



Observatório
Nacional

Divisão de Programas
de Pós-Graduação

INTEGRAÇÃO DE TÉCNICAS DOS MÉTODOS
GEOFÍSICOS NA IDENTIFICAÇÃO DE
CONDICIONANTES HIDROGEOLÓGICOS PARA A
OCORRÊNCIA DE URÂNIO NAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO DE SÃO JOSÉ DO VALE
DO RIO PRETO – RJ

Felipe Fraifeld

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Geofísica do Observatório
Nacional, como parte dos
requisitos necessários à obtenção
do título de Mestre em Geofísica.

Orientador: Dr. Juarez Lourenço – ON/ MCTI

Coorientador: Dr. Giovanni Chaves Stael ON/MCTI

Rio de Janeiro

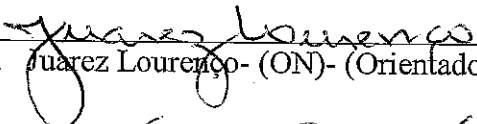
Outubro de 2023

"INTEGRAÇÃO DE TÉCNICAS DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS NA
IDENTIFICAÇÃO DE CONDICIONANTES HIDROGEOLÓGICOS PARA A
OCORRÊNCIA DE URÂNIO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO DE
SÃO JOSÉ DO VALE DO RIO PRETO – RJ"

Felipe Fraifeld

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM GEOFÍSICA.

Aprovada por:


Dr. Luiz Carlos de Carvalho Benyosef – (ON) – (Orientador)


Dr. José Marcus de Oliveira Godoy – (PUC-RIO)

RIO DE JANEIRO – BRASIL

10 DE OUTUBRO DE 2023

Fraifeld, Felipe

Integração de técnicas dos métodos geofísicos na identificação de condicionantes hidrogeológicos para a ocorrência de urânio nas águas subterrâneas na região de São José do Vale do Rio Preto – RJ/Felipe Fraifeld. – Rio de Janeiro: ON, 2023.

119 p. 29,7cm.

Orientador: Juarez Lourenço – ON/MCTI

Coorientador: Giovanni Chaves Stael – ON/MCTI

Dissertação (mestrado) – ON/Programa de Pós-graduação em Geofísica, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 110 – 118.

1. Urânio. 2. Magnetometria. 3. Gamaespectrometria. 4. Geotermia. 5. Hidrogeologia. I. Lourenço, Juarez; Stael, Giovanni Chaves. II. Observatório Nacional, Programa de Pós-graduação em Geofísica. III. Integração de técnicas dos métodos geofísicos na identificação de condicionantes hidrogeológicos para a ocorrência de urânio nas águas subterrâneas na região de São José do Vale do Rio Preto – RJ.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço à minha família, meus pais Gerson e Angela, minha irmã Nathalia e meu filho Gustavo. Para minha Mãe Angela Maria, um agradecimento extra mais do que especial por ser a grande fortaleza da minha vida, responsável por todo o suporte e apoio que me faz superar todas as dificuldades.

Ao meu filho, Gustavo, fonte de inspiração e força para sempre seguir em frente, sem importar o tamanho das ondas ou intensidade das tempestades que atravessam a vida.

À minha namorada Marcella Leite, por sua parceria na reta final, carinho, alegrias e amor.

Ao meu orientador Juarez Lourenço, por sua compreensão com os momentos pessoais difíceis que passei ao longo do mestrado e por todo apoio e suporte na elaboração da dissertação.

Aos meus amigos, aqui representados nas pessoas de Bruno Vieira, Alex Farias, Felipe Waldherr e Rodrigo Paixão que propiciaram momentos leves que auxiliaram a superar as fases mais pesadas ao longo do mestrado.

Ao Observatório Nacional, instituição secular que sempre tive grande admiração e que só aumentou ao longo do meu tempo enquanto mestrando.

Aos amigos do mestrado que ao longo das disciplinas ajudaram sobremaneira e compartilharam momentos de grande alegria, em especial Nicolas, Asmminey, Oscar, Marcos, Mari, Bruno e Emanuele.

À natureza, ciência e ao método científico.

“Afinal, o que é um cientista? É um homem curioso olhando por um buraco de fechadura, o buraco de fechadura da natureza, tentando saber o que está acontecendo”

Jacques Yves Cousteau

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Observatório Nacional como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Geofísica.

INTEGRAÇÃO DE TÉCNICAS DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS NA
IDENTIFICAÇÃO DE CONDICIONANTES HIDROGEOLÓGICOS PARA A
OCORRÊNCIA DE URÂNIO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO DE
SÃO JOSÉ DO VALE DO RIO PRETO – RJ

Felipe Fraifeld

Outubro de 2023

A presente pesquisa teve como objetivo realizar a investigação dos condicionantes hidrogeológicos para a ocorrência de altas concentrações de urânio nos poços tubulares na região de São José do Vale do Rio Preto, no Estado do Rio de Janeiro, a partir da utilização integrada de técnicas dos métodos geofísicos. O substrato geológico da região de São José do Vale do Rio Preto é formado majoritariamente por rochas ígneas e metamórficas de alto grau, que influenciam no predomínio do aquífero do tipo fissural na área de estudo. A avaliação dos dados aerogeofísicos, geotermais e hidrogeológicos apontam para a correlação entre maiores temperaturas da água subterrânea com os poços com teores elevados de urânio, bem como a presença de lineamentos estruturais de direção SO-NE e NW-SE que recortam áreas com respostas elevadas na análise gamaespectrométrica. As análises também indicam a ocorrência de um fluxo subterrâneo preferencial por essas estruturas até o vale do rio Preto, que drena encaixado sob forte influência da zona de cisalhamento transpressiva que sutura terrenos tectônicos, justamente nos locais onde há o registro de elevados teores de urânio na água subterrânea.

Palavras-chave: Urânio; Magnetometria; Gamaespectrometria; Geotermia; Hidrogeologia.

Abstract of the Dissertation presented to the National Observatory's Graduate Program in Geophysics as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Geophysics.

INTEGRATING TECHNIQUES FROM GEOPHYSICAL METHODS IN THE IDENTIFICATION OF HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS FOR THE OCCURRENCE OF URANIUM IN GROUNDWATER IN THE REGION OF SÃO JOSÉ DO VALE DO RIO PRETO – RJ

Felipe Fraifeld
October de 2023

This research aimed to carry out the investigation of the hydrogeological conditions for the occurrence of high concentrations of uranium in tubular wells in the region of São José do Vale do Rio Preto, in the State of Rio de Janeiro, based on the use of integrated techniques from geophysical methods. The geological basement of the region of São José do Vale do Rio Preto is formed mainly by igneous and metamorphic rocks, which influence the predominance of the fissure-type aquifer in the study area. The analysis of aerogeophysical, geothermal and hydrogeological data points to the connection between higher groundwater temperatures with wells with high uranium content. The data also indicates the presence of faults in the SW-NE direction that cut out areas with high response in the gamma-spectrometric analysis and, in association with the evaluation of preferential underground flow directions, show that the water flows through these structures to the Preto river valley, which drains under the strong influence of the transpressive shear zone that sutures tectonic terrains, precisely in the places where there are records of high levels of uranium in groundwater.

Keywords: Uranium; Aeromagnetic; Gamma-ray Spectrometry; Geothermic; Hydrogeology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Poço cadastrado com altos teores de urânio - A.....	17
Figura 2 - Poço cadastrado com altos teores de urânio - B.....	17
Figura 3 – Poço cadastrado com altos teores de urânio- C.....	17
Figura 4 – Poço em uso na estrada Canteadas - D.	17
Figura 5 – Mapa de localização da área de estudo.	18
Figura 6 – Precipitação acumulada mensal.....	20
Figura 7 – Aspecto da paisagem da sede do município de São José do Vale do Rio Preto	21
Figura 8 – Elevação topográfica com paredões rochosos.....	21
Figura 9 - Elevação topográfica com paredões rochosos da Serra das Flores.	22
Figura 10 – Localização dos cinturões neoproterozoicos.....	25
Figura 11 - Arcos magmáticos neoproterozoicos do Brasil	25
Figura 12 - Modelo tectônico simplificado com a evolução dos dois Sistemas de Arcos Magmáticos.....	27
Figura 13 - Mapa tectônico do setor central da faixa Ribeira.	28
Figura 14 - Seção estrutural composta do Orógeno Ribeira.	29
Figura 15 – Mapa geológico da área de estudo..	30
Figura 16 – Representação esquemática das componentes geomagnéticas. .	40
Figura 17 – Exemplo dos tipos de sensores.....	43
Figura 18 – Manobras de operacionais <i>roll</i> , <i>pitch</i> e <i>yaw</i>	43
Figura 19 – Exemplo de um plano de voo para um aerolevanteamento.	44
Figura 20 – Abundâncias relativas dos elementos radioativos.....	49
Figura 21 – Espectro de energia de K, U e Th	50
Figura 22 – Representação das variações de altura..	52
Figura 23 – Mapa dos poços com concentrações de urânio elevadas.....	60
Figura 24 - SRTM e poços da base SIAGAS na área de estudo.....	62
Figura 25 - Histograma de profundidade dos poços.....	61
Figura 26 – Perfil do poço 3100002009.....	64
Figura 27 – Perfil do poço 3100002010.....	64
Figura 28 – Modelo IDW da carga hidráulica obtida para a área de estudo e curvas potenciométricas e linhas de fluxo.....	68

Figura 29 - Detalhe do manto de alteração sobre afloramento de granito da Suíte Serra dos Órgãos..	69
Figura 30 - Detalhe do manto de alteração sobre afloramento de biotita gnaisse do complexo Rio Negro..	69
Figura 31 - Depósito aluvial às margens do rio Preto.....	69
Figura 32 - Afloramento de Biotita gnaisse do Complexo Rio Negro..	69
Figura 33 - Biotita gnaisse bandado do Grupo Raposo.....	70
Figura 34 – Afloramento de Granito com fenocristais de plagioclásio da Suíte Serra dos Órgãos.....	70
Figura 35 – Afloramento de biotita gnaisse com fraturas métricas em corte de Estrada.....	71
Figura 36 – Detalhe das fraturas métricas observadas no afloramento	71
Figura 37 – Mapa do Modelo Digital do Terreno da área de estudo.	73
Figura 38 – Mapa do campo magnético anômalo	75
Figura 39 – Mapa da Primeira Derivada Vertical.....	76
Figura 40 – Mapa da Amplitude do Sinal Analítico.....	78
Figura 41 – Mapa da Derivada em X.....	80
Figura 42 – Mapa Gamaespectrométrico da Contagem Total.....	82
Figura 43 – Mapa Gamaespectrométrico - canal Potássio.....	84
Figura 44 – Mapa Gamaespectrométrico, canal Tório	86
Figura 45 – Mapa Gamaespectrométrico, canal Urânio	89
Figura 46 – Mapa Gamaespectrométrico, canal Razão U/Th.....	91
Figura 47 – Mapa Gamaespectrométrico, canal ternário.....	94
Figura 48 – Localização dos poços de água subterrânea.	95
Figura 49 – Histograma da concentração de sílica.	96
Figura 50 – Histograma de temperaturas correspondentes.	97
Figura 51 – Relação de temperatura e fluxo de calor.....	98
Figura 52 – Modelo IDW de temperatura da água subterrânea.	99
Figura 53 – Modelo IDW de fluxo de calor na área de estudo.....	100
Figura 54 – Modelo esquemático em corte da dinâmica do fluxo subterrâneo na área de estudo..	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição de água nos reservatórios do planeta Terra.	14
Tabela 2 – Substâncias dos processos minerários existentes.	20
Tabela 3 - Dados dos poços nos municípios abarcados pela área de estudo..	33
Tabela 4 – Teor de urânio nos minerais mais comuns em rochas ígneas.....	34
Tabela 5 – Exemplos de métodos geofísicos e suas propriedades físicas.....	38
Tabela 6 – Variação da concentração média dos radioelementos em rochas e solos na Austrália.	48
Tabela 7 – Dados das amostras do LABAGUAS na área de estudo.....	59
Tabela 8 – Dados litológicos do poço 3100002009.....	59
Tabela 9 – Dados litológicos do poço 3100002010.....	66
Tabela 10 – Poços da base SIAGAS.....	66
Tabela 11 – Parâmetros utilizados para o cálculo da temperatura.....	96

LISTA DE SIGLAS


ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
API	American Petroleum Institute
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverse Distance Weighted
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
LABAGUAS	Laboratório de Caracterização de Águas
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS84	World Geodetic System
GEOINEA	Canal de compartilhamento de informações geoespaciais

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. ÁREA DE ESTUDO	18
3. OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS	23
4. JUSTIFICATIVA	24
5. ASPECTOS GEOLÓGICOS	25
5.1 Contexto Geotectônico	25
5.2 Contexto Hidrogeológico	31
5.3 Hidrogeoquímica	33
6. MÉTODO E METODOLOGIA	37
6.1 Método	37
6.1.1 Magnetometria.....	38
6.1.1.1 Redução de Dados Magnéticos.....	42
6.1.1.1.1 Correção Geomagnética.....	42
6.1.1.1.2 Correção Magnética Dinâmica	42
6.1.1.1.3 Correção da Variação Diurna	44
6.1.1.1.4 Correção do Erro de Paralaxe	45
6.1.1.2 Filtragem dos Dados	45
6.1.1.2.1 Primeira Derivada Vertical	45
6.1.1.2.2 Amplitude de Sinal Analítico (ASA)	46
6.1.2 Radiometria	46
6.1.2.1 Correções em dados radiométricos	50
6.1.2.1.1 Correção do tempo morto.....	51
6.1.2.1.2 Correção da altura efetiva do levantamento aéreo	52
6.1.2.1.3 Remoção do background.....	52
6.1.2.1.4 Remoção do background do radônio atmosférico	53
6.2.1.5 Correção do Efeito Compton	53

6.1.2.1.6 Correção altimétrica	54
6.1.2.1.7 Razões radiométricas	54
6.1.3 Geotermia.....	54
6.2 Metodologia	56
6.2.1 Pesquisa Bibliográfica	56
6.2.2 Levantamento de Campo	57
6.2.3 Parâmetros do Aerolevanteamento.....	58
6.2.4 Elaboração do Banco de Dados.....	58
6.2.5 Dados dos Poços	58
6.2.5.1 Poços com Alto Teor de Urânio.....	58
6.2.5.2 Poços Cadastrados na Base SIAGAS.....	61
6.2.6 Processamento dos Dados	63
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
7.1 Hidrogeologia	66
7.1.1 Fluxo Subterrâneo.....	66
7.1.2 Hidrogeologia local.....	69
7.1.2.1 Sistemas aquíferos inconsolidados – Granular	70
7.1.2.2 Sistema aquífero de porosidade fissural	70
7.2 Geofísica	72
7.2.1 Magnetometria	74
7.2.2 Gamaespectrometria.....	81
7.2.3 Geotermia.....	95
7.3 Compilação dos Resultados	101
8. CONCLUSÕES	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

1. INTRODUÇÃO

As pesquisas voltadas à prospecção e gerenciamento de águas subterrâneas são de extrema importância ao redor do mundo. No Brasil, dados de 2018 indicam  que 30% da utilização das águas subterrâneas é voltada para o abastecimento doméstico e cerca de 24% para o setor agropecuário, enquanto aproximadamente 52% dos municípios brasileiros utilizam a água subterrânea para o abastecimento (CPRM, 2018 apud HIRATA et al., 2019).

Segundo Fitts (2015) a quantidade de água total no planeta Terra é de aproximadamente $1,4 \times 10^9$ km³. Na Tabela 1 é listada a distribuição de água nos principais reservatórios do planeta e seus respectivos percentuais, assim como, o percentual de água fresca (MAIDMENT, 1993).

Tabela 1 - Distribuição de água nos reservatórios do planeta Terra.

Reservatório	Porcentagem de todas as águas (%)	Porcentagem de água fresca (%)
Oceanos	96,5	-----
Gelo e neve	1,8	69,6
Água sub. doce	0,76	30,1
Água sub. salina	0,93	-----
Lagos de água doce	0,007	0,26
Lagos salinos	0,006	-----
Pântanos	0,0008	0,03
Rios	0,0002	0,006
Umidade do solo	0,0012	0,05
Atmosfera	0,001	0,04
Biosfera	0,0001	0,003

Fonte: Maidment (1993).

De acordo com os dados da Tabela 1, o gelo/neve e as águas subterrâneas constituem os maiores reservatórios de água doce do planeta. Isso os torna a reserva natural mais relevante para a segurança hídrica. Também é possível observar na Tabela 1 que as águas subterrâneas doces são muito mais abundantes que a água doce de superfície, entretanto a facilidade de encontrar e utilizar a água de superfície fez com que seu uso fosse bem mais intensificado em todas as esferas de consumo. Então, cabe destacar que a grande maioria do volume de água subterrânea está armazenado em profundidade na crosta terrestre, em condições salobras para a maioria dos usos antrópicos (FITTS, 2015).

No Brasil, as águas subterrâneas e o seu consumo são regulamentados pelo anexo XX da portaria de Consolidação nº 5 de 28.09.2017 do Ministério da Saúde e o decreto que realiza o controle e a vigilância da qualidade da água para consumo humano, a Resolução RDC nº274 de setembro de 2005 assim como pela resolução CONAMA nº396/08, no estado do Rio de Janeiro, o Decreto nº40.156 de outubro de 2006 estabelece procedimentos para a regularização do uso de água superficial e em subsuperfície.

Apesar de todos os avanços no tratamento da água, na evolução dos métodos analíticos para a detecção de contaminantes e na legislação pertinente, cabe destacar que mesmo as águas avaliadas como puras podem apresentar elementos e substâncias que devem ser removidas antes do consumo humano. A presença de certos elementos químicos na água e as concentrações associadas, assim como outros parâmetros da qualidade da água estão intimamente relacionados às condições locais, como a geologia, o clima e as atividades humanas.

Desse modo, cabe destacar que nas águas subterrâneas há a ocorrência natural de teores elevados de sais minerais, com conteúdo variáveis de cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), potássio (K) e estrôncio (Sr), e podem conter, ou não elementos traço. Além desses, é possível a ocorrência de contaminantes radiogênicos nas águas.

No Brasil, os primeiros estudos sobre a contaminação e radioativa em águas de fontes subterrâneas tiveram início em 1920. No município de Águas da Prata, São Paulo, houve grandes avanços nas pesquisas na década de 1950, com a execução de prospecção de minerais uraníferos no planalto de Poços de Caldas (BONOTTO, 2004).

Nesse sentido, cabe destacar as pesquisas realizadas por Godoy et al., (2019) que apontam a presença de elevadas concentrações de elementos radioativos, como o urânio, nas águas dos poços tubulares da região Serrana do Estado do Rio de Janeiro. Enquanto a legislação brasileira define um limite máximo de 30 µg/L de urânio, as análises realizadas por Godoy et al., (2019) detectaram até 930 microgramas/litro nas águas dos poços analisados.

Uma das causas das elevadas concentrações de elementos radioativos nas águas subterrâneas pode ser justificada pela ocorrência das rochas na região serrana do estado do Rio de Janeiro, do qual, Picciotto (1950) apud Bonotto (2004) apresentou comprovações de que nos granitos, uma rocha ígnea extremamente comum na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, o urânio pode ser encontrado tanto nos minerais principais quanto nos acessórios.

Tendo em vista a análise laboratorial da água extraída e a conclusão de que diversos poços de abastecimento estavam contaminados por urânio, entre outros metais pesados, o Ministério Público ajuizou uma ação civil pública em 2018 que requereu a obrigação de colocação e lacre de todos os poços nos quais se observe contaminação por metais pesados. Conforme é possível observar nas Figuras 1, 2 e 3, alguns dos poços registrados com altos teores de urânio na região não estão sendo utilizados. É importante salientar, entretanto, que o devido lacre não pode ser constatado em diversos dos poços em vistoria de campo realizada na região, conforme ilustrado na Figura 4.

Desta forma, a presente pesquisa propõe a utilização dos métodos geofísicos integrados a hidrogeoquímica, para identificar as fontes geradoras e, também, os elementos carreadores de material contaminado até o ponto de captação da água, tendo em vista seus efeitos deletérios na saúde humana da população.



Figura 1 – Poço cadastrado com altos teores de urânio próximo ao Ginásio Municipal - Mário de Araújo Chaves desativado, porém não lacrado. Fonte: O autor.



Figura 2 - Poço cadastrado com altos teores de urânio no Sítio da Cachoeira desativado. Fonte: O autor.



Figura 3 – Poço cadastrado com altos teores de urânio próximo ao Ginásio Municipal - Mário de Araújo Chaves desativado, porém não lacrado. Fonte: O autor.



Figura 4 – Poço em uso na estrada Canteadas, utilizado para irrigação de plantação de hortaliças. Fonte: O autor.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se majoritariamente no município de São José do Vale do Rio Preto, inserido na região serrana no estado do Rio de Janeiro, abrangendo os municípios de Teresópolis, Petrópolis, Três Rios, Sumidouro e Sapucaia. As bacias de drenagem existentes na área de estudo possuem parte de suas nascentes nas Serras Maravilha, Flores, Boa Vista e Capim. A Figura 5 abaixo ilustra a área de estudo, que está situada entre os paralelos 22° 05'2" e 22° 16' Sul e os meridianos 42° 44' e 43° 02' Oeste.

