

Programa de Recursos Hídricos



Análise da Geometria do aquífero Urucuia e dinâmica de flutuações de Níveis d'água subterrânea (Relatório Preliminar 2022)

Dezembro, 2022



SECRETARIA DE
GEOLOGIA, MINERAÇÃO
E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

GOVERNO
FEDERAL

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministro de Estado

Adolfo Sachsida

Secretária de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Lilia Mascarenhas Sant'agostino

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor-Presidente Interino

Cassiano de Souza Alves

Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial

Alice Silva de Castilho

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

Marcio José Remédio

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Paulo Afonso Romano

Diretor de Administração e Finanças

Cassiano de Souza Alves

COORDENAÇÃO TÉCNICA

Chefe do Departamento de Hidrologia

Frederico Claudio Peixinho

Chefe da Divisão de Hidrologia Exploratória

João Alberto Diniz

EQUIPE DO PROJETO

Leanize Teixeira Oliveira

Vitor Hugo Rodrigues

Amilton de Castro Cardoso

Ricardo Cavalcanti Santiago

Eduardo Moussale Grissolia

Roberto Eduardo Kirchheim

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM
DIRETORIA DE HIDROLOGIA E GESTÃO TERRITORIAL – DHT
Departamento de Hidrologia
Divisão de Hidrogeologia e Exploração

Programa de Recursos Hídricos

AÇÃO LEVANTAMENTOS HIDROGEOLÓGICOS, ESTUDOS INTEGRADOS EM RECURSOS HÍDRICOS PARA
GESTÃO E AMPLIAÇÃO DA OFERTA HÍDRICA

Análise da Geometria do aquífero Urucuia e dinâmica de flutuações de Níveis d'água subterrânea

(RELATÓRIO PRELIMINAR 2022)

AUTORES

Leanize Teixeira Oliveira
Vitor Hugo Rodrigues
Eduardo Moussale Grissolia

Salvador
Dezembro, 2022



REALIZAÇÃO

Divisão de Hidrologia Exploratória

AUTORES

Leanize Teixeira Oliveira

Vitor Hugo Rodrigues

Eduardo Grissolia Moussale

Roberto Eduardo Kirchheim

EQUIPE EXECUTORA

Amilton de Castro Cardoso (Aquisição de dados Geofísicos)

Eduardo Grissolia Moussale (Modelagem 3D)

Leanize Teixeira Oliveira (Aquisição de dados de campo e relatório)

Ricardo Cavalcanti Santiago ((Aquisição de dados Geofísicos)

Vitor Hugo Rodrigues (Interpretação de dados geofísicos e relatório)

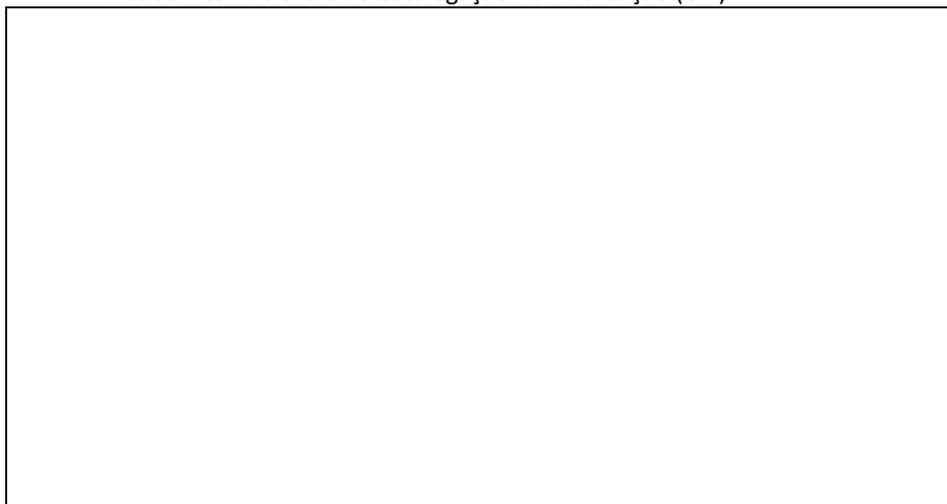
Roberto Eduardo Kirchheim (Análises Isotópicas)

NORMALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

XXXXX

FOTOS DA CAPA: Foto aérea da garganta localizada na divisa BA/TO, nascentes do rio Preto, obtida por drone operado por Ricardo Oliveira (Agosto/2022),

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)



Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária:

Permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte

Serviço Geológico do Brasil - CPRM

www.cprm.gov.br

seus@cprm.gov.br

RESUMO

O aquífero Urucuia vem sendo alvo de estudos pelo Serviço Geológico do Brasil desde 2006, sendo que ao longo desses dezesseis anos contribuiu com a disponibilização de relatórios e dados primários de interesse para os estudos hidrogeológicos na região Oeste da Bahia, destacando-se como uma das principais contribuições a rede de monitoramento de águas subterrâneas (RIMAS) que conta atualmente com 75 poços dedicados. Este relatório tem como objetivo apresentar as atividades desenvolvidas no Projeto Bacia escola em Urucuia durante o ano de 2022 e introduzir alguns resultados considerados preliminares tendo em vista a expectativa de continuidade da pesquisa nos próximos anos e a escassez de recursos do momento atual. Os estudos foram norteados pela necessidade de dimensionar a geometria do aquífero, avaliar a dinâmica temporal e espacial da flutuação dos níveis d'água subterrânea e contribuir com a divulgação dos dados disponíveis e dos resultados alcançados diante a comunidade local. Foram realizadas atividades de levantamentos geofísicos, cadastro de poços tubulares, modelagem tridimensional da sub-bacia Urucuia e do aquífero Urucuia, além de análise das flutuações de nível d'água. A análise da dinâmica temporal dos níveis d'água dos poços monitorados possibilitou a separação de cinco comportamentos distintos entre o período observado (2011 a 2022), sendo considerados resultados preliminares: Grupo I (Declínios constantes com inversão brusca de comportamento); Grupo II (Declínios dos níveis d'água com tendência de Recuperação dos NA's nos últimos anos); Grupo III (Declínios constantes dos níveis); Grupo IV (Rebaixamentos sazonais) e; Grupo V (Comportamento sem padrão definido). Os resultados preliminares apontam para a necessidade de investigações in loco, visando levantar parâmetros hidráulicos nas regiões dos poços de monitoramento, aumentando a escala de estudo em áreas específicas no intuito de explicar alguns comportamentos nos Nas, bem como para a necessidade de modelagem tridimensional e transiente dos fluxos de água subterrânea e o entendimento dos mecanismos de recarga do aquífero, que são primordiais para compreender o balanço hídrico e nortear decisões dos órgãos gestores dos recursos hídricos.

ABSTRACT

The Urucuia aquifer has been the subject of studies by the Geological Survey of Brazil since 2006, and over these sixteen years it has contributed to the availability of reports and primary data of interest for hydrogeological studies in the western region of Bahia, standing out as one of the main contributions to the groundwater monitoring network (RIMAS) which currently has 75 dedicated wells. This report aims to present the activities carried out in the Bacia Escola Project in Urucuia during the year 2022 and to introduce some results considered preliminary in view of the expectation of continuity of the research in the coming years and the scarcity of resources at the current moment. The studies were guided by the need to dimension the geometry of the aquifer, evaluate the temporal and spatial dynamics of fluctuations in groundwater levels and contribute to the dissemination of available data and results achieved to the local community. Geophysical surveys were carried out, registration of tubular wells, three-dimensional modeling of the Urucuia sub-basin and the Urucuia aquifer, as well as analysis of water level fluctuations. The analysis of the temporal dynamics of the water levels of the monitored wells made it possible to separate five distinct behaviors between the observed period (2011 to 2022), considering preliminary results: Group I (Constant declines with sudden reversal of behavior); Group II (Declines in water levels with a tendency for NAs to recover in recent years); Group III (Constant declines in levels); Group IV (Seasonal Downgrades) and; Group V (Behavior with no defined pattern). Preliminary results point to the need for on-site investigations, aiming to raise hydraulic parameters in the regions of monitoring wells, increasing the scale of study in specific areas in order to explain some behaviors in NAs, the need for three-dimensional and transient modeling of water flows groundwater and the understanding of aquifer recharge mechanisms are essential to understand the water balance and guide decisions by water resources management bodies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa das principais feições do substrato da Bacia Sanfranciscana modificado de Campos&Dardene, 1997, e localização da área de estudo.

Figura 2. Principais projetos de mapeamento geológico e levantamento geofísico na área de afloramento do aquífero Urucuia.

Figura 3. Regiões homogêneas segundo a curva de permanência adimensionalizada resultado dos estudos publicados em SGB/CPRM, 2019.

Figura 4. Espectro de frequência do sinal magnetotelúrico. Modificado de Simpson e Bahr (2005).

Figura 5. Arranjo de eletrodos e bobinas na aquisição de dados magnetotelúricos, Ujjal K. Borah et al. (2015).

Figura 6. Transformação da série temporal em função de transferência através do processamento de dados MT (NEERAJ, 2019).

Figura 7. Mapa da região aflorante do Grupo Urucuia em diversos estados. As linhas verdes representam as linhas sísmicas, os pontos verdes representam as estações MT planejadas e os pontos vermelhos as estações MT adquiridas. Além disso, há representação dos poços estratigráficos de Correntina, Mambaí, Luís Eduardo Magalhães e Vila Coaceral.

Figura 8. Linhas das campanhas 1 e 2 para aquisição de dados geofísicos magneto telúricos em roxo.

Figura 9. Pseudoseções de resistividade aparente para o perfil da campanha 1, polarizações Zxy e Zyx.

Figura 10. Resultado da inversão dos dados da campanha 1 para até aproximadamente 15 km de profundidade.

Figura 11. Resultado da inversão dos dados da campanha 1 para até aproximadamente 15 km de profundidade.

Figura 12. Resultado da inversão dos dados da campanha 1 para até aproximadamente 90 km de profundidade.

Figura 13. Pseudoseções de resistividade aparente para o perfil da campanha 2, polarizações Zxy.

Figura 14. Resultado da inversão dos dados da campanha 2 para até 3 Km de profundidade.

Figura 15. Perfil de resistividade do poço 2-ANP-3-BA próximo à cidade de Luís Eduardo Magalhães, ver **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, amarrado à seção sísmica da linha 3 em tempo. A linha vermelha representa o embasamento interpretado.

Figura 16. Interpretação do embasamento (linha preta) na seção invertida de dados magnetotelúricos da campanha 2.

Figura 17. Resultado da inversão dos dados da campanha 2 para até aproximadamente 15 km de profundidade.

Figura 18. Resultado da inversão dos dados da campanha 2 para até aproximadamente 80 km de profundidade.

Figura 19. Modelo de elevação utilizado para geração da superfície topográfica.

Figura 20. Seções sísmicas interpretadas georreferenciadas.

Figura 21. Interpretação das seções sísmicas em verde, com indicação do topo do embasamento.

Figura 22. Interpretação sísmica (em verde) gravimétrica (pontos laranjas) do topo do embasamento.

Figura 23. Sólido 3D do embasamento modelado através dos dados de poços e de interpretação sísmica e gravimétrica.

Figura 24. Modelo 3D preliminar do embasamento e da Sub-bacia Urucuia.

Figura 25. Seção vertical mostrando os sólidos do embasamento e Sub-bacia Urucuia modelados, juntamente com o poço ANP 2-ANP-3-BA e a seção sísmica.

Figura 26. Seções geolétricas georreferenciadas.

Figura 27. Seção vertical exibindo a seção geolétrica interpretada.

Figura 28. Modelo 3D com superfície do nível d'água estimado.

Figura 29. Seção vertical exibindo a superfície do nível d'água modelada.

Figura 30. Seção vertical exibindo a seção geolétrica interpretada ao fundo, juntamente com o sólido do embasamento modelado em transparência. Os ajustes e detalhamento das unidades do embasamento serão executados na próxima etapa.

Figura 31. Seções gravimétricas.

Figura 32. Seção vertical mostrando seção gravimétrica interpretada e modelo 3D sobreposto. Nas próximas etapas serão realizados ajustes e refinamento das unidades do embasamento.

Figura 33. Localização das estações RIMAS (pontos verdes).

Figura 34. Gráfico de Flutuação dos NAs versus tempo do Grupo I e mapa de localização.

Figura 35. Gráfico de Flutuação dos NAs versus tempo do Grupo II e mapa de localização.

Figura 36. Gráfico de Flutuação dos NAs versus tempo do Grupo III e mapa de localização.

Figura 37. Gráfico de Flutuação dos NAs versus tempo do Grupo IV e mapa de localização.

Figura 38. Variação dos Níveis d'água subterrânea (azul) no PM-20 (Grupo IV) e das chuvas na estação pluviométrica local. Fonte: Oliveira, 2020.

Figura 39. Gráfico de Flutuação dos NAs versus tempo do Grupo V.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos e levantamentos Geofísicos realizados no aquífero Urucuia.....

Tabela 2 - Interpretação da profundidade do embasamento em cada estação MT.

Tabela 3 - Poços RIMAS e seus rebaixamentos ao longo do período monitorado.

Tabela 4 - Relação dos poços do Grupo IV com seus respectivos Níveis d'água na data do primeiro registro de monitoramento e distância do poço à drenagem mais próxima.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	111
2	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	Erro! Indicador não definido.
2.1	ESTUDOS GEOLÓGICOS	13
2.2	SÍNTESE DOS ESTUDOS E LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS	Erro! Indicador não definido.5
2.3	ESTUDOS HIDROLÓGICOS E HIDROGEOLOGÍCOS	Erro! Indicador não definido.21
3	ATIVIDADES REALIZADAS EM 2022.....	26
4	LEVANTAMENTO GEOFÍSICO – MAGNETOTELÚRICO.....	28
5	MODELAGEM TRIDIMENSIONAL PRELIMINAR (SUB-BACIA URUCUA).....	41
6	DINÂMICA DOS NÍVEIS D'ÁGUA SUBTERRÂNEA	Erro! Indicador não definido.
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
	REFERÊNCIAS	5859
	ANEXOS	
	ANEXO 1 - ANÁLISES ISOTÓPICAS	

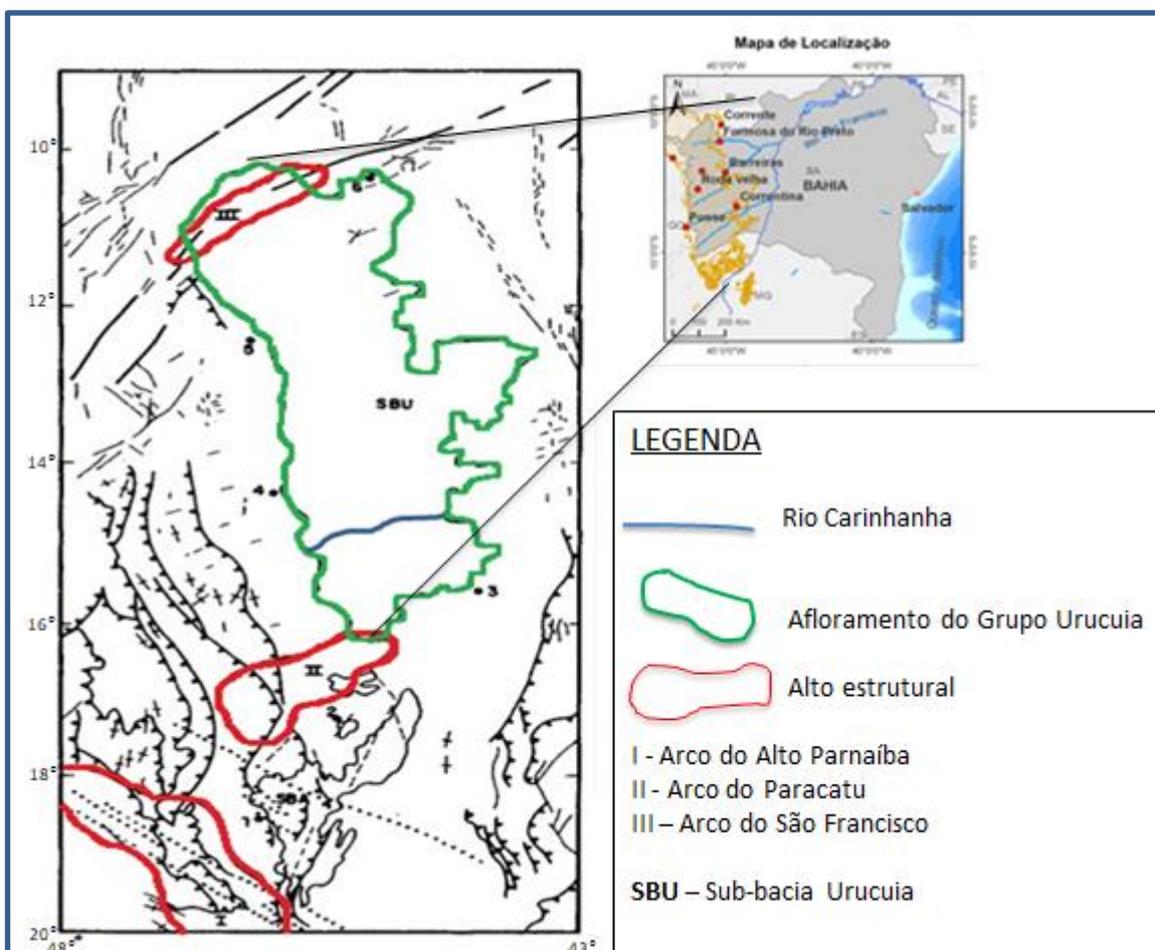
1. INTRODUÇÃO

O Serviço Geológico do Brasil (SGB) sob o Domínio da Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial, através do Programa Recursos Hídricos, ação Levantamento Hidrogeológico, área Recursos Hídricos Subterrâneos e subárea Pesquisa, estudo e cartografia hidrogeológica, disponibilizou recursos neste ano aplicados no Projeto Pesquisa, Estudos e Bacia Escola Hidrogeológica em Urucuia. Este relatório visa descrever as atividades desenvolvidas no ano corrente e apresentar alguns resultados. Os resultados são considerados ainda preliminares tendo em vista os seguintes fatores:

- O tempo de execução das atividades foi curto considerando a data de início da disponibilização dos recursos;
- Devido a contingências financeiras, parte dos recursos foi cortada;
- Os dados utilizados na modelagem 3D da Bacia Sanfranciscana (sub-bacia Urucuia) ainda são insuficientes para conclusão dos trabalhos. A proposição das atividades complementares a serem executadas em 2023 está elencada no item 7.
- A avaliação hidrogeológica também é considerada preliminar tendo em vista a necessidade de execução de duas importantes metas que seriam realizadas este ano, mas que tiveram de ser adiadas para o próximo período: Investigação *in situ* de características hidrológicas/hidrogeológicas e de uso e ocupação do solo e; execução de testes de aquífero para determinação de parâmetros hidráulicos, definição de tipos de sistemas aquíferos e identificação de possíveis barreiras hidráulicas, além da finalização da modelagem 3D para dimensionamento das reservas.

