinados pontos ($x_n, y_n, n = 1, \dots, N$) de uma arame ou fita metálica dobrada, onde w_n são as observações nesses pontos. Então, em uma dimensão:

$$\frac{d^4 u}{dx^4} = f_n, \quad x = x_n$$

= 0, caso contrário

Em duas dimensões:

$$\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} = f_n, \quad x = x_n, y = y_n$$

= 0, caso contrário

As unidades são adimensionais e a condição de solução é que $u(x_n) = w_n$, ou $u(x_n, y_n) = w_n$.

Em uma dimensão, u , $\partial u / \partial x$, e $\partial^2 u / \partial x^2$, a curvatura, são contínuos nos pontos onde a força está atuando, porém $\partial^3 u / \partial x^3$ é descontínua e o valor da descontinuidade é igual à força atuando naquele ponto. A solução em uma dimensão é um *spline* cúbico expresso por um polinômio de terceira ordem ($u = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3$) para cada segmento entre os pontos em que a força está atuando. Os coeficientes são encontrados usando a condição de continuidade.

Em duas dimensões, a curvatura

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = C(x, y)$$

deve satisfazer a condição de ser mínima, ou seja, a superfície mais simples que se ajusta aos dados:

$$\iint C^2(x, y) dx dy = \text{mínima}.$$

As estações audiomagnetotélúricas foram igualmente levantadas como mostra a figura 22.

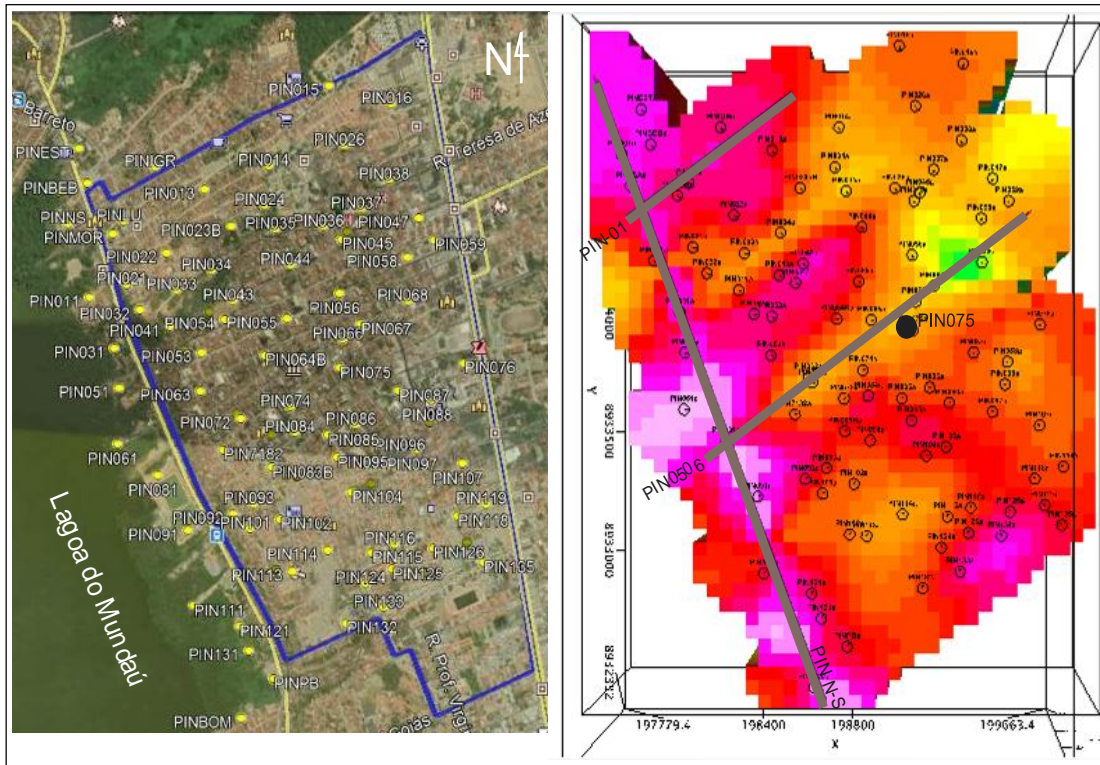


Figura 22 – Localização das estações audiomagnetotelúricas no terreno com pontos amarelos (esquerda) e na superfície do terreno (fatia do 3D construído com as resistividades obtidas) com círculos (direita).

Tanto as medidas realizadas com o método gravimétrico como com o audiomagnetotelúrico foram coletadas nas regiões da mineração, mas não nas zonas submersas. No entanto, uma das maiores vantagens dos métodos geofísicos reside na detecção de efeitos no ponto de amostragem bem como em uma área ao seu redor.

Conseqüentemente, a abertura da anomalia resistiva (Fig. 4, linha cheia grená a noroeste) obtida com dados audiomagnetotelúrico na direção da lagoa bem como de deficiência de massa no mapa Bouguer (Fig. 3) na mesma posição, por exemplo, é sugestiva que essas anomalias prosseguem por debaixo da lagoa e não são artefato da extrapolação por gridagem. A zona dessas anomalias reúne a maior concentração de minas e corresponde a zona interpretada como de afundamento com base na interferometria (Fig. 2) e na batimetria (Fig. 6); dois microtremores, inclusive, já ocorreram abaixo da lagoa (Fig. 1).