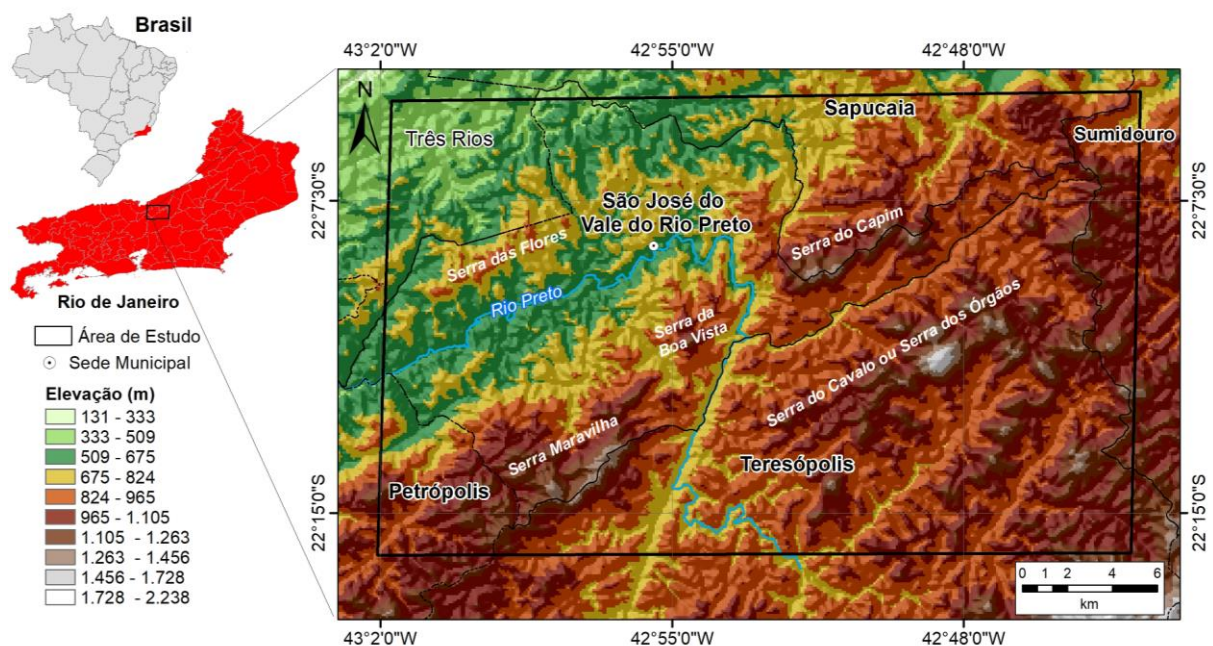


Figura 5 – Mapa de localização da área de estudo. Fonte: o autor.

A região tem como via de acesso principal a BR 116 para Teresópolis ao sul e Sapucaia ao norte. Outra via é a RJ 134, que liga São José do Vale do Rio Preto aos municípios de Areal e Petrópolis, a oeste conectando com a BR-040. O município de São José do Vale do Rio Preto fica a uma distância de 129 km da cidade do Rio de Janeiro e a 360 km de Belo Horizonte.

São José do Vale do Rio Preto faz parte da Região Serrana do estado do Rio de Janeiro, que também abrange os municípios de Bom Jardim, Cantagalo, Carmo, Cordeiro, Duas Barras, Macuco, Nova Friburgo, Petrópolis, Santa Maria Madalena, São Sebastião do Alto, Sumidouro, Teresópolis e Trajano de Moraes.

No que se refere à hidrografia da área de estudo, a partir da base topográfica (GEOINEA, 2021) é possível observar que o rio Preto possui as suas nascentes a mais de 2.000 metros de altitude, no vale dos Frades em Teresópolis, e que se estende por mais de 50 quilômetros até desembocar no rio Piabanha, importante afluente do rio Paraíba do Sul. Ademais, é possível citar na área de estudo, além do rio Preto, os rios Capim, Calçado, Bonito, Formiga, além dos córregos Sujo, Gamboa, Banqueta, dentre outras drenagens de menor porte.

Para fins de gestão das águas, o território do Estado do Rio de Janeiro foi dividido em nove Regiões Hidrográficas, conforme a Resolução Nº 107/2013 do CERHI/RJ, de forma que a área de estudo está inserida na Região Hidrográfica IV (RH-IV) (DOI-RJ, 2013), que apresenta área de aproximadamente 3.640 km² e sua gestão é realizada pelo Comitê Piabanha, criado pelo CERHI/RJ em 2003, sendo reconhecido e qualificado pelo Decreto Estadual nº 38.235/05.

No uso e cobertura do solo, na RH-IV está ocorrendo uma perda da sua cobertura vegetal, originalmente formada pela fitofisionomia de floresta estacional do bioma de Mata Atlântica, em decorrência da expansão de áreas urbanas e agrícolas. Sendo que, a economia da região, é marcada pelo desenvolvimento de atividades rurais, como para o plantio de verduras e legumes. Além de pecuária e avicultura, cabe destacar a produção de hortifrutigranjeiros em São José do Vale do Rio Preto, que se tornou o maior produtor do Estado do Rio de Janeiro (PMSJVRP, 2023).

O centro de São José do Vale do Rio Preto, por sua vez, possui comércios e ao longo do rio Preto é observada a atividade de extração de areia. De acordo com os dados do SIGMINE (2023), há na área de estudo 52 (cinquenta e dois) processos minerários, conforme apresentado na Tabela 2. Destes, 17 (dezessete) processos minerários estão relacionados à exploração da água mineral, cabendo destacar a extração de areia ao longo do leito do rio Preto, próximo à poços onde foi constatada a ocorrência de teores elevados de urânio (GODOY et. al., 2019).

Tabela 2 – Substâncias dos processos minerários existentes na área de estudo.

Substâncias	Número de processos
Água mineral	17
Areia	19
Argila	3
Caulim	2
Dado não cadastrado	1
Granito	5
Minério de ouro	4
Saibro	1
Total	52

Fonte: Extraído de SIGMINE (2023).

No que se refere aos aspectos climáticos, a área de estudo está inserida na zona climática tropical Brasil central (IBGE, 2002), variando de subquente a mesotérmico brando. Anualmente, de acordo com os dados da normal climatológica da estação 83744 operada pelo INMET (2023) em Teresópolis, há um total pluviométrico de 1.649,9 mm, com um período chuvoso entre novembro e março, e um período seco de abril a outubro (Figura 6).

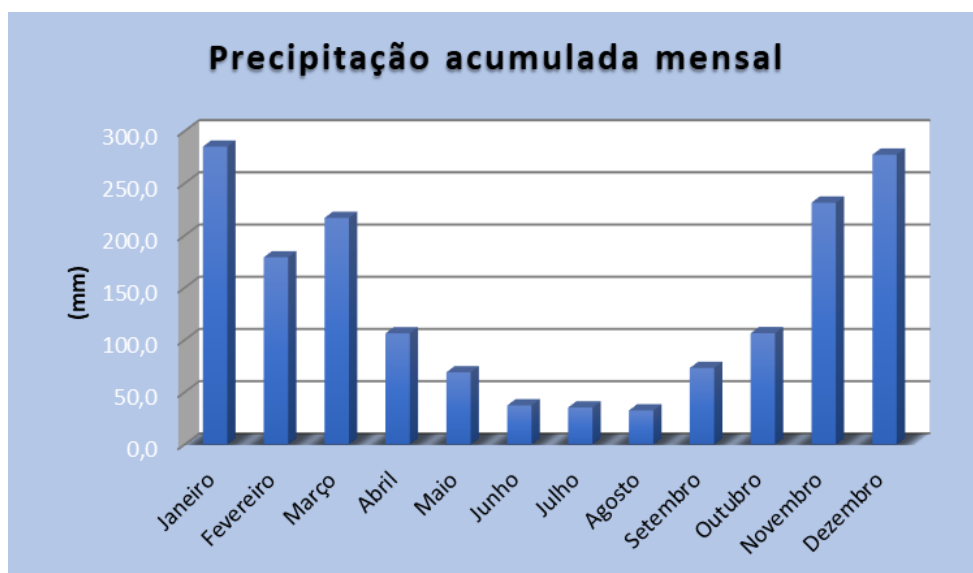


Figura 6 – Precipitação acumulada mensal. Fonte: Extraído de INMET, 2023.

Conforme é possível observar nos mapas topográficos e na Figura 7, a paisagem geomorfológica da sede do município de São José do Vale do Rio Preto, é marcada por um vale estrutural que se estende por mais de 4 quilômetros na direção SO-NE (CPRM, 2001), e é cercada por morros e serras que ultrapassam os mil metros de altitude, como exemplo a Serra da Boa Vista, Serra do Capim (Figura 8) e da Serra das Flores (Figura 9).



Figura 7 – Aspecto da paisagem da sede do município de São José do Vale do Rio Preto, localizado às margens do rio Preto, em um vale estrutural. Fonte: o autor.

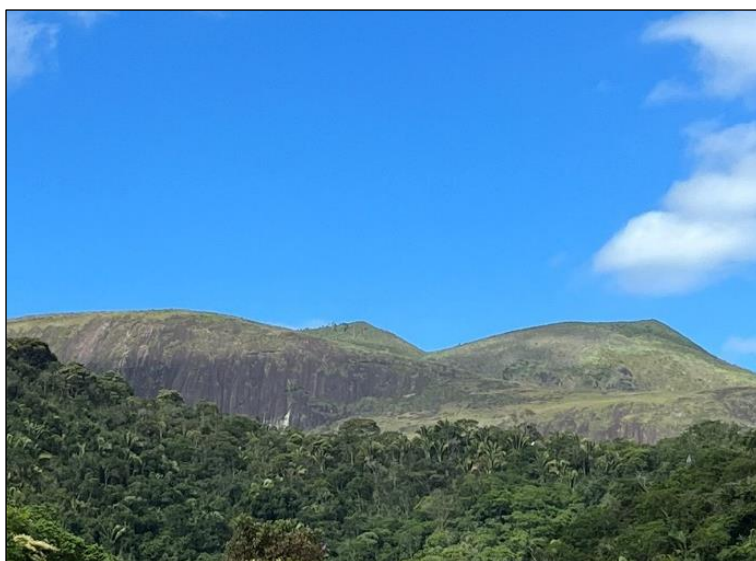


Figura 8 – Elevação topográfica com paredões rochosos da Serra do Capim. Fonte: o autor.



Figura 9 - Elevação topográfica com paredões rochosos da Serra das Flores e o desenvolvimento de citricultura próximo ao fundo de vale. Fonte: o autor.

O município de São José do Vale do Rio Preto, no contexto do abastecimento de água, possui política e plano municipal de saneamento, atendendo a 72,56% da população (PMSJVRP, 2023). Do ponto de vista da utilização da água subterrânea, em função da distribuição desigual da pluviosidade ao longo do ano, ocorrem variações sazonais, com períodos úmidos de novembro a março e períodos secos de abril a outubro (INMET, 2023). Devido a este fator, na região há uma busca pela abertura de poços artesianos para suprir a escassez promovida pela irregularidade das chuvas.

3. OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem como objetivo geral a utilização de forma integrada e em cas dos métodos geofísicos para identificar os condicionantes hidrogeológicos na ocorrência de altas concentrações de urânio nas águas subterrâneas na área de estudo.

Os objetivos específicos propostos são os seguintes:

- 1) Realizar o levantamento dos poços cadastrados na bacia hidrográfica do rio Preto no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), mantido pela CPRM;
- 2) Elaborar um mapa potenciométrico da área de estudo que permita identificar as linhas de fluxo subterrâneo preferenciais;
- 3) Utilizar o banco de dados magnetométricos para gerar mapas temáticos e identificar os corpos, e estruturas geológicas associadas à hidrogeoquímica do urânio;
- 4) Utilizar o banco de dados gamaespectrométricos para gerar os mapas temáticos e identificar os domínios e as fontes geradoras com alta concentração de urânio e identificar as concentrações de eU, eTh e K associados à hidrogeoquímica do urânio;
- 5) Utilizar os dados físico-químicos dos poços analisados pelo LABAGUAS, estimar o fluxo de calor pelo método geoquímico e identificar anomalias associadas ao calor radiogênico; e
- 6) Realizar o mapeamento das áreas com alto potencial de ocorrência de águas subterrâneas com concentrações elevadas de urânio, com base nos dados magnéticos, radiométricos e geotérmicos adquiridos.

4. JUSTIFICATIVA

O comprometimento da qualidade das águas superficiais nas bacias hidrográficas da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro (MOLINARI et al., 2017; PERES et al., 2007) tem levado cada vez mais a instalação de poços tubulares para a obtenção da água subterrânea, livre de efluentes sanitários e industriais. Entretanto, a água que em teoria deveria ser de alta qualidade, potável, apresenta altas concentrações de urânio (GODOY et al., 2000, 2005, 2019), que são decorrentes da natureza geológica local (CPRM, 2001), e vem sendo utilizada de forma massiva pela população.

Dessa forma, há uma premente necessidade em aprofundar os estudos que correlacionem os aspectos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos em maior detalhe para que seja possível delimitar as áreas mais suscetíveis à ocorrência de águas subterrâneas com altas concentrações de urânio em São José do Vale do Rio Preto - RJ.

Nesse sentido, a utilização de técnicas integradas dos métodos geofísicos com as informações da geoquímica busca identificar os condicionantes hidrogeológicos para a ocorrência de altas concentrações de urânio nas águas subterrâneas na região de São José do Vale do Rio Preto. Assim, o presente trabalho pretende auxiliar a gestão pública no controle do abastecimento de água subterrânea para a população, tendo em vista os efeitos deletérios do urânio, como o potencial carcinogênico (NRIAGU et al., 2012 e KEITH et al., 2013).

5. ASPECTOS GEOLÓGICOS

5.1 Contexto Geotectônico

No que se refere aos aspectos geotectônicos, a área de estudo encontra-se inserida na Província Mantiqueira (ALMEIDA et al., 1977). Interpretado como um sistema orogênico neoproterozoico que se distribui entre o sul e sudeste do Brasil, paralelo à costa atlântica, com uma direção preferencial NE-SO que se estende por mais de 3.000 km e envolve as Faixas Móveis Araçuaí, Ribeira, Brasília meridional, Dom Feliciano e São Gabriel (ALMEIDA et al., 1977).

A Figura 10 ilustra os cinturões neoproterozoicos no contexto do paleocontinente Gondwana, enquanto a Figura 11 apresenta a localização dos Arcos magmáticos neoproterozoicos do Brasil, com destaque para o segmento central da Faixa Móvel Ribeira, onde está localizada a área de estudo (*Central Ribeira Belt*).



Figura 10 – Localização dos cinturões neoproterozoicos no contexto do paleocontinente Gondwana. Fonte: Heilbron et. al., (2020).

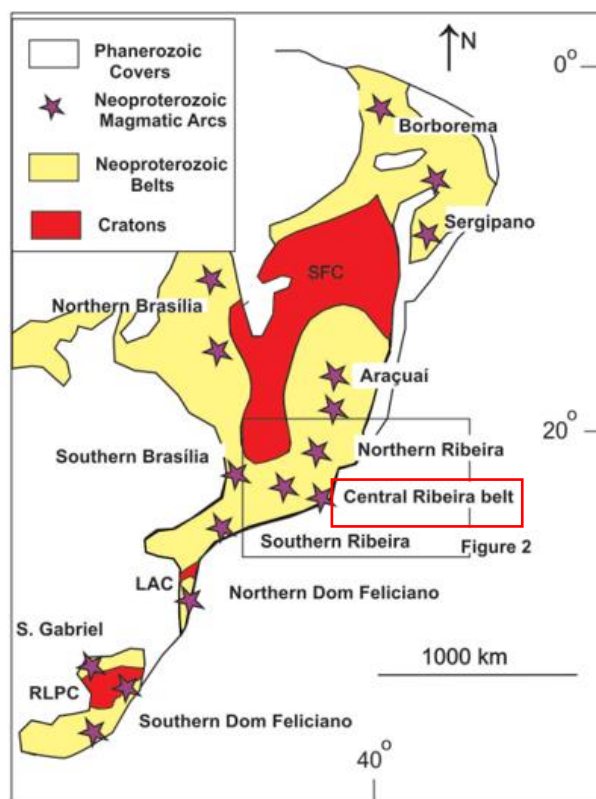


Figura 11 - Arcos magmáticos neoproterozoicos do Brasil, com destaque em vermelho para o segmento central da Faixa Móvel Ribeira. Fonte: adaptado de Heilbron et. al., (2020).

Nesse contexto, cabe destacar que a região de São José do Vale do Rio Preto (região da área de estudo), encontra-se no segmento central da Faixa Móvel Ribeira se embasamento é composto por complexos ortoderivados paleoproterozoicos, complexos paragnássicos neoproterozoicos e suítes intrusivas neoproterozoicas e paleozoicas que ocorrem em formato alongado, de direção preferencial NE-SO (HEILBRON et al., 2004). A sua gênese está relacionada à orogênese Brasileira-Panafricana, que culminou com a formação do supercontinente Gondwana (HEILBRON et al., 2004).

De acordo com Heilbron et al., (2020), os novos dados geocronológicos, geoquímicos e isotópicos obtidos nas últimas duas décadas levaram à descoberta de séries calcálicas neoproterozoicas expandidas e rochas básicas, cujas associações têm assinaturas geoquímicas e isotópicas típicas de arco magmático, que foram geradas em região de supra-subducção do manto astenosférico, por variados processos de diferenciação, mistura e contaminação.

Heilbron et al., (2020) ainda estabelecem dois diferentes sistemas de arcos magmáticos que são descritos para o segmento central da faixa Ribeira, e foram progressivamente acrescidos na borda sudeste e sul do Paleocontinente São Francisco. Sendo o arco interior caracterizado por rochas de arco magmático continental de 650-595 Ma com bacias associadas, enquanto o arco exterior compreende duas fases evolutivas, sendo uma fase intra-oceânica juvenil, de cerca de 860-769 Ma, e uma fase mais madura, de 790-620 Ma. A existência desses dois sistemas de arco magmático na margem passiva do continente São Francisco indica uma subducção complexa e diacrônica (HEILBRON et al., 2020).

A Figura 12 abaixo ilustra o modelo tectônico simplificado com a evolução desses dois sistemas de arcos magmáticos, conforme proposto por Heilbron et al., (2020), sendo:

- a) coexistência de margens passivas e desenvolvimento de arco externo;
- b) inversão das margens passivas e desenvolvimento do sistema de arco interno e estágio maduro do sistema de arco externo; e
- c) colisões diacrônicas.

Portanto, a identificação desses dois sistemas de longos arcos magmáticos no Orógeno Ribeira-Araçuaí leva ao reconhecimento de um cenário evolutivo longo e dinâmico previsto para a Evolução neoproterozoica deste sistema orogênico (HEILBRON et al., 2008, 2017; PEIXOTO et al., 2017; TUPINAMBÁ et al., 2012 apud HEILBRON et al., 2020).

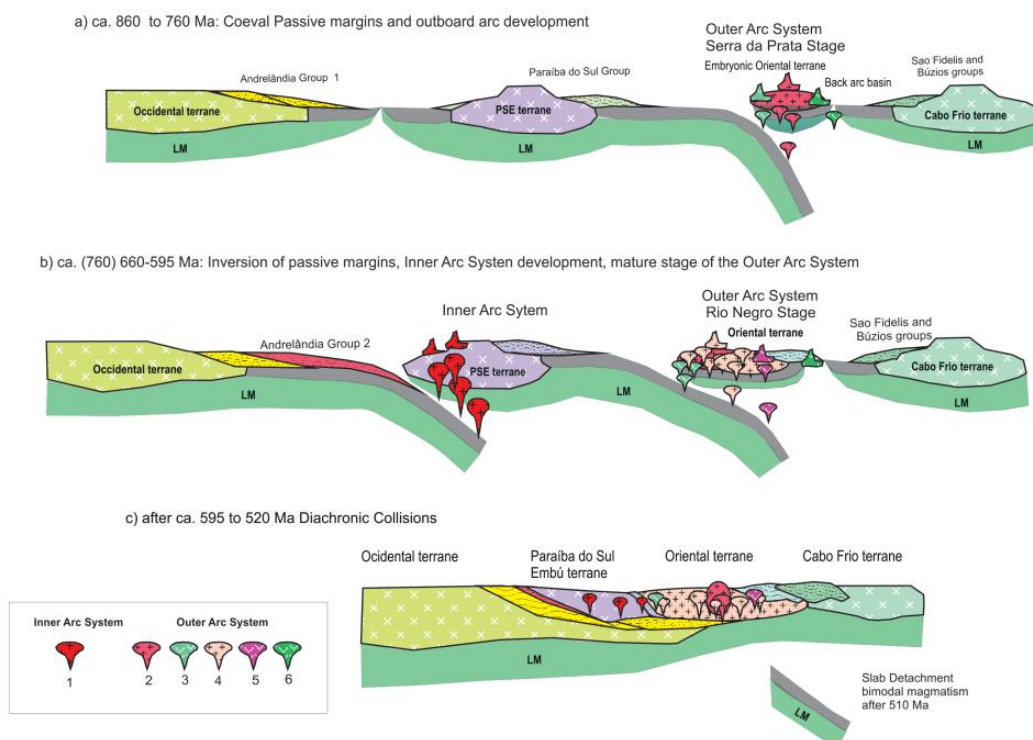


Figura 12 - Modelo tectônico simplificado com a evolução dos dois Sistemas de Arcos Mágmatícos. Legenda: 1- Complexo Serra da Bolívia – Sistema de Arco Interno, 2- 6: Rochas do sistema de arco externo, 2- Rochas calcalinas da Serra da Prata, 3- gabros toleíticos relacionados ao arco, 4- série calcalina de média a alto K, 5- Série shoshonítica do estágio Rio Negro, 6- magmatismo máfico de bacias de retroarco. Fonte: Heilbron et al., (2020).