A área de estudo deste projeto compreende a área de afloramento do Grupo Urucuia, baseada na Carta geológica do Brasil ao Milionésimo de 2004, limitada ao Sul pelo rio Carinhanha. No mapa da figura 1, apresentado abaixo, encontra-se a localização da área de estudo que compreende uma área de aproximadamente 140000 km². Do ponto de vista geotectônico pertence à sub-bacia Urucuia, porção centro norte da Bacia Sanfranciscana. Ressalta-se que na porção norte, o Arco do São Francisco (III) representa um divisor entre a porção Sul da Bacia do Parnaíba e a Bacia Sanfranciscana. Esta área setentrional apresenta algumas características geomorfológicas e hidroclimatológicas que a distingue do restante da

bacia e necessita ser mais investigada também do ponto de vista geológico e hidrogeológico no intuito de caracterizar posicionamentos estratigráficos das Bacias do Parnaíba e Sanfranciscana e melhor compreender o comportamento hidrogeológico.



Fonte: Adaptado de Campos&Dardenne, 1997.

Figura 1. Mapa das principais feições do substrato da Bacia Sanfranciscana modificado de Campos&Dardene, 1997, e localização da área de estudo.

A seguir serão apresentados um breve levantamento do estado da arte sobre os conhecimentos geológicos, estudos e levantamentos geofísicos e estudos hidrogeológicos; descrição das atividades desenvolvidas neste projeto em 2022; levantamento geofísico magnetotelúrico e processamento dos dados; modelagem tridimensional preliminar da Bacia Sanfranciscana (sub-bacia Urucuia) e do aquífero Urucuia; análise preliminar da dinâmica dos níveis d'água subterrânea e; considerações finais.

2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

O levantamento ora proposto visa reunir o atual estado-da-arte do conhecimento sobre a geologia, estratigrafia e tectônica da Bacia Sanfranciscana, mais especificamente sobre o Grupo Urucuia, buscando levantar os aspectos de interesse para os estudos hidrogeológicos do aquífero Urucuia. Os estudos hidrogeológicos e mapas temáticos de interesse para a pesquisa do sistema hídrico, já realizados e publicados, também são levantados.

Serão abordados também os estudos geofísicos realizados no estado da Bahia em áreas de afloramento do Urucuia.

2.1. ESTUDOS GEOLÓGICOS

A Bacia Sanfranciscana foi alvo de estudos e pesquisas por vários autores. Segundo Sgarbi et al, (2001), os primeiros estudos dos sedimentos do hoje denominado Grupo Urucuia deve-se a Derby, (1879) na região do alto rio São Francisco. Contudo Hartt, (1870) já havia sugerido a correlação dos arenitos das serras de Ibiapaba e Araripe com os chapadões de Santa Maria, Urucuia, etc, colocando-os no cretáceo-senominiano, apud, Oliveira & Leonardos (1943), in CPRM, (2008). Os termos Camadas Itapecuru (Lisboa, 1914), Arenitos das Chapadas (Rego,1926), formações arenosas do Urucuia (Brito,1979) foram utilizadas para descrever a litologia dos Chapadões no Noroeste de Minas Gerais. Os termos Grupo e Formação Urucuia vêm sendo utilizados nas últimas décadas, sendo que o termo Grupo Urucuia proposto por Campos & Dardenne (1997a), composto pelas Formações Serra das Araras e Posse, tem sido o mais frequente utilizado nos estudos hidrogeológicos. Ressalta-se ainda o trabalho de Campos & Dardene, (1999), com a introdução das Fácies 1 e 2 para a Formação Posse.

Hasuy & Haralyi (1991), Chang et al (1992), Borges et al (1992), Campos & Dardenne (1997b), Fleischer (1998), Bonfim & Gomes (2004) contribuíram com estudos sobre origem e tectônica da Bacia Sedimentar, destacando-se Pinto et al. (2001) que publicaram o livro: Bacia do São Francisco – Geologia e Recursos Minerais, ratificando o termo Bacia Sanfranciscana para descrever a sua seção Fanerozóica, e englobando o Grupo Urucuia como sendo o quarto ciclo tectono-sedimentar. Sgarbi *et al.* (2001) fazem uma importante revisão bibliográfica sobre a Bacia Sanfranciscana, contextualizando-a nos eventos geológicos regionais e globais.

Trabalhos de mapeamentos geológicos regionais realizados na região são citados em CPRM, 2009, sendo realizados na escala de 1:500.000 (Moore, 1963; Projeto LETOS); 1:1.000.000 1:2.500.000 (Projeto Letos, Projeto Radam, folha SD-23 Brasília, Barbosa & Dominguez, (1996)). Na escala 1:250.000 pode-se citar o Projeto Mapas Metalogenéticos e de Previsão de Recursos Minerais realizado na Folha Santa Maria da Vitória, (Bomfim, 1984), além das folhas Santa Rita de Cássia SC.23–Z-C, Formosa do Rio Preto SC.23–Y-D, Andrade Filho et al, (1994), Curimatá SC.23-Z-A, Corrente SC.23-Y-B e Xique-Xique SC.23-Z-B na escala 1:250.000, Arcanjo, (1999), além de Coribe Folha SD.23-X-C-V, na escala 1:100.000, Morais Filho, (1997). CPRM, 2008 publica mapeamento geológico, na escala de 1:250.000, na região da *cuesta* da Serra Geral de Goiás e abrangendo as bacias dos rios Arrojado e Formoso. A Figura 2 mostra as áreas dos principais mapeamentos geológicos/geofísicos.

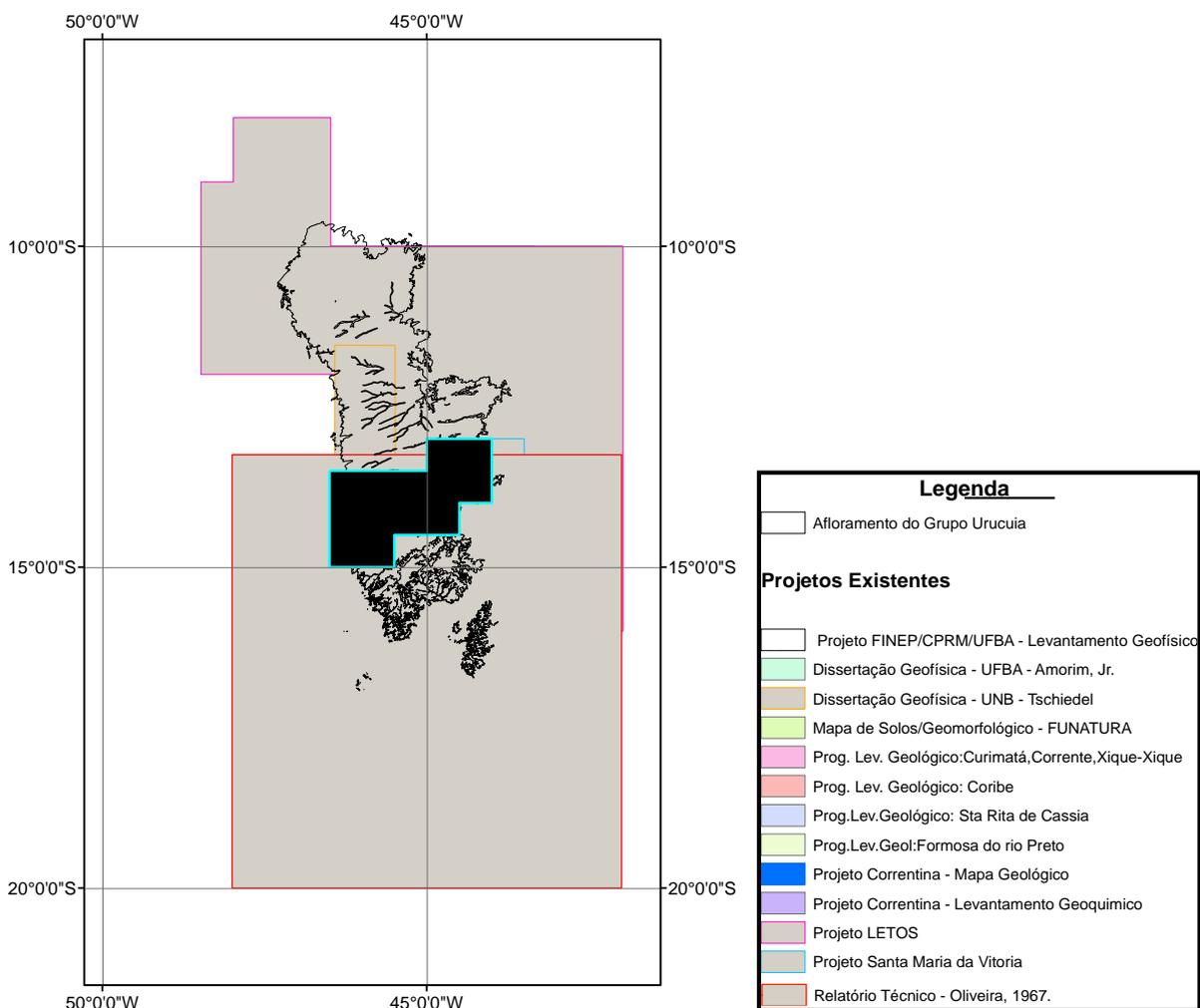


Figura 2. Principais projetos de mapeamento geológico e levantamento geofísico na área de afloramento do aquífero Urucuia.

2.2. SÍNTESE DOS ESTUDOS E LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS

Alguns levantamentos geofísicos já foram realizados em áreas específicas de afloramento do aquífero Urucuia, a exemplo de CPRM (2008), Gaspar (2006), Tschiedel (2004), Amorim Junior & Lima (2003), e Amorim Junior (2003), Lima (2000), além dos levantamentos geofísicos regionais como o levantamento gravimétrico no estado da Bahia, Gomes & Mota (1980), o levantamento Gravimétrico na Bacia do São Francisco (Marinho et al., 1991), e o estudo Magnetotelúrico da Bacia do São Francisco realizado pela PETROBRAS (Porsani e Fontes, 1992), ver tabela1. Há ainda os levantamentos sísmicos executados pela PETROBRAS na Bacia Sanfranciscana, e adquiridos para consulta, de acordo com dados disponibilizados no BDEP da ANP (Banco de Dados de Exploração e Produção da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), que foram interpretados e serão apresentados no próximo relatório.

Apesar da existência destes levantamentos ainda há questões a serem respondidas sobre o arcabouço tectônico do aquífero Urucuia e visando contribuir com o entendimento do mesmo foram realizados neste projeto levantamentos magnetotelúricos na porção norte do aquífero, com as respectivas estações dispostas ao longo de duas linhas de direções E-W e N-S, aproximadamente. Os dados adquiridos estão em fase de processamento e interpretação, ver considerações no ítem 4 deste relatório.

Tabela 1. Estudos e levantamentos Geofísicos realizados no aquífero Urucuia.

AUTOR	ANO	EXECUTOR	MÉTODO	ÁREA	ESPESSURA
Porsani, J. & Fontes, S.	1992	Observatório Nacional/ Petrobrás	43 sondagens magnetotelúricas	Norte do estado de MG (Zona de confluência dos rios Paracatu e S. Francisco, estendendo-se para NW até	Relatório de resultados finais não disponíveis para consulta.
Lima, O. A. L.	2000	CPGG/UFBA A/SR H	50 SEV, com medidas simultâneas da resistividade e cargabilidade elétricas aparentes	Bacia do Rio do Cachorro, afluente do rio Grande	400m a 180m
Nascimento, K.R.F. Amorim Jr,V.	2003	SRH/CPGG UFBA/CPG	80 sondagens elétricas verticais (SEV's) de resistividade e IP	Bacia do rio das Fêmeas, afluente do rio Grande	400 -100m
Bomfim, L. F. C.; Gomes, R. A. D.	2004	CPRM	Gravimetria/1980 (Interpretativo)	Sub-bacia Urucuia	1000-1500m
Tschiedel, M.W.	2004	UNB	Sondagens eletromagnéticas	Porção central da bacia sanfranciscana	300-720m (N-S) e 300-380m (E-W)
Gaspar, M.T.P/	2006/2007	UNB	eletromagnético com medições no domínio do tempo	Sub-bacia Urucuia	100-600m
Olivar A.L. de Lima(CPRM,2008)	2007	CPRM/ UFBA/FINE	65 sondagens elétricas verticais de IP-resistividade e Gravimetria	Sub-bacias hidrográficas dos rios Arrojado, Formoso	500m (espessura saturada)
ANA, 2017	2017	ANA/ENGE CORPS	149 SEV, 200pontos TDEM, 220 estações gravimétricas	Bacia Sanfranciscana	Até 375m
ANP	2009	ANP/GEOKI NETICS	Levantamento Sísmico	Bacia Sanfranciscana	Dados cedidos pela ANP em fase de interpretação pelo SGB

SGB/CPRM	2018/2022	SGB	Levantamento Magnetotelúrico: 57 pontos	Porção Norte da Bacia Sanfranciscana	Em processamento
-----------------	------------------	-----	---	--------------------------------------	------------------

2.3 ESTUDOS HIDROLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS

Os trabalhos voltados à caracterização hidrogeológica do aquífero Urucuia são relativamente recentes, sendo iniciados nas últimas duas décadas. Inicialmente, os principais estudos foram executados principalmente pela Superintendência de Recursos Hídricos do estado da Bahia (SRH), atual Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA), concentrando-se nas sub-bacias do rio das Fêmeas, rio do Cachorro e rio de Janeiro na bacia do rio Grande, tendo como principal motivação a determinação das outorgas na região. Neste período foram publicados os seguintes trabalhos: Santana e Lordêllo (1999), motivados por denúncias da mídia sobre a morte do rio Correntina (relata assoreamento, desvios de drenagem, barramento de terra nas bacias Arrojado e Formoso, diminuição das vazões a partir de 1993 e compactação do solo por agricultura mecanizada); Lima (2000), na bacia do rio Cachorro, verifica que a interação hidráulica entre o aquífero e rios estão praticamente desacoplados (porção ocidental) e a exploração de água subterrânea tem pouca influência sobre o rio, e forte relacionamento entre esses fluxos na porção oriental; Pimentel et al, 2000, calculou a recarga média de 20% da precipitação média anual na sub-bacia do rio das Fêmeas, alertando sobre o comprometimento da capacidade de recargas devido a desmatamento; Schuster, et al (2002), Schuster, et al (2002)a, instala 09 (nove) estações pluviométricas e monitora NAs em 18 (dezoito) poços na bacia do rio do Cachorro, faz uma modelagem temporal e espacial das águas subterrâneas, interpretam o aquífero Araras como livre e o Posse como semi-confinado, sendo concluído que há “grande probabilidade” de tratar-se de um aquífero freático ou não-confinado, além de homogeneidade dos aquíferos quando comparados bacia rio dos Cachorros e bacia rio das Fêmeas, ressaltando que os altos valores de T e S favorecem a conexão rio/aquífero; Bahia (2003b), publica os resultados dos estudos desenvolvidos na bacia do rio das Fêmeas e conclui que devido à demanda crescente de água para as atividades agrícolas, acarretará no alcance do limite máximo outorgável de algumas drenagens locais, também estabelece o raio de interferência dos poços bombeados (dependente de T,S e do tempo de bombeio) que seria na faixa

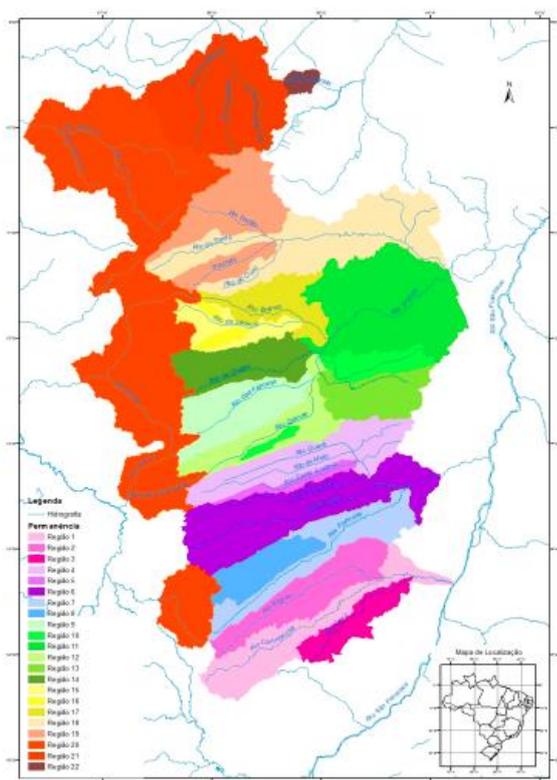
de 2000m a 2500m após 10 horas de bombeamento e recomenda uma observação de no mínimo 10 anos para perceber um rebaixamento significativo de nível d' água, sendo as taxas de bombeamento da época ainda considerados pouco estressantes e encontrando valores diferentes de T e S para as Formações Araras e Posse.

Posteriormente o SGB contribuiu com dois estudos (CPRM, 2008 e CPRM, 2012), nas sub-bacias dos rios Arrojado e Formoso, bacia do rio Corrente, afluentes da margem esquerda do rio São Francisco.

Em 2009 o SGB inicia a implantação do Projeto RIMAS, que pode ser considerada atualmente uma das maiores redes de monitoramento de aquífero no país, tendo sido implementada em três fases: 1) Fase 1: 38 poços instalados nos anos 2011/2012 na bacia do rio Grande; 2) Fase 2: nesta segunda fase a rede foi ampliada em mais 27 poços, incluindo a bacia do rio Corrente e Tocantins e; 3) Fase 3: 10 poços instalados na bacia do rio Carinhanha. Atualmente a rede conta com com 75 poços dedicados. Os dataloggers instalados geram dados horários dos níveis d'água e a data inicial de observação é de 07/09/2011 até o presente. Vale ressaltar que a data inicial de cada estação varia obviamente conforme a data de sua instalação e, devido a problemas de caráter diversos, há lacunas nos dados. O anexo 1 apresenta a série histórica dessas estações. Além do monitoramento dos níveis d'água, a rede contempla ainda o monitoramento qualitativo das águas subterrâneas a partir de amostragens periódicas, mas ainda não sistemáticas, contemplando os seguintes parâmetros: Alumínio (Al), Arsenio (As), Berilo (Be), Bicarbonato (HCO_3), Boro (B), Calcio (Ca), Cadmio (Cd), Cloreto (Cl), Zinco (Zn), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Fluoreto (F), Ferro total (Fe), Mercurio (Hg), Potássio (K), Magnésio (Mg), Manganês (Mn), Sódio (Na), Níquel (Ni), Nitritos (NO_2), Nitratos (NO_3), Chumbo (Pb), Selenio (Se), Silica (SiO_2), Sulfato (SO_4), Fosfato (PO_4), Bário (Ba), Cobalto (Co), Estanho (Sn), Estrôncio (Sr), Lítio (Li), Titânio (Ti), Vanádio (V), Molibdênio (Mo), Antimônio (Sb), Brometo (Br), Prata (Ag), Alcalinidade Total, Dureza total, Sólidos dissolvidos totais e pH. Análises hidroquímicas também foram feitas na bacia do rio corrente em poços produtivos particulares e foram publicados em CPRM,

2007. Análises químicas para a investigação de agroquímicos também foram realizadas na bacia do rio Corrente (em poços produtivos), CPRM, 2012, em duas campanhas pré e pós-período das chuvas, não tendo sido detectado contaminações da água subterrânea, o mesmo ocorrendo para 33 poços da RIMAS amostrados em 2015, para as mesmas varreduras.

