

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

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

**Volume II**  
RELATÓRIOS TÉCNICOS  
K. Geofísica – Audiomagnetotelúrico

Rio de Janeiro, maio de 2019



**MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA**

**Ministro de Estado**

Bento Albuquerque

**Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral**

Alexandre Vidigal de Oliveira

**SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM**

**DIRETORIA EXECUTIVA**

**Diretor Presidente**

Esteves Pedro Colnago

**Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial**

Antônio Carlos Bacelar Nunes

**Diretor de Geologia e Recursos Minerais**

José Leonardo Silva Andriotti

**Diretor de Infraestrutura Geocientífica**

Fernando Pereira de Carvalho

**Diretor de Administração e Finanças**

Juliano de Souza Oliveira

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

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

---

## **Volume II** **RELATÓRIOS TÉCNICOS** **K. Geofísica – Audiomagnetotelúrico**

### **Autoria**

Lúcia Maria da Costa e Silva

### **Empresa contratada**

AMGEOS Engenharia

### **Acompanhamento no campo**

João Batista Freitas de Andrade

Rio de Janeiro, maio de 2019

## COORDENAÇÃO INSTITUCIONAL

---

**Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial (DHT):** Antônio Carlos Bacelar Nunes

## COORDENAÇÃO TÉCNICA-EXECUTIVA

---

**Coordenador-Geral:** Thales de Queiroz Sampaio

**Coordenação técnica:** Maria Adelaide Mansini Maia e Jorge Pimentel, Departamento de Gestão Territorial (DEGET)

**Assessoria:** Helion França Moreira e Ricardo Moacyr de Vasconcellos, Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial (DHT)

**Estudos de geologia aplicada:** Sandra Fernandes da Silva, Divisão de Geologia Aplicada (DIGEAP)

**Estudos de geomorfológicos e historicidade da ocupação:** Marcelo Eduardo Dantas, Divisão de Gestão Territorial (DIGATE)

**Estudos hidrogeológicos:** Fernando Antônio Carneiro Feitosa, Departamento de Hidrologia (DEHID)

**Estudos geofísicos:** Lucia Maria da Costa e Silva, Gerência de Geologia e Recursos Minerais/Sup. Reg.de Belém (GEREMI/SUREG-BE), e Luiz Gustavo Rodrigues Pinto, Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica (DISEGE)

**Estudos batimétricos:** Hortência Assis, Divisão de Geologia Marinha (DIGEOM)

**Estudos cartográficos:** Fabio Costa, Divisão de Cartografia (DICART)

**Modelagem geológica em ambiente 3D:** Ricardo Wosniak e Eduardo Grissolia, Divisão de Economia Mineral e Geologia Exploratória (DIEMGE)

**Geoprocessamento:** Denilson de Jesus, Divisão de Geoprocessamento (DIGEOP)

## EQUIPE TÉCNICA

---

Alexandre Borba (Geólogo)

Alexandre Lago (Geólogo)

Amaro Luiz Ferreira (Geólogo)

Bruce Fabini Franco Chiba (Geofísico)

Bruno Elldorf (Geólogo)

Cipriano Gomes de Oliveira (Téc. em Geociências)

Daniel Moreira (Eng. Cartógrafo)

Dario Dias Peixoto (Geólogo)

Denilson de Jesus (Eng. Cartógrafo)

Eduardo Moussalle Grissolia (Geólogo)

Eugênio Pires Frazão (Geólogo)

Fábio Silva da Costa (Eng. Cartógrafo)

Fernando Antônio Carneiro Feitosa (Geólogo)

Fernando Lúcio Borges Cunha (Geólogo)

Giana Grupioni Rezende (Eng. Cartógrafo)

Gilmar Pauli Dias (Geólogo)

Heródoto Goes (Geólogo)

Hiran Silva Dias (Analista de sistemas)

Hortência Maria Barboza de Assis (Geóloga)

Ítalo Prata de Menezes (Geólogo)

Ivan Soares dos Santos (Téc. em Geociências)

Jairo Jamerson Correia de Andrade (Geofísico)

João Batista Freitas de Andrade (Geólogo)

Jorge Pimentel (Geólogo)

Jose Antônio da Silva (Geólogo)

Juliana Moraes (Geóloga)

Júlio Cesar Lana (Geólogo)

Larissa Flávia Montandon Silva (Geóloga)

Leandro Galvanese Kuhlmann (Geólogo)

Loury Bastos Mello (Geóloga)

Lúcia Maria da Costa e Silva (Geóloga)

Luiz Antônio R. Almendra (Téc. em Geociências)

Luiz Gustavo Rodriguez Pinto (Geofísico)

Marcelo Ambrósio Ferrassoli (Geólogo)

Marcelo de Queiroz Jorge (Geólogo)

Marcelo Eduardo Dantas (Geógrafo)

Marcio Junger Ribeiro (Téc. em Geociências)

Márcio Martins Valle (Oceanógrafo)