Após estes eventos, um longo período de estabilidade crustal se estendeu no Paleozoico até a transição entre o Jurássico e o Cretáceo, quando houve a quebra do Gondwana (HASUI, 2012). e n o entretanto, antes da quebra do Gondwana ocorreu um intenso magmatismo básico, de caráter toleítico, que provocou um enxame de diques de direção predominante NE-SO de espessuras variadas

No que se refere à compartimentação tectônica proposta para o segmento da Faixa Ribeira em que a área de estudo está inserida, a sua composição é representada por dois terrenos tectono-estratigráficos, que são separados por falhas de empurrão e por zonas de cisalhamento oblíquas transpressivas, incluindo a zona de sutura designada de CTB (*Central Tectonic Boundary*), que delimita os Terrenos Ocidental e Oriental. A Figura 13 e a Figura 14, respectivamente exibem o mapa e o perfil longitudinal do segmento central da Faixa Móvel Ribeira em relação à área de estudo.

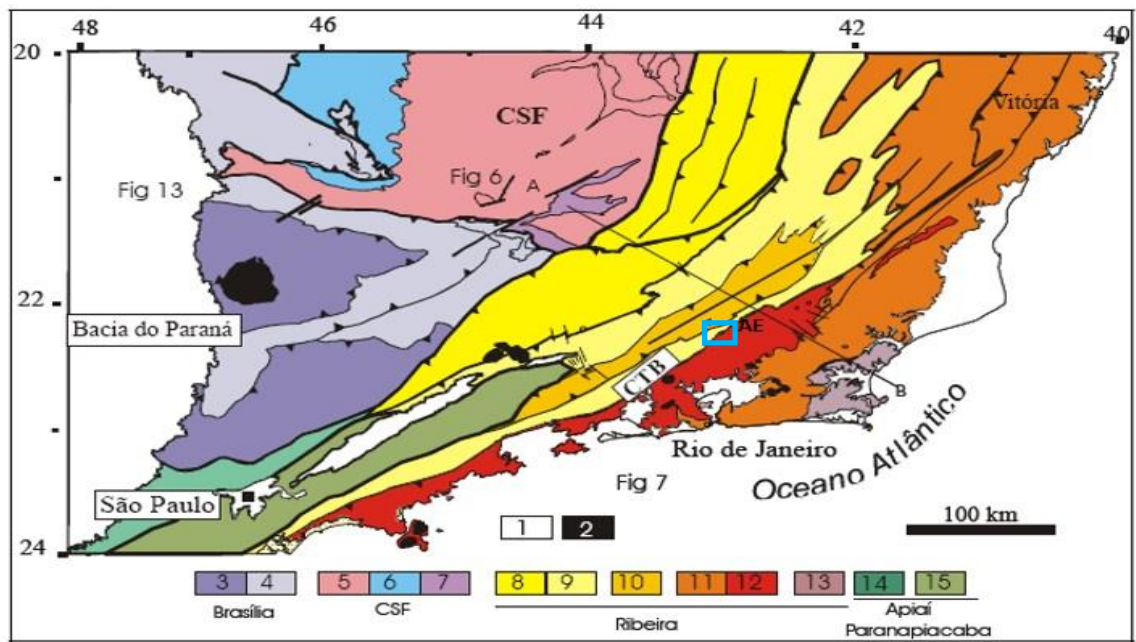


Figura 13 - Mapa tectônico do setor central da faixa Ribeira, mostrando os terrenos tectono-estratigráficos. Legenda. 1- Riftes Cenozoicos; 2- Rochas alcalinas do Cretáceo e Terciário; Orógeno Brasília (3-4): 3- Nappes Inferiores; 4- Nappes Superiores; 5- Embasamento do CSF e domínio autóctone; 6- Supergrupo São Francisco; 7- Metassedimentos do Domínio Autóctone; Orógeno Ribeira (8-13): 8- Domínio Andrelândia e 9- Domínio Juiz de Fora do Terreno Ocidental; 10- Klippe Paraíba do Sul; 11- Terreno Oriental; 12- Granitóides do Arco Magmático Rio Negro; 13- Terreno Cabo Frio; Orógeno Apiaí/Paranapiacaba (14-15): 14- Terrenos São Roque e Açunguí; 15- Terreno Embu. O polígono azul representa a localização aproximada da Área de Estudo (AE).

Fonte: HEILBRON et al, (2004).

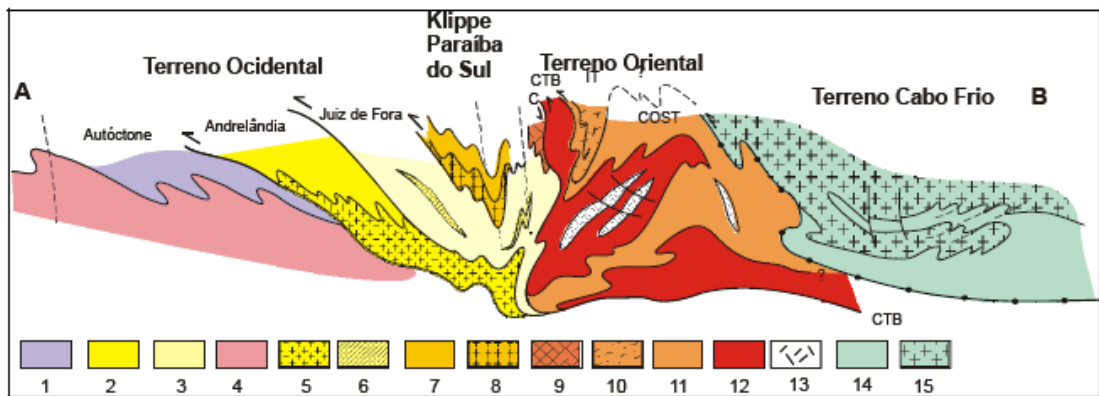


Figura 14 - Seção estrutural composta do Orógeno Ribeira com a relação entre os diferentes terrenos e domínios estruturais. Legenda: Terreno Ocidental (1-6): 1 a 3- Megassequência Andrelândia nos domínios Autóctone, Andrelândia e Juiz de Fora, Terreno Ocidental; 4 a 6- Associações do embasamento (Complexos Barbacena, Mantiqueira e Juiz de Fora); Terreno Paraíba do Sul (7-8): 7- Grupo Paraíba do Sul; 8- Complexo Quirino; Terreno Oriental (9-13): 9- Sequência Cambuci; 10- Sequência Italva; 11- Sequência Costeiro; 12- arco magmático Rio Negro; 13- Granitos colisionais; 14- Sequências Búzios e Palmital; 15- Complexo Região dos Lagos. Fonte: HEILBRON et al, (2004).

Sendo assim, conforme os dados do Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro elaborado por Heilbron et al., (2016) (Figura 15), as principais unidades litoestratigráficas dentro da área de estudo são: Q2a – Depósitos Aluviais: barras arenosas, planície de inundação e preenchimento de canal; NPrpaa – Grupo Raposo - Unidade Arcádia-Areal: granada-biotita-gnaisses bandados, com intercalações de quartzitos, rochas calcissilicáticas, rochas meta-ultramáficas, gonditos e ocorrência de sulfetos disseminados; NPrpsgn – Grupo Raposo - Unidade Conservatória: granada-biotita gnaiss; sillimanita-granada-biotita gnaiss bandado, migmatítico, com intercalações de anfibolito e quartzo; NP23g1 – Complexo Rio Negro: Hornblenda ortognaisses, metadioritos, metagranitóides porfiríticos, granitóides homogêneos; NP3g2co – Suíte Cordeiro Granitóides Sin-Colisionais Intrusivos ou Híbridos; e NP3g2co – Suíte Serra dos Órgãos Granitóides Sin-Colisionais Intrusivos ou Híbridos.

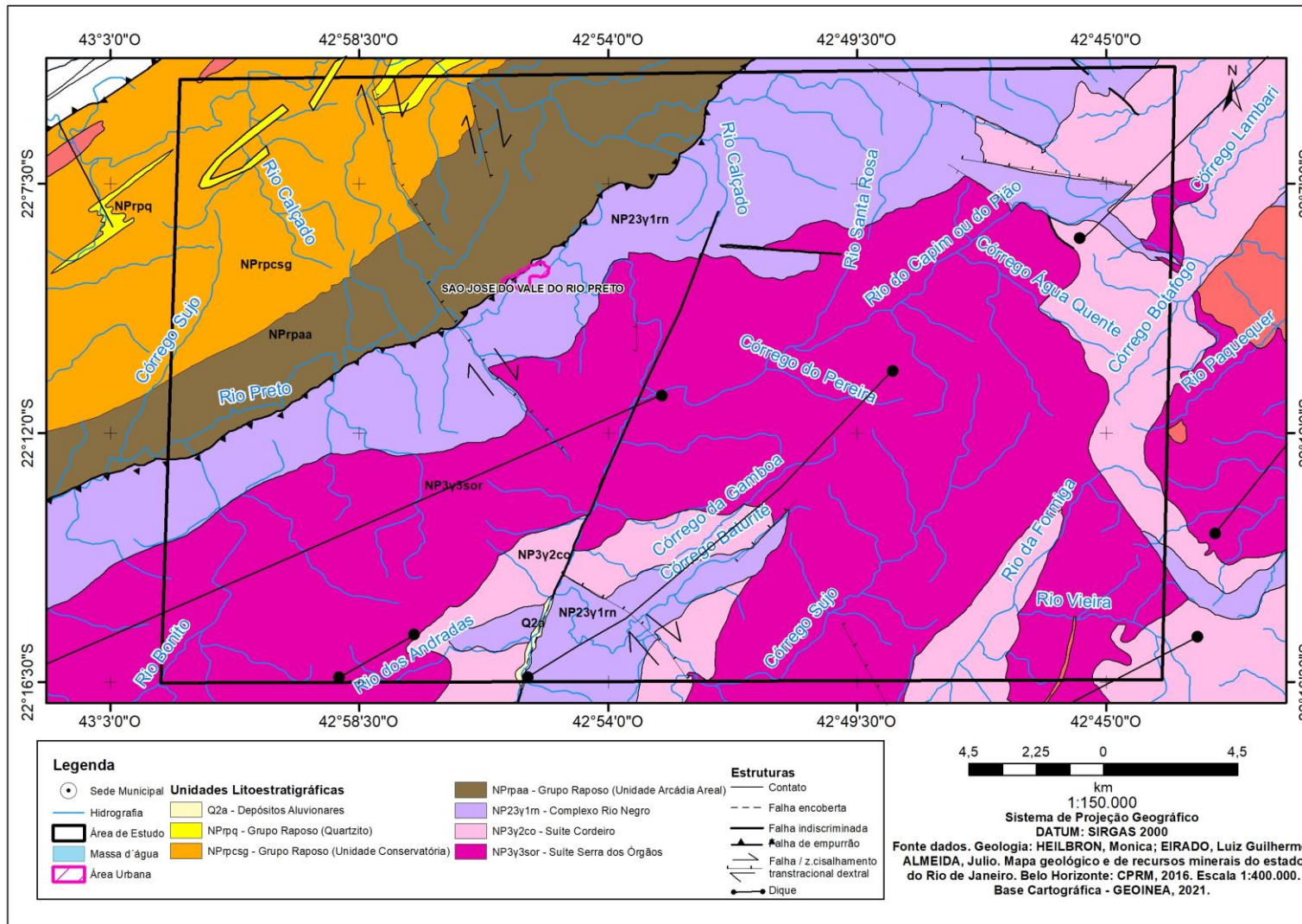


Figura 15 – Mapa geológico da área de estudo. Fonte: o autor.

Dessa forma, no que se refere à geologia da área de estudo, é importante ressaltar que esta encontra-se na Faixa Móvel Ribeira, que, em síntese, pode ser descrita como um complexo cinturão de dobramentos e empurrões de *trend* NE-SO originados no evento Brasileiro. Portanto, as diferentes litologias que afloram na área de estudo podem ser divididos, em termos evolutivos, em três grupos principais de rochas e sedimentos: o Embasamento; as Intrusivas Básicas Mesozoicas e a Cobertura Quaternária (HEILBRON et al., 2004, 2016).

5. 2 Contexto Hidrogeológico

A partir da descrição das unidades geológicas apresentada anteriormente é possível observar o predomínio de litologias ígneas e metamórficas na área de estudo. e n o Fitts (2015), o fluxo das águas subterrâneas nestas rochas é um dos fenômenos hidrogeológicos que possui a menor previsibilidade. Esse fato se dá pela baixa porosidade dessas rochas, que é extremamente baixa (ocasionalmente abaixo de 1%) e a permeabilidade, em geral, é controlada por uma rede irregular de fraturas (FITTS, 2015).

A porosidade nessas rochas concentra-se na forma de pequenos poros não conectados entre os cristais, nas rochas cristalinas, como as ígneas e as metamórficas, o fluxo dos fluidos ocorre através das fraturas (FITTS, 2015).

Em relação à permeabilidade, as rochas cristalinas não fraturadas registram valores e oros a e extremamente baixos, em contraposição às mesmas rochas cristalinas altamente fraturadas, em que a permeabilidade possui ordens de grandezas superiores (FITTS, 2015).

As fraturas e outras diversas estruturas rúpteis das rochas, como junções, diaclases e falhas, usualmente se dão em forma de sets, mais ou menos paralelos ss em um maciço rochoso é possível observar diversas famílias destas estruturas geológicas que têm a sua origem associada a esforços tectônicos, provocados por estresses na crosta terrestre (FITTS, 2015). Na área de estudo oser a se eventos rúpteis ocorridos durante o jurássico e cretáceo que culminaram com a ruptura do megacrátón Gondwana e a sequência de eventos diastróficos do neocretáceo ao paleógeno que fraturaram a crosta formando grábens e *horsts* (RICCOMINI et al., 2004).

De acordo com Fitts (2015), quando há um controle da permeabilidade e da condutividade hidráulica pelas fraturas, esta pode ser denominada como anisotrópica, em função da condutividade ser maior nos locais em que o embasamento é altamente fraturado. Esse mesmo autor destaca que a permeabilidade de uma fratura é controlada por sua abertura e suavidade, que são propriedades de difícil mensuração em profundidade. Assim, ressalta-se, que muitas fraturas são preenchidas parcialmente por minerais precipitados, a exemplo dos óxidos de ferro, que dificultam a estimativa da permeabilidade em função, apenas, de dados de medições de densidades de fraturas. Dessa forma, para uma melhor estimativa realiza-se o teste de bombeamento, que é um método eficiente para avaliar a permeabilidade em rochas cristalinas (FITTS, 2015).

Em relação às rochas ígneas extrusivas, vale ressaltar o intenso magmatismo básico que causou um enxame de diques anteriormente à quebra do Gondwana e que são mapeados na área de estudo, marcadamente os diques (MOHRIAK, 2004). Devido ao resfriamento repentino característico dessa litologia há uma grande concentração de fraturas, cuja permeabilidade é anisotrópica (FITTS, 2015).

No que se refere à classificação hidrogeológica, de acordo com a classificação do Ministério de Meio Ambiente (MMA), a associação entre os aspectos geológicos, geomorfológicos e climáticos pode ser observada na disposição de 10 províncias hidrogeológicas no Brasil (DNPM, 1983) e os aquíferos compartilham condições similares de armazenamento, circulação e qualidade da água. De acordo com esse mapeamento, a área de estudo está localizada na província hidrogeológica do Escudo Oriental, cujo domínio aquífero associado é substrato aflorante e o sistema aquífero principal é de zonas fraturadas (CPRM, 2001).

Em relação aos aspectos hidrogeológicos no Estado do Rio de Janeiro, a análise dos dados dos 1.700 poços tubulares existentes no estado, reunidos em um banco de dados pela CPRM (2001), com o apoio de Universidades, empresas públicas e privadas, assim como do Departamento de Recursos Minerais (DRM-RJ), permitiu avaliar a potencialidade hidrogeológica do estado. Este banco de dados (CAPUCCI et al., 2001) contém valores sobre o somatório de poços, as profundidades médias, as vazões médias, assim como as médias das capacidades específicas para cada

município, com as informações organizadas tanto na forma de tabela, quanto vetorial, para ser analisada em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

A Tabela 3 apresenta os municípios inseridos na área de estudo, bem como os dados sobre os poços tubulares cadastrados para os mesmos, conforme Capucci et al., (2001).

Tabela 3 - Dados dos poços nos municípios abarcados pela área de estudo.

Municípios	Aquífero Captado	Profundidade média dos poços (m)	Q média dos Poços (m³/h)	Capacidade Específica Média
São José do Vale do Rio Preto	-	100,66	4,76	0,34
Teresópolis	-	79,07	4,10	0,46
Petrópolis	Fraturado	96,03	6,93	0,55
	Misto	78,11	5,24	0,57
Três Rios	Fraturado	88,71	13,43	2,13
Sapucaia	Fraturado	78,30	9,71	0,45

Fonte: Capucci et al., 2001.

5. 3 Hidrogeoquímica

A área de estudo é marcada por uma expressiva rede hidrográfica, da qual se destaca o rio Preto, que drena próximo ao contato entre a Unidade Arcádia Areal, composta por granada-biotita-gnaisses bandados, com intercalações de quartzitos, e o Complexo Rio Negro, formado por hornblenda, ortognaisses, metadioritos, metagranitoides porfíricos e granitoides homogêneos (HEILBRON et al., 2016), onde são observados poços com teores elevados de urânio.

No que se refere à distribuição de urânio em minerais e rochas, no a se que a compreensão da dinâmica magmática é fundamental para o entendimento da disposição e da migração do urânio na crosta terrestre, que desde a consolidação do planeta Terra tem sofrido alterações influenciadas por atividades magmáticas (BONOTTO & SILVEIRA, 2006). Esse fato pode ser observado através da retenção do urânio nos principais minerais formadores de rocha, em sua incorporação em minerais secundários e acessórios ou mesmo em altas concentrações, através da formação de minerais próprios (BONOTTO & SILVEIRA, 2006).

De acordo com Picciotto (1950) apud Bonotto & Silveira (2006), há evidências de que nos granitos, uma rocha extremamente comum na área de estudo, o urânio pode ser observado tanto nos minerais principais quanto nos acessórios. A Tabela 4 abaixo apresenta a relação do teor do urânio em vários minerais principais e acessórios de rochas ígneas compilado por Pertlik et al., (1974).

Tabela 4 – Teor de urânio nos minerais mais comuns em rochas ígneas.

Mineral	U (ppm)	Mineral	U (ppm)
Quartzo	1,7	Epidoto	20-200
Feldspato	2,7	Granada	6-30
Biotita	8,1	Huttonita	3-7x10 ⁴
Muscovita	2,8	Magnetita e opacos	1-30
Hornblenda	0,2-60	Monazita	500-3000
Piroxênio	0,1-50	Titanita	10-700
Olivina	0,05	Xenótima	300-4x10 ⁴
Alanita	30-1000	Zircão	100-6000
Apatita	10-100	-----	-----

Fonte: Pertlik et al., (1974).

Segundo Lazzerini (2013), a concentração média do urânio nos basaltos é de 0,87 ppm e nos granitos de 3 ppm. Em relação a influência do magmatismo na ocorrência de urânio, Gabelman (1977) discute a importância deste como um processo fundamental para a migração do urânio em escala regional.

De acordo com Gabelman (1977) apud Bonotto e Silveira (2006), os processos típicos de eventos magmáticos são: fusão magmática (através do processo de anatexia), volatilização fracionada (gases dispensados durante o processo) hidrotermalismo (liberação de fluidos pelo acréscimo de temperatura e pressão) e metassomatismo (deformação, recristalização e compressão dos fluidos). Pertlik et al., (1974) descreve a ocorrência de urânio em veios como uraninita ou pechblenda durante episódios de magmatismo.

Conforme Bonotto (2004), o urânio possui diversos estados de valência, 2+, 3+, 4+, 5+ e 6+, sendo mais observado no ambiente nas formas 4+ e 6+. Em rochas ígneas e seus minerais primários associados, o urânio pode ser encontrado no estado 4+, constituindo o íon uranoso (U⁴⁺), com potencial iônico 4 e raio iônico 1,05 Å, próximo ao do cálcio e das terras raras trivalentes (Goldschmidt, 1954 apud Bonotto (2004).

Urânio é presente como constituinte essencial em aproximadamente 100 minerais, e pode ser encontrado, principalmente, na uraninita (UO₂) e em sua variedade não cristalina na pechblenda.

Moreira-Nordemann (1977) apud Bonotto & Silveira (2006) estudou a distribuição de urânio nos minerais formadores de rochas ígneas. Seus estudos apontaram para a sua ocorrência igualmente acentuada em quartzo e feldspatos e a ocorrência de urânio no quartzo e no feldspato pode estar vinculada ao sistema de substituição isomórfica, concentração e adsorção em minerais imperfeitos, assim como a inclusão no retículo cristalino e em microcristais.

Seus estudos também indicaram que a biotita retém de 19 a 22% do total de urânio, e que minerais pesados tais como o zircão, a monazita, a apatita, a magnetita, a ilmenita e a riebeckita contêm de 61 a 65% deste teor (MOREIRA-NORDEMANN, 1977 apud BONOTTO & SILVEIRA, 2006). Ademais, esse trabalho também observou que no processo de alteração dado pelo intemperismo químico, há uma maior resistência nos minerais pesados e que apenas uma pequena porção do urânio total existente na rocha se junta com a solução quando esta sofre alteração.