Além do monitoramento hidrogeológico foi implantado desde 2013, para complementar as redes estaduais e federal, a Rede hidrometeorológica do aquífero Urucuia (RHUrucuia) composta por 12 estações climatológicas, 17 pluviométricas e 17 fluviométricas que entraram em operação desde 2014 (a estação fluviométrica Bananeiras possui apenas 13 medições de vazão em 2016/2017 e, portanto, está desativada). Nestas estações são obtidos dados de Temperatura do Ar ($^{\circ}\text{C}$), Pressão atmosférica (hPA), Umidade relativa do ar (%), Radiação solar (W/m^2), Velocidade (m/s) e direção dos ventos e precipitação (mm) a cada 15 minutos, além de cota e vazão diárias de rios. Estes dados encontram-se disponíveis em <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Monitoramento-Hidrologico-e-Hidrogeologico/Rede-Hidrometeorologica-do-Aquifero-Urucuia---RHUrucuia-6388.html>, onde pode ser acessado também o relatório técnico SGB/CPRM, 2021, que apresenta uma avaliação dessa rede, consistência e análise dos dados pluviométricos e fluviométricos. A caracterização hidrológica da região do aquífero Urucuia baseada em dados secundários é apresentada em SGB/CPRM, 2019, onde foram identificadas 22 regiões homogêneas. Conclui-se nestes estudos que em geral há conformidades entre os resultados da série histórica secundária (CPRM, 2019) e as análises das séries temporais da RHUrucuia, principalmente no que diz respeito às relações entre vazão de base e vazão de longo tempo, e das razões entre as vazões Q90 e Q50, sendo as maiores diferenças observadas em termos do coeficiente de escoamento, sugerindo continuidade dos estudos. Sugere-se ainda que as concessões de outorga pudessem se basear em valores únicos para cada região homogênea (sub-bacias), inicialmente 50% da Q95. As regiões homogêneas sugeridas neste estudo são apresentadas na figura 3.



Fonte: SGB/CPRM, 2019

Figura 3. Regiões homogêneas segundo a curva de permanência adimensionalizada resultado dos estudos publicados em SGB/CPRM, 2019.

Estudos isotópicos também foram contemplados nas pesquisas do aquífero Urucuia: 27 amostras de águas superficiais e subterrâneas com análise de ^{18}O e ^2H (Aquino et al., 2003), 106 amostras de águas subterrâneas, superficiais e de chuva (1) foram coletadas para análises de ^{18}O e ^2H pelo SGB e publicadas em CPRM, 2008. Em 2016 foram coletadas 52 amostras de rios, 01 amostra de lagoa, 23 amostras de águas subterrâneas e amostras de chuva para análises de ^{18}O e ^2H e ^3H (realizadas em apenas três das amostras de rio e cinco dentre as amostras de poços) e foram interpretados por Oliveira, 2020.

Em 2013 a ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico) publica os estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do aquífero Urucuia com proposições de modelo de Gestão Integrada (ANA, 2013), constando de três volumes sobre caracterização geral do meio físico, levantamento hidrogeológico e vulnerabilidade do risco de contaminação, e estratégias de manejo sustentável. Mais recentemente pode-se citar o estudo fomentado pela AIBA/ABAPA/IAIBA/Prodeagro (Montalvani, et

al., 2019) onde além da caracterização dos recursos hídricos ressalta-se a modelagem do aquífero Urucuia. No site <http://obahia.dea.ufv.br/#/about> encontra-se a plataforma OBahia – Inteligência Territorial e Hídrica para o Oeste da Bahia que disponibiliza as seguintes ferramentas: Servidor de Mapas, Previsão do Início da Estação Chuvosa, Previsão de vazões mínimas e estresse hídrico, Lucratividade rural, Séries temporais de mapas, Visualização dos dados dos modelos de águas subterrâneas e Governança.

Existem ainda alguns estudos (dissertações e teses) desenvolvidos nas bacias supracitadas ou de caráter regional, com foco em diversos aspectos do aquífero Urucuia a exemplo de: AMORIM JUNIOR, 2003; Gaspar, 2006; ALBUQUERQUE, 2009; Barbosa, 2016; Cunha, 2017; Oliveira, 2020; Ramos, 2020; Vieira, 2021; Além dos parâmetros hidrodinâmicos, balanço hídrico e dados que contribuem para a caracterização da geometria do aquífero que foram publicados nos diversos estudos, destaca-se a delimitação dos subtipos de aquíferos em livre regional, suspenso local, confinado ou semiconfinado e livre profundo (Gaspar,2006). O semiconfinamento tem sido atribuído aos níveis silicificados, mas a extensão dessas áreas semiconfinadas tem apresentado divergências. A diferenciação entre as formações Posse e Serra das Araras tem sido dificultada pela pouca quantidade de perfis litológicos e perfilagens geofísicas dos poços.

3. ATIVIDADES REALIZADAS EM 2022

Para o ano de 2022 foram estabelecidos os seguintes objetivos de pesquisa no Projeto Urucuia: dimensionamento das reservas do aquífero, compreensão dos fatores determinantes na flutuação dos níveis d'água subterrânea e divulgação dos resultados e da rede RIMAS à comunidade local. Conforme já mencionado, as atividades previstas para o período não foram realizadas em sua totalidade. A seguir são citadas as atividades desenvolvidas:

- Cadastramento de pontos d'água: foram cadastrados 198 novos poços localizados na parte setentrional da área, onde havia uma lacuna de informações. Seriam necessárias mais duas campanhas de campo para finalizar a atividade. Ainda neste contexto, reestabeleceu-se os contatos para concretização do convênio SGB/AIBA que poderá fornecer informações sobre os poços da região.

- Levantamento geológico do Grupo Urucuia utilizando imagem de drones nas áreas aflorantes da escarpa da Serra Geral. Visando a utilização das imagens para interpretação de feições geológicas, foi realizada uma campanha de campo com a equipe da DICART. Esta atividade foi precedida de um treinamento de três dias na SUREG-SA (Curso de Inspeção e mapeamento com drone) com participação além da equipe do Projeto Urucuia de outros colaboradores da empresa. Esta metodologia de mapeamento é considerada inovadora na empresa, e necessitará de outro treinamento da equipe visando a interpretação das imagens.

- Levantamento Geofísico: foi realizada uma campanha de campo visando a conclusão do levantamento geofísico magnetotelúrico iniciado em 2018. Este levantamento está sendo considerado conclusivo, ver item 4 deste relatório.

- Modelagem tridimensional da Bacia Sanfranciscana e do aquífero Urucuia. A equipe DIENGE está elaborando, a partir dos dados disponíveis, o modelo 3D da Sub-bacia Urucuia construído a partir do software Leapfrog Geo v.2021.2.5, ver item 5 deste relatório.

- Análise da rede de monitoramento RIMAS e da flutuação dos níveis d'água subterrânea. De forma preliminar algumas considerações encontram-se no item 5 deste relatório. Está prevista para o próximo período a realização de testes de aquífero e perfis hidrogeológicos que irão auxiliar na compreensão da dinâmica dos níveis d'água do aquífero.

- Os dados utilizados na pesquisa estão sendo georreferenciados e com a colaboração da equipe DICART pretende-se disponibilizá-los no Website do SGB.

4. LEVANTAMENTO GEOFÍSICO – MAGNETOTELÚRICO

4.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O método magnetotelúrico (MT) é uma técnica de exploração geofísica passiva que objetiva estimar as propriedades elétricas das rochas. Diferente dos métodos geoeletricos ativos, como os de eletrorresistividade, o MT faz uso de fontes naturais que causam variações no campo eletromagnético terrestre.

Para frequências abaixo de 1 Hz, as fontes naturais têm origem na interação entre ventos solares e magnetosfera que, ao produzirem oscilações nestes, geram ondas eletromagnéticas. Por outro lado, frequências maiores que 1 Hz são geradas por atividades elétricas de relâmpagos de regiões distantes cujos sinais eletromagnéticos se propagam pela zona entre a ionosfera e a superfície da terrestre (

Figura 4). Em torno de 1 Hz no espectro de potência há uma zona conhecida como banda morta onde predomina uma baixa razão sinal ruído que pode se manifestar nas curvas de sondagem de MT por meio da redução da qualidade do dado (SIMPSON; BAHR, 2005).

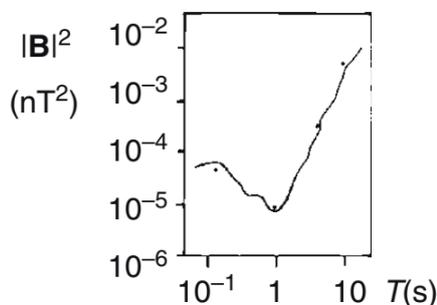


Figura 4. Espectro de frequência do sinal magnetotelúrico. Modificado de Simpson e Bahr (2005).

No campo, são usados eletrodos para medir a diferença de potencial na direção x (E_x) e y (E_y). Dessa forma, as variações do campo magnético são medidas por meio 3 bobinas de indução perpendiculares entre si (B_x , B_y e B_z). Todas as bobinas e eletrodos estão conectados a um *datalogger* que fará o registro dos dados, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

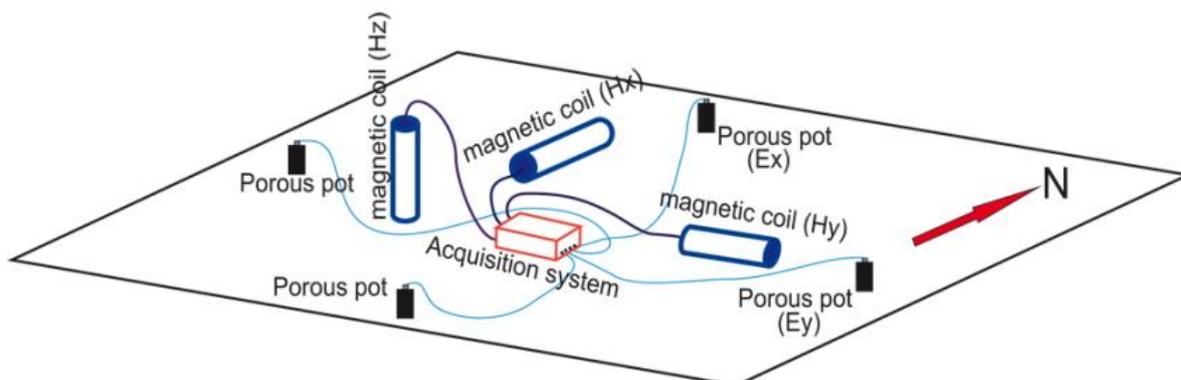


Figura 5. Arranjo de eletrodos e bobinas na aquisição de dados magnetotelúricos, Ujjal K. Borah et al. (2015).

A teoria do método MT baseia-se em algumas hipóteses que são uma aproximação simplificada do comportamento eletromagnético da Terra (CAGNIARD, 1953; GEORGE V.; FRANK C., 1966):

- i. Os campos eletromagnéticos obedecem às equações de Maxwell.
- ii. A Terra não gera energia eletromagnética, mas apenas a dissipa ou absorve.
- iii. Todo campo pode ser tratado como conservativo longe de suas fontes.
- iv. Os campos eletromagnéticos utilizados, gerados por correntes ionosféricas que estão relativamente distantes da superfície terrestre, podem ser considerados como ondas uniformes e plano-polarizadas que incidem aproximadamente verticalmente sobre a superfície da Terra. Essa premissa, no entanto, pode ser violada em regiões polares e equatoriais.
- v. Não há acúmulo de cargas no interior da subsuperfície considerando um modelo plano paralelo estratificado. Entretanto essa premissa não é válida em ambientes mais complexo com comportamento multidimensional.
- vi. Cargas são conservadas e a Terra se comporta como um condutor ôhmico.
- vii. Correntes de deslocamento são quase estáticas para períodos de sondagens MT. Portanto essas podem ser negligenciadas em relação às correntes de condução.
- viii. As variações na permissividade elétrica e na permeabilidade magnética das rochas podem ser desconsideradas comparadas às variações das condutividades das rochas.

Os componentes ortogonais dos campos elétricos (E_x e E_y) e magnético (H_x e H_y) estão relacionados por meio de um tensor de impedância complexo Z no domínio da frequência:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Z também é conhecido como função de transferência e estabelece uma relação linear entre as propriedades físicas medidas no domínio da frequência.

Por ser complexo, Z possui uma parte real e outra imaginária, portanto cada componente tem não apenas magnitude, mas uma fase associada. Dessa forma, a função de transferência é costumeiramente representada pela sua resistividade aparente $\rho(\omega)$ e pela sua fase $\phi(\omega)$ dadas por (CAGNIARD, 1953):

$$\rho(\omega) = (1/\omega \mu) |Z(\omega)|^2 \quad (2)$$

$$\phi(\omega) = \tan^{-1}(\text{Im}(Z)/\text{Re}(Z)) \quad (3)$$

onde ω é a frequência angular, μ é a permeabilidade magnética e $\text{Im}(Z)$ e $\text{Re}(Z)$ são as partes imaginária e real do tensor de impedância, respectivamente.

4.2. PROCESSAMENTO

O objetivo do processamento magnetotelúrico é estimar a função de transferência mais representativa a partir dos dados eletromagnéticos coletados em campo (). Na sua forma mais simples, esse processamento pode ser feito dividindo a série temporal em janelas, convertendo o dado de cada janela para o domínio da frequência e usando uma regressão robusta para estimar Z a partir da equação 1 (EGBERT; BOOKER, 1986).

Contudo, fontes artificiais de ruído podem persistir no dado, distorcendo os valores na curva da função de transferência. Uma forma de minimizar esses ruídos é realizar a aquisição com duas estações, uma local e outra remota. Dessa forma, seria possível desacoplar o ruído do sinal, que estaria descorrelacionado entre as duas estações.

Mas nem sempre é viável a realização de aquisição com duas estações simultâneas. Neste trabalho foi utilizado o fluxo de processamento proposto por Weckmann *et al.* (2005), que se baseia na inspeção de vários elementos estatísticos (tais como densidade do espectro de potência, coerências e distribuição das funções de respostas) das janelas de dados convertidas ao domínio da frequência. O processamento foi feito utilizando-se um pacote para *Python* chamado *Resistics*, desenvolvido e mantido por Neeraj Shah.

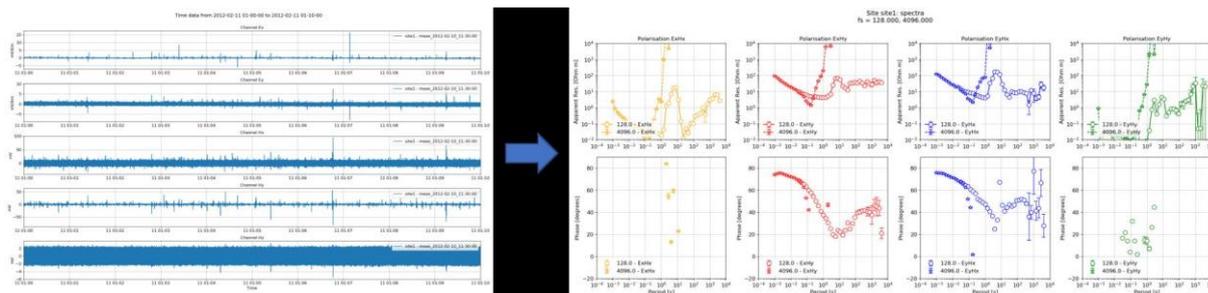


Figura 6. Transformação da série temporal em função de transferência através do processamento de dados MT (NEERAJ, 2019).

4.3. INVERSÃO

Após a obtenção das funções de transferência, que relaciona resistividade aparente (ρ) e phase (ϕ) a uma dada frequência (ω) ou período T , a última etapa do tratamento de dados consiste na inversão desses dados geofísicos. De modo geral, a inversão de dados MT se propõe a estimar o modelo geoeletrico real, em profundidade.

O algoritmo de inversão utilizado foi o *OCCAM 2D*, que congrega vários algoritmos publicados e foi desenvolvido pelo *Marine EM Laboratory* (CONSTABLE; PARKER; CONSTABLE, 1987; DEGROOT-HEDLIN; CONSTABLE, 1990; PASTANA DE LUGÃO; WANNAMAKER, 1996; WANNAMAKER; STODT; RIJO, 1987). O *OCCAM 2D*, no entanto, exige como entrada alguns arquivos em formatos bem definidos e que devem ser criados pelo usuário. Esses arquivos são *Data File* (que contém os dados para inversão), *Mesh File* (com a informação geométrica da malha do modelo), *Model File* (que faz o detalhamento de como os blocos de *mesh* são divididos no bloco do modelo) e *Startup File* (contém parâmetros de controle para inversão e o modelo inicial). A criação desses arquivos e a plotagem do resultado final da inversão foi possível através do pacote *Python Mtpy* (KRIEGER; PEACOCK, 2014).

4.4. AQUISIÇÃO

O objetivo primário da aquisição de dados magnetotelúricos na região do Sistema Aquífero Urucuia foi definir o arcabouço estrutural da porção norte da Bacia Sanfranciscana, que carece de dados geofísicos e geológicos que alcancem zonas mais profundas. Com isso, seria possível entender o delineamento do embasamento nessa região, cujo estudo já havia sido realizado nas porções centro e sul através de linhas sísmicas. De forma secundária, esperava-se também alguma resposta em termos de

características geolétricas que pudessem indicar a base do Grupo Urucuia, ou ao menos uma separação entre os Grupos Urucuia e Areado.

Nesse sentido, o método magnetotelúrico se mostrou promissor, já que permite a investigações em grandes profundidades e tem um baixo custo relativo a outros métodos de exploração, como o método sísmico.

Ao todo, foram planejadas 90 estações distribuídas em duas linhas com direções aproximadamente Norte-Sul e Leste-Oeste (Figura 7). Foram realizadas 3 campanhas de campo, com a medição de 25 estações na primeira campanha, 19 na segunda e 13 na terceira.

Como a terceira campanha ainda está em fase de processamento de dados, mostraremos neste relatório o resultado das duas primeiras campanhas.