Maria Adelaide Mansini Maia (Geóloga)

Marília de Araújo Costa Rodrigues (Geofísica)

Nilo Costa Pedrosa Júnior (Geólogo)

Patrícia Durringer Jacques (Geóloga)

Pedro Augusto dos Santos Pfaltzgraff (Geólogo)

Rafael Corrêa de Melo (Geólogo)

Ricardo Cavalcanti Santiago (Geofísico)

Ricardo Duarte de Oliveira (Eng. Cartógrafo)

Ricardo Wosniak (Geólogo)

Roberto Gusmão de Oliveira (Geólogo)

Rodrigo Luiz Gallo Fernandes (Geólogo)

Ronaldo Gomes Bezerra (Geólogo)

Rubens Esteves Kenup (Eng. Cartógrafo)

Rubens Pereira Dias (Geólogo)

Sandra Fernandes da Silva (Geóloga)

Thales de Queiroz Sampaio (Geólogo)

Thiago Dutra dos Santos (Geólogo)

Tiago Antonelli (Geólogo)

Valter José Marques (Geólogo)

Vanildo Almeida Mendes (Geólogo)

Victor Augusto Hilquias Silva Alves (Geólogo)

## **ASSESSORIA DE COMUNICAÇÃO**

---

Warley Aparecido Pereira (Jornalista)  
Letícia de Barros Alves Peixoto (Jornalista)  
Pedro Henrique Pereira dos Santos (Comunicador Organizacional)

## **ASSESSORIA JURÍDICA**

---

Vilmar Medeiros Simões (Consultor Jurídico)

## **COLABORAÇÃO E AGRADECIMENTOS**

---

Prof. Dr. Aderson Farias do Nascimento, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)  
Prof. Dr. André Etienne Ferraz, Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Prof. Dr. André Ferrari, Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Prof. Dr. Emanuel Jardim de Sá, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)  
Geólogo Guilherme Estrela, Ex-diretor de Exploração e Produção da Petrobras  
Prof. Dr. Luiz Antônio Pieranttoni Gamboa, Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Geólogo Ricardo Latgé Milwart de Azevedo, Conselho-Diretor do Clube de Eng. e Conselheiro do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Rio de Janeiro (CREA-RJ)  
Prof. Me. Abel Galindo Marques, Universidade Federal de Alagoas (UFAL)  
Profa. Dra. Regla Toujaguez La Rosa Massahud, Universidade Federal de Alagoas (UFAL)  
Prof. Me. Nagib Charone, Universidade Federal do Pará (UFPA)  
Governo do Estado de Alagoas  
Prefeitura de Maceió  
Defesa Civil Nacional  
Defesa Civil do Estado de Alagoas  
Defesa Civil de Maceió  
59º Batalhão de Infantaria Motorizada  
Equatorial Energia Alagoas  
United States Geological Survey (USGS)

## **APOIO CPRM**

---

Coordenação de Eventos e Cerimonial (DIG)	Divisão de Cartografia (DICART)
Departamento de Gestão Territorial (DEGET)	Divisão de Informática (DIINFO)
Departamento de Hidrologia (DEHID)	Superintendência Regional de Belém (SUREG-BE)
Departamento de Administração de Material e Patrimônio (DEAMP)	Superintendência Regional de Belo Horizonte (SUREG-BH)
Departamento de Contabilidade, Orçamento e Finanças (DECOF)	Superintendência Regional de Goiânia (SUREG-GO)
Departamento de Informações Institucionais (DEINF)	Superintendência Regional de Manaus (SUREG-MA)
Divisão de Editoração Geral (DIEDIG)	Superintendência Regional de Recife (SUREG-RE)
Divisão de Gestão Territorial (DIGATE)	Superintendência Regional de Salvador (SUREG-SA)
Divisão de Geologia Aplicada (DIGEAP)	Superintendência Regional de São Paulo (SUREG-SP)
Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica (DISEGE)	Residência de Fortaleza (REFO)
Divisão de Geologia Marinha (DIGEOM)	Residência de Porto Velho (REPO)
Divisão de Economia Mineral e Geologia Exploratória (DIEMGE)	Residência de Teresina (RETE)
Divisão de Geoprocessamento (DIGEOP)	Escritório do Rio de Janeiro
	Sede Administrativa Brasília/DF

# APRESENTAÇÃO

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 de 15 fevereiro de 2018 e o evento sísmico de magnitude regional igual a 2,4 de 3 de março de 2018 ocorridos na região, que levaram inclusive à interdição de diversas moradias.

Em decorrência, foi solicitada a presença de técnicos do Serviço Geológico do Brasil - CPRM por meio dos ofícios nº 044/2018 – CEDEC-AL e nº 34/2018 – PJC/MPE/AL para auxiliar na investigação das causas do fenômeno responsável pelos danos gerados a alguns 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.