Betejtin (1970) apud Bonotto & Silveira (2006) observou que a presença de urânio é mais significativa em rochas graníticas, pegmatitos graníticos e em sienitos, que são rochas típicas da área de estudo (a exceção da última), em que a uraninita se dispõe de forma assimétrica. Por meio de evidências petrográficas que apontam a evolução associada em equilíbrio geoquímico e termodinâmico, constatou-se que a paragênese mineral da uraninita está associada aos minerais de tório, terras raras, nióbio, tântalo, turmalina e zircão (BETEJTIN, 1970 apud BONOTTO & SILVEIRA, 2006).

Yang et al., (2014), por sua vez, em seu estudo a respeito de urânio e radônio nas águas subterrâneas no estado do Maine (USA), concluíram que concentrações elevadas foram observadas dentro ou perto de intrusões graníticas. Nesse sentido, destaca os que o radônio constitui um gás nobre que se origina a partir do decaimento radioativo da série do urânio (YANG et al., 2014).

Por ser um elemento gasoso, o radônio é extremamente móvel, saindo da estrutura cristalina dos minerais, podendo estar dissolvido na água que percola nas fraturas, ou mesmo escapa para os solos ou para a atmosfera (GIULIANI, 2015).

Portanto, como o isótopo de ^{238}U constitui 99,27% de todo o urânio natural na Terra, e o radônio estar associado ao decaimento de sua série radioativa, o ^{222}Rn está associado geoquimicamente ao urânio. Dessa forma, como as rochas possuem determinadas concentrações de urânio em suas composições, por consequência, também há concentrações de radônio associadas (GIULIANI, 2015).

6. MÉTODO E METODOLOGIA

6.1 Método

Os geofísicos envolvem a aplicação dos princípios da física para a compreensão e estudo do planeta Terra, sobretudo no seu interior, por meio da realização de medições na superfície, ou próximo a ela (TELFORD, 1990). A interpretação e análise dessas medidas físicas, que variam tanto verticalmente, quanto lateralmente trazem luz às propriedades como a densidade, susceptibilidade magnética, resistividade, raio sísmico e entre outras, e cujo conhecimento traz uma grande amplitude de possibilidades que devem ser avaliadas criteriosamente, tendo em vista as suas vantagens e desvantagens (KEAREY et al., 2009).

Em um levantamento geofísico o objetivo é identificar os aspectos da estrutura interna da Terra com base em medições executadas na superfície, ou em suas proximidades, o que configura um tipo de problema denominado de inverso (KEAREY et al., 2009). Nesse sentido, existe o problema da ambiguidade na interpretação de dados geofísicos.

Então, para reduzir a utilização de ao menos dois métodos geofísicos, em associação a dados de poços, para a eliminação dessa ambiguidade inerente aos levantamentos geofísicos, conforme apontado por Roy (1962).

De acordo com Kearey et al., (2009), o tipo de propriedade física à qual cada método geofísico atende, estabelece o seu campo de atuação. No que se refere aos tipos de métodos geofísicos, conforme apresentado na Tabela 5, os mesmos podem ser segmentados em duas linhas principais, sendo eles:

- 1) métodos que utilizam fontes naturais; e
- 2) métodos que utilizam fontes artificiais.

Tabela 5 – Exemplos de métodos geofísicos e suas propriedades físicas.

Método Geofísico	Tipo de fonte	Parâmetro Medido	Propriedades Físicas
Gravimétrico	Natural	Variações espaciais do campo gravitacional	Densidade
Magnetométrico		Variações espaciais do campo geomagnético	Suscetibilidade magnética e remanência
Radiométrico		Contagem por tempo	Radiação ionizante
Sísmico	Artificial	Tempo de trajeto das ondas sísmicas refletidas e refratadas	Densidade e módulos elásticos das ondas sísmicas
Resistividade		Resistência da terra	Condutividade elétrica
Polarização induzida		Voltagens de polarização	Capacitância elétrica
Potencial espontâneo		Potenciais elétricos	Condutividade elétrica
Eletromagnético		Respostas a radiações eletromagnéticas	Condutividade e Indutância elétrica
Radar		Tempo de percurso de pulsos de radar refletido	Constante dielétrica

Fonte: Adaptado de Kearey et al., (2009).

Sendo assim, conforme a necessidade de investigação de cada estudo, deve-se buscar a propriedade física que apresente as respostas mais compatíveis com os objetivos propostos. ss na presente dissertação, o l a o o método magnetométrico, radiométrico e a geotermia , cujo detalhamento é apresentado a seguir.

6.1.1 Magnetometria

Os métodos magnetométricos têm como objetivo compreender a geologia fundamentada nas anomalias do campo magnético da Terra em função das propriedades magnéticas das rochas (KEAREY et al., 2009). Os levantamentos magnéticos podem ser executados tanto em terra, quanto no mar, ou no ar, de forma que o método magnetométrico é amplamente utilizado, dada a velocidade de execução dos levantamentos a partir da utilização de aeronaves, por exemplo (KEAREY et al., 2009).

Apesar de grande parte dos minerais que compõem as rochas da superfície não serem magnéticos, certas litologias possuem minerais magnéticos em quantidade suficiente para gerar anomalias magnéticas relevantes que se superpõem ao campo magnético normal da Terra (KEAREY et al., 2009).

Nesse sentido, a compreensão do campo geomagnético da Terra é fundamental tanto para a redução de dados magnéticos para um valor de referências (Datum) adequado, quanto para a avaliação das anomalias. Em comparação com o campo gravitacional da Terra, o campo geomagnético possui uma geometria mais complexa, composta por variações irregulares de orientação e magnitude de acordo com a latitude, longitude, ao longo do tempo (KEAREY et al., 2009).

Em campo, no levantamento magnético, as anomalias não são medidas de forma direta, mas sim a partir de suas componentes, que podem ser medidas de três formas, sendo elas:

- a) Medir as componentes X,Y e Z utilizando coordenadas ortogonais;
- b) Medir o campo total B com os ângulos de inclinação (I) e declinação (D);
- c) Medir as duas componentes H e Z, bem como o ângulo D.

A Figura 16 abaixo ilustra de forma esquemática as componentes do campo geomagnético mencionadas anteriormente, sendo:

- B** – Intensidade total do vetor do campo magnético;
- H** – Componente horizontal do vetor do campo;
- Z** – Componente vertical do vetor do campo;
- X** – Componente Norte-Sul do campo magnético;
- Y** – Componente Leste-Oeste do campo magnético;
- D** – Declinação magnética definida pelo ângulo entre o norte geográfico e o norte magnético (componente);
- I** – Inclinação magnética definida pelo ângulo entre o plano horizontal e o vetor do campo magnético.

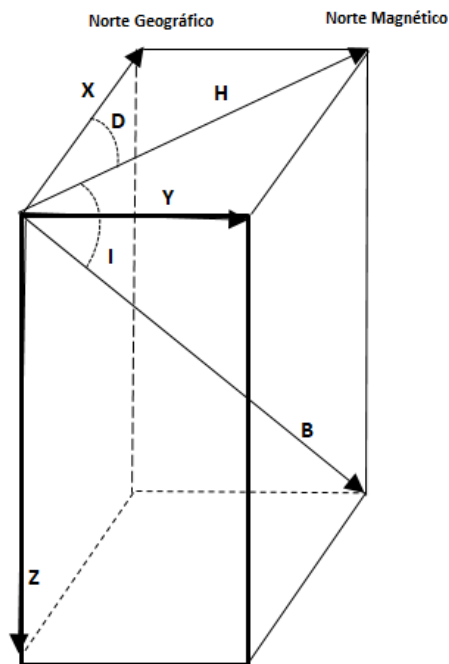


Figura 16 – Representação esquemática das componentes geomagnéticas. Fonte: adaptado de Kearey et al., 2009.

Os elementos medidos que definem o campo magnético da Terra são descritos através das relações apresentadas a seguir:

$$Y = B \cos I \sin D \quad \text{Eq. 1}$$

$$Z = B \sin I \quad \text{Eq. 2}$$

$$B^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 \quad \text{Eq. 3}$$

$$D = \tan^{-1} \frac{Y}{X} \quad \text{Eq. 4}$$

$$I = \tan^{-1} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad \text{Eq. 5}$$

No que se refere à forma de aquisição dos dados para a caracterização do campo geomagnético, cabe destacar a utilização de observatórios, por meio de estações magnéticas fixas que se encontram posicionadas em diferentes partes do planeta (KEAREY et al., 2009).

Em relação as variações históricas do campo magnético, as variações diurnas provocadas por efeitos externos, como as explosões solares que impactam na ionosfera, fazem com que as componentes não apresentem um comportamento uniforme na superfície da Terra (KEAREY et al., 2009).

Nesse sentido, cabe salientar as variações dos valores do campo na superfície do planeta que pode variar entre 25.000 nT, na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, até 70.000 nT nos polos geográficos (KEAREY et al., 2009).

O método utilizado para chegar ao valor do campo magnético teórico em qualquer parte do planeta é o método dos harmônicos esféricos, que é adotado para obter a fórmula do *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), MILSOM (2002).

A teoria mais aceita para a geração do campo magnético principal da Terra, que corresponde a cerca de 90% do campo terrestre, é que o mesmo seria gerado no núcleo externo do planeta, como resultado do movimento de cargas energizadas e das correntes de convecção que são responsáveis pela movimentação de grande quantidade de matéria no interior do planeta (KEAREY et al., 2009).

Nesse contexto, caso o campo dipolar for subtraído do campo magnético observado, o campo residual permite identificar aproximações para os valores de um segundo dipolo, com menor intensidade (KEAREY et al., 2009).

Essa dinâmica de subtração pode ser repetida para outros momentos dipolares, até que o campo geomagnético observado teórico atinja o valor de precisão requisitado. Sendo assim, o cálculo do efeito de cada dipolo fictício contribui para uma função conhecida como harmônica, de forma que a técnica de aproximações sucessivas do campo observado é conhecida harmônicos esféricos, que é equivalente à análise de Fourier em coordenadas esféricas polares (KEAREY et al., 2009).

Portanto, ao deduzir o valor do IGRF regional dos dados medidos em um determinado levantamento, é possível obter os valores magnéticos de interesse, associado às anomalias magnéticas das litologias existentes na área alvo, bem como a variação diurna (KEAREY et al., 2009).

6.1.1.1 Redução de Dados Magnéticos

A redução de dados magnéticos é um procedimento de fundamental importância para que se remova das observações todos os fatores de variação magnética que não seja aquela gerada pelo efeito magnético das rochas da área de interesse. Portanto, para corrigir falsas anomalias que são causadas por agentes externos e assegurar a qualidade dos dados é de fundamental importância identificar o método adequado e a logística, a utilização dos equipamentos, bem como a técnica de correção de dados mais adequados (KEAREY et al., 2009).

6.1.1.1.1 Correção Geomagnética

Esse processo de redução é caracterizado pela remoção do IGRF regional das observações realizadas, tirando, portanto, o efeito de um campo geomagnético de referência dos dados de um determinado levantamento. Deve-se ter em conta, no entanto, que o IGRF, apesar de sua utilização consistir no método mais rigoroso de correção geomagnética, o mesmo apresenta imperfeições, uma vez que os harmônicos adotados são fundamentados em observações de uma rede de observatórios pouco densa e esparsa. Dessa forma, o IGRF também é preditivo, uma vez que utiliza a extrapolação dos harmônicos esféricos (KEAREY et al., 2009).

No que se refere à metodologia utilizada na presente pesquisa, a partir do posicionamento geográfico, considerando a latitude e a longitude da área de estudo, foi obtido o IGRF da região, com base na rotina de construção do IGRF do software Oasis Montaj.

6.1.1.1.2 Correção Magnética Dinâmica

Para a correção magnética dinâmica, em primeiro lugar é preciso avaliar o tipo de sensor que foi utilizado no levantamento. Entre os principais sensores estão o tipo Stinger, o Bird e Fish (LOWRIE, 2007), conforme ilustrado na Figura 17.

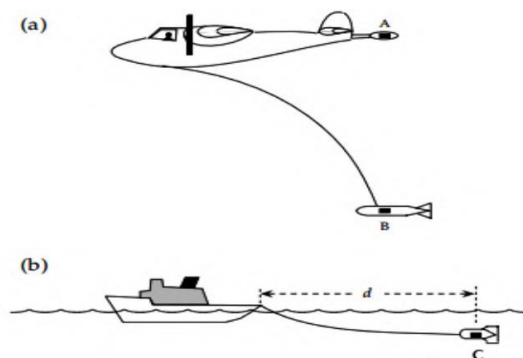


Figura 17 – Exemplo dos tipos de sensores. A – sensor stinger, B – sensor Bird e C – sensor fish. Fonte: Lowrie (2007).

Conforme CPRM (2010), para o caso de aerolevantamentos, após a definição do sensor que será utilizado no levantamento, tem início a correção, que é fundamentada na avaliação de como a estrutura da aeronave e voo podem influenciar na coleta de dados.

Os procedimentos têm início antes da decolagem e são repetidos ao longo do trajeto, em alturas diferentes, como forma de controle. Para avaliar variações na velocidade, ou pequenas oscilações no trajeto de voo, que podem influenciar negativamente nos dados, são realizadas manobras operacionais.

A partir de movimentos controlados, que simulam desvios que podem se dar ao longo do processo de obtenção dos dados, que são conhecidas como *roll* (movimentação em que as asas se inclinam ao longo do eixo longitudinal), *pitch* (tanto o bico quanto a cauda da aeronave se inclinam transversalmente em relação à linha de voo) e *yaw* (tanto o bico quanto a cauda da aeronave se movimentam no plano da linha de voo), conforme ilustrado na Figura 18. Estas manobras produzem coeficientes nos dados que são adquiridos, contribuindo para a sua correção.

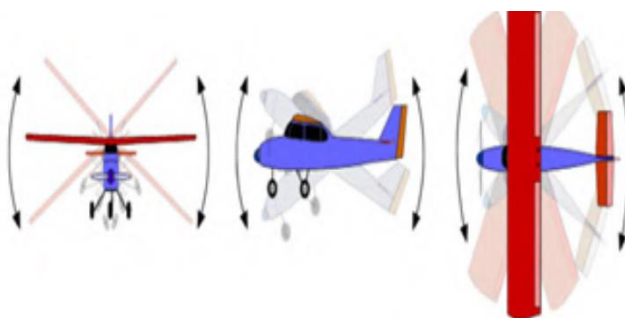


Figura 18 – Manobras de operacionais *roll*, *pitch* e *yaw*, respectivamente. Fonte: CPRM, 2010.

6.1.1.1.3 Correção da Variação Diurna

A remoção da variação diurna se dá em função das oscilações do campo magnético ao longo do dia, o que demanda o conhecimento de suas variações para que seja realizada a correção dos dados. Uma das formas de se realizar essa correção é a partir da instalação de uma estação base, que irá captar variações no campo dentro da área de levantamento, sendo capaz, por exemplo, de registrar os efeitos de tempestades magnéticas (KEAREY et al., 2009).

Alternativamente, a remoção de resíduos da variação diurna em um levantamento também pode ser determinada por meio do arranjo de pontos de intersecção no plano de voo (Figura 19), de forma que a análise de leituras de cada ponto revela em conjunto a mudança de campo em uma série de diferentes períodos de tempo, possibilitando que todo o levantamento seja ajustado para variação diurna, por meio de um processo de ajuste de rede (KEAREY et al., 2009).



Figura 19 – Exemplo de um plano de voo para um aerolevantamento.

Fonte: TELLES & RABELO, 2013.

6.1.1.1.4 Correção do Erro de Paralaxe

O erro de paralaxe, também conhecido como *lag* (CPRM, 2010), decorre de medições que são realizadas em aparelhos analógicos, em função de desvios ópticos que provocam erros de leituras.

A correção desse erro pode ser realizada pelo sobrevoo da aeronave sobre uma região de anomalia conhecida, ou em grandes altitudes, para que seja possível individualizar a medida apenas o campo magnético, sem a influência das anomalias, ou de forma alternativa, também é possível corrigir o erro de paralaxe ao se fazer o voo em sentidos opostos sobre uma mesma região, possibilitando a correção por meio do deslocamento a medição do campo magnético em função do tempo (CPRM, 2010).

6.1.1.2 Filtragem dos Dados

O processo de filtragem dos dados magnéticos compreende a utilização dos dados já corrigidos e ajustados, por meio dos procedimentos elencados anteriormente, a aplicação de filtros tem como objetivo realçar as estruturas, de forma a representar melhor as anomalias objeto de interesse (BLAKELY, 1995).

6.1.1.2.1 Primeira Derivada Vertical

O filtro da primeira derivada vertical tem como objetivo principal delinear com maior precisão as bordas das anomalias rasas, destacando falhas e contatos em função do realce das anomalias de curto comprimento e maior gradiente. A primeira derivada vertical, portanto, mede a taxa de variação do campo magnético anômalo conforme se afasta ou se aproxima verticalmente da fonte provocadora, podendo ser aplicadas derivadas direcionais de ordem N (BLAKELY, 1995).

Na equação abaixo, F é a indicação de Fourier, sendo k o número de onda ou a frequência, de forma que a equação é dependente da ordem n , sendo comumente utilizados valores não superiores a dois, uma vez que números maiores podem filtrar excessivamente as frequências dos dados, realçando fontes rasas que muitas vezes são associadas a ruídos (KEAREY et al., 2009).

$$F \left(\frac{\partial^n f}{\partial z^n} \right) = k^n F(f) \quad \text{Eq. 6}$$

6.1.1.2.2 Amplitude de Sinal Analítico (ASA)

De acordo com Li (2006), o filtro ASA depende da intensidade magnética total (TMI), e é adotado para o mapeamento de fontes rasas, realçando as bordas dos corpos e definindo a forma geométrica destes.

A amplitude do sinal analítico é obtida por meio da equação abaixo, que é formada pela combinação do gradiente vertical (z), dos gradientes horizontais (x, y) e do campo magnético anômalo (T).

$$|ASA(x, y)| = \sqrt{\left[\frac{\partial T}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{\partial T}{\partial y}\right]^2 + \left[\frac{\partial T}{\partial z}\right]^2} \quad \text{Eq. 7}$$

6.1.2 Radiometria

De acordo com Kearey et al., (2009), o levantamento radiométrico é de fundamental importância no mapeamento geológico pois possibilita a diferenciação de diferentes tipos de litologias com base em sua assinatura radioativa. Na natureza há mais de 50 isótopos radioativos, no entanto, a maioria possui rara ocorrência ou é apenas fracamente radioativa (KEAREY et al., 2009). Nesse sentido, os elementos de maior interesse para levantamentos geofísicos estão relacionados à desintegração natural do potássio (^{40}K), bem como dos elementos da série do urânio (^{235}U e ^{238}U) e do tório (^{232}Th) e o potássio (^{40}K) (KEAREY et al., 2009).

No que se refere ao decaimento radioativo, observa-se que a instabilidade de certos isótopos, ao se desintegrarem espontaneamente formam outros elementos, o processo de desintegração é acompanhado pela emissão de radioatividade de três tipos possíveis.

As partículas alfas constituem núcleos de hélio ${}^4_2\text{He}$ que são emitidos do núcleo em determinadas desintegrações, conforme representado abaixo:



As partículas beta, por sua vez, são elétrons que podem ser emitidos no processo de divisão de um nêutron em um próton e um elétron no decorrer de certas desintegrações (KEAREY et al., 2009). Nesse processo, o próton permanece dentro do núcleo o que faz com que o peso atômico se mantenha, mas o número atômico aumente para formar um novo elemento.



Por fim, os raios gama são formados por radiação eletromagnética pura (KEAREY et al., 2009), que é liberada de núcleos excitados no decorrer do processo de desintegração, sendo caracterizados por frequências mais altas do que 10¹⁶ Hz, diferenciando dos raios-x por possuírem uma energia mais alta.

Outro processo de emissão em alguns elementos radioativos que também libera energia na forma de raios gama é o processo denominado captura K, que ocorre quando um elétron da casca mais interna (K) penetra no núcleo, formando um novo elemento e decrescendo o número atômico, conforme indicado abaixo:



Dessa forma, o decaimento radioativo pode conduzir à constituição de um novo elemento estável, ou a um outro elemento radioativos que, por sua vez, também pode comportar um decaimento, sendo a taxa de decaimento exponencial definida conforme a equação abaixo, onde N representa o número de átomos remanescentes após um tempo (t) a partir de um número inicial N₀ no tempo t=0, sendo λ a constante de decaimento específica do elemento em análise:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{Eq. 11}$$

No que se refere à aplicação do método, a principal forma é fundamentada no mapa ternário dos radioelementos, que é formado por meio da associação de cores definidas para cada um dos radioelementos, ilustrando, dessa forma, a abundâncias relativas de ²³⁸U, ²³²Th e ⁴⁰K em diferentes tipos de litologia (KEAREY et al., 2009).

Dessa forma, o objetivo desse método é captar a emissão natural de raios gama dos isótopos de potássio, tório e urânio e, a partir da distinção existente em relação a emissão natural desses elementos, conseguir estimar a concentração desses elementos nas rochas e solos (DICKSON & SCOOT, 1997). A Tabela 6 apresenta os valores da concentração média dos radioelementos em rochas e solos da Austrália.

Tabela 6 – Variação da concentração média dos radioelementos em rochas e solos na Austrália.