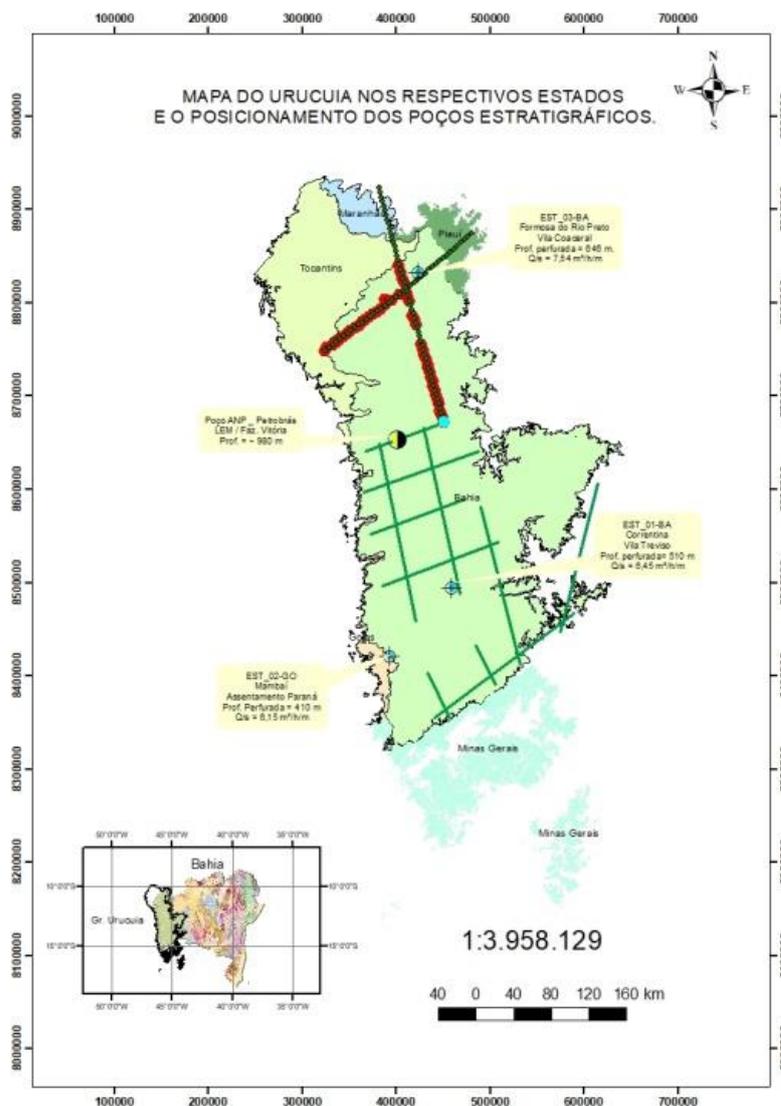


Figura 7. Mapa da região aflorante do Grupo Urucuia em diversos estados. As linhas verdes representam as linhas sísmicas, os pontos verdes representam as estações MT planejadas e os pontos vermelhos as estações MT adquiridas. Além disso, há representação dos poços estratigráficos de Correntina, Mambaí, Luís Eduardo Magalhães e Vila Coaceral.

- Campanha 1

A campanha 1 foi feita em um perfil Norte-Sul desde a estação URU42 até a URU71 e se estende por 175 Km, ver 8. Contudo, algumas estações precisaram ser descartadas no processamento devido ao excesso de ruído ambiental ou problema no sinal de algum dos canais. Dentre todas as estações levantadas durante a Campanha 1, quinze apresentaram dados coletados de boa qualidade.

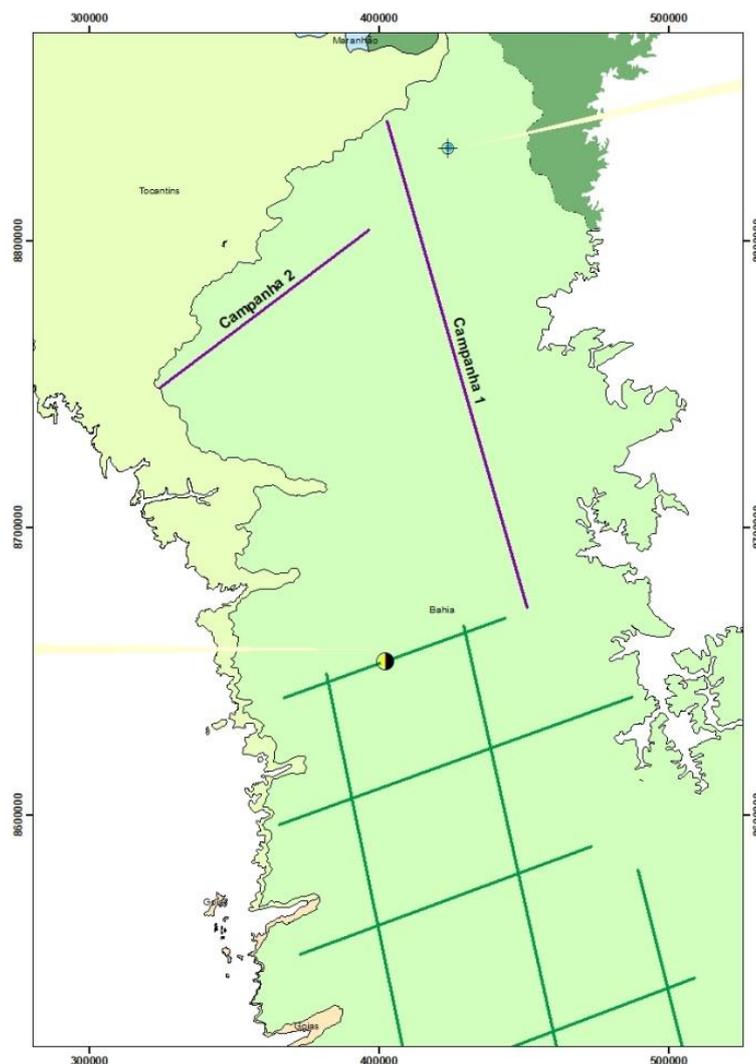


Figura 8. Linhas das campanhas 1 e 2 (em roxo) para aquisição de dados geofísicos magnetotelúricos.

Após o processamento dos dados das estações validadas foi possível construir as pseudoseções de resistividade aparente para essa campanha, representada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** As seções representam as duas polarizações diferentes Z_{xy} e Z_{yx} , que são modos de representar o tensor de impedância magnética.

Essas seções nos mostram um forte contraste lateral de resistividade em praticamente todos os períodos analisados. Esse não seria um comportamento esperado para a Bacia Sanfranciscana, já que trabalhos como os de Campos e Dardenne (1997) e dados sísmicos obtidos sugerem um modelo tipo *sag*. Portanto, esse contraste em grandes profundidades pode indicar algum excesso de ruído antrópico ou ainda um modelo multidimensional com geometria complexa que é difícil de ser estimado com as ferramentas de processamento e inversão disponíveis.

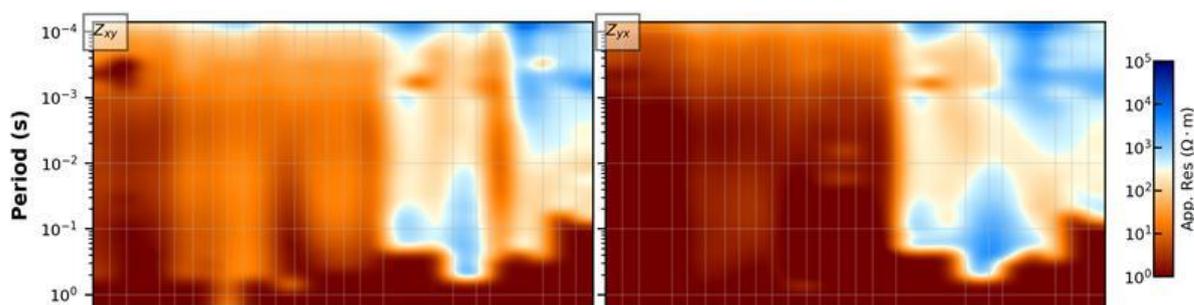


Figura 9. Pseudoseções de resistividade aparente para o perfil da campanha 1; polarizações Z_{xy} e Z_{yx} .

Procedeu-se à inversão dos dados de processados. A inversão fez uso dos modos TM e TE e de um modelo com 9329 parâmetros. A malha escolhida é formada por 256 nós horizontais, 90 nós verticais.

A partir da análise da figura 10, que mostra o resultado da inversão em níveis de profundidades que permitem uma inferência da geometria da bacia, podemos concluir que não é possível notar um contraste de resistividade vertical que possa marcar o limite entre a camada de sedimentos e o embasamento cristalino. O esperado seria um abrupto aumento da resistividade com a profundidade entre 500 m e 1000 m, região provável para a presença do cristalino. Da mesma forma, nenhuma característica geolétrica nesta seção que possa indicar a diferenciação de camadas dentro do pacote sedimentar.

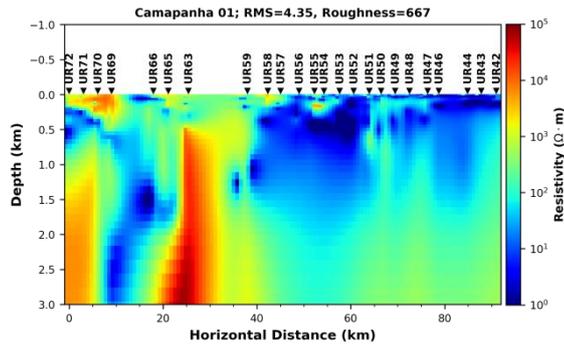


Figura 10. Resultado da inversão dos dados da campanha 1 para até aproximadamente 15 km de profundidade.

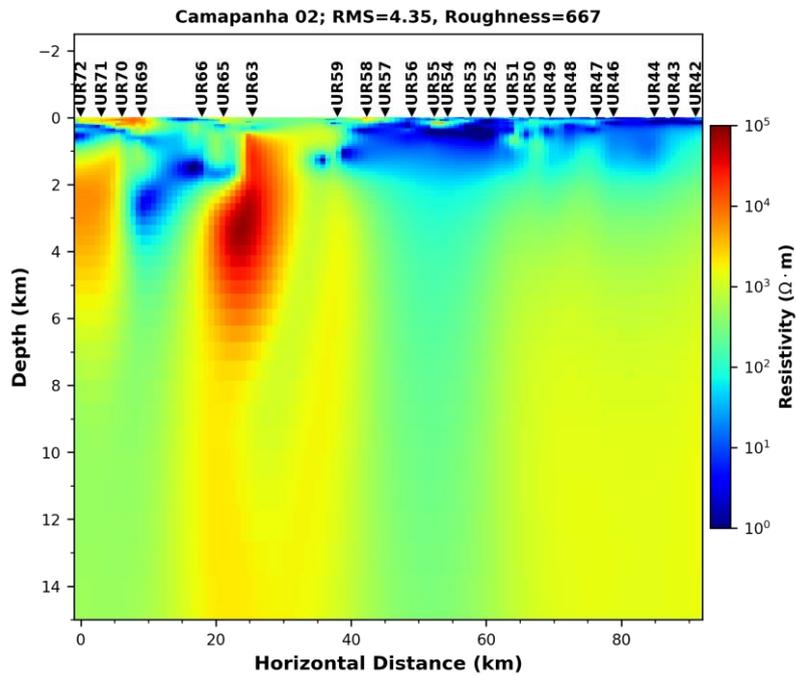


Figura 11. Resultado da inversão dos dados da campanha 1 para até aproximadamente 15 km de profundidade.

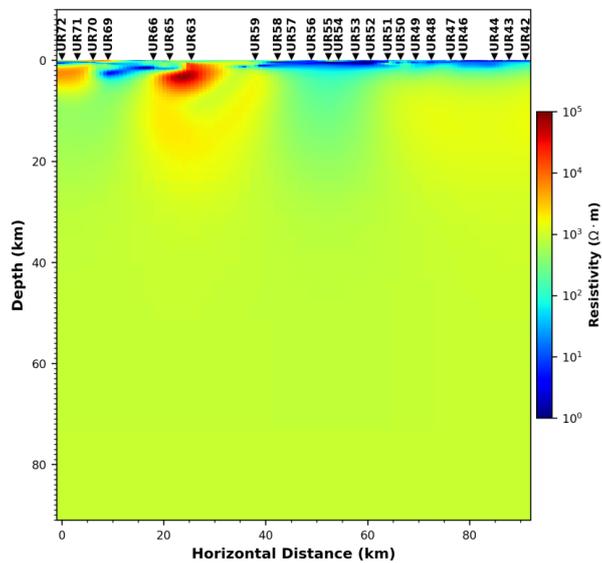


Figura 12. Resultado da inversão dos dados da campanha 1 para até aproximadamente 90 km de profundidade.

As figuras 11 e 12 mostram o resultado da inversão para profundidades maiores, correspondentes a aproximadamente 15 e 90 km, respectivamente. Essas figuras colocam o resultado dos dados magnetotelúricos em um contexto mais tectônico e sua análise serve como ilustração, mas está além do escopo deste trabalho.

- Campanha 2

Os levantamentos da campanha 2 foram realizadas ao longo de um perfil de direção Oeste-Leste, desde a estação URU01 até a URU19, com extensão de 100 km aproximadamente (**Erro! Fonte de referência não encontrada.8**). Durante a análise dos dados de campo, uma estação precisou ser descartada por inconsistência nos mesmos, resultando em um total de 18 estações úteis para o processamento.

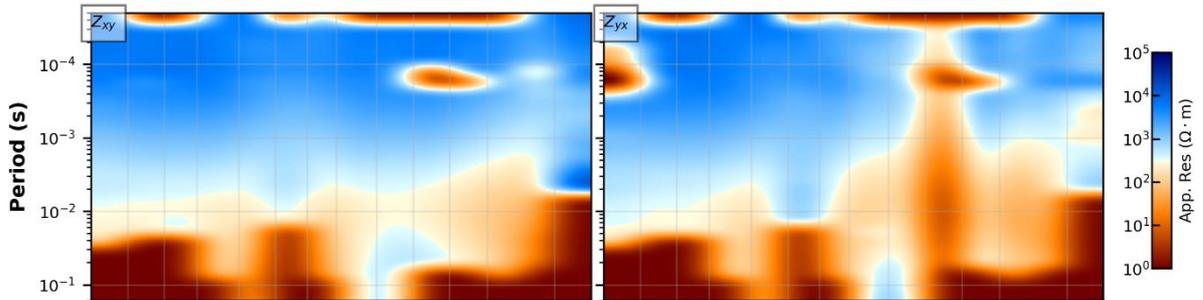


Figura 2. Pseudoseções de resistividade aparente para o perfil da campanha 2, Polarizações Zxy e Zyx.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra pseudoseções de resistividade aparente do perfil da campanha 2 para as polarizações Zxy e Zyx. Pode-se perceber uma estrutura mais homogênea lateralmente no interior do pacote sedimentar do que nos dados da campanha 1. No entanto, do ponto de vista geológico, ainda é um dado difícil de se interpretar, portanto a necessidade da inversão geofísica.

Mais uma vez, a inversão foi feita utilizando os modos TM e TE, com 8953 parâmetros. Há 246 nós horizontais e 90 nós verticais na malha escolhida.

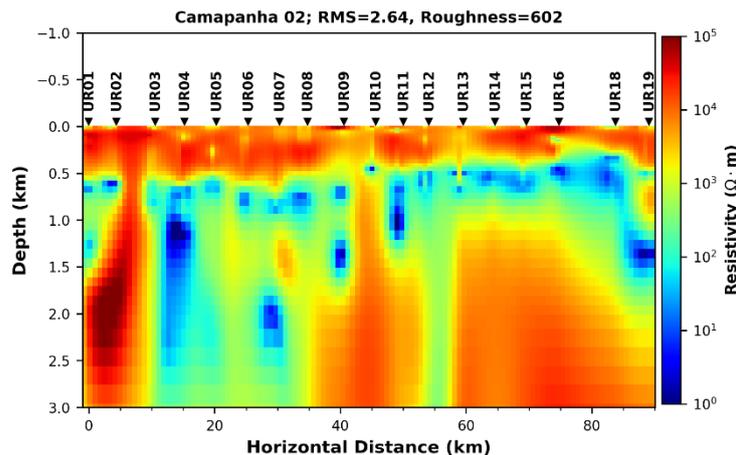


Figura 14. Resultado da inversão dos dados da campanha 2 para até 3 Km de profundidade.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o resultado da inversão dos dados magnetotelúricos da campanha 2 para profundidades de até 3 km. Nesse caso, nota-se um comportamento geoeletrico condizente com o de uma bacia. Três camadas geoeletricas podem ser destacadas. Há um pacote mais resistivos e superficial, em torno de $10^4 \Omega.m$, de espessura variando entre 400 e 500 m. Abaixo deste há uma camada mais condutiva, com valores de resistividade em torno de $10^2 \Omega.m$ e espessura variando de 100 a 500 m. Sotoposto a essa camada condutiva há um pacote predominantemente resistivo, mas com grande variabilidade lateral de resistividade.

Esse mesmo padrão de resistividade pode ser observado em um dado de poço da Bacia Sanfranciscana. O poço 2-ANP-3-BA (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), perfurado próximo à cidade de Luís Eduardo Magalhães no oeste da Bahia sobre uma linha sísmica, apresenta o mesmo padrão de resistividade observado acima: camada resistiva superior, camada condutiva intermediária e outra mais resistiva inferior. No entanto, o perfil de poço indica que a camada resistiva inferior é o próprio embasamento cristalino.

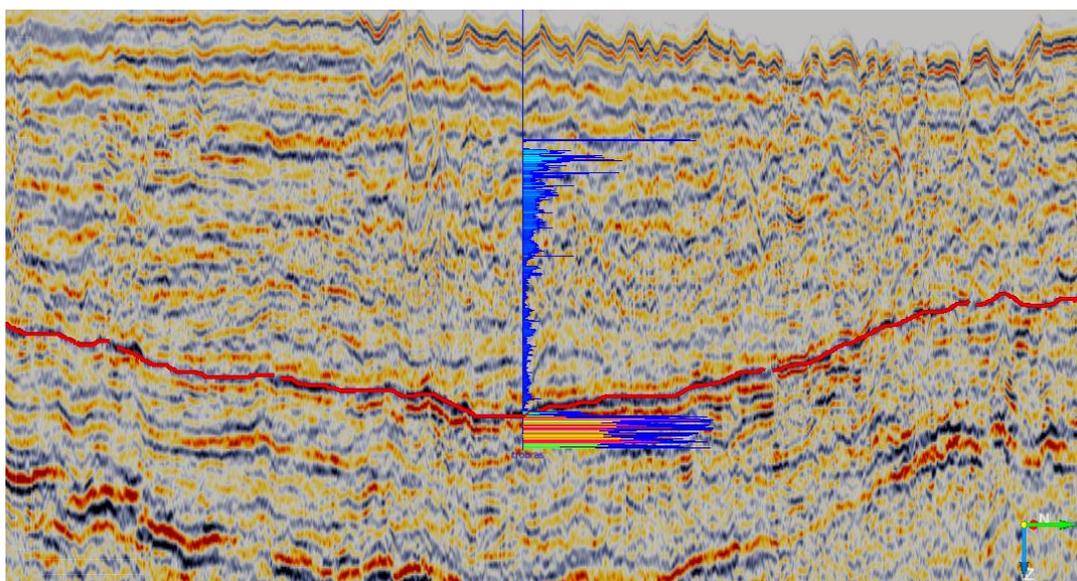


Figura 15. Perfil de resistividade do poço 2-ANP-3-BA próximo à cidade de Luís Eduardo Magalhães (ver **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), amarrado à seção sísmica da linha 3 em tempo. A linha vermelha representa o embasamento interpretado.

Desse modo, a posição do embasamento na seção de resistividade da **Erro! Fonte de referência não encontrada.4** foi interpretada entre a camada condutiva intermediária e a resistiva inferior (ver **Erro! Fonte de referência não encontrada.6**). Essa interpretação está indicada na Tabela como a profundidade do embasamento para cada estação MT.