Os resultados obtidos até a presente data pelos diversos métodos investigativos utilizados pela CPRM no período de junho de 2018 a abril de 2019 estão organizados nos seguintes três volumes, com pormenores sobre a metodologia utilizada, de modo a responder a portaria MME nº 20 de 11 de janeiro de 2019, que se refere à designação do Serviço Geológico do Brasil para elucidar as causas do fenômeno.

➤ **Volume I – Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL): relatório síntese dos resultados nº 1.**

Apresenta os principais resultados obtidos nas investigações de forma resumida e adequada ao público não especialista.

➤ **Volume II – Relatórios Técnicos**

Compreende os seguintes relatórios que embasaram o volume I, que poderão sofrer seja atualização, seja aprofundamento, com o avanço dos trabalhos ou aquisição de novas informações:

- A. Mapa de feições de instabilidade do terreno
- B. Levantamento interferométrico
- C. Levantamento cartográfico
- D. Aspecto geológico e estrutural
- E. Aspecto geomorfológico e do histórico de ocupação do bairro
- F. Caracterização geológico-geotécnica
- G. Geofísica – Radar de Penetração do Solo (GPR) em residências e em vias públicas
- H. Geofísica – Batimetria na lagoa Mundaú
- I. Geofísica – Eletrorresistividade

- J. Geofísica – Gravimetria
- K. Geofísica – Audiomagnetotelúrico (AMT)
- L. Geofísica – Sismologia
- M. Hidrogeologia
- N. Integração de dados geológicos e de extração de sal em ambiente 3D

➤ **Volume III – Sistema de Informações Geográficas**

Reúne as informações vetoriais e matriciais georreferenciadas (geoinformação) utilizadas ou geradas pelo presente estudo, organizadas no Sistema de Informação Geográfica (SIG), para uso em *softwares* de geoprocessamento. Os dados estão no formato *shapefile*, com projeção cartográfica Universal Transversa de Mercator (UTM) 25S, Datum SIRGAS2000.

## **SUMÁRIO**

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>8</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>9</b>
<b>INTERPRETAÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>15</b>

## **INTRODUÇÃO**

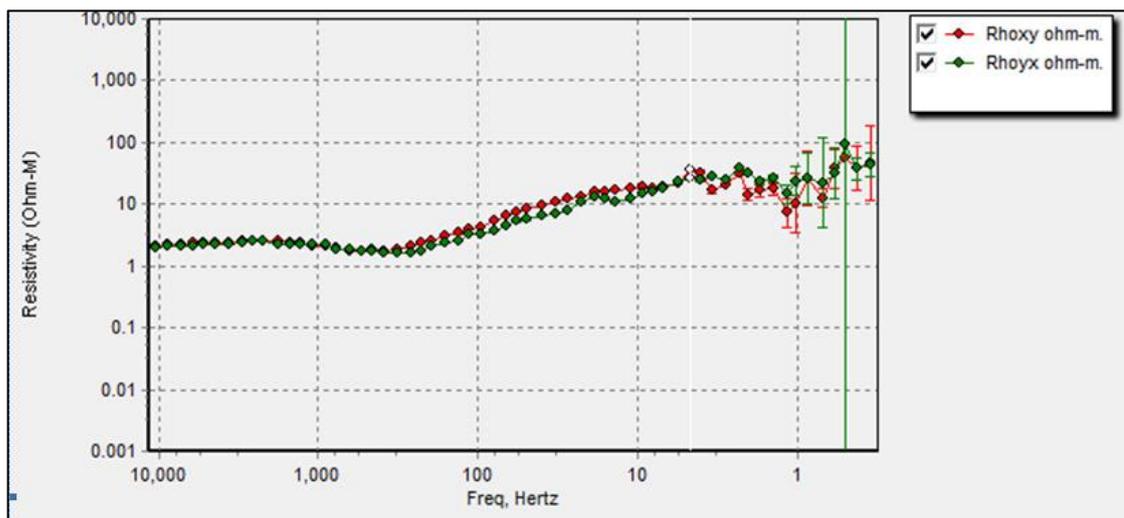
O método Audiomagnetotelúrico (AMT) é uma das variantes do método Magnetotelúrico (MT). Essa família de métodos utiliza campos elétrico e magnético naturais. No caso do AMT, esses campos estão associados aos raios das tempestades que percorrem o globo terrestre pela atmosfera, estando, portanto, disponíveis para uso em toda a Terra.

As correntes elétricas, associadas ao campo elétrico na atmosfera, geram campo magnético que penetra na Terra. Este campo induz no interior do terreno correntes elétricas conhecidas como telúricas que, por sua vez, geram um campo magnético secundário (fenômeno conhecido como indução eletromagnética). Os campos gerados no interior do terreno são um retrato do que existe no seu interior. Estes campos secundários e os campos primários sobrepõem-se dando origem aos chamados campos resultantes que vem trazendo informação sobre o interior do terreno. São os campos elétrico e magnético resultantes nas direções Norte-Sul e Leste-Oeste que são detectados pelo método Audiomagnetotelúrico na superfície. A razão entre componentes perpendiculares destes campos permite obter a distribuição da propriedade resistividade elétrica no interior do terreno.