2.5. Qual a resolução e o skin depth estimado do método AMT para a profundidade de 900m?

A resolução, capacidade de distinguir dois sinais gerados por alvos próximos um do outro, depende de vários fatores, como frequências adquiridas, espaçamento entre os pontos de levantamento, contraste de resistividade entre as feições da subsuperfície e o meio, espessura das camadas/volume dos corpos, razão sinal/ruído, número de eventos amostrados (logo duração das séries de tempo), processamento de dados.

Não há resolução típica em termos de largura de banda de períodos do sinal medido ou outro. A propagação do campo audiomagnetotelúrico é difusa. De um modo geral, alvos condutivos como seriam as minas com salmoura, apresentando alto contraste com o meio, sendo bem iluminados, seriam os mais bem discriminados.

O *skin depth*, distância em que o campo se encontra atenuado de $1/e$ do seu valor original (ou seja, de 37%), com frequência citada como profundidade de penetração do campo, é tanto maior quanto maior for a resistividade e o período:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 503 \sqrt{\rho T}$$

sendo $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, com f como a frequência e T simbolizando o período.

Logo, não há estimativa de *skin depth* para uma profundidade, porque o *skin depth* é uma profundidade.

Do ponto de vista prático, o *skin depth* permite uma estimativa da profundidade que está sendo alcançada com atenuação de 37% do sinal em determinado tempo de amostragem, o que permite, por sua vez, estimar o tempo de permanência em cada estação. As séries de tempo amostradas em cada estação cobriram de 10 kHz a 1 Hz para um tempo de permanência de 45 minutos (tempo necessário para obter a repetição de eventos necessária ao seu empilhamento de modo a obter dados confiáveis).

A profundidade de 900 metros, topo aproximado das cavernas, foi escolhida com base na imagem desfocada que pode derivar da interpretação quantitativa usada, a inversão com a informação a priori conhecida como suavidade. Um corpo tipo “ponto”, que pode ser uma aproximação para uma caverna de sal (Fig. 23 topo), após a inversão tem sua forma desfocada especialmente para baixo. (Fig. 23 base). Em outras palavras, a imagem perde em resolução propositadamente por inclusão de um vínculo matemático (a informação a priori necessária ao processo computacional) que define que a propriedade (a resistividade elétrica, no caso), fique tanto na lateral quanto na vertical próxima daquela da célula vizinha.

A notar que foi esse também o método utilizado para obtenção do resultado 3D da gravimetria mostrado na figura 12. Não opera, desta forma, a interpretação pelo método direto, cuja informação a priori é buscada em poços e seções geológicas e introduzida pelo intérprete, permitindo resultado como mostrado na figura 17 (e também o resultado da figura 20).

A inversão por meio da suavidade é a técnica mais utilizada da interpretação geofísica quantitativa automática porque não exige a introdução de informação pelo intérprete ou, em outras palavras, não é demandado do intérprete o conhecimento geológico da área. Comercialmente é o que pode ser feito, inclusive pelo fator tempo (a inversão leva mais tempo computacional, mas o método direto exige conhecimento difícil de obter da área).

É comum, após a interpretação pelo método da inversão, proceder à interpretação pelo método direto para se traduzir com maior perfeição a subsuperfície. Os resultados já obtidos, contudo, em especial por conta de sua integração com vários outros como já foi mencionado, já explicado, é indicativo que a causa do fenômeno de afundamento tem relação com as cavernas da Braskem.

Para finalizar, é mostrada na figura 24, a distribuição de resistividade obtida para a profundidade de 1.000 metros, portanto, no nível das minas. Como pode ser observado, os resultados são análogos aqueles obtidos para 900 metros (Fig. 4), com o aumento da resistividade na borda da lagoa aumentando com a diminuição da profundidade, o que também é sugestivo que o desequilíbrio do maciço é ascendente (direção provável de rompimento do teto das minas).

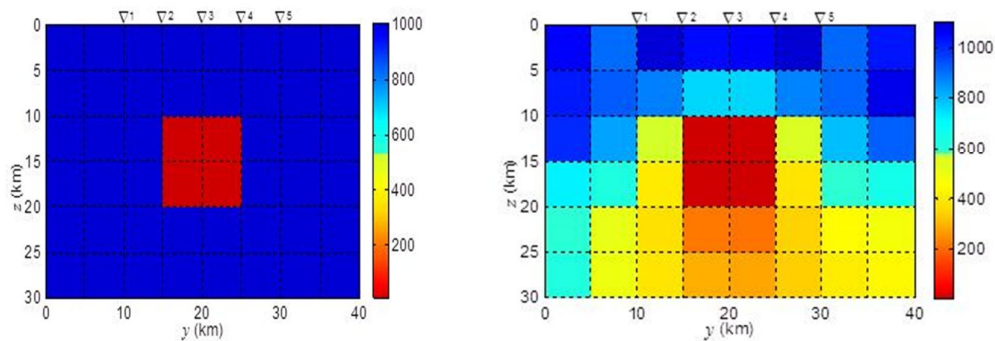


Figura 23 – Corpo tipo “Ponto”. (a) Corpo sintético. (b) Solução obtida por meio de inversão com informação a priori de suavidade para dado magnetotelúrico. Períodos 0,1778-0,4217-1-1,7783 s. Escala ohm.metro.