Tanto a seção sísmica da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, com o embasamento interpretado na linha vermelha, como a seção geoeétrica da campanha 2 são aproximadamente transversais ao eixo mais alongado da bacia (ver figura 8).

Podemos ver em ambas um formato sinclinal. Portanto, elas corroboram o modelo *sag* como estrutura principal da Bacia Sanfranciscana, sobre a qual repousa o Grupo Urucuia. Além disso, a ordem de grandeza da profundidade do embasamento encontrada no poço, em torno de 840 m, é muito próxima às profundidades do embasamento obtidas pelo MT (ver Tabela 2).

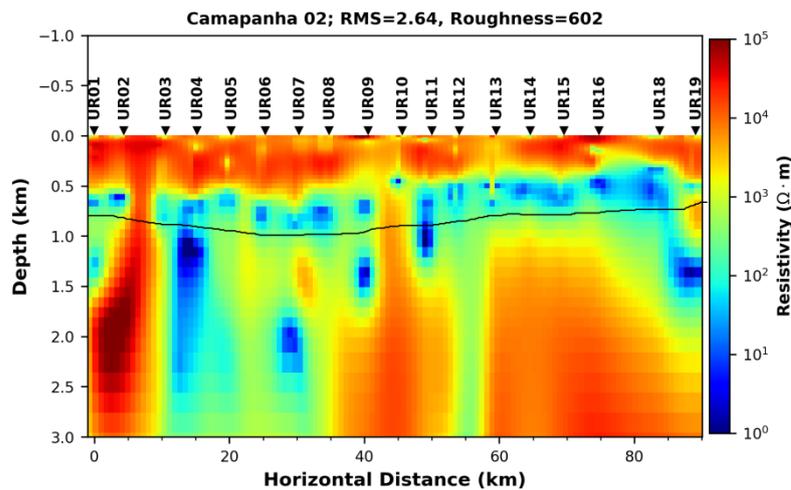


Figura 16. Interpretação do embasamento (linha preta) na seção invertida de dados magnetotelúricos da campanha 2.

Tabela 2- Interpretação da profundidade do embasamento em cada estação MT.

Estação	Prof. (m)	X_UTM (m)	Y_UTM(m)
URU01	790	324593	8749032
URU02	790	326811	8753410
URU03	810	333274	8755327
URU04	850	336552	8758459
URU05	880	340438	8761693
URU06	930	344378	8764891
URU07	950	348329	8767960
URU08	930	351906	8770662

URU09	890	356522	8774174
URU10	870	361325	8776105
URU11	870	364019	8779869
URU12	820	367711	8781694
URU13	770	371940	8785192
URU14	770	376027	8788168
URU15	760	380101	8791087
URU16	715	384270	8794188
URU18	690	390000	8800000
URU19	680	395472	8803067

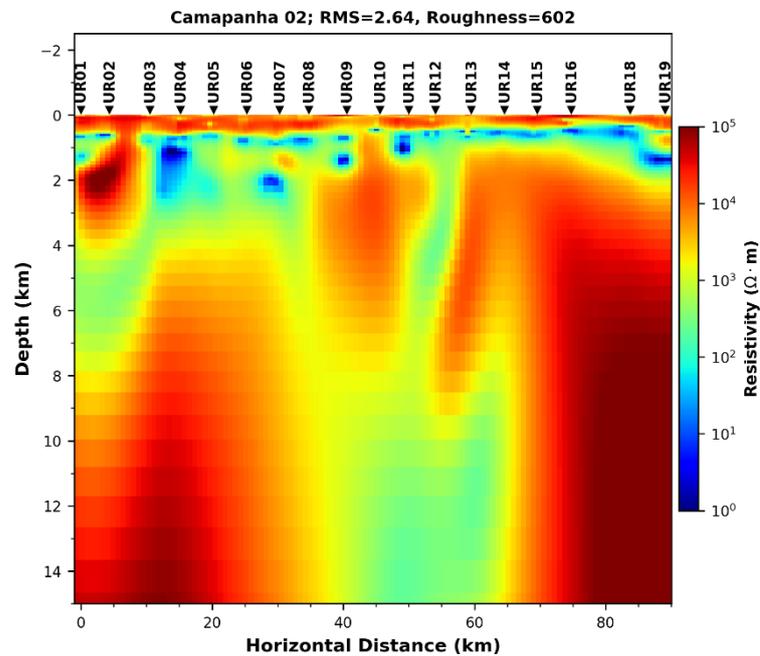


Figura 17. Resultado da inversão dos dados da campanha 2 para até aproximadamente 15 km de profundidade.

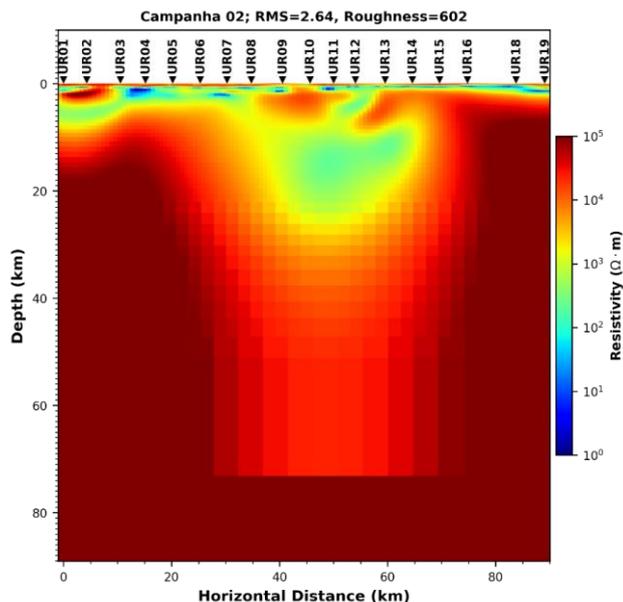


Figura 18. Resultado da inversão dos dados da campanha 2 para até aproximadamente 80 km de profundidade.

As Figuras **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostram o resultado da inversão dos dados da campanha 2 para profundidades superiores. Importante salientar que há elementos tectônicos que podem ser interpretados a partir dessas seções. No entanto, o foco desse trabalho é o entendimento da Bacia Sanfranciscana, particularmente do Grupo Urucuia.

- Conclusão

O método geofísico magnetotelúrico é um dos poucos capazes de fazer investigações em altíssimas profundidades, como na descontinuidade de Moho, mas também pode ser muito útil para exploração de bacias sedimentares, principalmente devido a sua boa relação custo-benefício. Por conta disso, ele foi escolhido para estudos no Sistema Aquífero Urucuia.

Apesar dos dados da campanha 1 não apresentarem um resultado muito satisfatório em termos de trazer à luz aspectos tectônicos e sedimentares da Bacia Sanfranciscana, os dados da campanha 2 estiveram de acordo com o conhecimento prévio da mesma. Não só foram capazes de corroborar sua característica sinclinal, já sugerida na literatura, como a profundidade do embasamento estava numericamente muito semelhante ao observado em um poço estratigráfico. Com isso, é possível extrapolar o delineamento do fundo da bacia para regiões mais ao norte.

5- MODELAGEM 3D PRELIMINAR DA SUB-BACIA URUCUIA

O modelo 3D preliminar da Sub-bacia Urucua foi construído inteiramente no software Leapfrog Geo v.2021.2.5. A base de dados utilizada contou com poços profundos da ANP e poços SIAGAS, além de dados geofísicos de sísmica, gravimetria e de levantamentos geolétricos. A topografia da área da bacia foi obtida a partir de imagens Alos Palsar, com resolução de 12,5m.

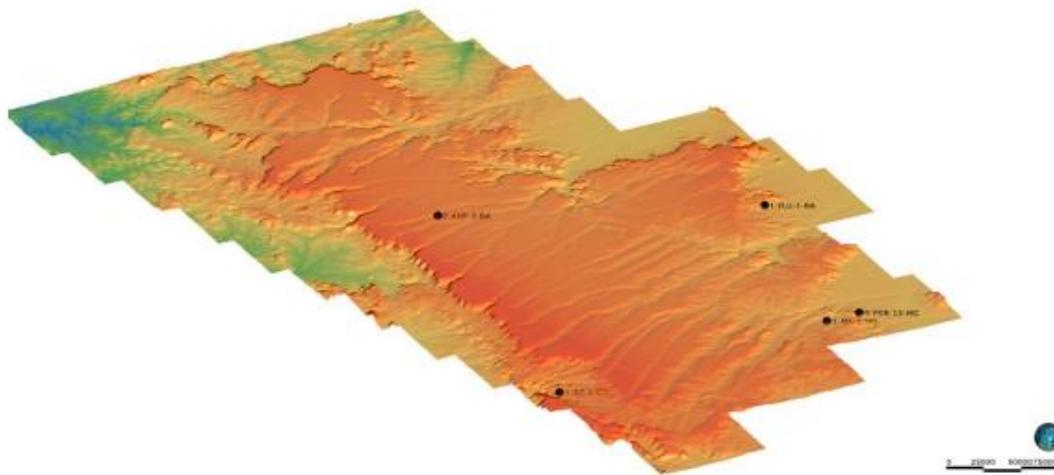


Figura 19. Modelo de elevação utilizado para geração da superfície topográfica.

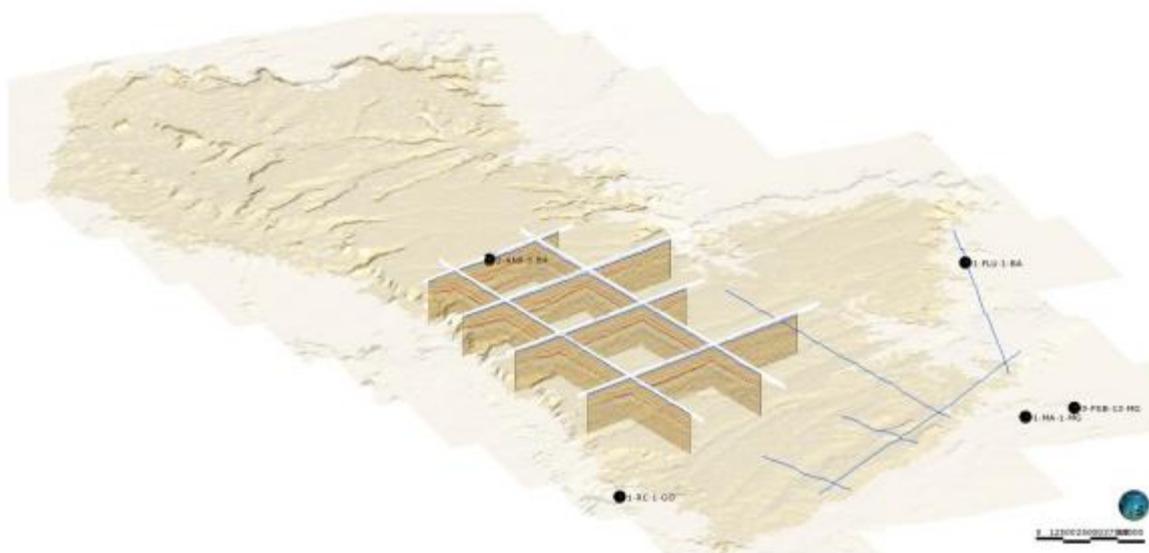


Figura 20. Seções sísmicas interpretadas georreferenciadas.

No modelo preliminar foi delimitado o arcabouço estrutural do embasamento, através dos dados de poços profundos, interpretações sísmicas e gravimétricas. Estes dados permitiram obter a profundidade, em diferentes pontos, do topo do embasamento. Desta forma, através do software, a nuvem de pontos foi interpolada e

a superfície de contato entre a bacia Sanfranciscana e o embasamento Neoproterozóico, composto pelo Grupo Bambuí.

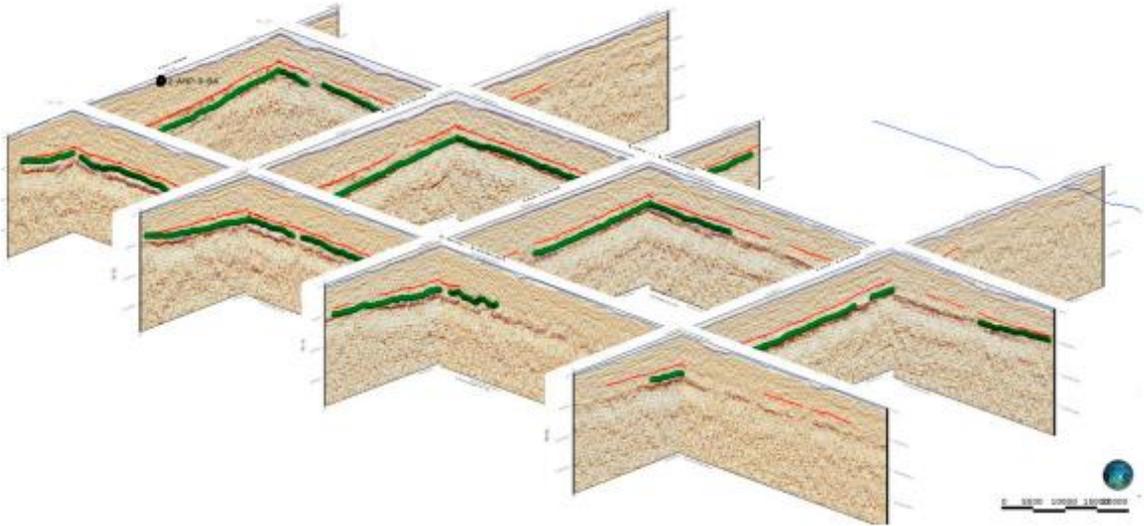


Figura 21. Interpretação das seções sísmicas em verde, com indicação do topo do embasamento.

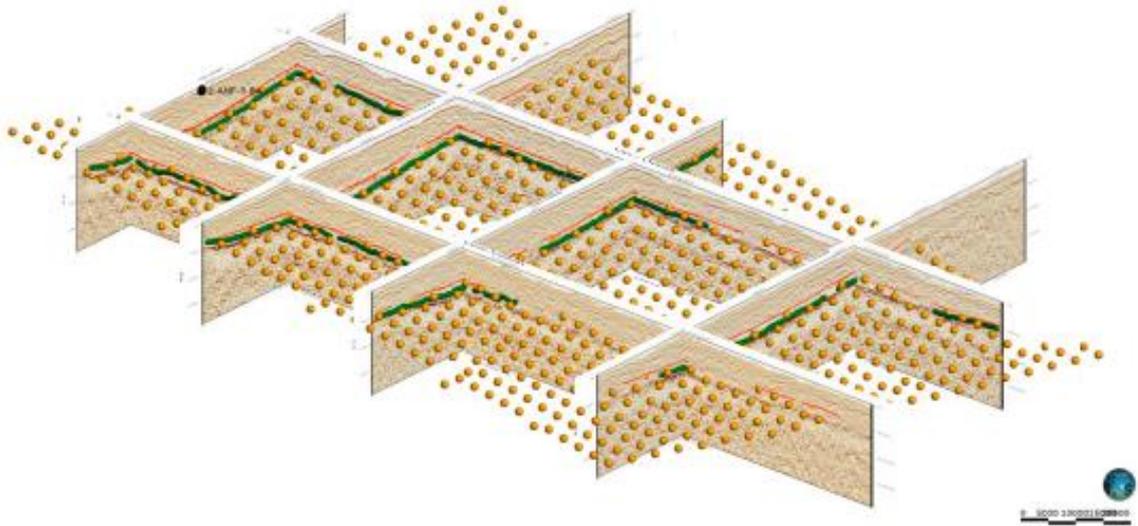


Figura 22. Interpretação sísmica (em verde) gravimétrica (pontos laranjas) do topo do embasamento.

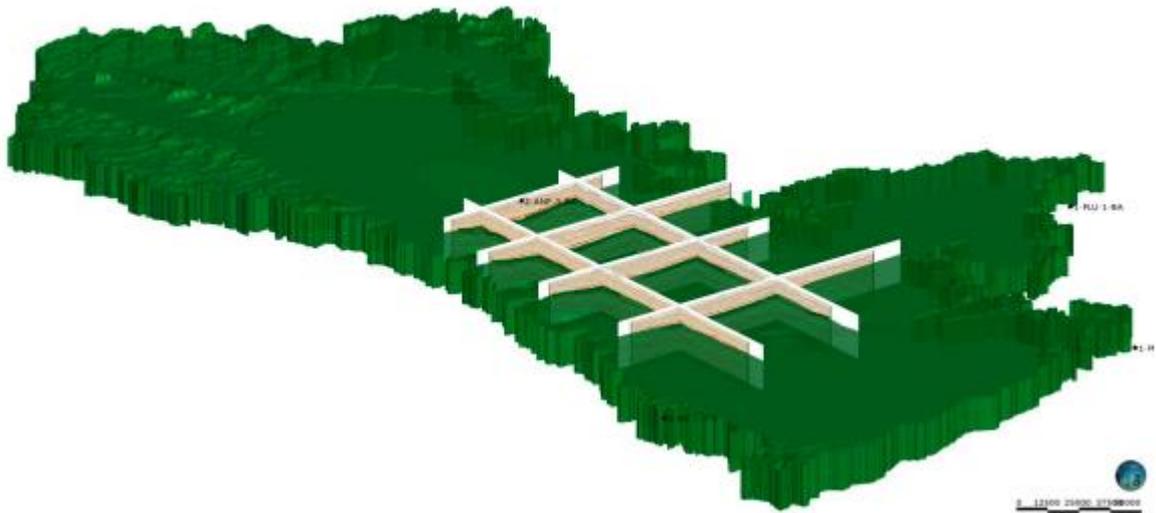


Figura 23. Sólido 3D do embasamento modelado através dos dados de poços e de interpretação sísmica e gravimétrica.

De forma simplificada, neste modelo preliminar, considerou-se toda a coluna sedimentar acima do embasamento como sendo parte da Sub-bacia Urucuia. Desta forma, o modelo gerado deu origem aos sólidos 3D do embasamento e Urucuia.



Figura 24. Modelo 3D preliminar do embasamento e da Sub-bacia Urucuia.

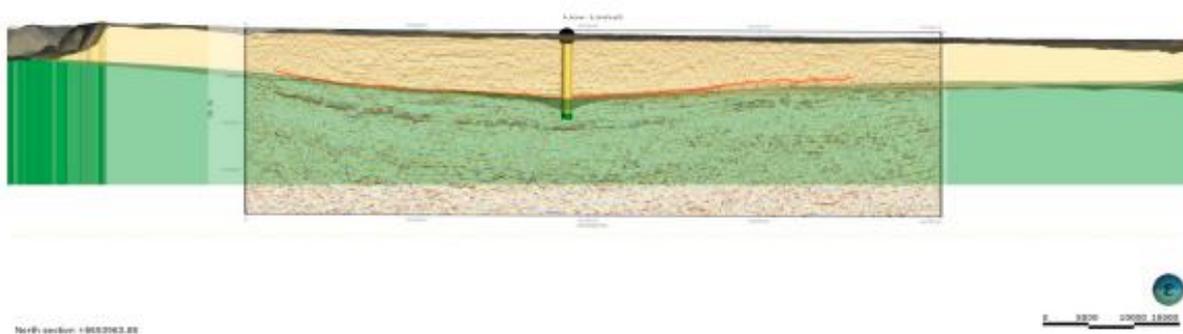


Figura 25. Seção vertical mostrando os sólidos do embasamento e Sub-bacia Urucuia modelados, juntamente com o poço ANP 2-ANP-3-BA e a seção sísmica.