Tipo de rocha		Rocha			Solo		
		K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)
Intrusivas	Granitoides	0,3-4,5	0,4-7,8	2,3-45	0,4-3,9	0,5-7,8	2,0-37
	Rochas gnáissicas	2,4-3,8	2,1-3,6	18-55	0,7-1,9	1,6-3,8	6,0-19,0
	Pegmatitos	2,6-5,5	0,3-1	0,3-9,6	-	-	-
	Aplitos	0,6-4	1,0-8,0	3,0-20	-	-	-
	Quarto-feldspatos porfíricos	1,0-5,0	1,3-2,9	6,0-14,0	-	-	-
	Intrusivas intermediárias	0,7-5,6	0,1-1,2	0,8-6,1	0,7-3,4	1,5-2,6	2,9-8,4
	Intrusivas máficas	0,1-0,8	0,0-1,1	0,0-3,1	-	-	-
Extrusivas	Vulcânica félsicas	2,0-4,4	1,4-1,3	13-28	1,8-3,2	1,3-2,4	10-18
	Vulcânicas intermediárias	1,8-4,1	0,9-5,6	1,5-15	1,0-2,7	1,2-3,6	4,0-17
	Andesitos com baixo – k	0,7-0,9	1,0-2,5	3,0-8,0	0,8-1,5	1,2-1,5	4,0-6,0
	Vulcânicas máficas	0,3-1,3	0,3-1,3	2,0-5,0	0,2-1,4	0,6-2,5	3,3-13
	Vulcânicas ultramáficas	0,2-0,9	0,3-0,9	0,0-4,0	-	-	-
Sedimentares	Folhelhos arqueanos	0,4-1,6	0,3-1,3	1,0-5,0	-	-	-
	Outros tipos de folhelhos	0,1-4,0	1,6-3,8	10-55,0	0,7-3,0	1,2-5,0	6,0-19,0
	Arenitos	0,0-5,5	0,7-5,1	4,0-22,0	0,1-2,4	1,2-4,4	7,0-18,0
	Carbonatos	0,0-0,5	0,4-2,9	0,0-2,9	-	-	-

Fonte: Modificado de Dickson & Scoot (1997).

De maneira geral, o diagrama ternário é composto pelas cores RGB (*Red, Green and Blue*), com concentrações de tório e urânio em ppm e potássio em percentual, o que faz com que as cores se associem a cada um dos vértices de um triângulo equilátero, com gradação variando conforme a concentração de cada um dos elementos registrados no levantamento.

A Figura 20 ilustra um diagrama ternário representando a intensidade relativa da composição de cada um dos três elementos (U, Th e K), configurando um elemento extremamente utilizado nos levantamentos radiométricos, tanto em levantamentos terrestre, quanto em levantamentos aéreos.

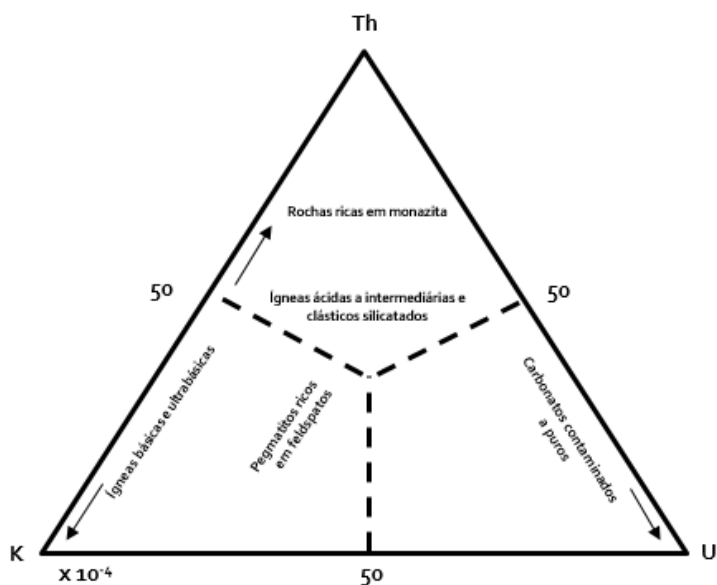


Figura 20 – Abundâncias relativas dos elementos radioativos em diferentes tipos de litologias. Fonte: Adaptado de Kearey et al. (2009).

Conforme é possível observar na Figura 21, que ilustra graficamente o comportamento das radiações emitidas pelos elementos U, Th e K, constata-se picos de 1,46 MeV para o potássio, 2.615 MeV para o tório e 1,76 MeV para urânio. É importante salientar, no entanto, que conforme indicado por Ribeiro et al., (2013), os isótopos de Th e U não emitem radiação gama, mas sim os isótopos filhos que são gerados a partir do decaimento destes elementos. Sendo este o motivo para não utilizar a referência da porcentagem desses elementos nas rochas, tal qual é realizado para o potássio, mas sim se utilizar o termo tório equivalente (eTh) e urânio equivalente (eU) enquanto forma de representação das estimativas das concentrações desses elementos nas litologias alvo dos levantamentos radiométricos.

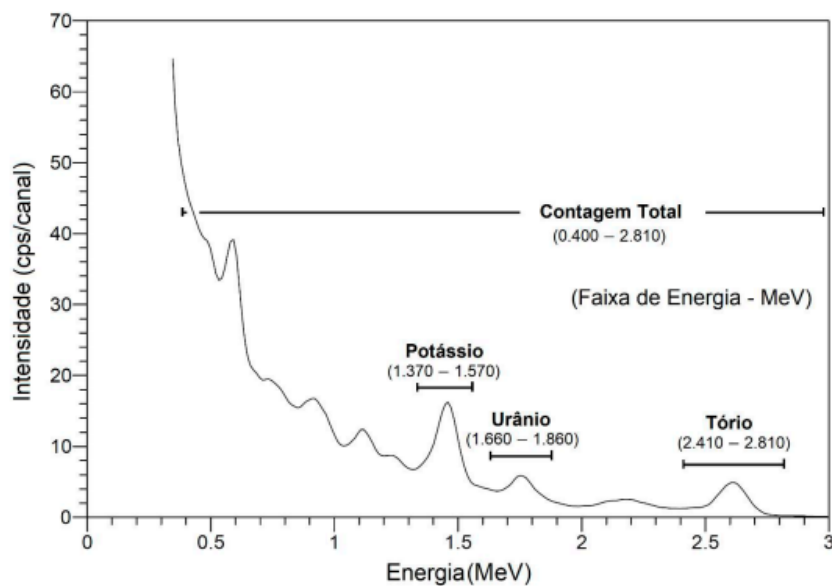


Figura 21 – Espectro de energia de K, U e Th e janelas de medições. Fonte: IAEA (2003).

De acordo com Ribeiro et al., (2013), as radiações gama emitidas pelos elementos radioativos nas variadas litologias são inversamente proporcionais à densidade das mesmas, o que provoca uma forte redução em seus valores. Portanto, agentes externos que estejam localizados entre os sensores de medições e a superfície podem influenciar nos levantamentos, de forma que a melhor condição para medir as emissões se dão em campos abertos, sendo importante ressaltar que as mesmas só registram sinais rasos, com cerca de 30 a 40 cm de profundidade a partir da superfície (KEAREY et al., 2009).

6.1.2.1 Correções em dados radiométricos

Assim como, apontado para os levantamentos magnetométricos, para os levantamentos radiométricos deve haver um padrão rígido na aquisição dos dados, com vistas a assegurar a qualidade dos dados, bem como os resultados. Nesse sentido, cabe destacar que a radiação gama sofre interferência por determinados fatores que atenuam seus valores, influenciando nas medições das concentrações de U, Th e K.

Nesse contexto, conforme apontado por IAEA (2003), tanto o equipamento utilizado no levantamento, quanto a altura nominal de voo também influenciam na qualidade dos dados, de forma que as taxas de contagem (cps) não dependem unicamente das concentrações dos radioelementos presentes próximo à superfície. Portanto, a realização de testes e a calibração dos sensores é fundamental para o sucesso dos levantamentos radiométricos, de forma a corrigir os dados das concentrações dos elementos U, Th e K angariados no decorrer dos levantamentos.

Sendo assim, as principais correções aplicadas nos levantamentos radiométricos são a correção do tempo morto, a correção da altura efetiva de voo, a remoção do background, a correção do efeito Compton, a correção altimétrica e as razões radiométricas que seguem descritas em detalhe na sequência.

6.1.2.1.1 Correção do tempo morto

A correção do tempo morto é fundamentada na correção da defasagem que é gerada entre o tempo que o espectrômetro leva para processar cada pulso medido, uma vez que no decorrer desse processo o equipamento não realiza o registro de novos dados, gerando uma lacuna de informação.

Portanto, a correção da lacuna gerada pela defasagem existente entre o registro e o processamento dos dados é realizada por meio da normalização da quantidade de contagens executadas ao longo do tempo integral do levantamento em relação a cada canal e suas contagens respectivas, sendo, em média, os valores obtidos a cerca de 5-15 μ /pulso (IAEA, 2003).

Conforme é possível observar abaixo, a equação apresenta o cálculo do valor N das contagens corrigidas por segundo, sendo t o tempo morto do equipamento, n representando o valor das contagens observadas por segundo e CT a contagem total de todos os canais (IAEA, 2003).

$$N = \frac{n}{1 - C_t t} \quad \text{Eq. 12}$$

6.1.2.1.2 Correção da altura efetiva do levantamento aéreo

Em função de inconstância na altura do voo realizado pela aeronave nos levantamentos ocorre uma oscilação nos valores medidos de contagem. Ademais, mesmo que a radiação sofra a atenuação pelo ar, a correção está diretamente relacionada à pressão atmosférica e à temperatura do ar (IAEA, 2003). A Figura 22 ilustra como podem ocorrer as variações de altura no decorrer de um levantamento aéreo.

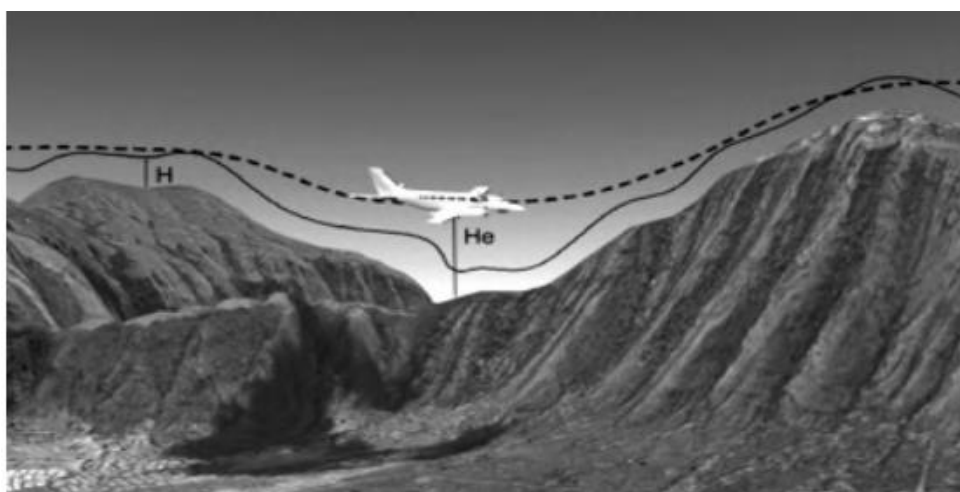


Figura 22 – Representação das variações de altura nominal (He) e da altura do voo real (H). Fonte: Ribeiro et al., (2013).

A equação abaixo ilustra como calcular a altura nominal (He), em metros, que está diretamente relacionada à altura real (H), a temperatura (dada em graus Celsius) e a pressão (em milibar) (IAEA, 1991).

$$H_e = H \left(\frac{273,15}{T+273,15} \right) \left(\frac{P}{1013,25} \right) \quad \text{Eq. 13}$$

6.1.2.1.3 Remoção do background

A correção associada à remoção do background cósmico e da aeronave, é fundamentada no acréscimo a cada uma das janelas das influências da aeronave e a radiação cósmica de fundo. De acordo com Ribeiro et al., (2013), os valores estimados associados aos coeficientes utilizados no cálculo da correção do background são realizados no denominado voo cósmico, que é realizado, de maneira geral, sobre grandes superfícies líquidas, como lagos, por exemplo, em distintas alturas de voo.

A equação abaixo mostra como obter n que é composto pela contribuição da aeronave e da radiação cósmica e é dependente da influência da aeronave, bem como do valor b que é formado pela razão entre a contagem realizada em uma janela específica e a contagem no canal cósmico e , por fim, n_{cos} que representa as contagens observadas no canal de radiação cósmica (IAEA, 2003).

$$n = a + bn_{cos} \quad \text{Eq. 14}$$

6.1.2.1.4 Remoção do background do radônio atmosférico

A remoção do background do radônio atmosférico é fundamentada na influência que a concentração de radônio, que é um isótopo filho da série do tório e possui uma distribuição não uniforme ao longo da atmosfera, gera nos resultados de contagem de urânio. De acordo com Ribeiro et al., (2013), é necessário a utilização de duas configurações nos detectores, que são denominadas *upward-looking* e *downward-looking*, sendo a primeira formada por um detector *upward* parcialmente blindado, que só capta radiação proveniente de uma única direção proveniente da parte superior, isto é, da atmosfera, enquanto o detector *downward* capta a radiação no sentido inverso.

Conforme IAEA (2003), a equação abaixo indica como é possível remover a influência do radônio existente na atmosfera, que depende da contagem *upward* de urânio, da contagem *downward* de urânio, da contagem de tório e das constantes a_1 , a_2 , a_u , a_t , b_u e b_t que estão relacionadas à calibração correta dos equipamentos.

$$U_r = \frac{U - a_1 U - a_2 Th + a_2 b_t - b_u}{a_u - a_1 - a_2 a_t} \quad \text{Eq. 15}$$

6.2.1.5 Correção do Efeito Compton

A correção do efeito Compton é fundamentada na remoção da influência do tório sobre o urânio, tório sobre o potássio e do urânio sobre o potássio, extraíndo, dessa forma, a influência dos canais de maior energia sobre os canais de menor energia.

6.1.2.1.6 Correção altimétrica

De acordo com IAEA (1991), a correção altimétrica deve ser realizada em levantamentos radiométricos aéreos para mitigar falsas anomalias que são geradas pela topografia. A equação abaixo mostra como a correção pode ser calculada, tendo em vista que as taxas de contagem possuem variação exponencial conforme a altura.

$$N_H = N_0 e^{-\mu H} \quad \text{Eq. 16}$$

6.1.2.1.7 Razões radiométricas

Em função das características distintas existentes entre os radionuclídeos, as rochas podem possuir concentrações distintas de U, Th e K. De acordo com Ribeiro et al., (2013), a partir das contagens individuais de cada elemento são criados os primeiros produtos, além do mapa que representa a contagem total. Na sequência, tendo como referência os mapas das contagens individuais, são gerados os produtos secundários, que apresentam as razões entre U, Th e K, na forma U/Th, U/K e Th/K, que tem como objetivo ressaltar a diferenciação de concentração dos radionuclídeos.

6.1.3 Geotermia

A geotermia é a ciência que estuda o calor ou a energia proveniente do interior da Terra, sendo de grande importância para os estudos de energia e demais pesquisas geofísicas, fornecendo informações como o fluxo de calor e o gradiente geotérmico.

Há diversos métodos propostos para estimar as temperaturas das camadas da subsuperfície com base em análises químicas de fontes naturais e de poços, como os desenvolvidos nos trabalhos de Fournier & Rowe (1966), Truesdell (1976), Fournier (1977) apud Alexandrino & Hamza (2018), sendo recorrente o uso de concentrações de sílica dissolvida na determinação de temperaturas das águas em subsuperfície. Os geotermômetros que utilizam a saturação de quartzo dependem do equilíbrio do quartzo dissolvido em fluidos geotérmicos e da relativa dificuldade do quartzo para precipitação de soluções supersaturadas (ALEXANDRINO & HAMZA, 2018).

Conforme apontado por Alexandrino & Hamza (2018), embora atualmente haja grande progresso a respeito da utilização da termometria geoquímica em fontes termais, poucos trabalhos foram desenvolvidos para analisar quimicamente fluidos não termais.

As relações essenciais para o uso do geotermômetro de sílica são baseadas na fundamentação de que a quantidade de sílica dissolvida nas águas de nascente é dependente das temperaturas in situ dos reservatórios geotérmicos (FOURNIER & ROWE, 1966 apud ALEXANDRINO & HAMZA, 2018). De acordo com Alexandrino & Hamza (2018), os estudos anteriores utilizavam um método de cálculo das temperaturas que faz uso de aproximações, cujas constantes características são fundamentadas em ajustes numéricos aplicados aos dados de solubilidade obtidos experimentalmente. A análise dessas relações apontou para uma melhora nos ajustes estatísticos a partir de uma abordagem segmentada, em que os dados de solubilidade são subdivididos em seções separadas e relações empíricas específicas são desenvolvidas para cada seção.

Em relação aos métodos propostos para estimar as temperaturas da subsuperfície com base em análises químicas de fontes naturais e de poços, que foram alvo de análise na presente pesquisa, cabe destacar os trabalhos desenvolvidos por Fournier & Rowe (1966), Truesdell (1976), Fournier (1977) apud Alexandrino & Hamza (2018).

Estes trabalhos utilizavam um método para o cálculo das temperaturas com base em dados empíricos, cujas constantes características foram baseadas em ajustes numéricos generalizados para solubilidade experimental, e a relação geral pode ser descrita conforme a equação abaixo, onde SiO_2 é a concentração de sílica em ppm e T_{SiO_2} é a temperatura em °C, sendo A, B C e D os valores das constantes características.

$$T_{\text{SiO}_2}(\text{SiO}_2) = A + B(\text{SiO}_2) + C(\text{SiO}_2)^2 + D\ln(\text{SiO}_2) \quad \text{Eq. 17}$$

Dessa forma, conforme apontado por Alexandrino & Hamza (2018), os geotermômetros utilizam a saturação de quartzo e, dessa forma, estão relacionados com a dificuldade relativa do quartzo para precipitação de soluções supersaturadas e com o equilíbrio do quartzo dissolvido em fluidos geotérmicos.

No que se refere ao cálculo da estimativa de fluxo de calor do teor de sílica, referente à superfície, a relação empírica proposta por Swanberg e Morgan (1978) é descrita por meio da equação abaixo, onde T_{SiO_2} é relativo à temperatura do reservatório derivada do teor de sílica, q o fluxo de calor superficial e m e b são constantes, sendo a primeira relacionada com a profundidade de circulação, enquanto a segunda indica a temperatura média anual da superfície.

$$T_{SiO_2} = mq + b \quad \text{Eq. 18}$$

6.2 Metodologia

Para a realização da presente dissertação foram executados procedimentos que incluem atividades de biblioteca e de laboratório, utilizando computadores e programas específicos voltados para a geofísica. Sendo assim, a seguir é apresentada a metodologia adotada para a realização da presente pesquisa:

6.2.1 Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica foi adotada para atingir parte dos objetivos propostos na presente pesquisa que, de acordo com Lima & Miotto (2007), consiste em uma importante ferramenta no desenvolvimento do conhecimento, sendo a pesquisa bibliográfica definida por um conjunto sequencial de procedimentos em busca de soluções, com foco no objeto de estudo, sem ser aleatório.

Dessa forma, a presente dissertação realizou a pesquisa bibliográfica das principais bases de dados online, como as plataformas Scielo, Google Acadêmico, entre outras. A pesquisa se desenvolveu por meio da busca por palavras-chave, como “geofísica”, “magnetometria”, “radiometria”, “radioatividade”, “geotermia”, entre outros, que permitiram filtrar uma diversidade de artigos, dissertações e teses, que foram avaliadas na presente pesquisa.

Ademais, a pesquisa bibliográfica também foi executada na biblioteca do Observatório Nacional, onde foi realizada a revisão bibliográfica a respeito dos aquíferos e da radioatividade das águas subterrâneas.

Sendo assim, a pesquisa através das plataformas citadas e da biblioteca possibilitou o acesso a um número contundente de informações e dados de qualidade,

viabilizando o desenvolvimento da pesquisa proposta, angariando o conhecimento existente e disponível sobre o tema em análise.

6.2.2 Levantamento de Campo

Complementando a pesquisa bibliográfica, foi executado um trabalho de campo de reconhecimento e coleta de imagens geológicas/geomorfológicas da área de estudo. Em campo foram retiradas fotografias e as observações foram registradas em caderneta.

O GPS utilizado em campo foi o VISTA HCX, da marca GARMIN, e o Datum adotado foi o SIRGAS 2000. As coordenadas apresentadas nas legendas das fotografias de campo referem-se ao local de onde as mesmas foram tiradas. Para a medição das estruturas geológicas nos afloramentos foi utilizada uma bússola tipo clar, e as medições de direção e mergulho informadas estão no formato dip/dip.

6.2.3 Parâmetros do Aerolevanteamento

Para o levantamento realizado pelo Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro (CPRM, 2012) foi utilizada a aeronave Piper Navajo PA31-350, prefixo PR-PEC e uma aeronave Cessna Caravan C208B, prefixo PT-MED.

No que se refere aos parâmetros que orientaram a execução do aerolevanteamento, os mesmos seguem descritos abaixo:

- Direção das linhas de voo: N-S
- Espaçamento entre as linhas de voo: 0,5 km
- Direção das linhas de controle: E-O
- Espaçamento entre as linhas de controle: 10 km
- Intervalo entre medições geofísicas consecutivas: 0,1 s (magnetômetro) e 1,0s (gamaespectrômetro)
- Altura média de voo: 100 m
- Velocidade aproximada de voo: 270 km/h

6.2.4 Elaboração do Banco de Dados

Para a montagem do banco de dados foi utilizado o software Seequent/Oasis Montaj© versão 9.8, bem como o software ArcGis, versão 10.8 da Esri© para o desenvolvimento da presente pesquisa.

A primeira etapa da elaboração do banco de dados consistiu na verificação geoespacial dos poços com elevadas concentrações de urânio identificados pelo LABAGUAS, da Puc-Rio, que possui os laudos hidrogeoquímicos que foram utilizados de base para o desenvolvimento da presente pesquisa.