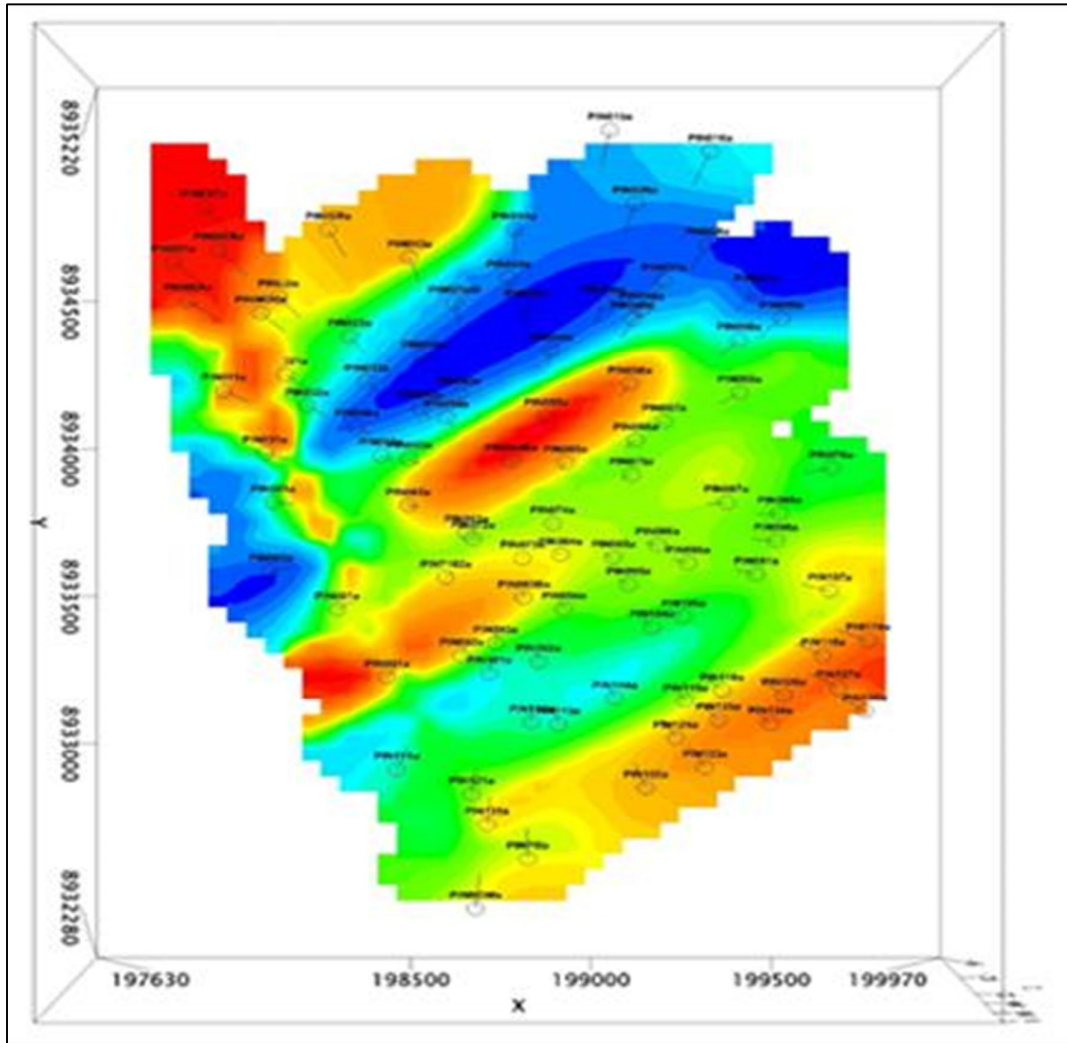


Figura 24 – Seção horizontal a 1.100 metros de profundidade. Círculos negros: posição das estações.

3. SISMO SUPERFICIAL NÃO TECTÔNICO

3.1. Considerando que as ondas identificadas no sismo do dia 03.03.2018 tem as componentes P, S e de superfície (Rg), qual o embasamento para a CPRM concluir que o sismo não foi tectônico, já que a maioria dos sismos tectônicos no Brasil são superficiais?

De fato, a maioria dos eventos no Brasil são de origem tectônica e superficiais (< 12 km de profundidade, p. ex. 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 Rede Sismográfica Brasileira. Este fato não é observado em terremotos tectônicos como o mostrado na figura 25.

Na figura 25a é mostrado 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 25b, 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 25a é a mesma entre o evento de Maceió (AL) e a estação NBAN (Fig. 25b), ou seja, cerca de 60 km.

É preciso ressaltar 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 (Fig. 25b) 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 25a e 25b denotam a chegada da onda P em cada sismograma.