Através dos dados do estudo de ANA (2017), foram obtidas seções geolétricas e gravimétricas regionais, as quais foram georreferenciadas e inseridas no modelo 3D. Esta visualização permitiu a validação da superfície de contato gerada na etapa anterior, e possibilitará, em etapas futuras, um detalhamento das unidades sedimentares da Sub-bacia Urucuia, assim como uma diferenciação das unidades metassedimentares do Grupo Bambuí e rochas cristalinas do embasamento.

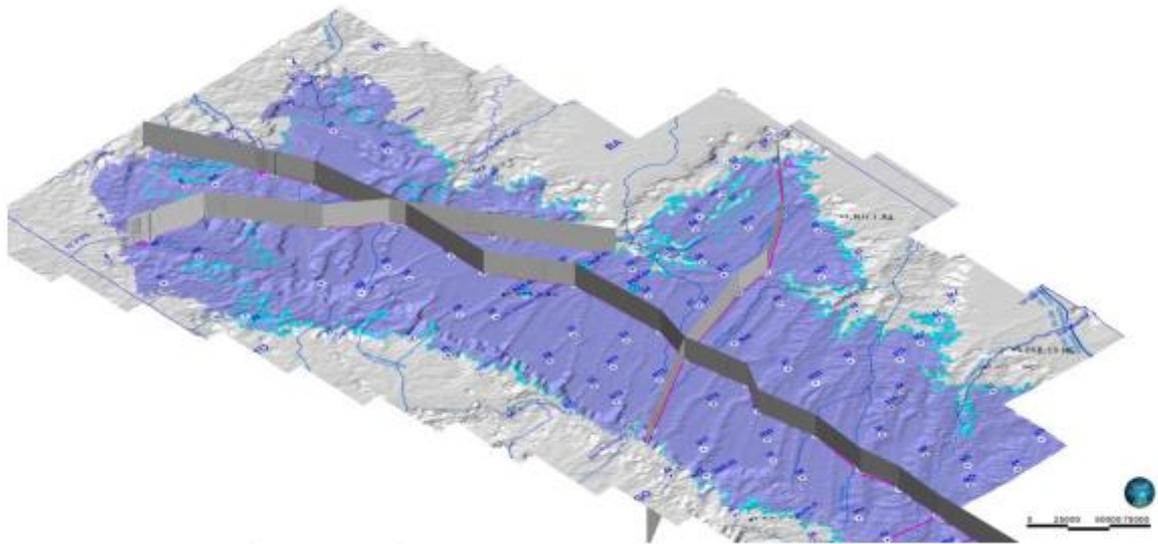


Figura 26. Seções geoeletricas georreferenciadas.

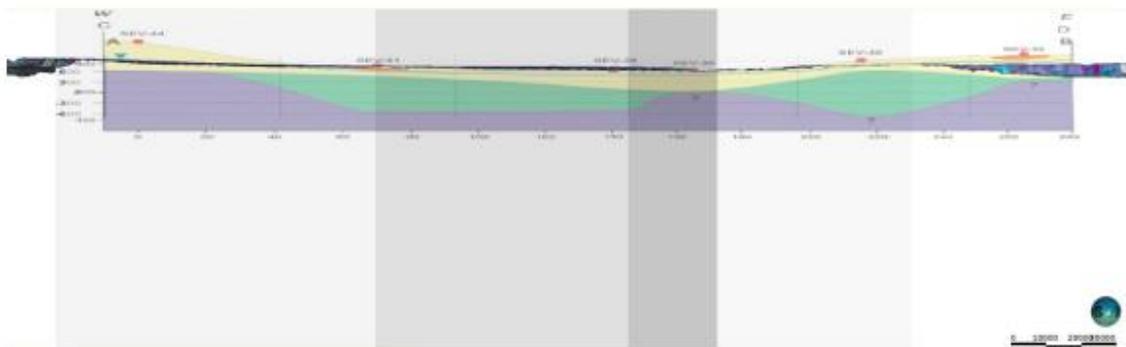


Figura 27. Seção vertical exibindo a seção geoeletrica interpretada.

Além disso, as seções geoeletricas forneceram também o nível d'água estimado do aquífero Urucuia. No modelo preliminar este nível foi modelado, gerando assim uma superfície 3D ao longo de toda a área de estudo.

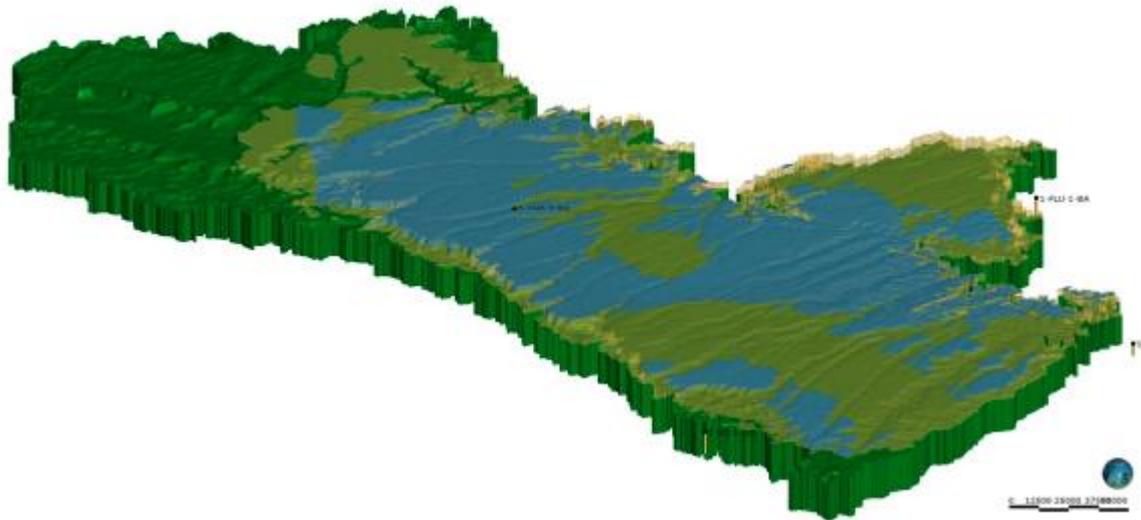


Figura 28. Modelo 3D com superfície do nível d'água estimado.



Figura 29. Seção vertical exibindo a superfície do nível d'água modelada.

Nas próximas etapas serão realizados ajustes do modelo 3D do embasamento, com base nas seções gravimétricas e geolétricas, além de dados estruturais obtidos também no estudo de ANA (2017). As unidades do embasamento serão individualizadas, assim como as unidades sedimentares da bacia são franciscana. Níveis conglomeráticos/silicificados também poderão ser modelados através das seções geolétricas e mapas geológicos de superfície.

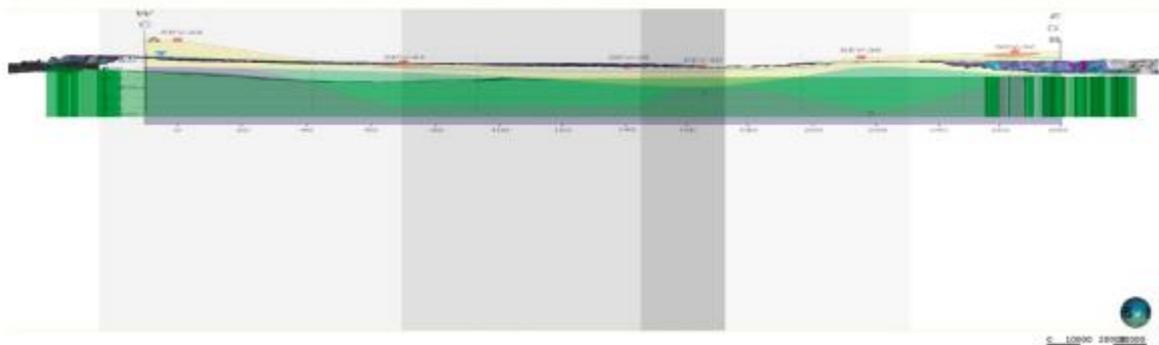


Figura 30. Seção vertical exibindo a seção geolétrica interpretada ao fundo, juntamente com o sólido do embasamento modelado em transparência. Os ajustes e detalhamento das unidades do embasamento serão executados na próxima etapa.

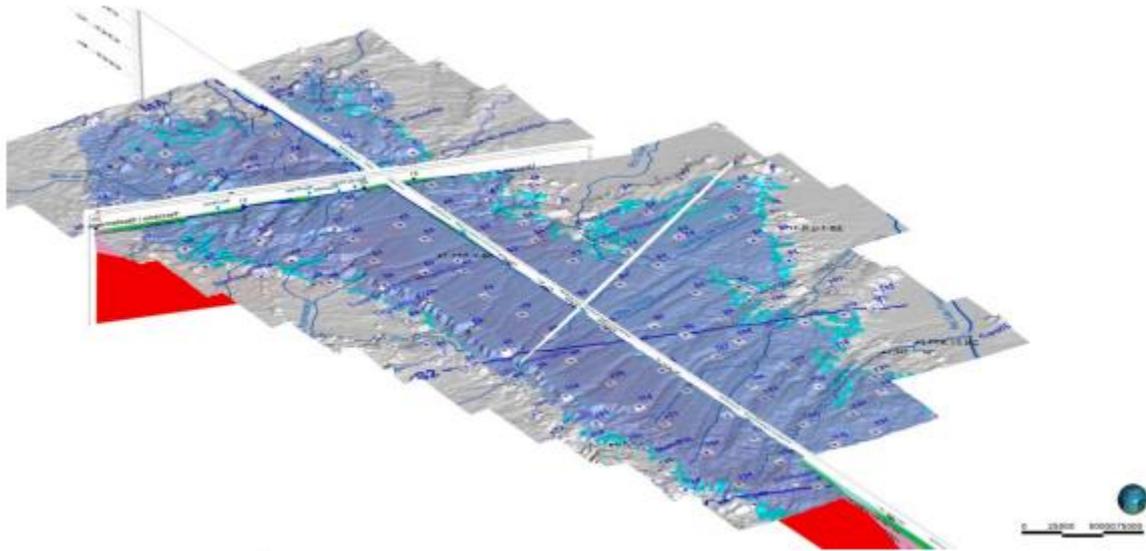


Figura 31. Seções gravimétricas.

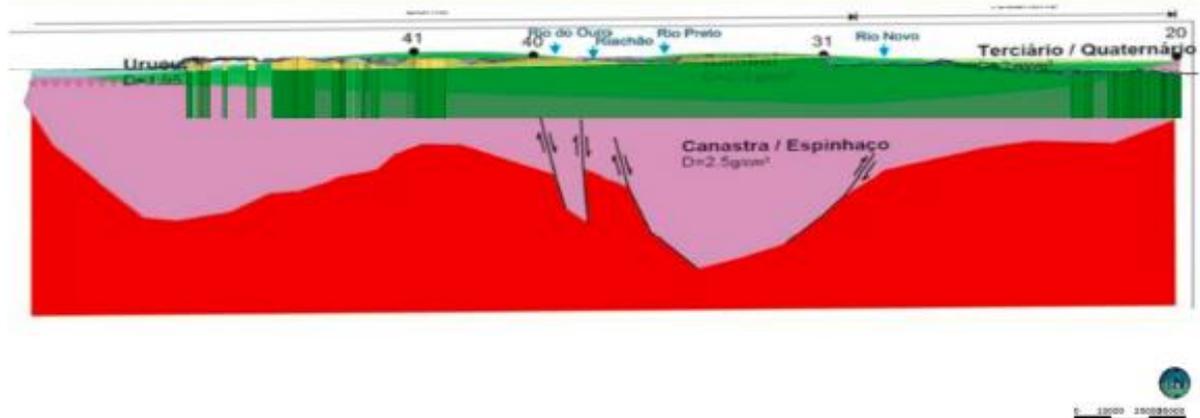


Figura 32. Seção vertical mostrando seção gravimétrica interpretada e modelo 3D sobreposto. Nas próximas etapas serão realizados ajustes e refinamento das unidades do embasamento.

6- DINÂMICA DA FLUTUAÇÃO DOS NÍVEIS D'ÁGUA

A análise dos dados das flutuações de níveis d'água foi feita em 65 poços RIMAS, em conjunto com os dados de chuvas nas estações ou próximas a elas de forma ainda preliminar neste relatório. O mapa da figura 33 apresenta a localização das estações de monitoramento da rede RIMAS.

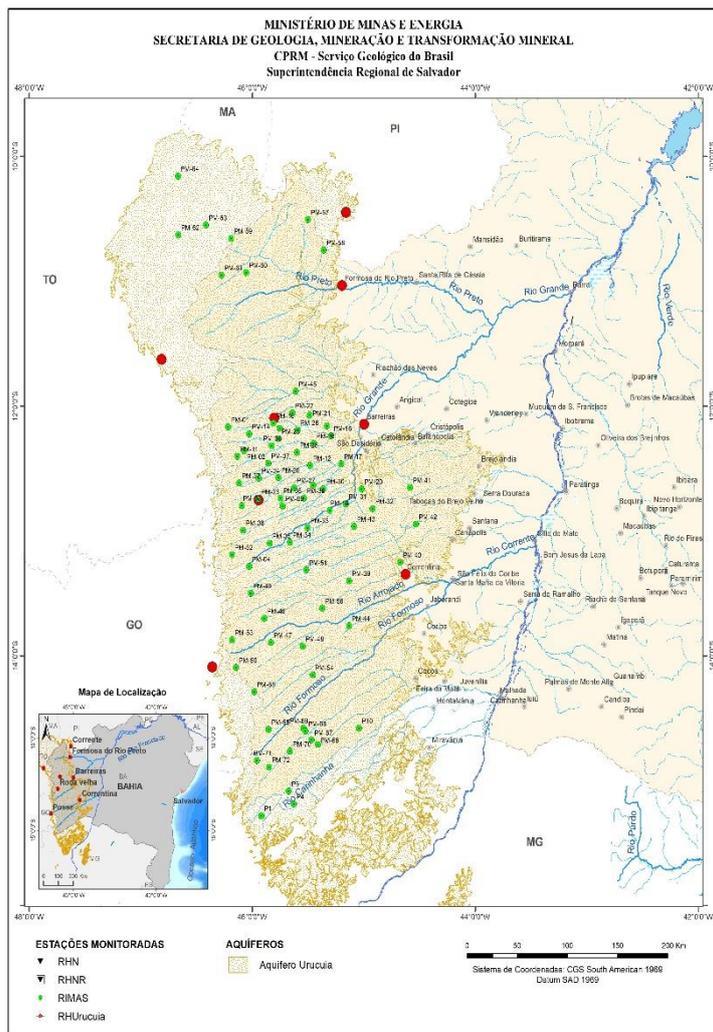


Figura 33. Localização das estações RIMAS (pontos verdes).

A consistência dos dados de níveis d'água de cada estação foi feita a partir da listagem dos registros em ordem cronológica, eliminando possíveis duplicidade de dados e retificando inconsistências com posterior plotagem em gráfico das séries temporais. Visando comparar os rebaixamentos dos 65 poços analisados, todos os dados são plotados como rebaixamentos a partir da data de início da série, conforme apresentados nos gráficos da figura 34 a 38.

A tabela 3 apresentada a seguir mostra a profundidade do poço, o nível estático da data de perfuração do poço, o rebaixamento máximo do nível d'água durante o período monitorado e o rebaixamento do nível d'água em relação ao último dado registrado de cada poço. Os poços de numeração 66 a 72 foram feitos em 2021/2022 e instalados em setembro/outubro de 2022. O maior rebaixamento absoluto observado foi do poço PM11-Fazenda Baldissarrela (8,24m ou 0,84m/ano), sendo que os poços que apresentam declínios de NA's rebaixaram entre 0,2 a 1,2m/ano com valor médio de 0,64m/ano.

Tabela 3- Poços RIMAS e seus rebaixamentos ao longo do período monitorado.