Na sequência foram georreferenciados os dados dos poços, cadastrados na plataforma SIAGAS, inserindo as informações de nível estático, dados de elevação, obtidos a partir de imagens de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), que serviram para calcular as cargas hidráulicas e gerar um mapa potenciométrico da área de estudo, possibilitando identificar as linhas preferenciais de fluxo subterrâneo.

Posteriormente, foram utilizados os dados magnéticos e gamaespectrométricos no formato XYZ disponibilizados pela CPRM, referentes ao Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro (CPRM, 2012). Os dados já tinham sido reduzidos, com os valores finais magnetométricos e gamaespectrométricos.

No que se refere ao database dos dados aerogeofísicos, o mesmo foi estruturado por meio dos campos: coordenadas cartográficas (UTM N, UTM E) e geográficas (Latitude e Longitude), elevação, data da aquisição, hora da aquisição, e canais de cada tema (magnetométrico e gamaespectrométrico). O datum utilizado foi o WGS84 e projeção 23S.

6.2.5 Dados dos Poços

6.2.5.1 Poços com Alto Teor de Urânio

De acordo com os dados de qualidade da água analisados pelo laboratório LABAGUAS da PUC-Rio (GODOY et al., 2019), dos 25 poços alvo de investigação foram identificados 6 poços com concentração de urânio acima dos limites estabelecidos pela portaria MS 2914/2011, que é de 0,030 (mg L⁻¹), o que faz com que a água, nos pontos em que essas amostras foram coletadas, não possa ser classificada como potável.

Destes 25 (vinte e cinco) poços, 17 (dezessete) estão localizados na área de estudo da presente pesquisa (Tabela 7), sendo 6 com teores elevados de urânio, conforme ilustrado na Figura 23.

Tabela 7 – Dados das amostras do LABAGUAS na área de estudo.

Amostra	Coordenadas UTM – Zona 23S – Datum SIRGAS2000		U mg/L	Teor elevado de U
	E (m)	S (m)		
1	712398	7550001	0,036	Sim
2	715725	7549177	0,036	Sim
3	713693	7549875	<0,001	Não
4	713534	7550083	0,002	Não
5	712398	7550001	<0,001	Não
6	711452	7547555	0,029	Não
7	711344	7547077	0,18	Sim
8	711400	7547009	0,005	Não
9	710507	7546719	0,04	Sim
10	709828	7546209	0,12	Sim
11	708330	7547106	0,068	Sim
12	708183	7546109	<0,001	Não
13	708034	7545504	0,003	Não
14	708722	7544793	<0,001	Não
15	704360	7543799	0,002	Não
16	706440	7545124	0,02	Não
17	713352	7546892	<0,001	Não

Fonte: Godoy et al., 2019.

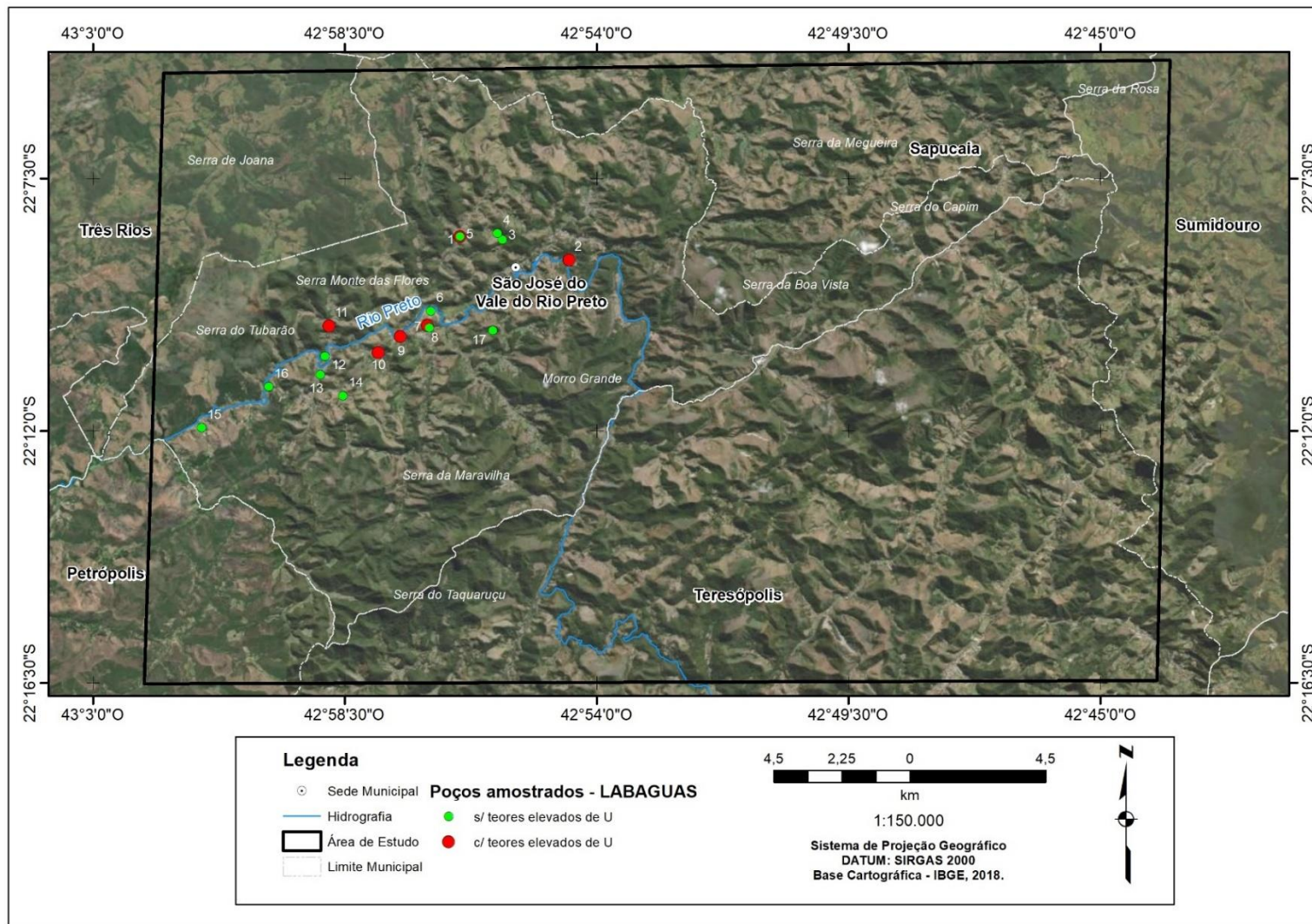


Figura 23 – Mapa dos poços com concentrações de urânio elevadas, identificados pelo LABAGUAS. Fonte: o autor.

6.2.5.2 Poços Cadastrados na Base SIAGAS

Embora a análise da base de dados disponibilizada pelo SIAGAS, desenvolvido pela CPRM, ter identificado a ocorrência de 236 poços cadastrados nos municípios interceptados pela poligonal da área de estudo (26 em Petrópolis, 18 em Sapucaia, 20 em São José do Vale do Rio Preto, 4 em Sumidouro, 24 em Três Rios e 44 no município de Teresópolis), apenas 28 estão inseridos na área de estudo (

Figura 25) e foram utilizados para estimar o fluxo subterrâneo em função de apresentarem os dados de nível estático.

Outro dado relevante à pesquisa associada aos dados da base SIAGAS é relativo à profundidade média dos poços, que é de 140,6 metros. A Figura 24 apresenta o histograma de profundidade dos poços da base SIAGAS na área de estudo. Conforme apontado por Godoy et al., (2019), poços com profundidade superior a 80 metros nessa região possuem um alto potencial para a ocorrência de concentrações elevadas de urânio.

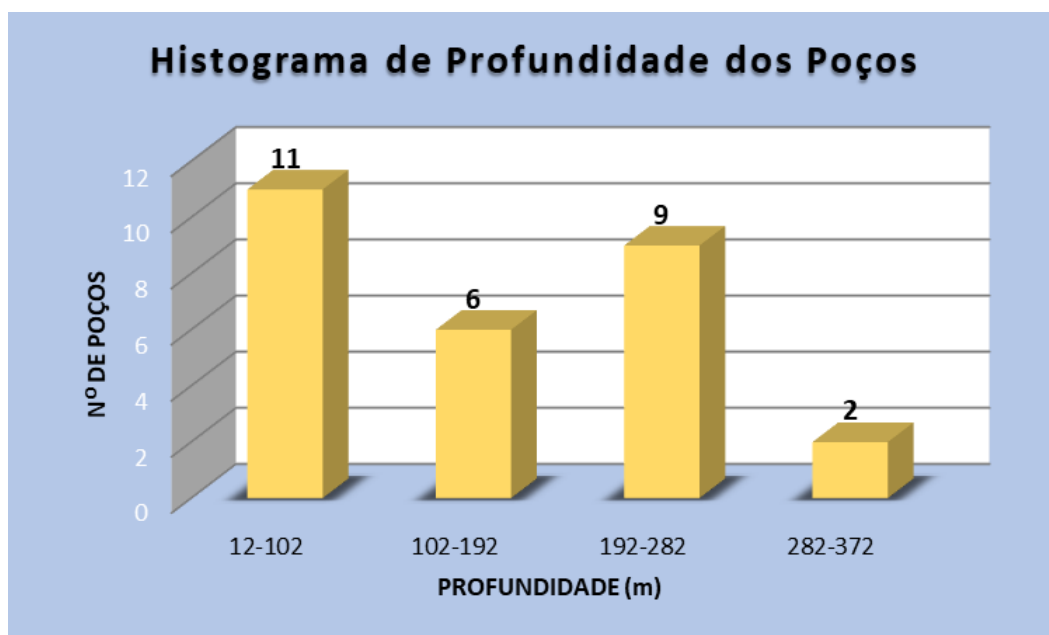


Figura 24 - Histograma de profundidade dos poços. Fonte: o autor.

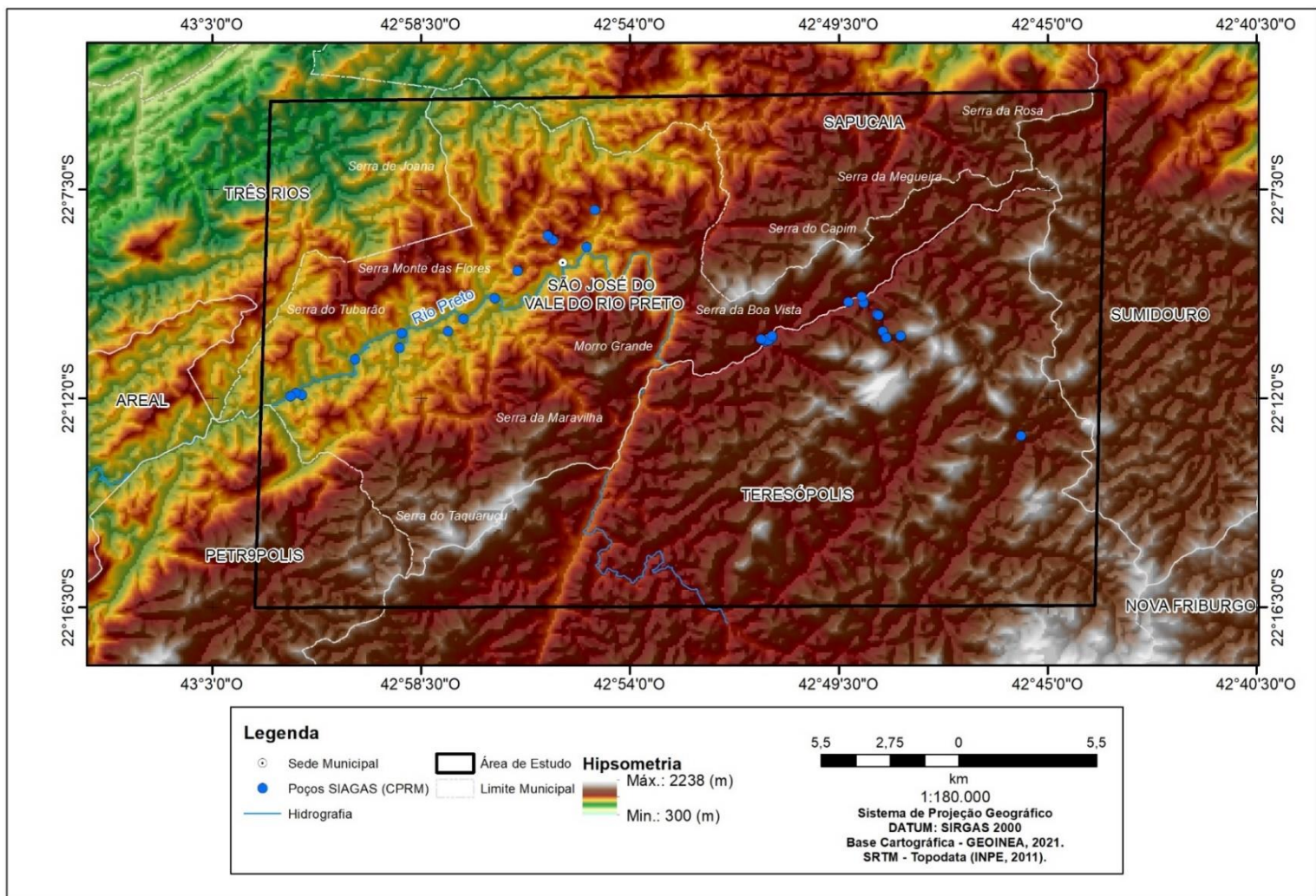


Figura 25 - SRTM e poços da base SIAGAS na área de estudo. Fonte: o autor.

Em relação aos dados geológicos, como exemplo é possível avaliar o perfil do poço 3100002009, que está associado ao teor elevado de urânio. A Figura 26 ilustra o perfil construtivo do poço que possui profundidade de 120 m e entrada de água em 17, 34, 36 e 84m (SIAGAS, 2022). A Tabela 8, por sua vez, indica as informações litológicas por profundidade. Os dados revelam a presença de rocha cristalina nas profundidades de entrada de água, típica do sistema aquífero fissural, alternando o estado de intemperismo entre rocha sã e rocha alterada.

Por outro lado, como exemplo de poços associados a baixos teores de urânio na área de estudo é possível avaliar o perfil do poço 3100002010. A Figura 27 ilustra o perfil construtivo do poço que possui profundidade de 150m e entrada de água em 13, 25 e 39,5m (SIAGAS, 2022). A Tabela 9, no entanto, indica as informações litológicas por profundidade. Os dados revelam a presença de gnaisse nas profundidades de entrada de água, típica do sistema aquífero fissural. Cabe destacar, no entanto, que ao contrário do poço com alto teor de urânio, nesse poço não há a presença de rocha alterada em profundidade, o que pode revelar a ausência de estruturas em profundidade responsáveis pelo fluxo subterrâneo com altos teores de urânio no local.

Tabela 8 – Dados litológicos do poço 3100002009.

Poço: 3100002009			
De:	Até:	Litologia	Descrição Litológica
0	9	Rocha Intemperizada	Material Inconsistente
9	11	Rocha Cristalina Não Identificada	Rocha Alterada
11	84	Rocha Cristalina Não Identificada	Rocha Sã
84	120	Rocha Cristalina Não Identificada	Rocha Alterada

Fonte: SIAGAS, 2022.

Tabela 9 – Dados litológicos do poço 3100002010.

Poço: 3100002010			
De:	Até:	Litologia	Descrição Litológica
0	9,5	Solo	Solo de Alteração Silto-Argiloso
9,5	150	Gnaisse	Biotita Quartzo Gnaisse São

Fonte: SIAGAS, 2022.

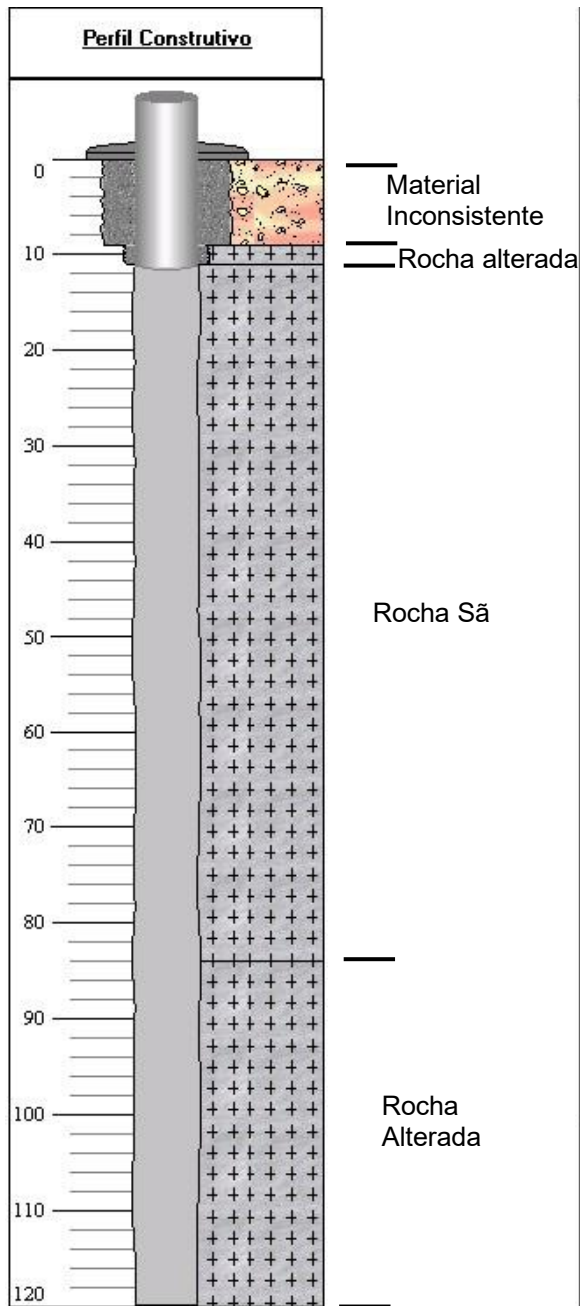


Figura 26 – Perfil do poço 3100002009, da base SIAGAS. Fonte: SIAGAS, 2022.

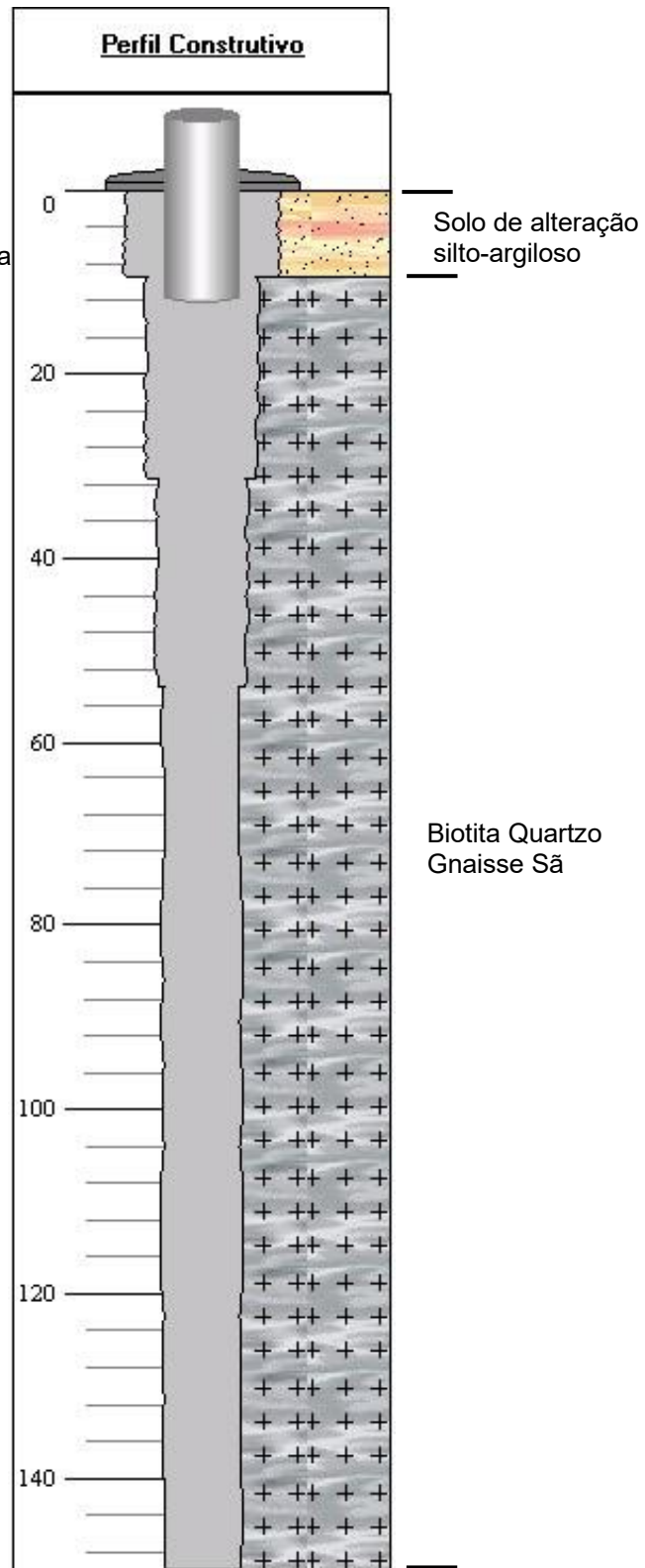


Figura 27 – Perfil do poço 3100002010, da base SIAGAS. Fonte: SIAGAS, 2022.