Na figura 25c é mostrado 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 25c.

Na figura 25d aparece 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 NBMO).

Na figura 25d 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 25d, é possível observar que o evento em Maceió (espectro em vermelho) 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 25a) não possuem essa assinatura monocromática como a observada em Maceió no dia 03.03.2018. Inclusive, o aspecto dos sismogramas é completamente distinto.

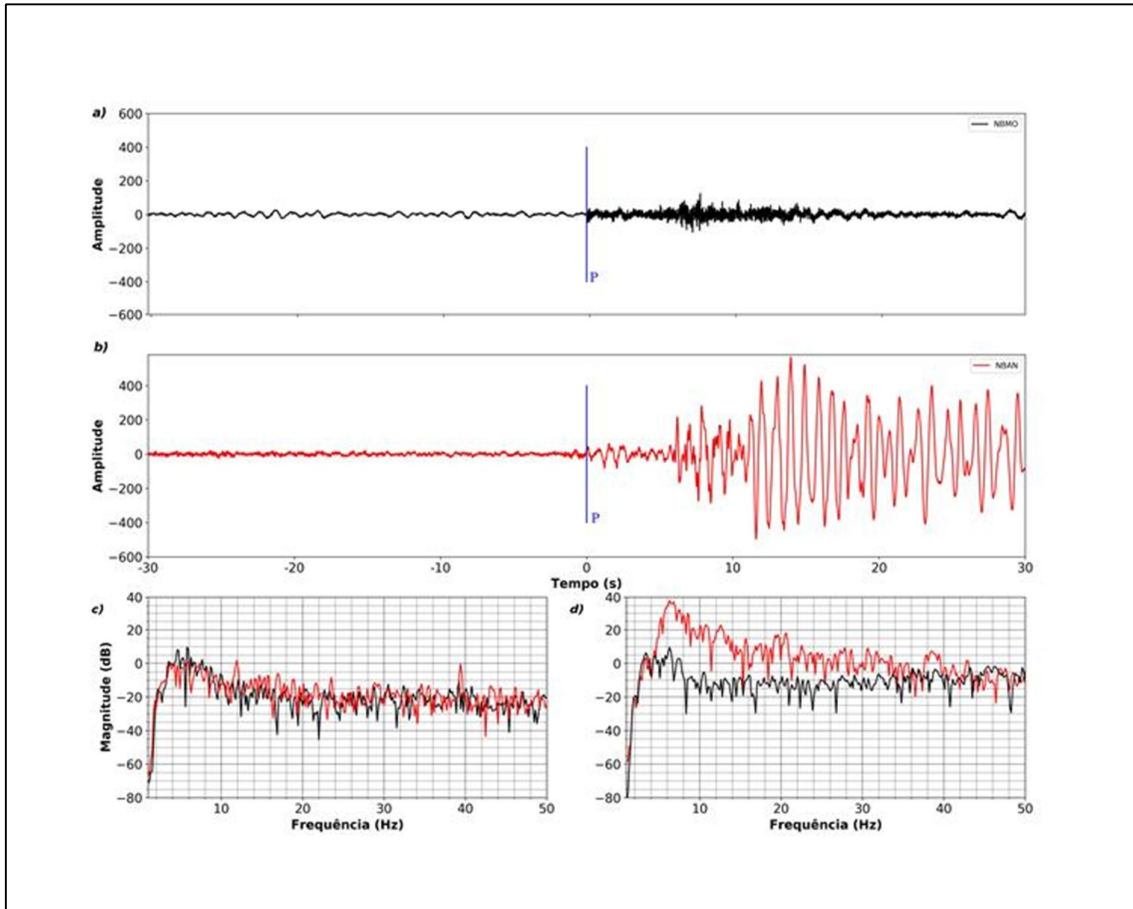


Figura 25 - Sismogramas de evento tectônico (a) e evento em Maceió (b). (c) e (d) são os espectros de energia dos registros antes e depois da chegada da onda P em cada um dos sismogramas.

3.2. Considerando que no relatório técnico Volume II — L a CPRM afirma que há um alto nível de ruído ambiental que oblitera a chegada das ondas sísmicas dos pequenos eventos, como foi possível concluir que os eventos coincidem com as cavidades?

Os eventos detectados e reportados possuem uma razão sinal-ruído que permitiu a identificação visual e sua localização, identificando as chegadas das ondas nos sensores.

Em qualquer sismicidade, a quantidade de eventos de menor magnitude é maior que os de maior magnitude (Lei de Gutenberg-Richter e.g. Gutenberg & Richter, 1944) e, portanto, os de maior magnitude possuem uma razão sinal-ruído que permita a localização.

3.3. Considerando que a CPRM conhecia as atividades especiais (pescaria) que estavam sendo executadas nos poços da Mineração, foram expurgados dos resultados da sismologia os ruídos gerados por estas atividades no período avaliado pela CPRM?

Os dados foram obtidos de modo contínuo e, portanto, o registro engloba todo e qualquer movimento do solo que possa ser captado pelos sensores. Em tais estudos são identificados sinais que produzem ondas P e S, as quais podem ser utilizadas para identificá-los como eventos sísmicos e não como ruídos de pescaria e/ou detonações, por exemplo. Se o fossem, os epicentros dos sinais determinados seriam bem mais numerosos e espacialmente aglomerados em torno dos locais onde ocorreram estes “ruídos”. Não foi isso o identificado.