Os resultados AMT foram obtidos por meio da contratação pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM 007/PR/19, processo 309.00490/2018, em conformidade com as especificações de execução de serviços contidas na Proposta Comercial AMGEOS P145\_CPRM\_MACEIOv5, datada de 12/12/2018, unindo esforços das empresas AMGEOS e STRATAIMAGE. O levantamento em 100 estações se deu entre 8 de fevereiro e 10 de março de 2019, tendo sido seguido do processamento, geração de modelos e confecção de relatório. É este material que embasa as considerações e interpretação geológico-geofísica que compõem o presente relatório.

## METODOLOGIA

As medidas em cada uma das estações AMT em Maceió foram realizadas durante 30 minutos a uma hora, o que permitiu registrar informações para mais de 60 profundidades, como mostra a figura 1, construída com a resistividade aparente (eixo dos y) obtida para mais de 60 frequências (eixo dos x) (relacionadas a diferentes profundidades). Foram obtidos resultados até 1.500 metros.



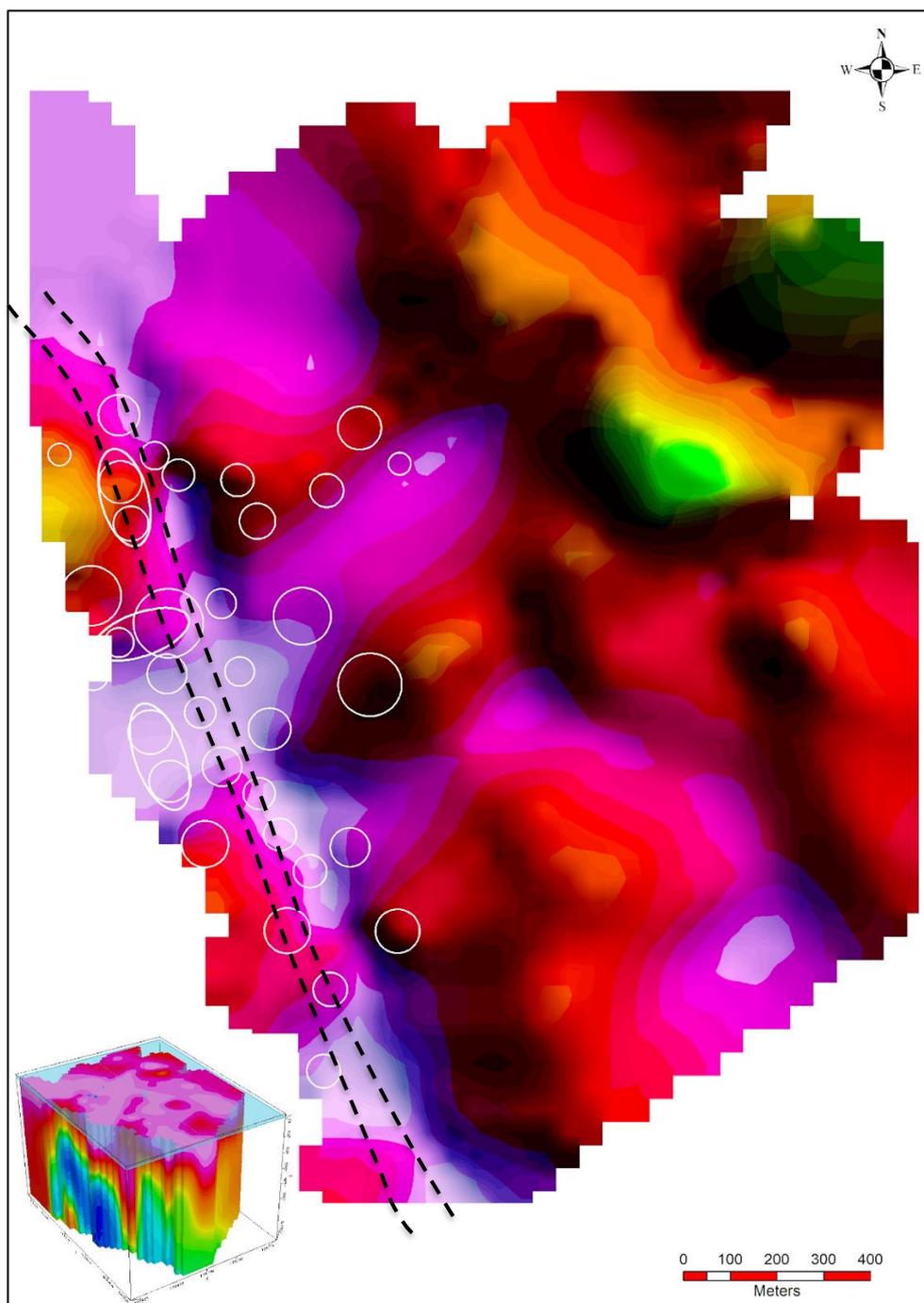
**Figura 1.** Janela do programa mostrando as duas curvas de resistividade aparente na direção Norte-Sul (Rhoxy) e Leste-Oeste, respectivamente para a estação PIN061.