6.2.6 Processamento dos Dados

Nessa etapa foram processados os dados magnéticos e gamaespectrométrico produzidos pela CPRM para identificar as estruturas e os corpos geológico associados a hidrogeoquímica do urânio, por meio da interpretação da presença de fraturas, profundidade, litologias e demais correlações hidrogeológicas

Como os dados já estavam analisados e pré-processados, deu-se início à geração dos mapas temáticos. Na sequência foi utilizado o procedimento *Grid and Image* do software Seequent/Oasis Montaj© e os grids foram gerados pelo processo de mínima curvatura (BRIGGS, 1974) com malhas de 125 x 125 metros, que corresponde a 1/4 do espaçamento de 500 metros das linhas de voo.

No que se refere à geotermia, os dados físico-químicos dos poços analisados pelo LABAGUAS foram processados para estimar o fluxo de calor pelo método geoquímico (TRUESELL, 1976; FOURNIER, 1977 apud ALEXANDRINO & HAMZA, 2018). Ademais, para se obter o modelo de temperatura da água subterrânea na área de estudo foi utilizado o interpolador IDW no software ArcGIS, que é fundamentado na dependência espacial, conforme expresso na equação abaixo, onde V_i é o iésimo valor desconhecido, n é o número de pontos tomados para obter os valores desconhecidos, V_j é o jtaésimo valor conhecido, d_{ij} é a distância entre o iésimo valor desconhecido e o jtaésimo valor conhecido e p é a potência.

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{d_{ij}^p} V_j}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{d_{ij}^p}} \quad \text{Eq. 19}$$

Da mesma forma, os dados de elevação, obtidos a partir de imagens de radar SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) utilizados para definir as cargas hidráulicas e compor um mapa potenciométrico da área de estudo foi executado por meio do interpolador IDW no software ArcGIS, possibilitando a identificação das linhas de fluxo subterrâneo preferenciais. O cálculo da carga hidráulica (h) (DAS, 2007), por sua vez, foi obtido pela subtração da cota (z) pelo nível estático dos poços, através da equação abaixo.

$$h = z - ne \quad \text{Eq. 20}$$

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Hidrogeologia

7.1.1 Fluxo Subterrâneo

A partir dos dados dos poços cadastrados no SIAGAS foi possível obter as curvas potenciométricas e as linhas preferenciais de fluxo subterrâneo. Para tanto, foi realizado o cálculo da carga hidráulica (H), cujos resultados são apresentados na Tabela 10, que indica os poços da base SIAGAS identificados na área de estudo e que foram utilizados para o cálculo da carga hidráulica.

Tabela 10 – Poços da base SIAGAS utilizados para o cálculo da carga hidráulica. (continua).

Ponto	Latitude	Longitude	Município	Prof.	Ne (m)	Qe (m ³ /h/m)	Z (m)	H (m)
3100024267	-22,1783	-42,8489	Teresópolis	115	12,6	0,064	816	803,4
3100024268	-22,1797	-42,8514	Teresópolis	148	5,5	0,353	812	806,5
3100024269	-22,1792	-42,8519	Teresópolis	64	15,35	0,141	813	797,65
3100024270	-22,1794	-42,8503	Teresópolis	300	16,5	0,036	814	797,5
3100024288	-22,1778	-42,8489	Teresópolis	300	10	0,017	821	811
3100024272	-22,1789	-42,8528	Teresópolis	280	22,6	0,054	813	790,4
3100024282	-22,1656	-42,8214	Teresópolis	200	1,78	0,602	825	823,22
3100024284	-22,1658	-42,8161	Teresópolis	200	2,87	0,164	827	824,13
3100024285	-22,1700	-42,8111	Teresópolis	200	0,38	0,21	849	848,62
3100024286	-22,1703	-42,8106	Teresópolis	200	2,68	0,783	849	846,32
3100024287	-22,1761	-42,8092	Teresópolis	200	8,18	0,386	868	859,82
3100024288	-22,1778	-42,8028	Teresópolis	200	6,1	1,023	1069	1062,9
3100024289	-22,1783	-42,8078	Teresópolis	204	11,05	0,157	891	879,95
3100024415	-22,2136	-42,7594	Teresópolis	12	1,16	0,01	921	919,84
3100002002	-22,1717	-42,9597	SJVRP	96	2	0,07	540	538
3100002003	-22,1819	-42,9828	SJVRP	82	1	0,62	530	529
3100002004	-22,1861	-42,9986	SJVRP	100	6	0,12	525	519
3100002005	-22,1458	-42,9156	SJVRP	90	6	0,21	596	590
3100002006	-22,1433	-42,9275	SJVRP	121,5	2	0,09	708	706
3100002007	-22,1325	-42,9125	SJVRP	102	1	0,39	722	721
3100002008	-22,1642	-42,9486	SJVRP	116	2,5	0,06	541	538,5

Tabela 10 – Poços da base SIAGAS utilizados para o cálculo da carga hidráulica.
(continuação).

3100002009	-22,1761	-42,9653	SJVRP	120	10	1,8	575	565
3100002010	-22,1989	-43,0178	SJVRP	150	5,88	0,14	537	531,12
3100002011	-22,1767	-42,9819	SJVRP	50	8	1,13	580	572
3100002012	-22,1417	-42,9294	SJVRP	35	14	0,48	716	702
3100023812	-22,1983	-43,02	SJVRP	80	5,96	0,038	522	516,04
3100023813	-22,1994	-43,0219	SJVRP	100	15,74	0,308	520	504,26
3100024283	-22,1636	-42,8167	SJVRP	200	0,6	0,291	843	842,4

Fonte: SIAGAS, 2022.

Após a seleção dos poços e cálculo da carga hidráulica, foi realizada uma análise geoestatística por meio da ferramenta IDW, que forneceu os pesos ponderados à carga hidráulica dos pontos dos poços dentro da sub-bacia próxima ao núcleo urbano de São José do Vale do Rio Preto, conforme ilustrado na Figura 28. Desta forma, foi possível mapear as zonas de maior carga hidráulica correspondente ao leito do rio do Capim e as zonas de menor carga hidráulica, que se localizam próximas ao leito do rio Preto na área de estudo.

Na sequência, foram geradas as curvas equipotenciais da interpolação e definidas as linhas de fluxo para ilustrar o trajeto preferencial da água subterrânea na área de estudo, de montante para jusante. A Figura 28 abaixo ilustra as linhas equipotenciais e as linhas de fluxo, tendo como referência o recorte da sub-bacia próxima ao centro urbano de São José do Vale do Rio Preto, onde foram observados poços com teores elevados de urânio (GODOY et al., 2019).

A partir do mapa gerado foi possível observar as principais zonas de recarga e, principalmente para a presente pesquisa, as zonas de descarga (Figura 28). É possível observar que as zonas de recarga estão associadas as principais serras existentes na área de estudo, como a Serra da Maravilha e a Serra das Flores, enquanto as zonas de descarga se concentram junto à calha do rio Preto.

Em função da análise espectral de dados gamaespectrométricos ser eficiente na interpretação qualitativa dos sinais energéticos dos radioelementos (K, eU, eTh) em pouca profundidade, avalia-se que a identificação das potenciais zonas de descarga auxilie na observação de anomalias associadas à ocorrência de altos teores de urânio nos poços tubulares existentes na área de estudo.

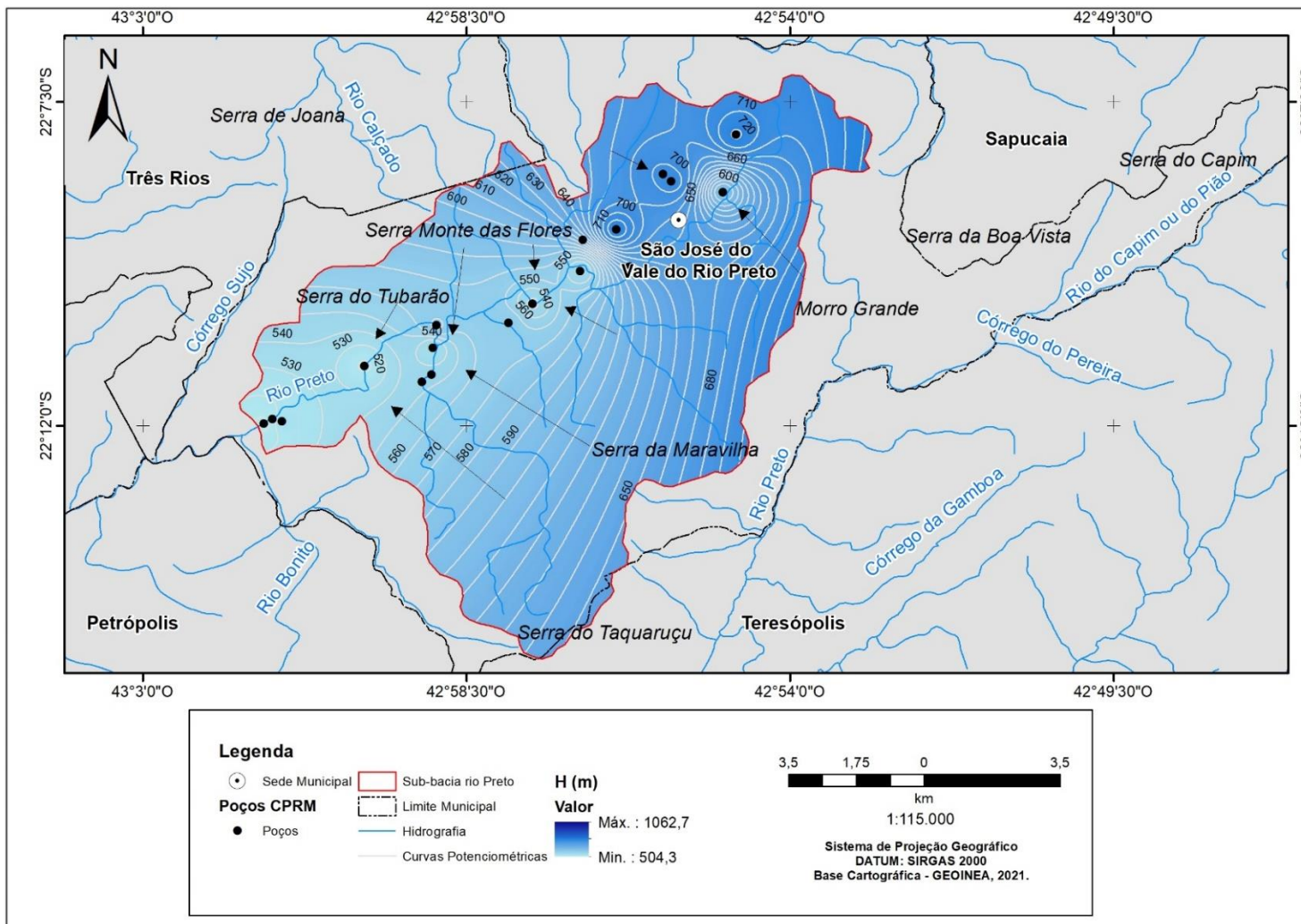


Figura 28 – Modelo IDW da carga hidráulica obtida para a área de estudo e curvas potenciométricas e linhas de fluxo.

Fonte: o autor.

7.1.2 Hidrogeologia local

Com base nos diversos litotipos das unidades geológicas que ocorrem na área de estudo, foram definidos dois sistemas aquíferos principais, sendo eles:

- Sistemas Aquíferos Inconsolidados - Granular
 - Manto de alteração e Depósitos aluviais
- Sistema Aquífero de Porosidade Fissural
 - Gr. Raposo, Complexo Rio Negro, Suíte Serra dos Órgãos e Cordeiro

As Figuras 29, 30, 31, 32, 33 e 34 ilustram as principais unidades geológicas identificadas na área de estudo.

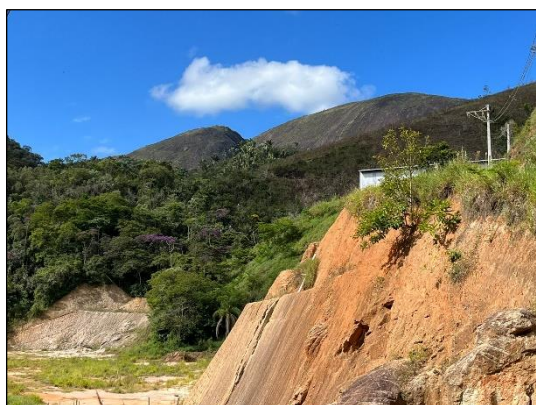


Figura 29 - Detalhe do manto de alteração sobre afloramento de granito da Suíte Serra dos Órgãos. UTM 23k E: 718170/S: 7546645. Fonte: O autor.



Figura 30 - Detalhe do manto de alteração sobre afloramento de biotita gnaisse do complexo Rio Negro. UTM 23k E: 711163/S: 7547260. Fonte: O autor.



Figura 31 - Depósito aluvial às margens do rio Preto. UTM 23k E: 715714/S: 7549150. Fonte: O autor.



Figura 32 - Afloramento de Biotita gnaisse do Complexo Rio Negro. UTM 23k E: 711163/S: 7547260. Fonte: O autor.

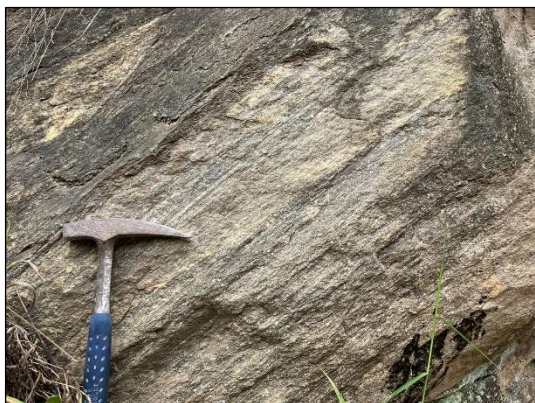


Figura 33 - Biotita gnaiss bandado do Grupo Raposo, Unidade Conservatória. UTM 23k E: 708403/S: 7547009. Fonte: O autor.



Figura 34 - Afloramento de Granito com fenocristais de plagioclásio da Suíte Serra dos Órgãos. UTM 23k E: 718170/S: 7546645. Fonte: O autor.

7.1.2.1 Sistemas aquíferos inconsolidados – Granular

As coberturas superficiais da área de estudo são representadas por mantos alterados e depósitos aluviais, que correspondem aos aquíferos inconsolidados – granulares. Em campo foi possível observar que os depósitos inconsolidados são formados a partir da alteração do embasamento rochoso existente e possuem como característica a sua ocorrência nas vertentes das serras e morros.

Cabe destacar que esta unidade é de fundamental importância em termos hidrogeológicos locais, marcadamente por seu papel na recarga dos aquíferos, em função da sua capacidade de infiltração rápida, especialmente nos locais de menor declividade, que são típicas desse sistema (FITTS, 2015). Essa dinâmica contribui, sobretudo, para a recarga do sistema aquífero de porosidade fissural (gnaisses e granitos), além de também servir como meio para descarga dos aquíferos, quando em cotas topográficas mais baixas.

7.1.2.2 Sistema aquífero de porosidade fissural

Os sistemas aquíferos de porosidade fissural, por sua vez, são observados em rochas com baixa porosidade primária, ou seja, pouca presença ou inexistência de espaço intergranular, o que faz com que a água seja transmitida, marcadamente, por meio de descontinuidades presentes nas rochas, como juntas/fraturas e falhas (FITTS, 2015).

Neste sentido, observamos que este tipo de aquífero observado na área de estudo da presente pesquisa é formado por rochas cristalinas do embasamento (Grupo Raposo, Complexo Rio Negro, Suíte Serra dos Órgãos e Suíte Cordeiro).

Apesar de as condições climáticas da área de estudo, marcada por elevados índices pluviométricos, acelerarem o processo de intemperismo e, assim, suprimir muitas discontinuidades, cabe destacar que estas discontinuidades, por muitas vezes, controlam e condicionam os padrões preferenciais da rede de drenagem, uma vez que estas geram caminhos preferenciais para o escoamento superficial sobre o embasamento cristalino.

A partir da análise dos lineamentos fotointerpretados nas imagens de radar SRTM e dos mapas magnetométricos, foi possível destacar a presença de vários lineamentos SO-NE, sendo representado principalmente pelo rio Preto e outras de direção NO-SE, E-O e N-S, associados principalmente aos tributários de primeira e segunda ordem.

Em campo foi possível observar esses sets preferenciais em diversos afloramentos, como os ilustrados na Figura 35 e na Figura 36.



Figura 35 – Afloramento de biotita gnaisse com fraturas métricas em corte de Estrada. UTM 23k E: 711163/S: 7547260. Fonte: O autor.



Figura 36 – Detalhe das fraturas métricas observadas no afloramento (34/55;46/51). UTM 23k E: 711163/S: 7547260. Fonte: O autor.

7.2 Geofísica

Para identificar os corpos e estruturas geológicas associadas à hidrogeoquímica do urânio, e as principais estruturas associadas às zonas de recarga da área de estudo foram utilizados as informações dos mapas magnéticos, onde há uma maior proximidade do sistema aquífero com a superfície, e também foram utilizados os dados dos mapas gamaespectrométricos.

Para uma melhor interpretação dos dados, foram correlacionadas as informações da geologia e do mapa do modelo digital do terreno (Figura 37) com os mapas geofísicos temáticos. Nesta figura é possível observar que a topografia é marcada pela presença de maciços, típicos do domínio montanhoso, assim como morros elevados, que são intercalados com planícies aluvionares nas regiões dos vales dos rios principais e córregos tributários.

O mapa de modelo digital de superfície registra uma área com altitudes máximas de quase 1480 m de elevação, encontradas na região a SO, e SE do polígono da área de estudo correspondendo a serra dos Órgãos, e se estende por alguns quilômetros com uma orientação preferencial SE-NE. Na região SO do polígono da área foi identificada outra região com altas altitudes correspondendo a serra Maravilha. Ainda é possível observar outras regiões de menor altitude como a serra das Flores a NO, a serra da Boa Vista e serra do Capim na região central do mapa. Na região dos vales dos rios, as drenagens marcam a diminuição na altitude relativa, indicadas pela graduação de cores que vai do marrom, passando ao verde até chegar ao azul, com direções variadas.

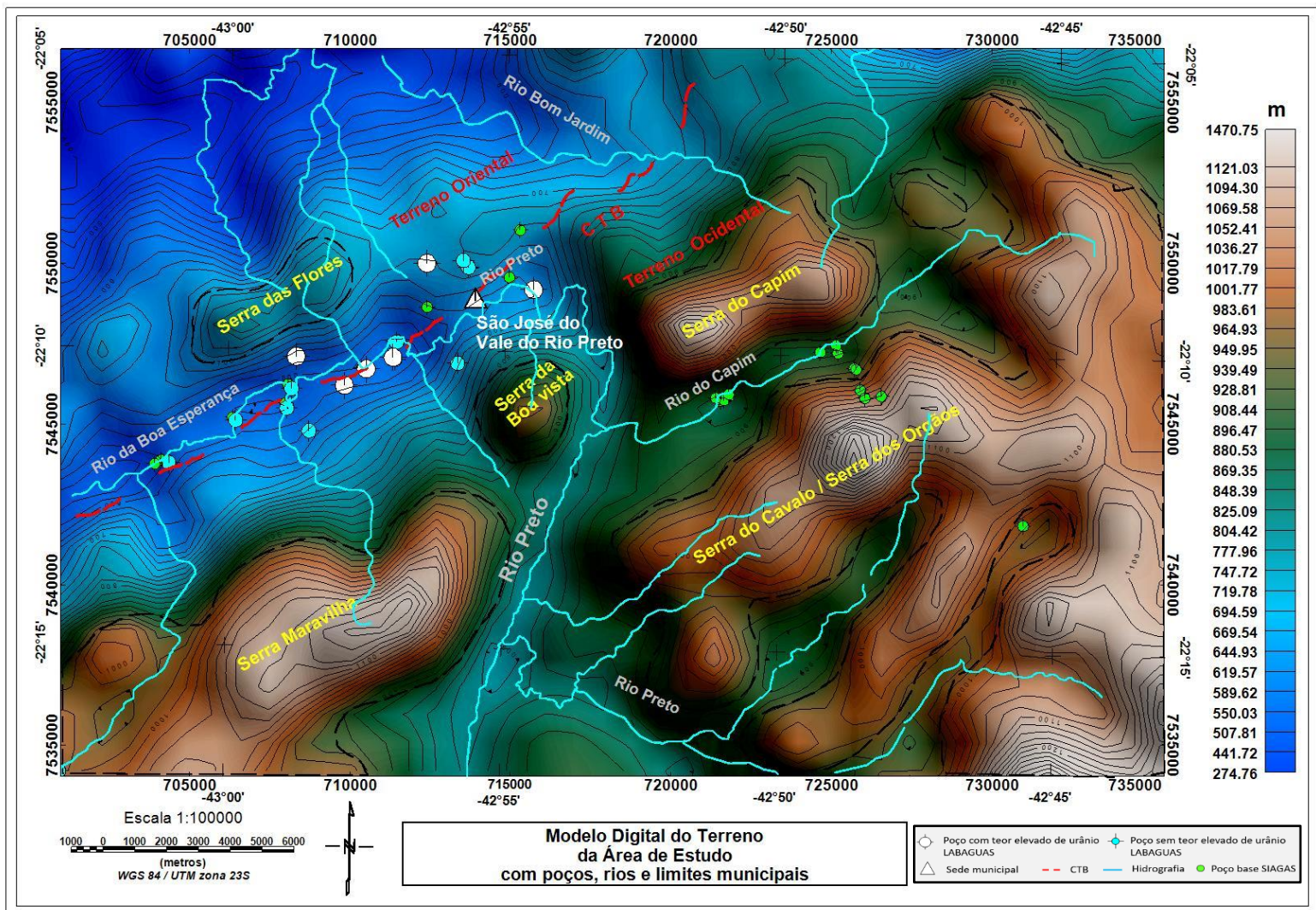


Figura 37 – Mapa do Modelo Digital do Terreno da área de estudo. Fonte: O autor.