3.4. A CPRM tem os registros sismográficos da região que ela monitorou? Poderiam nos fornecer a intensidade dos sismos identificados correlacionando com data, epicentro e hipocentro?

Sim. O dado está em registro de contínuo (em formato mseed) e a CPRM autorizou sua cessão. Não há como realizar um levantamento de intensidade (efeito sentido), pois estes eventos, em particular, não foram sentidos pela população. Com relação aos parâmetros hipocentrais, consideramos que podem ser fornecidos.

3.5. A CPRM considerou o impacto do lineamento BR 01 (que corta a bacia sedimentar de Alagoas, passando pela Mineração) na interpretação dos sismos ocorridos na bacia sedimentar de Alagoas?

Sim, porém a hipótese foi descartada ao ver-se o padrão dos sismos localizados sobre a projeção das cavernas em superfície, na zona rúptil e na zona coincidente com uma projeção da interferometria na lagoa. Em adição, as assinaturas obtidas não são condizentes com o lineamento BR 01.

A sismicidade no NE do Brasil pode, em alguns casos, ser correlacionada com feições em superfície, mas esta correlação não é sempre observada (e.g. Bezerra *et al.*, 2011) e os hipocentros dos eventos estão localizados no embasamento cristalino. No caso de um lineamento cortando a bacia e, se o mesmo incluir as camadas geológicas em tela, é consistente com o fato que as mudanças de esforços provocadas pela mineração tenham

reativado estas estruturas. Conforme afirmado na questão 1.4, é relatado na literatura que a mineração de sal por dissolução pode induzir sismicidade associada a colapsos de teto das cavernas e/ou que aproveitam zonas de fraquezas pré-existentes.

A figura 26 mostra a deformação estimada pela interferometria de satélite. A cor vermelha denota maior subsidência, e os tons amarelados apresentam valores intermediários, enquanto em verde os de menores valores de subsidência. Na mesma figura (à esquerda e direita), estão representados por pequenos círculos, os epicentros determinados até agora. A figura 26 à direita mostra um padrão de deformação esperado para a área que não pode ser amostrada pelo satélite (curvas tracejadas). Os epicentros estão majoritariamente na área de subsidência, o que sugere que os dois fenômenos estão relacionados.

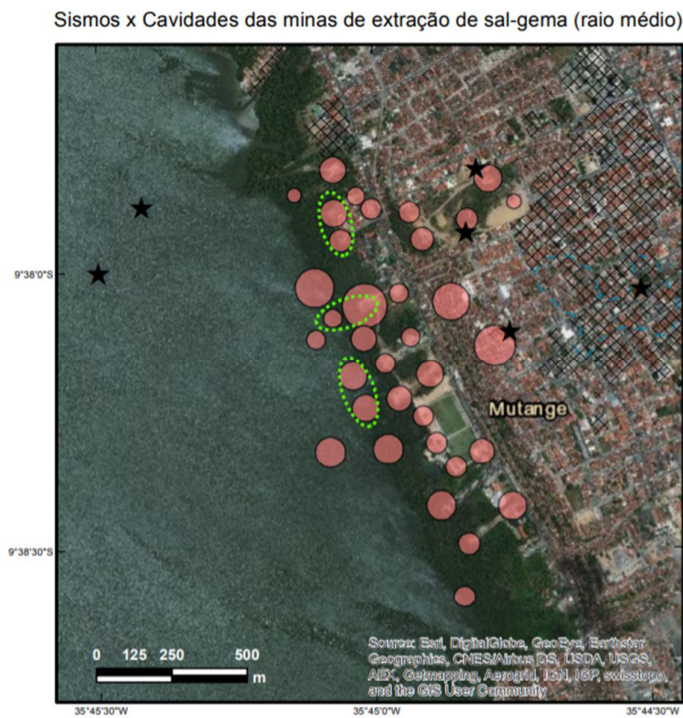
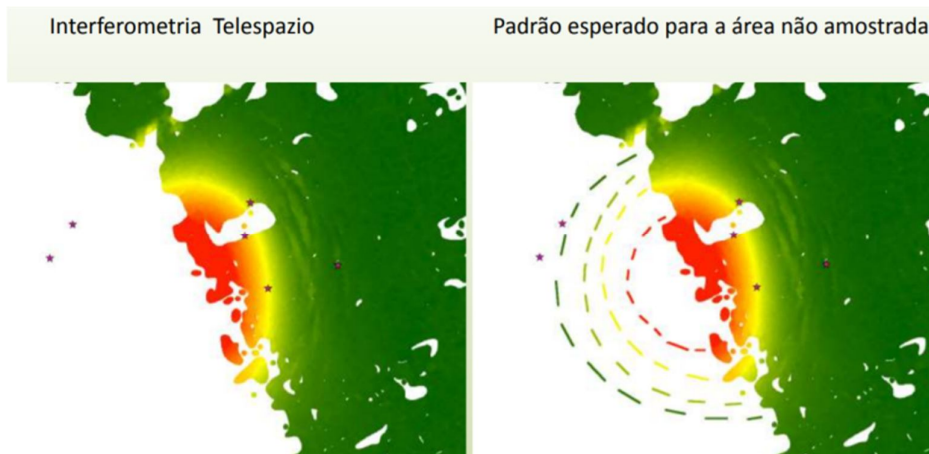


Figura 26 – Minas de sal com indicação daquelas que se uniram, sismos monitorados e interferometria.