Em cada uma das profundidades (frequências) acessadas pelo método foram medidas duas resistividades bem como duas fases (atraso entre os campos) e, ainda, a componente vertical do campo magnético. São, portanto, várias profundidades e em cada uma delas cinco medidas que foram obtidas por estação, o que garante elevada confiabilidade no resultado final. Dez estações foram eliminadas por existir dúvidas sobre a confiabilidade das mesmas.

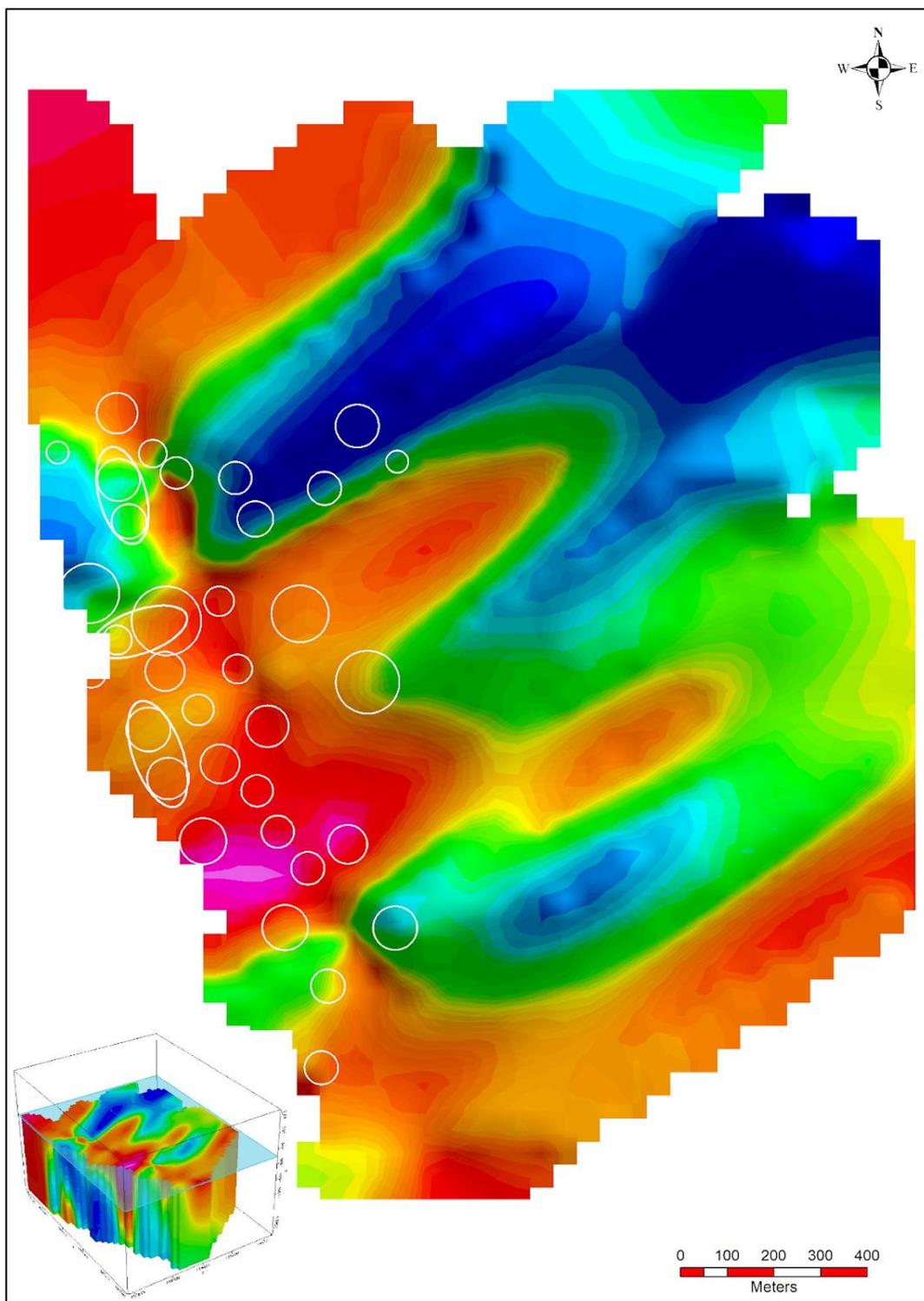
O modelo 2D para cada uma de doze linhas de estações foi obtido considerando-se que a resistividade real da subsuperfície varia suavemente na horizontal e na vertical, o que gera anomalias mais amplas do que a feição no interior do terreno que as provocou. A união desses resultados entrou na composição do modelo tridimensional (3D) para o bairro do Pinheiro, o bairro do Mutange, porção mais ao norte do bairro do Farol e mais ao sul dos bairros Bebedouro e Chã da Jaqueira.