Sigla	Profundidade (m)	Nível Estático NE (m)	Rebaixamento Máximo	Rebaixamento em relação ao último registro	Período de monitoramento
PM -01	83	14,30	6,49	5,76	Set/2011-Fev/2022*
PM -02	103	45,30	6,37	6,24	Ago/2011-Jul/2022*
PM -03	131	72,55	4,89	4,45	Set/2011-Abr/2022*
PM -04	124	55,95	5,92	5,87	Set/2011-Jun/2022
PM- 05	64	16,93	2,08	0,84	Abr/2013-Jul/2022*
PM- 06	62	14,04	0,89	-0,56	Set/2011-Jul/2022*
PM-07	62	20,30	2,74	1,82	Abr/2012-Jul/2022*
PM-08	64	8,20	3,32	2,78	Out/2015-Dez/2021*
PM-09	73	7,80	3,40	0,26	Set/2011-Fev/2022*
PM-10	71,5	33,15	1,19	0,17	Abr/2013-Jul/2022*
PM-11	110	67,50	8,24	8,24	Ago/2011-Nov/2021*
PM-12	72	3,90	1,27	0,87	Set/2011-Jul/2022*
PM-13	101	12,20	1,34	0,62	Set/2011-Jul/2022*
PM-14	71	51,20	5,62	2,67	Ago/2012-Jul/2022*
PM-15	121	74,10	1,82	1,82	Jul/2013-Jul/2022*
PM-16	72	12,00	1,04	0,76	Abr/2013-Dez/2021*
PM-17	82	48,62	2,85	2,81	Abr/2012-Jul/2022*
PM-18	51	8,69	0,53	-0,19	Set/2015-Jul/2020*
PM-19	91	3,86	0,87	0,02	Out/2011-Dez/2021*
PM-20	63	3,48	0,94	0,32	Out/2011-Jul/2021*
PM -21	82	28,32	5,35	5,13	Abr/2012-Jun/2022*
PM-22	60	20,78	3,70	3,58	Ago/2012-Jul/2021*
PM -23	83	58,36	4,36	2,88	Set/2011-Abr/2022*
PM -24	92	26,63	6,23	6,22	Set/2011-Fev/2022*
PM -25	114	30,33	1,8	1,59	Ago/2011Fev/2020*
PM -26	51	28,90	2,39	2,25	Abr/2013-Jan/2021*
PM -27	51	4,82	1,5	1,03	Set/2011-Dez/2021*
PM-28	64	27,70	4,72	3,31	Ago/2012-Jul/2021*
PM-29	74	25,70	4,71	2,27	Ago/2012-Jul/2022*
PM-30	63	7,81	0,78	-0,53	Jun/2014-Fev/2022*
PM-31	80	32,50	0,85	0,79	Mai/2013-Nov/2019*
PM-32	73	9,35	1,33	1,02	Ago/2012-Dez/2021*
PM-33	71	22,45	2,75	-1,25	Ago/2012-Jul/2022*
PM-34	70	16,32	2,71	-0,79	Ago/2012-Jul/2022*
PM-35	72	27,25	3,11	0,99	Ago/2012-Jul/2022*
PM-36	110	67,91	4,80	4,38	Ago/2012-Jul/2022*
PM-37	111	67,85	4,06	4,06	Ago/2012-Set/2015*
PM-38	62	26,73	1,61	1,19	Ago/2012-Jul/2020*
PM-39	70,7	50	0,56	0,56	Dez/2015-Fev/2017*
PM-40	34	20,8	1,42	1,27	Dez/2015-Out/2020*
PM-41	51	20,5	2,49	2,49	Dez/2015-Jun/2021*
PM-42	34	8,2	0,33	-0,08	Dez/2015-Mai/2021*
PM-43	70	27,5	4,34	3,66	Dez/2015-Dez/2021*
PM-44	104	55,7	2,36	2,36	Jul/2016-Nov/2019*
PM-45	127,5	50,2	0,96	-0,85	Set/2015-Jul/2022*
PM-46	103	36,36	2,97	2,93	Dez/2015-Nov/2021*
PM-47	112	68	1,89	1,04	Dez/2015-Jun/2022*
PM-48	82	38,5	3,05	1,63	Dez/2015-Jun/2022*
PM-49	102	50,3	3,19	3,19	Dez/2015-Jun/2022*
PM-50	154	118,5	4,45	4,45	Nov/2018-Jun/2022*
PM-51	92	38,1	0,43	-0,85	Dez/2015-Mai/2021*
PM-52	144	108,3	4,44	4,44	Ago/2016-Dez/2019*
PM-53	162	117,95	2,82	2,82	Nov/2015-Nov/2019*
PM-54	110	63,4	3,48	2,07	Dez/2015-Jun/2022*
PM-55	70,50	48,34	5,35	4,76	Ago/2016-Jan/2022*
PM-56	96	55,01	1,43	1,43	Dez/2015-Jul/2019*

PM-57	192	163,17	0,05	-0,14	Nov/2018- Mar/2022*
PM-58	182	144,3	0,27	0,27	Mai/2017- Mar/2022*
PM-59	186	118,74	0,72	0,71	Jun/2017-Abr/2018*
PM-60	132	76,7	0,4	0,3	Jun/2017-Mar/2021*
PM-61	124	88,75	0,46	0,46	Ago/2018-Abr/2022*
PM-62	42	2,2	0	-0,59	Fev/2020-Mai/2017*
PM-63	62	1,3	0,03	-0,23	Mai/2017-Fev/2020*
PM-64	52	9,45	0,97	0,08	Mai/2017-Fev/2020*
PM-65	180	145,09	3,03	3,00	Dez/2015-Jan/2020*
PM-66	140				**
PM-67	120				**
PM-68	57				**
PM-69	126				**
rPM-70	110				**
PM-71	140				**
PM-72	62				**

Fonte: A autora 2022. * Poços com lacunas nos dados. ** Poços instalados entre setembro/outubro 2022.

Os poços foram separados em 5 (cinco) grupos em função de uma padronização de comportamentos das flutuações de Níveis d'água: Grupo I (Declínios constantes com inversão brusca de comportamento); Grupo II (Declínios dos níveis d'água com tendência de Recuperação dos NA's nos últimos anos); Grupo III (Declínios constantes dos níveis); Grupo IV (Rebaixamentos sazonais); Grupo V (Comportamento sem padrão definido). Ressalta-se que os poços PM-22 (Agrobasso), PM- 43 (Santo Antonio), PM-55 (São Miguel), PM-58 (Águia de Prata) e provavelmente também o PM-25 (N. Sra. Fátima), estão no raio de influência direta de poço(s) produtivo(s), possuindo, portanto, distorções no comportamento natural das flutuações regionais. As figuras 34 a 38 apresentadas a seguir mostram esses grupos de poços em gráficos de flutuação dos NAs ao longo do período observado e os mapas de localização dos mesmos.

Os poços do grupo I apresentam mudança brusca de comportamento entre declínios e recuperação dos níveis d'água. Estes poços estão localizados na porção Norte e na porção Sul da área com nível estático de 88 e 38m respectivamente. O declínio dos níveis a partir de 2015 deve estar relacionado ao período menos chuvoso entre 2012 e 2015, sendo que o início da recuperação dos níveis iniciou-se a partir de setembro de 2018, ver figura 34.

Os poços do Grupo II apresentam declínios constantes a partir de 2011 e uma tendência de recuperação a partir de setembro de 2019, provavelmente resultante do aumento das chuvas a partir de 2015. A figura 35 mostra o gráfico da flutuação de NA em função do tempo e o mapa de localização dos poços. Por outro lado, na figura 35, os poços do Grupo III mostram declínios constantes, mas não apresentam tendência de recuperação de NAs. Os poços dos Grupos II e III estão distribuídos por toda a região,

representam o comportamento da maioria dos poços monitorados e seus NE variam de 16 a 145m, exceto o PM-08 e PM-32, com NE de 8m e 9m respectivamente.

GRUPO I

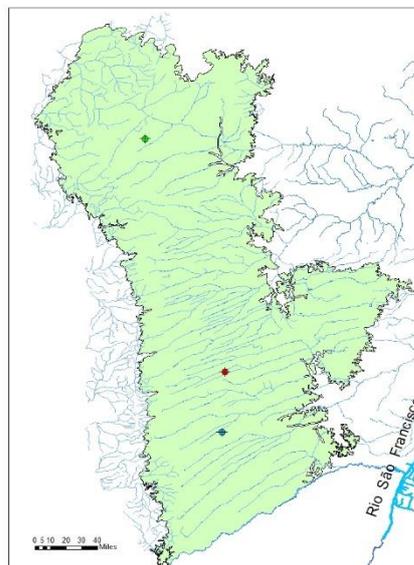
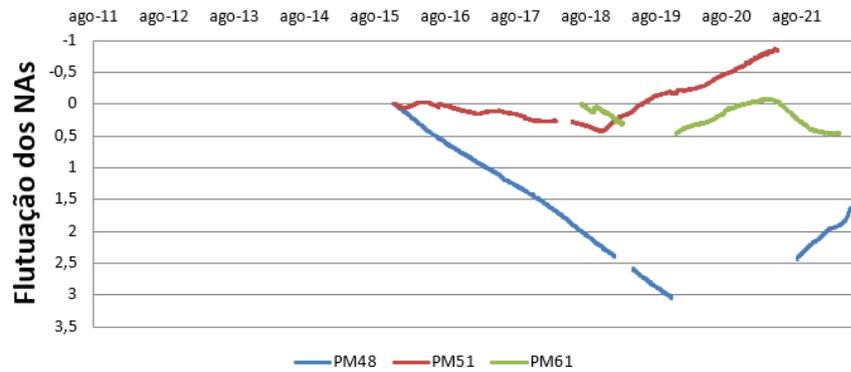


Figura 34. Gráfico de Flutuação dos NAs versus tempo do Grupo I e mapa de localização.

GRUPO II

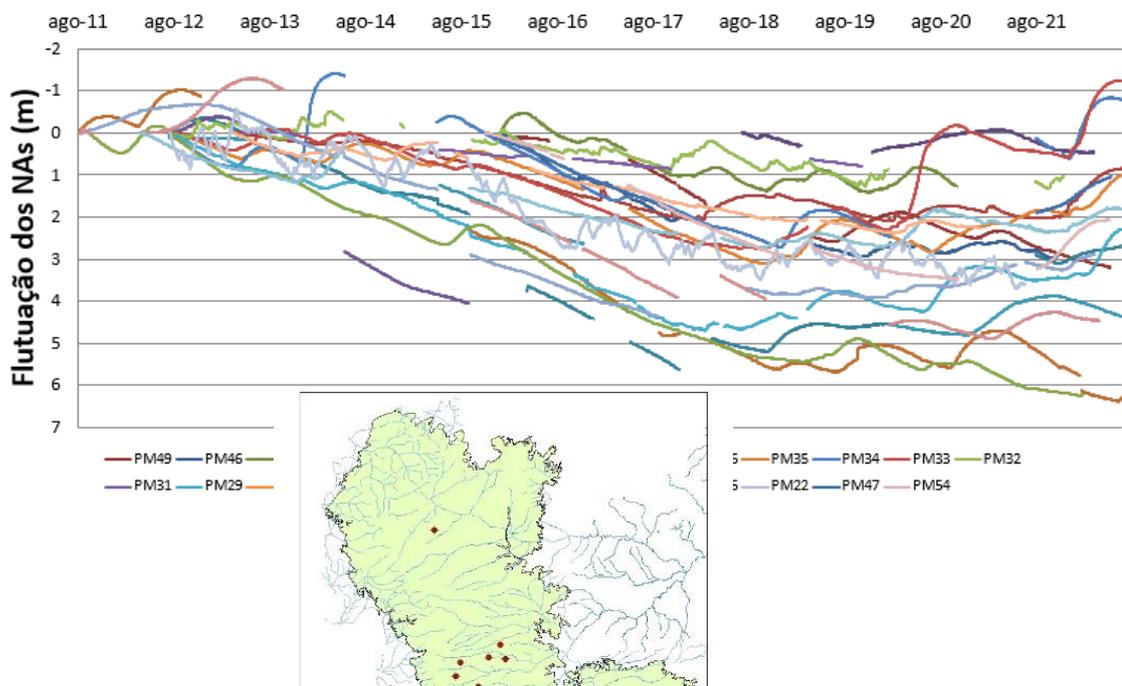


Figura 35. Gráfico de Flutuação dos NAs versus tempo do Grupo II e mapa de localização.

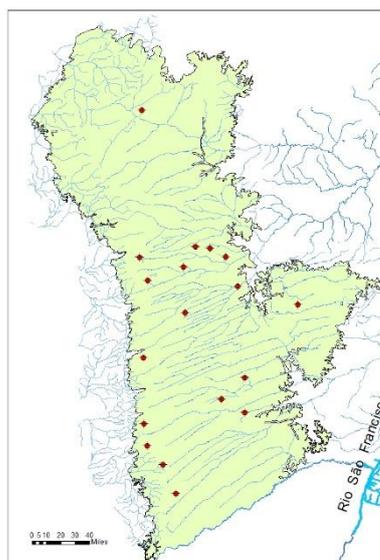
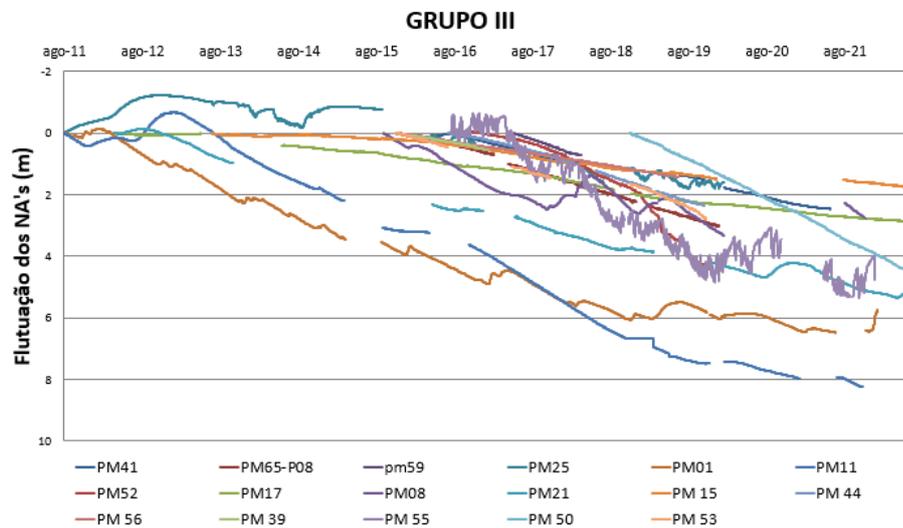


Figura 36. Gráfico de Flutuação dos NAs versus tempo do Grupo III e mapa de localização.

Estes dois últimos poços poderiam ser enquadrados como pertencentes aos Grupos III e IV pois mostram declínios constantes mas também demonstram certa variação sazonal.

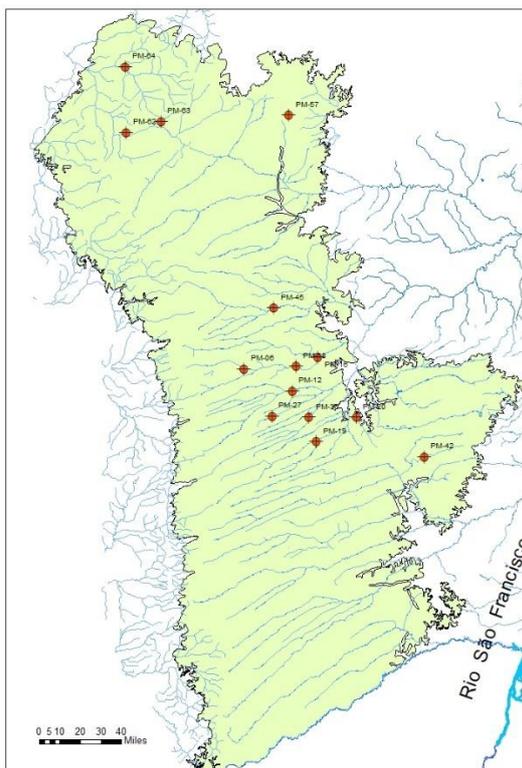
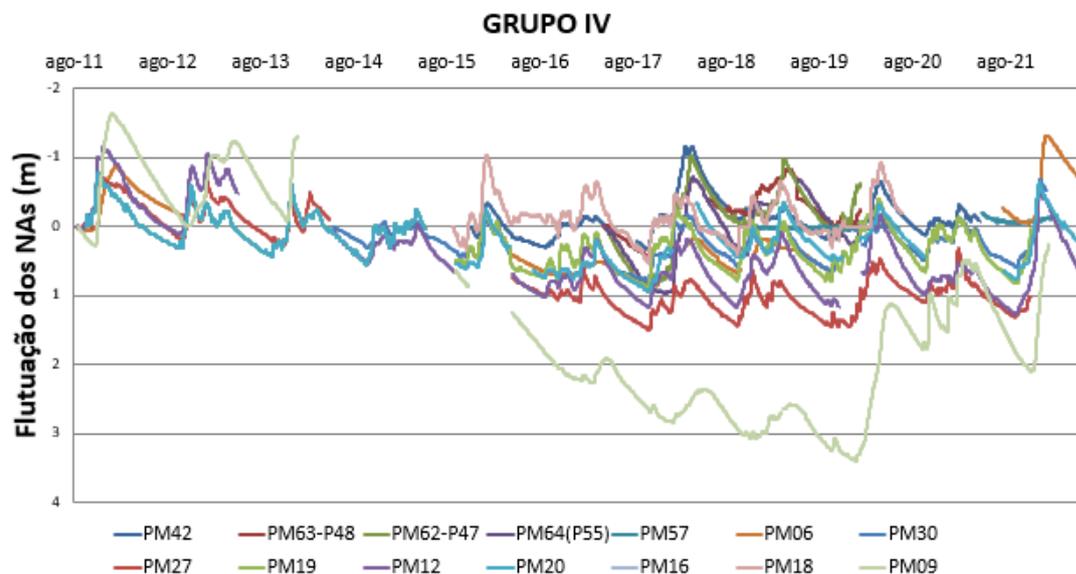


Figura 37. Gráfico de Flutuação dos NAs versus tempo do Grupo IV e mapa de localização.

Os poços agrupados no Grupo IV possuem em comum a flutuação dos níveis d'água em função do período chuvoso e seco, que é bem definido durante o ano

hidrológico em toda a região (chuvas predominantes de outubro/novembro a maio e período seco entre junho e setembro), ver figura 37 e figura 38. Dessa forma predominam o final do declínio dos NAs em outubro e final da recuperação entre dezembro e maio. Estes poços encontram-se localizados a distâncias de até 1700m de drenagens e possuem Nível Estático variando entre 1,53 a 15,31m, ver tabela 4.

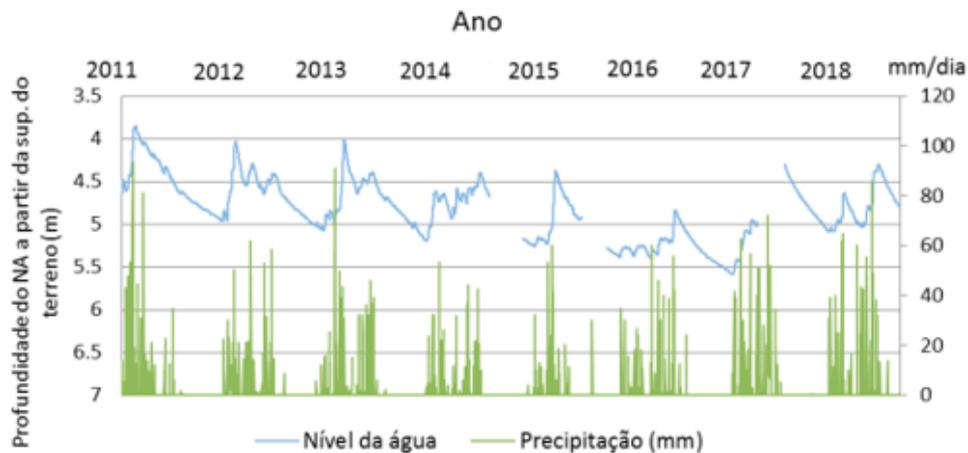


Figura 38. Variação dos Níveis d'água subterrânea (azul) no PM-20 (Grupo IV) e das chuvas (verde) na estação pluviométrica local. Fonte: Oliveira, 2020.

Nota-se na figura 38 que além das flutuações sazonais dos níveis d'água, existe um leve declínio dos níveis médios entre 2011 e 2017 e tendência de recuperação a partir de 2017.

Tabela 4. Relação dos poços do Grupo IV com seus respectivos Níveis d'água na data do primeiro registro de monitoramento e distância do poço à drenagem mais próxima.

POÇO	NA's	DISTÂNCIA AO RIO (m)	POÇO	NA's	DISTÂNCIA AO RIO (m)
PM42	8,7	550	PM19	4,64	550
PM63	1,53	300	PM12	3,92	300
PM62	2,83	1000	PM20	4,64	500
PM64	9,37	1700	PM16	12,2	206
PM06	15,31	800	PM18	8,79	300
PM30	7,48	300	PM09	6,9	600
PM27	5,21	50			

Fonte: A
2022.

autora,

Por fim, seis poços parecem não ter padrão de comportamento que se encaixe nos grupos anteriores e são definidos aqui como pertencentes ao Grupo V, ver figura 39.