4. NÃO EXISTENCIA DE FALHA LISTRICA NO BAIRRO DO PINHEIRO

4.1. É sabido que a metodologia de sísmica de reflexão (AWD) é o método mais adequado para identificação de falhas geológicas, porque a CPRM não considerou os dados da sísmica de reflexão disponibilizados pela Braskem na sua conclusão?

A gravimetria é um método reconhecido por sua capacidade de localizar e modelar estruturas tectônicas, sobretudo falhas gravitacionais em bacias sedimentares. Este fato está muito bem documentado na literatura científica (p.ex. Molina et al., 1989; Castro & Castelo Branco, 1999; Fernandes & Chang, 2002).

Uma falha lítrica é um tipo de falha gravitacional cujo mergulho diminui gradativamente com a profundidade. Assim, os maiores rejeitos verticais associados com a força da gravidade estão localizados na parte da falha mais próxima da superfície. Portanto, se existe uma falha lítrica aflorante no bairro Pinheiro, ela não gerou rejeito suficiente para ser detectada por dados gravimétricos. Além disto, não há registros nos dados de interferometria que indique subsidências verticais importantes no local da falha sugerida pela Braskem.

A CPRM não foi comunicada oficialmente sobre a entrega dos dados AWD. Nesse sentido recorreu à ANM para obter esses dados. Entretanto, ao obter cópia dos dados na ANM verificamos que os mesmos estavam corrompidos. O acesso aos dados brutos e processados só foi obtido no dia 25/04/2019, depois de disponibilizados pela Braskem.

Até o presente momento a CPRM não recebeu os dados interpretados, assim como o relatório da sísmica, interferometria, geologia e Modelagem 3D.

4.2. Considerando que a sísmica de reflexão (AWD) demonstrou que a falha lítrica aflora a 162 metros da casa rosa, tal constatação poderia explicar as patologias encontradas no bairro do Pinheiro?

Não. Ainda que se confirme a falha lítrica, sua existência não explica as patologias encontradas.

4.3. Considerando que a CPRM afirma que os danos do bairro do Pinheiro são explicados pelo fato de estar em uma zona de transição entre uma área com e sem subsidência, qual a metodologia de cálculo utilizada pela CPRM para provar tal afirmação?

O Serviço Geológico do Brasil contratou o levantamento interferométrico do bairro do Pinheiro e adjacências. Esse estudo baseado em imagens de satélite (SAR) com o objetivo de apontar as áreas com deformação do terreno e sua velocidade de deformação com alta precisão de resultado. Este método é bastante utilizado para detectar movimentação milimétrica de terrenos.

Contratou-se, para tanto, a empresa TELESPIAZIO, altamente especializada nesse tipo de mapeamento, cuja análise dos dados permitiu afirmar que:

- a. As imagens de satélite obtidas entre abril de 2016 e dezembro de 2018, delimitaram novas áreas instáveis, impossíveis de serem detectadas em levantamento de campo tradicionais;
- b. Os dados interpretados em março de 2019 mostram que houve subsidência contínua e em aceleração até o fim do período amostrado;
- c. É possível observar deformação radial se espalhando do centro da área, onde atinge 40 cm de subsidência (afundamento) a partir das cavidades de extração de sal localizadas à margem da Lagoa Mundaú (Fig. 27).