## RESULTADOS

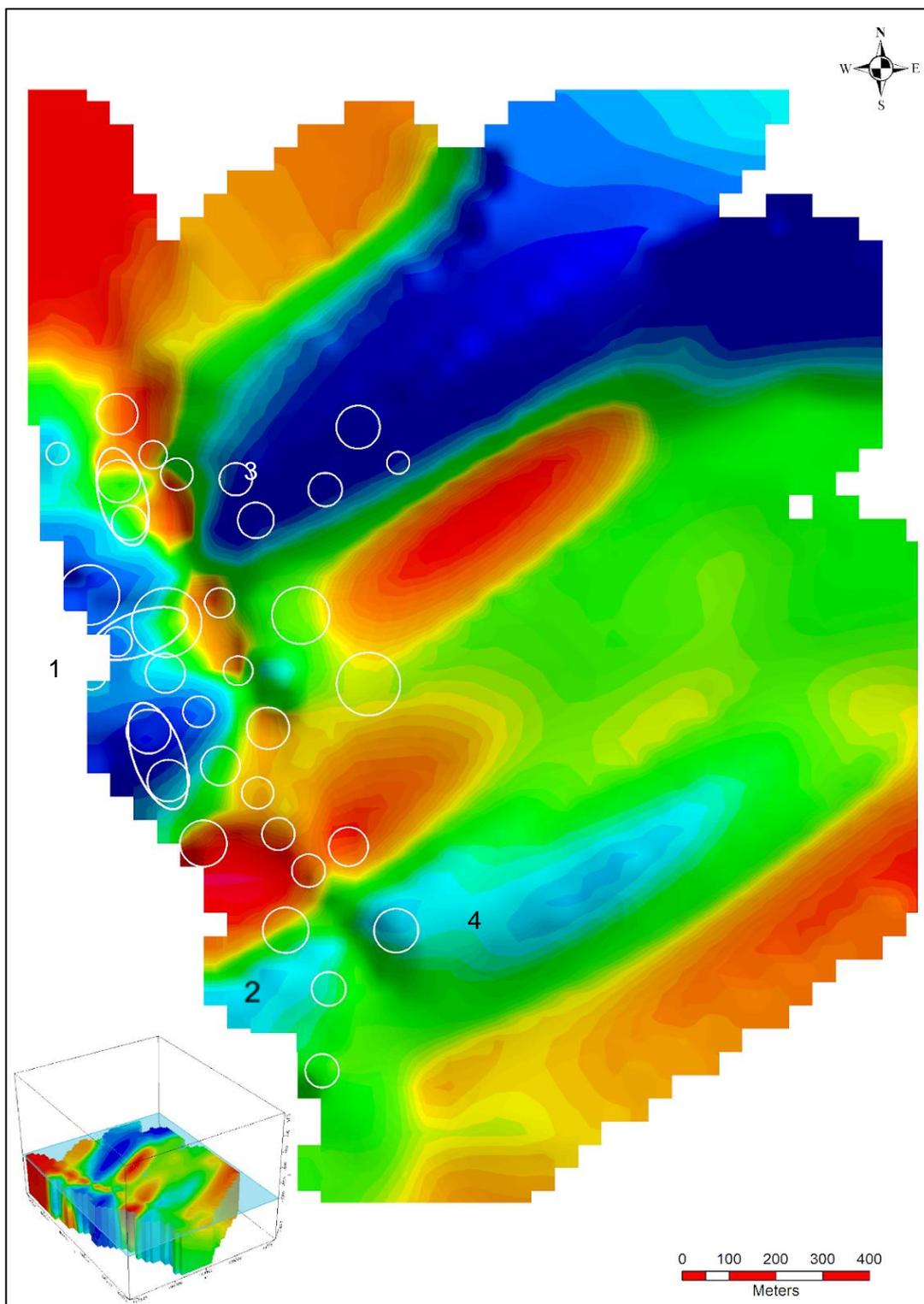
O fatiamento do modelo 3D em 100, 500 e 900 metros de profundidade é mostrado nas figuras 2, 3 e 4, respectivamente. Nas figuras foi lançada a posição dos poços de extração de sal-gema em círculos brancos. A resistividade cresce dos tons quentes (vermelho) para os frios (azul).



**Figura 2.** Seção horizontal a 100 metros de profundidade. Canto esquerdo inferior: modelo 3D indicando a profundidade da seção. Círculos brancos: poços da extração de sal-gema. Tracejado preto: falha.



**Figura 3.** Seção horizontal a 500 metros de profundidade. Canto esquerdo inferior: modelo 3D indicando a profundidade da seção. Círculos brancos: poços da extração de sal-gema.



**Figura 4.** Seção horizontal a 900 metros de profundidade. Canto esquerdo inferior: modelo 3D indicando a profundidade da seção. Círculos brancos: poços da extração de sal-gema. Números: áreas anômalas.