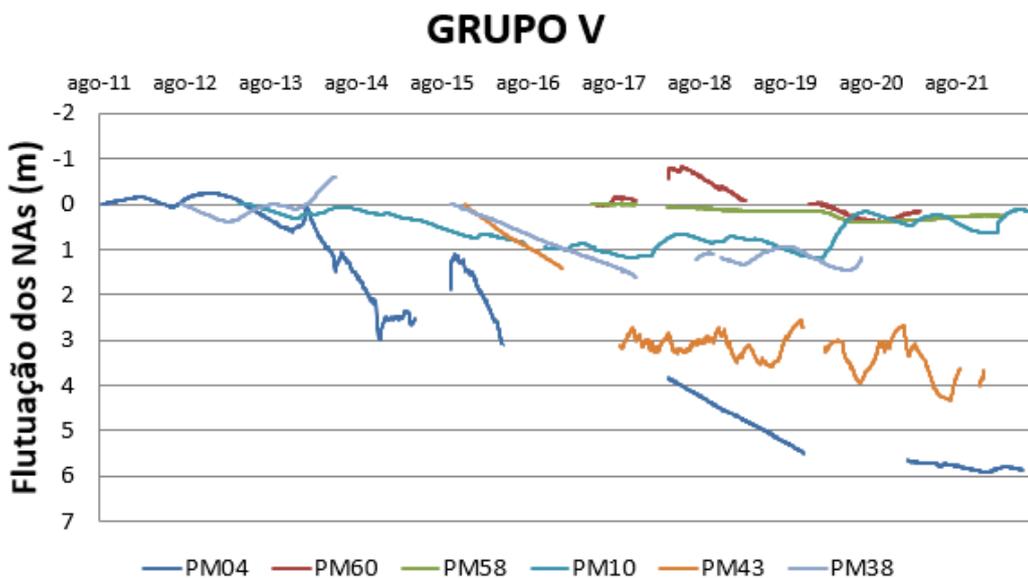


Fig1

A grande maioria dos poços apresentam declínios nos níveis d'água ao longo do tempo e encontram-se distribuídos em várias áreas do aquífero. A dinâmica dos níveis d'água do aquífero pode ter influência de vários fatores naturais e antrópicos. Destaca-se na área de estudo as seguintes causas: recarga por chuva, infiltração de águas superficiais (diretamente de rios ou irrigação) ou exploração de águas subterrâneas a partir de poços. A resposta do aquífero a tais interferências depende dos parâmetros hidráulicos, intensidade e frequência das chuvas e fatores de interferência na recarga do aquífero, como o uso e ocupação do solo, cobertura vegetal e padrões ou mudanças climáticas. A análise das flutuações de nível d'água de forma a entender e prever a sua dinâmica do ponto de vista transitório e espacial é de fundamental importância, com implicações econômicas de alto impacto para a comunidade local.

Pretende-se na próxima etapa do projeto analisar individualmente os rebaixamentos dos NAs dos poços em uma escala maior, principalmente na tentativa de determinar o tipo de aquífero e as suas características/interferências hidráulicas.

Ressalta-se que a série histórica de todos os poços monitorados apresentam lacunas, muitas vezes extensas e tem se tornado cada vez mais constante.

A tabela a seguir mostra a distribuição da série histórica de 65 poços de monitoramento da RIMAS.

Tabela 5 - Série histórica de monitoramento dos poços RIMAS.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Espera-se que os dados resultantes dos levantamentos geofísicos e a modelagem 3D da Subbacia Urucuia (aquífero Urucuia) contribuam para a caracterização da geometria do aquífero e conseqüentemente auxiliem no dimensionamento das reservas do aquífero. Os estudos encontram-se ainda em fase de elaboração e os resultados ora apresentados são considerados preliminares. No âmbito deste Projeto pretende-se complementar e concluir as seguintes atividades no ano de 2023: Complementar o cadastro de pontos d'água; concluir a modelagem 3D da subbacia Urucuia; finalizar o processamento de dados do levantamento magnetotelúrico e concluir a interpretação dos dados geofísicos juntamente com as seções sísmicas; levantar as cotas topográficas dos contatos litológicos Grupo Urucuia/Bambui, Grupo Urucuia/embasamento cristalino e grupo Urucuia/Rochas da Bacia do Parnaíba nos afloramentos conhecidos; executar os testes de aquíferos; fazer os levantamentos "in loco" nas proximidades dos poços de monitoramento visando o reconhecimento do comportamento hidráulico do aquífero; finalizar a análise sobre a flutuação dos níveis d'água subterrânea e apresentar os resultados às comunidades locais e; elaborar Seções Hidrogeológicas que permitam identificar o comportamento hidráulico do aquífero (pretende-se mapear áreas aflorantes nas escarpas da região ocidental e setentrional da subbacia Urucuia, a partir do uso de novas tecnologias visando mapeamento geológico com drones/perfis geofísicos). Esta última atividade requer treinamento da equipe e será de grande utilidade, pois trata-se de uma ferramenta relativamente nova que terá aplicação em outros Projetos Geológicos e hidrogeológicos no SGB.

Visando ampliar a área de cobertura da rede de monitoramento na região (nas áreas que requer maior nível de detalhamento ou nas áreas onde há lacunas de informação) pretende-se instalar dataloggers em poços cedidos por particulares.

Considerando o estado atual de conhecimento do aquífero ressalta-se a importância de estudar os mecanismos de recarga do mesmo, sua propagação nas zonas não saturadas de elevada espessura (acima de 20m) no sentido de compreender as recargas efetivas e conseqüentemente distinguir a influência das variações climáticas (intensidade e frequência das chuvas) e da exploração do aquífero sobre a flutuação dos níveis d'água.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Consórcio Engecorps - Walm . Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e proposição de modelo de gestão integrada e compartilhada. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2013a. v.1

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Consórcio Engecorps - Walm - Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e proposição de modelo de gestão Integrada e compartilhada. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2013b. v.3

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e proposição de modelo de gestão integrada compartilhada: resumo executivo. Brasília, DF: ANA, 2017.

ANA, 2017. Estudos Hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema aquífero Urucuia: Investigação Geofísica na região dos Sistemas aquíferos Urucuia (SAU) e Areado (SAE). Relatório Técnico Temático. 94p.il.

ALBUQUERQUE, A. C. L. S. Estimativa de recarga da Bacia do rio das Fêmeas através de métodos manuais e automáticos. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2009

ANDRADE FILHO, E. L.; NEVES, J. P.; GUIMARÃES, J. T. (Orgs.) **Santa Rita de Cássia SC.23–Z-C, Formosa do Rio Preto SC.23–Y-D**. Estados da Bahia e Tocantins. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 1994. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.

AMORIM JR., V. Avaliação hidrogeológica do aquífero Urucuia na Bacia do Rio das Fêmeas usando IP-Resistividade. 2003. 82 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

AMORIM JUNIOR, V.; LIMA, O. A. L. Aquífero Urucuia: uma avaliação hidrogeológica integrando eletroresistividade e polarização induzida no domínio do tempo. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE GEOFÍSICA, 8., 2003, Rio de Janeiro. **Anais ... Rio de Janeiro: SBGf., 2003. 1 CD-ROM.**

ARCANJO, J. B. A.(Org.) **Curimatá. Folha SC.23-Z-A Corrente. Folha SC.23-Y-B (Parcial) e Xique-Xique Folha SC.23-Z-B (Parcial)**. Estados da Bahia e do Piauí. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 1999. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.

BAHIA. Superintendência de Recursos Hídricos. **Uso Conjunto das águas superficiais e subterrâneas da sub-bacia do Rio das Fêmeas - Bahia**. Relatório Final, Salvador, 2003. 165 p.

BARBOSA, J. S. F; DOMINGUEZ, J.M.L (Coords.) **Geologia da Bahia**: texto explicativo para o Mapa Geológico ao Milionésimo. Salvador: SICM/SGM, 1996. 400 p.

BARBOSA, N.S. Hidrogeologia do sistema aquífero Urucuia na região das bacias hidrográficas dos rios Formoso e Arrojado, oeste do estado da Bahia. 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

BOMFIM, L. F. C. **Projeto Mapas Metalogenéticos e de Previsão de Recursos Minerais**: Folha SD.23-X-C, Santa Maria da Vitória. Texto e Mapas. Escala 1:250.000. Salvador: CPRM, 1984. 2 v. Convênio DNPM/CPRM.

BOMFIM, L. F. C.; GOMES, R. A. D. Aquífero Urucuia – Geometria e Espessura: idéias para discussão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XX., 2004, Cuiabá. **Anais**. Cuiabá: ABAS, 2004. 1 CD-ROM.

BORGES, M. da S.; Igreja, H.S. da; Costa, J.B.S.; Hasui, Y. 1992. Faciologia e tectônica da Formação Urucuia na região de Dianópolis, SW de Tocantins. *Geociências*, 11(1): 7-18.

BRITO, I.M. Bacias sedimentares e formações pós-paleozóicas do Brasil. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 179p. 1979.

CAGNIARD, L. BASIC. Theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. **GEOPHYSICS**, v. 18, n. 3, p. 605–635, jul. 1953.

CAMPOS, J.E.G., DARDENNE, M.A. Origem e evolução tectônica da Bacia Sanfranciscana. *Revista Brasileira de Geociências* V.27(3):283-294, setembro de 1997a.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 27, n. 3, p. 269–282, 1997b.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Distribuição, Estratigrafia e Sistemas Depositionais do Grupo Urucuia – Cretáceo Superior da Bacia Sanfranciscana. *Geociências*, Rio Claro - SP, v. 18, n. 2, p. 481-499, 1999.

CHANG, H. K.; BENDER, A. A.; KOWSMANN, R. O. O papel das tensões intraplaca na evolução de bacias sedimentares: exemplo da Formação Urucuia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., 1992, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBG, 1992. v. 1, p. 568-569.

CONSTABLE, S. C.; PARKER, R. L.; CONSTABLE, C. G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. **GEOPHYSICS**, v. 52, n. 3, p. 289–300, mar. 1987.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL; UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA. **Hidrogeologia do aquífero Urucuia - Bacias dos Rios Arrojado e Formoso, Bahia**. Brasília: CPRM, 2008. 1 CD-ROM. Projeto Comportamento das Bacias Sedimentares da Região Semi-Árida do Nordeste Brasileiro. Rede Cooperativa de Pesquisa entre o Fundo Setorial de Recursos Hídricos - CTHIDRO e a Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, com a participação da CPRM – Serviço Geológico do Brasil, UFBA, UFC, UFCG, UFPE e a UFRN.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Aquífero urucuia caracterização hidrológica com base em dados secundários. Belo Horizonte: CPRM, 2019a. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/20922>. Acesso em: 21 dez. 2021.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Rede integrada de monitoramento das águas subterrâneas - RIMAS. Brasília, DF: CPRM, 2022. Disponível em: <http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>. Acesso em: 5 dez. 2022.

CUNHA, V.C.V., 2017. AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS NA BACIA DO RIO DAS FÊMEAS, SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA – BAHIA. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte, 135p.

DEGROOT-HEDLIN, C.; CONSTABLE, S. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. **GEOPHYSICS**, v. 55, n. 12, p. 1613–1624, dez. 1990.

DERBY, O. A. 1879. Contribuição para o estudo da geologia do valle do rio São Francisco. Arquivos Museu Nacional, Rio de Janeiro, 87-119.

EGBERT, G. D.; BOOKER, J. R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions. **Geophysical Journal International**, v. 87, n. 1, p. 173–194, out. 1986.

FLEISCHER, R. 1998. A rift model form the sedimentary diamonds deposits of Brazil. *Mineralium Deposita*, 33: 238-254.

GASPAR, M.T.P.; CAMPOS J.E.G.; MORAES R.A.V de. Determinação das espessuras do Sistema Aquífero Urucuia a partir de estudo geofísico. *Revista Brasileira de Geociências*, 42 (Supl 1): 154-166. 2012

GASPAR, M. T. P. Sistema aquífero Urucuia: caracterização regional e propostas de gestão. 2006. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/6742>. Acesso em: 21 dez. 2021.

GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G. O sistema aquífero Urucuia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, n. 4, p. 216-226, 2007. Suplemento. Disponível: <https://pgegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9236>. Acesso em: 21 dez.

GOMES, R.A.A.D. & MOTTA, A.C. Projeto Levantamento Gravimétrico no estado da Bahia. Relatório Final. Salvador:CPRM, 1980.5v. Convenio DNPM/CPRM.

GEORGE V., K.; FRANK C., F. Electrical methods in geophysical prospecting. Em: **International series of monographs on electromagnetic waves**. 1. ed. Oxford, New York: Pergamon Press, 1966. v. 10p. 519.

HARTT, C.F. 1870 - *Geology and Physical Geography of Brazil*; Boston, p. 480.

HASUI, Y. & HARALYI, N.L.E. 1991. Aspectos Lito-estruturais e geofísicos do Soerguimento do Alto Paranaíba. *Geociências*, São Paulo, 10: 57-77.

KRIEGER, L.; PEACOCK, J. R. MTpy: A Python toolbox for magnetotellurics. **Computers & Geosciences**, v. 72, p. 167–175, nov. 2014.

LIMA, O.A.L. Estudos geológicos e geofísicos do Aquífero Urucuia na Bacia do Rio Cachorro -Oeste do Estado da Bahia. Relatório técnico. Salvador-BA: 2000. Superintendência de Recursos Hídricos-SRH/ Centro de Pesquisas em Geofísica e Geologia-CPGG/UFBA. 42p

LIMA, O.A.L. Levantamentos Geofísicos no Aquífero Urucuia: Sub-bacias dos Rios Formoso e Arrojado, Bahia. Relatório técnico. Salvador-BA: 2007. Universidade Federal da Bahia/ Centro de Pesquisas em Geo-física e Geologia-CPGG/UFBA. 37p

MARINHO,F.; OLIVEIRA,W.; QUINTÃO, S.; PONTES,C.; SOARES, O.& MELLO,U., 1991. Levantamento gravimétrico na Bacia do São Francisco. PETROBRAS-DEPEX-SEDOC. RIO DE JANEIRO.

MATOVANI et al, 2019. Estudo do Potencial Hídrico da região Oeste da Bahia: quantificação e monitoramento da disponibilidade dos recursos do aquífero Urucuia e superficiais nas bacias do rio Grande, Corrente e Carinhanha. Viçosa-MG. 359p. il.Relatório Técnico final.

MOORE,B. Geological Reconnaissance of the South west corner of the Maranhão Basin.1963.Rio de Janeiro, Petrobras-Depex.

MORAIS FILHO, J.C. R. Programa de Levantamento Geológico Básico do Brasil. Coribe. Folha SD.23-X-C-V.Estado da Bahia. 1:100.000. Brasília, CPRM.1997.80p.il. mapa.

NASCIMENTO, K. R. F. do (coord.). Uso conjunto das águas superficiais e subterráneas da subacia do Rio das Fêmeas - BA: resumo executivo do relatório final. Salvador: SRH, 2003. ANA/GEF/PNUMA/OEA, Superintendência de Recursos Hídricos (SRH). 208p Disponível em: [https://cdn.agenciapeixe vivo.org.br/media/2019/06/Uso-Conjunto-das- %C3%81guas-Superficiais-e-Subterr%C3%A2neas-da-Sub-bacia-do-rio-das- F%C3%A2neas-BA.pdf](https://cdn.agenciapeixe vivo.org.br/media/2019/06/Uso-Conjunto-das-%C3%81guas-Superficiais-e-Subterr%C3%A2neas-da-Sub-bacia-do-rio-das-F%C3%A2neas-BA.pdf). Acesso em: 21 dez. 2021.

NEERAJ, S. **Tutorial: Processing theory**. Documentação de software. Disponível em: <<https://resistics.io/tutorial.html>>. Acesso em: 9 dez. 2022.

OLIVEIRA, L.T. Balanço hídrico transitório e análise das variações de níveis d'água na porção meridional do aquífero Urucuia – Bahia/ Leanize Teixeira Oliveira . – Salvador, 2020

OLIVEIRA, A.I. & LEONARDOS, O.H. Geologia do Brasil. Is. I.I:Serv. Inf.Agric., 1943. 813p. (Série Didática, 2).

PASTANA DE LUGÃO, P.; WANNAMAKER, P. E. Calculating the two-dimensional magnetotelluric Jacobian in finite elements using reciprocity. **Geophysical Journal International**, v. 127, n. 3, p. 806–810, dez. 1996.

PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A (Eds.) **Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais**. Belo Horizonte: SBG, 2001. 349 p.

PORSANI, J.; FONTES, S. **Estudo magnetotelúrico na bacia do São Francisco**. Rio de Janeiro: PETROBRAS/CENPES, 1992. 21 p. Relatório de Projeto de Pesquisa.

REGO, L. F. M. Reconhecimento geológico da parte ocidental do Estado da Bahia. **Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil**, Rio de Janeiro, n. 17, p. 33-54, 1926.

SANTANA, A. G.; LORDÊLLO, A. V. **Relatório Técnico de Avaliação das Condições Ambientais e de Atividades Impactantes nos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Correntina e outros**. Salvador: SRH, 1999. 19 p.

SGARBI, G.N.C.; SGARBI,P.B.A.; CAMPOS,J.E.G.; DARDENNE,M.A.; PENHA,U.C. 2001. Bacia Sanfranciscana: o registro Fanerozóico da bacia do são Francisco. In: Bacia do São Francisco-Geologia e Recursos Naturais, 1a. ed. Belo Horizonte, SBG, 2001.v.1, p.93-138.

SBG/CPRM. 2021a-Sistema Aquífero Urucuia: Caracterização hidrológica com dados da Rede Hidrometeorológica do Aquífero Urucuia. 138p.II. Brasília, 2021.

SGB/CPRM. 2021b. Sistema Aquífero Urucuia: Monitoramento, Estudos e Bacia-Escola. 265p. il. Brasília, 2021.

SIMPSON, F.; BAHR, K. **Practical magnetotellurics**. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2005.

SCHUSTER, H. D. M.; SILVA, F. F. da; TEIXEIRA, S. L.; BATISTA, L. H. G.; FREITAS, W. A. de. Estudos hidrogeológicos do aquífero Urucuia no oeste baiano para obtenção de parâmetros nas outorgas de mananciais subterrâneos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2002, São Paulo. Anais [...]. Florianópolis, SC: ABAS, 2002. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/2736>. Acesso em: 21 dez. 2021.

SCHUSTER, H. D. M. Modelagem de fluxo subterrâneo com vistas à definição de parâmetros para outorgas de mananciais subterrâneos na bacia hidrográfica do rio dos Cachorros - oeste do estado da Bahia. Projeto rio dos Cachorros e anexos. 113 p. Salvador:BA, 2003.

TSCHIEDEL, M.W. Aplicação de estudo geofísico como contribuição ao conhecimento da tectônica da Sub-Bacia Urucuia. Brasília-DF, 2004. 76p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.

UJJAL K. BORAH; PRASANTA K. PATRO; VADDEBOINA SURESH. Processing of noisy magnetotelluric time series from Koyna-Warna seismic region, India: a systematic approach. **Annals of Geophysics**, v. 58, n. 2, p. 1, 15 jun. 2015.

VIEIRA, M. de S. B. Estudo das vazões em períodos de recessão hídrica no sistema aquífero Urucuia. 2021. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) /Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/41347>. Acesso em: 21 dez. 2021.

WANNAMAKER, P. E.; STODT, J. A.; RIJO, L. A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modelling. **Geophysical Journal International**, v. 88, n. 1, p. 277–296, 1 jan. 1987.

WECKMANN, U.; MAGUNIA, A.; RITTER, O. Effective noise separation for magnetotelluric single site data processing using a frequency domain selection scheme. **Geophysical Journal International**, v. 161, n. 3, p. 635–652, jun. 2005.