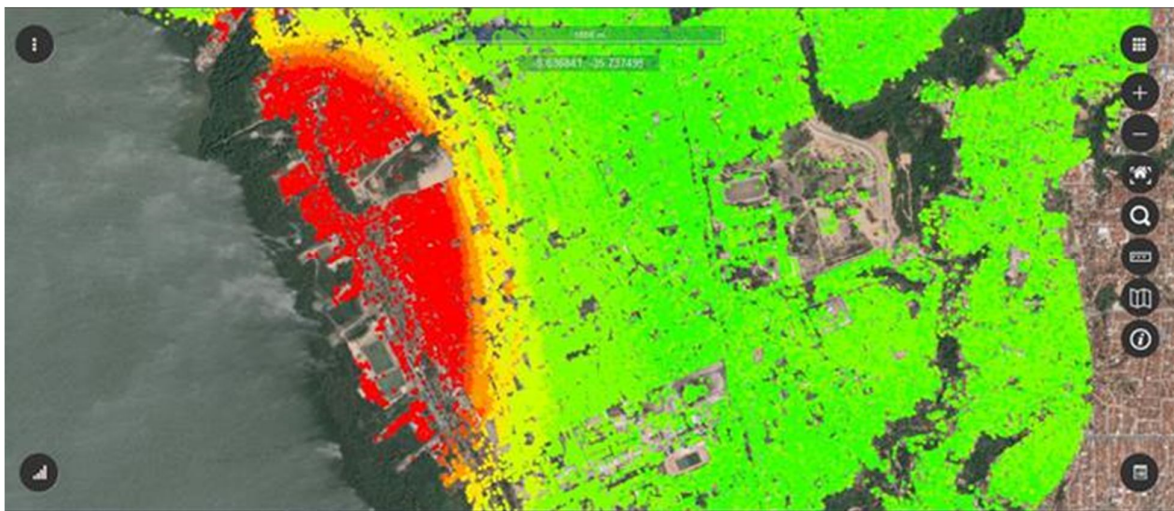


Figura 27 – Resultado do levantamento por interferometria apresentando uma região em subsidência (cor vermelha) na área da mineração de sal.

A integração de dados e de mapeamentos realizados pelo Serviço Geológico do Brasil resultou no *Mapa de Integração de Processos de Instabilidade do Terreno* que apresenta as faixas de maior aceleração do processo de subsidência e as áreas afetadas por rachaduras e trincas, e mostra claramente a faixa ou zona de transição entre a porção estável do bairro do Pinheiro (Fig. 28), representada nas cores verdes, marrom claro e amarelo. Nessas faixas ocorrem as maiores concentrações de feições de instabilidade do terreno, representadas por trama na cor preta e amarela. As zonas de maior aceleração do processo de subsidência do terreno estão representadas na cor vermelha. Um modelo ilustrativo desse processo ao longo da faixa de “transição” pode ser visualizado na figura 29.



Figura 28 – *Mapa de Integração de Processos de Instabilidade do Terreno* apresentando as faixas de maior aceleração do processo de subsidência e as áreas afetadas por rachaduras e trincas, além das minas de sal.

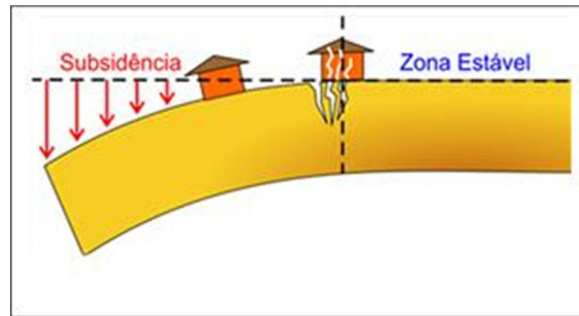


Figura 29 - Esquema ilustrativo do processo de subsidência e danos causados na superfície do terreno.

Com base nos dados interferométricos foram realizadas diversas modelagens pela equipe de técnicos do Serviço Geológico do Brasil buscando, entre outras informações, estabelecer as variações de velocidade e de aceleração das deformações do terreno conforme apresentado na figura 30.

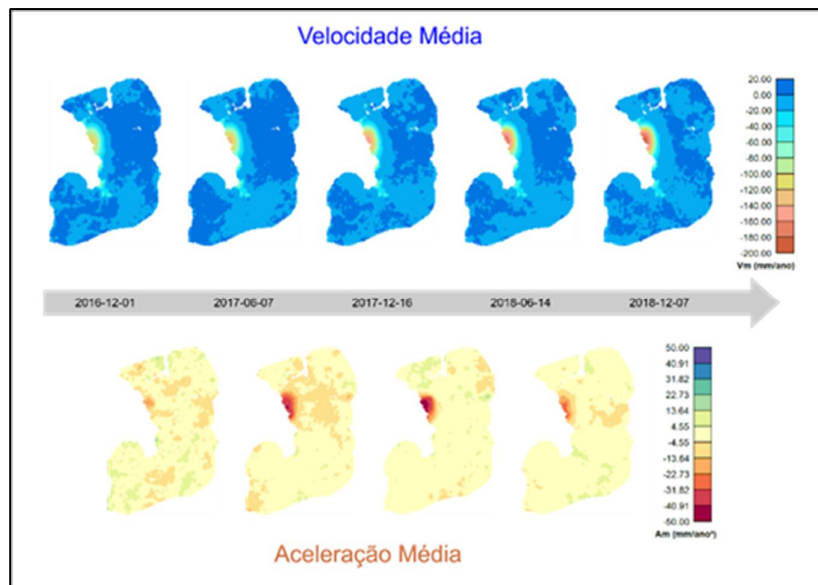


Figura 30 - Evolução de velocidade e aceleração entre 2016 e 2018 com intervalo semestral (aproximadamente).

5. OUTROS

5.1. Após os esclarecimentos trazidos pela Braskem, os mapas e recomendações da CPRM precisarão ser revistos?

Não. O estudo da CPRM é definitivo quanto à causa-gatilho (nexo causal) do fenômeno que ocorre nos bairros do Pinheiro, Mutange e Bebedouro.

É importante lembrar que foram levantadas nove causas a serem investigadas quando a sua possibilidade de representarem a causa-gatilho do fenômeno observado inicialmente no Pinheiro. Elas foram reunidas em quatro grupos. Dezenas de profissionais debruçaram-se na investigação de cada uma delas para avaliar a possibilidade que tinham de representar a causa-gatilho. Concluíram TODOS que os estudos apontam apenas a **desestabilização das cavidades da extração de sal-gema** como causa-gatilho.