## **INTERPRETAÇÃO**

Na profundidade de 100 metros, o terreno investigado mostra feições muito parecidas com aquelas observadas na superfície, ou seja, elevada condutividade provocada pela presença de argila e silte dos sedimentos mais recentes. Nessa profundidade já é possível observar a compartimentação estrutural do terreno (blocos, falhas) em que se destaca o alinhamento de pequenas anomalias de elevada resistividade Norte/Noroeste-Sul/Sudoeste que corresponde ao falhamento do Mutange. Esse falhamento, assinalado por meio de duas linhas pretas tracejadas na figura 2, foi encontrado em toda a profundidade investigada (1.500 metros) e, portanto, deve se estender a profundidades ainda maiores.

Na profundidade de 500 metros, observa-se a presença de anomalias de elevadíssima resistividade, enquanto na profundidade de 900 metros, topo assumido para as cavernas provocadas pela extração de sal gema, essas anomalias são ainda mais expressivas.

O sal gema mineral possui elevada resistividade. No entanto, as cavernas de extração de sal devem ser mantidas com água pressurizada. Sal na presença de água torna-se condutivo. Conseqüentemente, nas posições em que estão as cavernas, a resposta AMT deveria mostrar elevada condutividade (vermelho). A existência de anomalias resistivas onde estão localizados vários poços é, por si só, indicativa que o conteúdo de água nas cavernas é inexistente ou parcialmente existente. O volume de água teria sido substituído pelo material das camadas superiores que teriam sofrido desmoronamento para dentro do interior das cavernas, pela acomodação de sal gema (halocinese) e por espaços vazios de diferentes dimensões. A resistividade do ar é muito elevada, tende ao infinito. A presença de espaços vazios, acomodando ar, contribuiria para a elevada resistividade encontrada.

Há duas anomalias resistivas entre a lagoa e a falha do Mutange, áreas 1 e 2 da figura 4, que indicam esse desequilíbrio dos poços de extração de sal gema. A primeira avança por debaixo da lagoa.

Há também, após a falha do Mutange, duas anomalias resistivas coincidindo com poços de extração de sal gema nas áreas 3 e 4 da figura 4.

Tanto as anomalias 1 e 3 quanto as anomalias 2 e 4 podem guardar relação, mascarada pela falha. As anomalias 3 e 4 estendem-se para nordeste além dos poços de extração de sal; a anomalia 4 atinge valores consideráveis de resistividade (muito superiores a 10.000 ohm.m). Valores elevados de resistividade são provocados por vazios, diápiro de sal gema e cracks com gás, mas a porção nordeste das anomalias 3 e 4 não coincide com anomalia gravimétrica provocada pela deficiência de massa desenvolvida que se esperaria na presença de vazios,

sal gema e gás, como no caso das demais anomalias AMT. Valores elevados de resistividade podem indicar também a presença de petróleo e óleo diesel, e estes não gerariam anomalia gravimétrica provocada por deficiência de massa. A extração de sal gema teria utilizado este último nas cavernas.