5.2. Considerando as diversas ressalvas feitas nos anexos do relatório síntese, quais os estudos que a CPRM ainda está desenvolvendo ou irá desenvolver? Há possibilidade de revisão das conclusões?

O Serviço Geológico do Brasil dará continuidade aos estudos dos processos de subsidência no bairro do Pinheiro e adjacências considerando que, conforme afirmado na questão anterior, os estudos da CPRM são definitivos quanto à causa-gatilho (nexo causal) do fenômeno que ocorre nos bairros do Pinheiro, Mutange e Bebedouro. Assim, não há possibilidade de revisão das conclusões, pois entende-se que ainda que possam surgir novos dados, estes não invalidariam as conclusões da instabilidade já anunciadas.

Dentre os trabalhos que deverão ser realizados, destacamos:

- a. Análise dos sonares das minas ativas e inativas em ambiente 3D;
- b. Monitoramento interferométrico abrangendo o período de 2019 a 2020;
- c. Monitoramento dos sistemas aquíferos subterrâneos com a instalação dos piezômetros;
- d. Apoio para a Defesa Civil municipal, estadual e SEDEC nas ações de proteção e defesa civil;
- e. Realização de carta geotécnica do município de Maceió;
- f. Monitoramento via Rede Sismográfica;

- g. Levantamentos sismológicos com as seguintes ações e atividades: i – verificação do impacto de um modelo de velocidades com parâmetros mais adequados à região; ii – verificação do uso de outras técnicas de supressão de ruído; iii – verificação do uso de outras técnicas de localização hipocentral que não sejam baseadas apenas na marcação (manual ou automática) de ondas P e S; iv – estimativas do momento tensor dos eventos individualmente.
- h. Análise dos 19 volumes dos processos contidos na Agência Nacional de Mineração. Aprofundamento das análises do AMT e gravimétricos, e aprimoramento do modelo 3D.
- i. Interpretação dos dados sísmicos de refração fornecidos pela Braskem.
- j. Realização, pela Braskem, de um levantamento aerogravimétrico gravimétrico que envolva uma área de 10 km x 10 km com os bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro no centro e incluindo toda a área da Lagoa Mundaú. As linhas de vôo devem ter um espaçamento igual ou de preferência menor do que 100 metros.

5.3. O que levou a CPRM a afirmar, no Apêndice D, a existência de dados sobre sonares não repassados pela Braskem?

Significou afirmar que a CPRM não recebeu a totalidade de dados sobre sonares disponíveis na Braskem, apenas aqueles mencionados no apêndice D.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bezerra, F. H., do Nascimento, A. F., Ferreira, J. M., Nogueira, F. C., Fuck, R. A., Neves, 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.

C D. L. de Castro & R. M. G. Castelo Branco. 1999. Caracterização da arquitetura interna das bacias do Vale do Cariri (NE do Brasil) com base em modelagem gravimétrica 3D. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 17(2,3).

Chave, A. D. and Jones, A. G., 2012, The Magnetotelluric Method, Theory and Practice, ch. 9.

Briggs, I.C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39(1):39-48.

Cowie, P.A. et al. 2000. Implications of fault array evolution for synrift depocentre development: insights from a numerical fault growth model. *Basin Research* (2000) 12, 241–261.

Cuenca, M.C. 2013. Improving radar interferometry for monitoring fault-related surface deformation. *Publications on Geodesy 81*, NCG KNAW, Netherlands Geodetic Commission, Delft, January 2013.

Fernandes, F.L.; Chang, H.K. 2002. Modelagem Gravimétrica da Bacia de Taubaté - Vale Do Rio Paraíba do Sul, Leste do Estado de São Paulo. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 19(2).

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.

Grasso, J. R., & Sornette, D. (1998). Testing self-organized criticality by induced seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B12), 29965-29987.

Gutenberg, B. & Richter, C. 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, 185 – 188.

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.

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

Leary, P. C. (1997). Rock as a critical-point system and the inherent implausibility of reliable earthquake prediction. *Geophysical Journal International*, 131(3), 451-466.

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.

Molina, E.C.; Ussami, N.; Sá, N.C., Blitzkow, D. 1989. Interpretação dos dados gravimétricos da parte norte da Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, 19(2):187-196.

Sal Gema Mineração Ltda. 1989. Reestudo Geológico e Reavaliação das Reservas de Sal. Sal Gema Mineração Ltda, Maceió. AL, 31p.

Souza-Lima, W. 2008. Sequências Evaporíticas da Bacia de Sergipe-Alagoas. In: Mohriack, W. et al. (eds) Sal: Geologia e Tectônica. Petrobrás, Beca Edições Ltda., 449 p.

Swain, C.J. 1976. A Fortran IV program for interpolating irregularly spaced data using the difference equations for minimum curvature. Computer & Geosciences, 1:231-240.

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff, R.E. & Keys D.A. 1990. Applied Geophysics. 2nd edition, Cambridge, Cambridge University Press, 770 p.