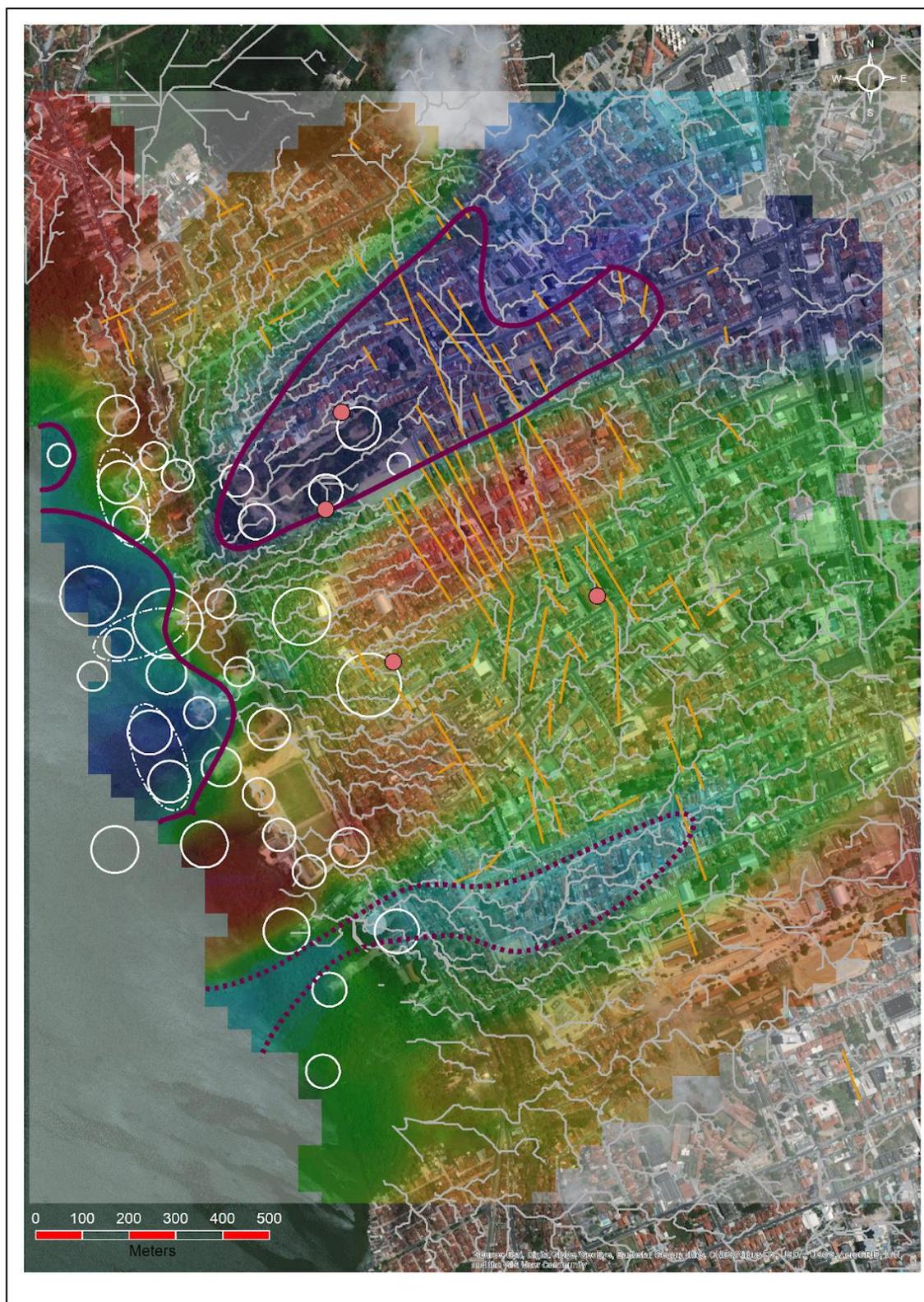
As anomalias resistivas observadas a 900 metros (Fig. 4) aparecem menos desenvolvidas a 500 metros de profundidade (Fig. 3), o que atesta que a origem das mesmas se encontra nas profundidades compatíveis com o teto das cavernas (900 metros) bem como a movimentação das anomalias na vertical. A figura 3 mostra, também, uma nova anomalia, que deriva da anomalia 3 da figura 4.

A figura 5, por sua vez, mostra a seção obtida a 900 metros de profundidade, sobreposta à visão do mapa com os furos de extração de sal gema marcados com círculos brancos, e os quatro hipocentros de terremotos fracos e rasos observados neste ano de 2019 com círculos cheios vermelhos. As feições de trincamento aparecem como linhas vermelhas. Finalmente, valores de acumulação de direções de gradiente obtidos a partir dos resultados de interferometria aparecem em cinza.

Na figura destacam-se dois dos terremotos mais ao norte coincidindo com dois poços de extração de sal gema e com anomalia resistiva AMT. Eles não coincidem com trincamentos, logo a zona pode estar submetida a regime de afundamento com predominância da fase ainda dúctil em superfície. Um terceiro terremoto mais ao sul coincide também com poço de extração de sal gema, em zona de trincamentos, e um quarto terremoto, mais a leste, ocorre em zona de maior frequência de trincamentos, ou seja, zonas em que a fase rúptil se mostra na superfície. Esses resultados mostram que a acomodação do terreno está sendo realizada nos locais de extração de sal gema em profundidade, mas que também já alcançou outras áreas.

Com base na integração desses resultados, foi possível eleger as áreas em profundidade que merecem maior atenção, sendo que o padrão das linhas de acumulação de direções de gradiente advindos da interferometria e a presença de feições rúpteis (trincas, rachaduras) foram utilizados para delimitar a extensão nordeste da anomalia 3, provavelmente alongada por *aliasing* (amostragem espacial deficitária) artefatos da interpolação gráfica e pela própria informação a priori (suavidade) incorporada na interpretação por meio de inversão.

O resultado é mostrado na figura 5. As áreas relacionadas às anomalias 1 e 3 aparecem delimitadas com linha cheia. A área associada às anomalias 2 e 4, por sua vez, é destacada com linha pontilhada. Dentre essas, a área mais a sudoeste relacionada à anomalia 1, e a porção da área também mais a sudoeste associada à anomalia 3 são as que merecem maior atenção.



**Figura 5.** Seção horizontal a 900 metros de profundidade. Círculos brancos: poços de extração de sal-gema. Círculos vermelhos: terremotos ocorridos este ano. Linhas vermelhas: trincas. Linhas cinza: gradiente obtida a partir dos dados da interferometria.

## **CONCLUSÕES**

Os resultados AMT mostram que poços de extração de sal gema não se encontram na condição de equilíbrio planejada e que esse desequilíbrio está ascendendo e espalhando-se na horizontal, modificando vigorosamente a distribuição de resistividade que teria sido impressa pela natureza.