7.2.1 Magnetometria

O mapa do campo magnético anômalo (CMA) foi utilizado como base para aplicação de filtros e geração dos mapas magnéticos temáticos. Conforme é possível observar na Figura 38, os valores da intensidade magnética variam de -13,52 a 118,46 nT. Também é possível notar que as estruturas apresentam compartimentação de direção SO–NE, acompanhado o *trend* geológico regional.

O mapa da primeira Derivada Vertical (Figura 39), apresenta valores de taxa de intensidade magnética variando de -0,06 a 0,03 nT/m, os lineamentos magnéticos traçados, que representam as fontes magnéticas rasas, apresentam *trend* geológico de direção SO-NE que corresponde a direção predominante no estado do Rio de Janeiro, que pode ser observado nos mapas geológicos e geofísicos.

Destaca-se na parte NO do mapa a falha do CTB de direção SO-NE que acompanha o rio Preto na região de São José do Vale do Rio Preto para SO até Areal. O CTB é caracterizado como uma falha de empurrão resultado da sutura do grupo Raposo (Terreno Oriental) com o Complexo Rio Negro (Terreno Ocidental). Acima do CTB temos um grande lineamento que coincide com a Serra das Flores, correspondendo ao contato do Grupo Raposo (unid. Conservatória) com o Grupo Raposo (unid. Arcádia Areal), e outros paralelos.

No canto SO da área para o canto NE junto a serra Maravilha temos um grande lineamento SO-NE paralelo ao CTB delimitando uma região que corresponderia ao contato do Complexo Rio Negro com a Suíte Serra dos Órgãos. Na região do Complexo Rio Negro é possível observar vários lineamentos destoando do *trend* regional, com direções variando de O–E a ENE 20°.

Seguindo para o canto SE da área temos vários lineamentos de direção SO45NE correspondente aos limites da Serra dos Órgãos. As falhas observadas de direção SO-NE em toda área, parecem ser de grandes profundidades, e poderiam estar relacionadas a colagem de paleocontinentes e/ou arcos de ilhas.

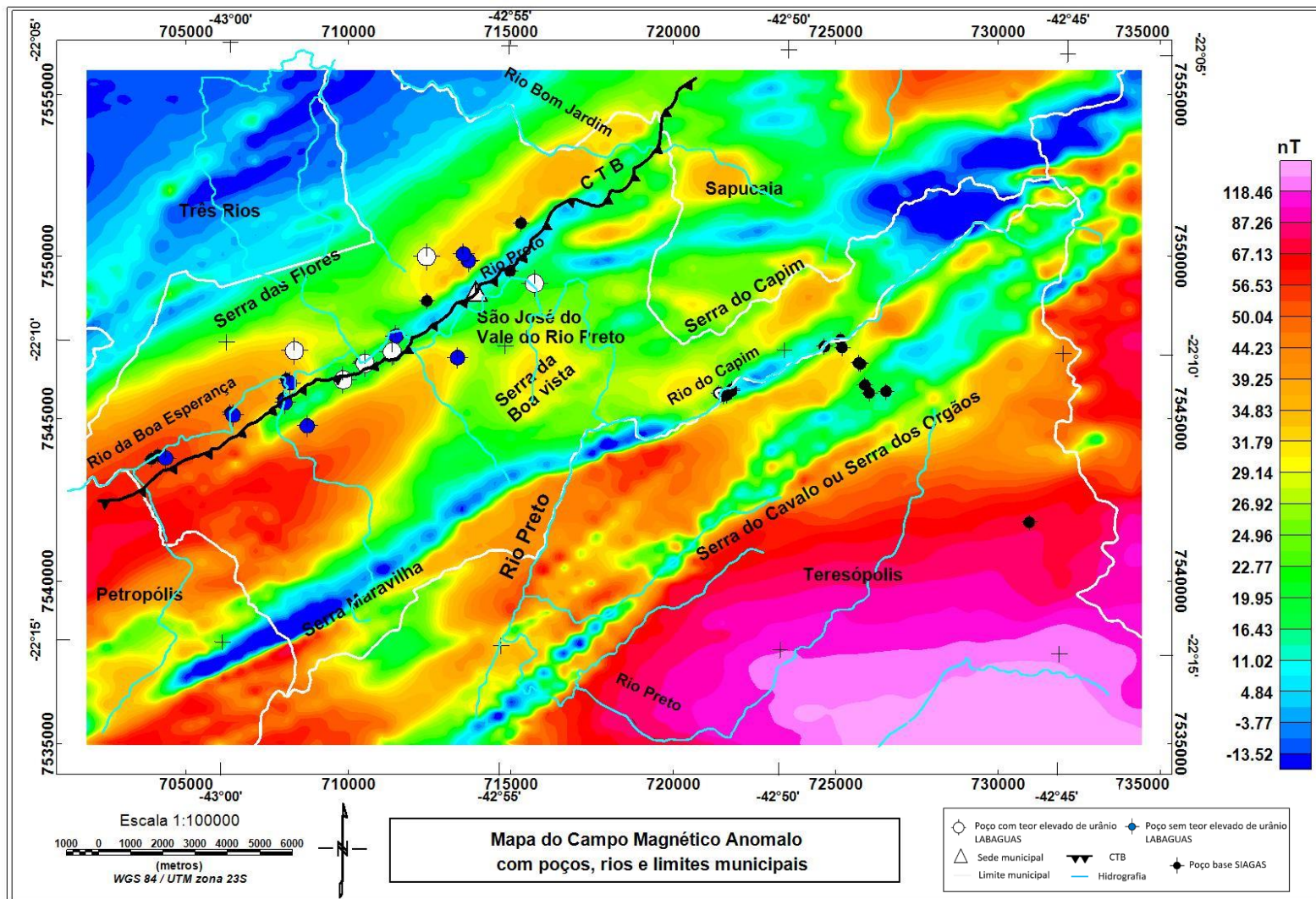


Figura 38 – Mapa do campo magnético anômalo – nele estão sobrepostos os principais rios, a falha de empurrão do CTB e as serras.

Fonte: o autor.

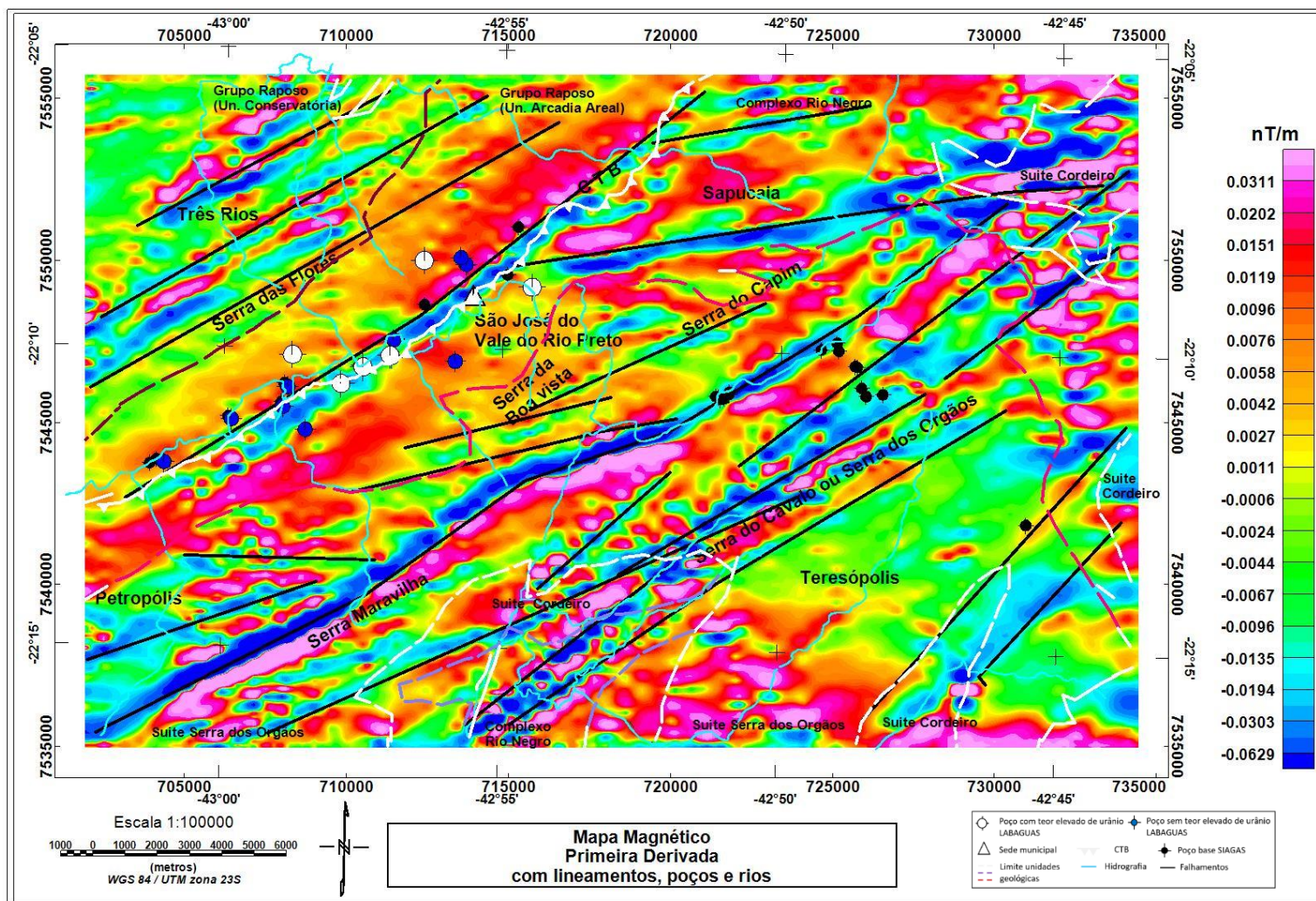


Figura 39 – Mapa da Primeira Derivada Vertical – nele estão sobrepostos os principais rios, a falha de empurrão do CTB e a serras.

Fonte: o autor.

O filtro da amplitude do sinal analítico, por sua vez, é utilizado para estimar a borda dos corpos anômalos e sua forma geométrica. O mapa da amplitude do sinal analítico (Figura 40) apresenta valores de taxa de intensidade magnética variando de 0,0082 a 0,0759 nT/m.

Nesse mapa fica evidenciado a presença de grandes estruturas de direção SO-NE, coincidentes com falhamentos traçados no mapa da Primeira Derivada Vertical. Um deles é um corpo alongado nesta direção na região do perímetro urbano e arredores de São José do Vale do Rio Preto, onde encontram-se os poços contaminados com urânio. Este corpo está conectado a outro corpo de direção ENE 9° que se estende até o limite E da área e coincide com um lineamento traçado no mapa da Primeira Derivada e ao longo do CTB. De acordo com o mapeamento geológico disponível (CPRM, 2016), estes corpos estariam na região do Complexo Rio Negro.

Na região SO da área de estudo foi possível observar um corpo magnético de alta taxa de intensidade magnética que apresenta geometria estirada do qual foi interpretada nesse trabalho como um dique, que coincide com a serra Maravilha até o contato com o corpo na parte NE da área de direção ENE 9°. O corpo se estende por toda região da suíte Serra dos Órgãos dentro da área de estudo.

Outro corpo paralelo ao possível dique, de direção predominante SO-NE, ao sul da área de estudo, tem as mesmas características. No entanto, o mesmo atravessa um pedaço do complexo Rio negro, da Suíte Cordeiro e a Suíte Serra dos Órgãos. Estes corpos parecem ser delimitadores de blocos litosféricos nesta região que sofreram sutura durante a formação da Faixa Ribeira.

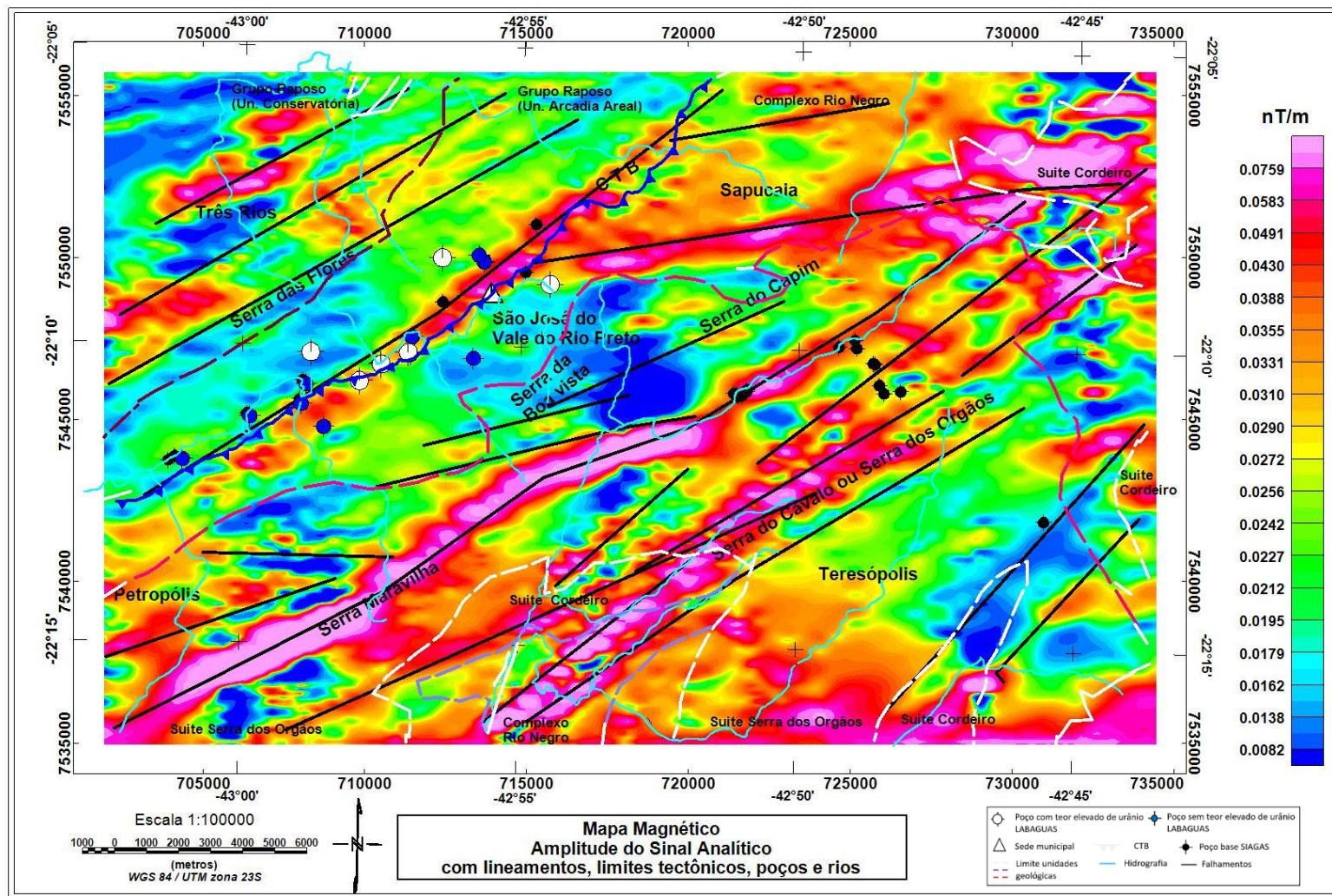


Figura 40 – Mapa da Amplitude do Sinal Analítico – nele estão sobrepostos os principais rios, a falha de empurrão do CTB e a serras.

Fonte: o autor.

Assim como a Primeira Derivada Vertical (Figura 39), além de evidenciar os corpos e estruturas geológicas mais rasas associadas a lineamentos magnéticos, são utilizadas derivadas direcionais para o refinamento de interpretação, com a finalidade de realçar uma direção preferencial da área de interesse.

O mapa da derivada em X (Figura 41), apresenta valores de taxa de intensidade magnética variando de -0,0057 a 0,0036 nT/m, neste mapa é possível traçar uma grande quantidade falhamentos de direção NO-SE, mas de pequena extensão, diferente dos falhamentos traçados no mapa da Primeira Derivada Vertical. Estes falhamentos estariam a pequenas profundidades e poderiam ser resultado dos esforços de dobramentos da crosta durante o processo de colagem dos paleocontinentes e/ou arcos de ilhas.

Os falhamentos estão na direção dos poços contaminados e podem servir de caminho para carreamento, ou terem formado regiões de trapas (grabens) nos vales onde são observadas planícies aluvionares, entre as elevações das serras da região, para acúmulo de sedimentos dos maciços rochosos ao redor.

Em relação a estes lineamentos, outro aspecto que merece destaque está relacionado à percolação de outras substâncias além do urânio, como o radônio. De acordo com Giuliani (2015), altas concentrações de radônio, tanto no solo quanto na superfície do terreno apresentam correlações positivas com lineamentos tectônicos, falhas e fraturas, de forma que através do processo de alívio de pressão, o gás escapa por meio das discontinuidades formadas chegando nível do terreno.

É importante ressaltar, no entanto, que na pesquisa desenvolvida por Godoy et al., (2019), foi identificado a emissão de radônio ($0,50 \mu\text{Sv h}^{-1}$) com um espectrômetro portátil apenas na cabeça de um poço que registrava altos teores de urânio região de estudo. Esse resultado contribui para a avaliação de que a fonte litológica com urânio não está próxima à superfície.

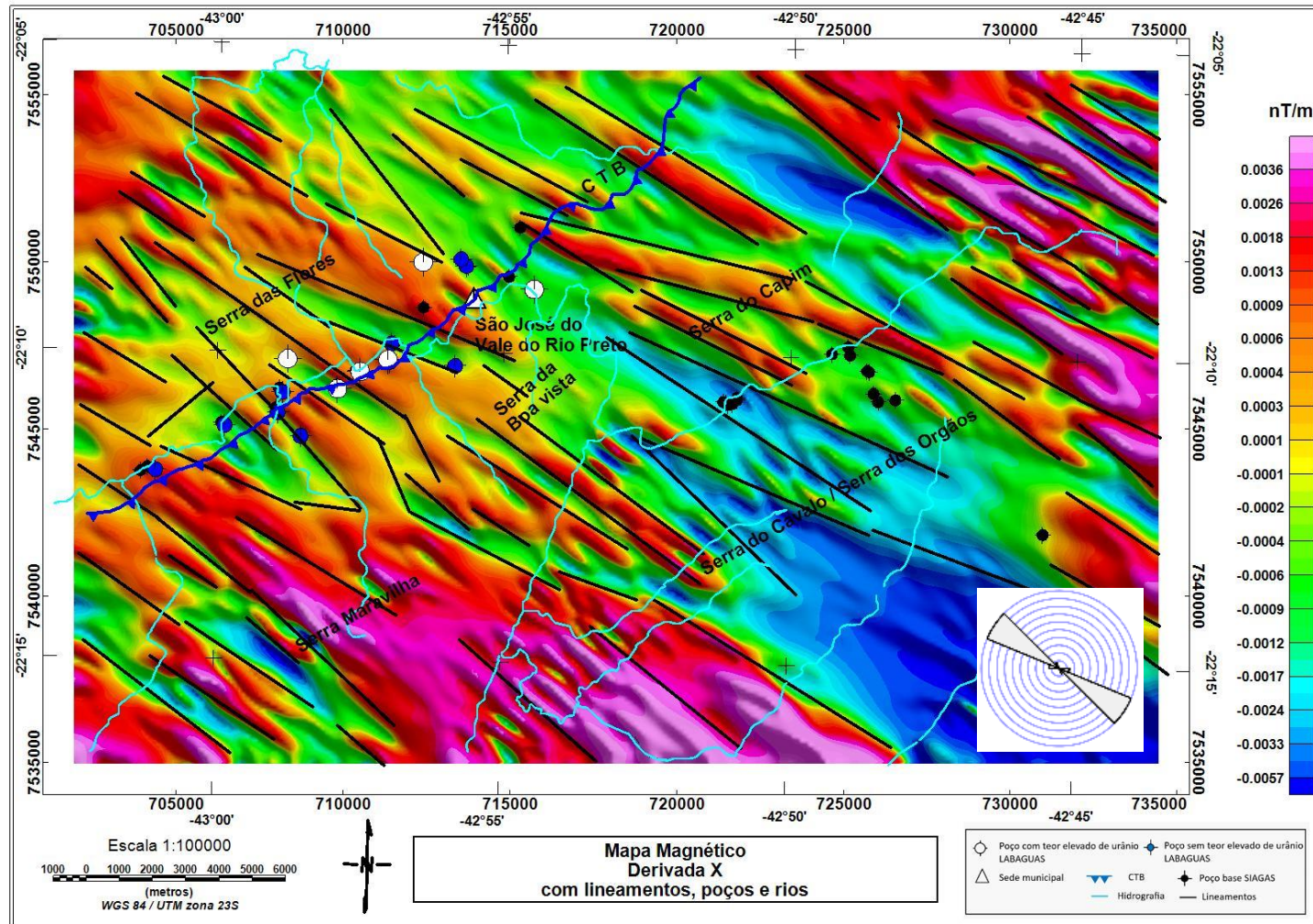


Figura 41 – Mapa da Derivada em X – nele estão sobrepostos os principais rios, a falha de empurrão do CTB, a serras e a roseta indica a direção preferencial predominante dos lineamentos, que é NO-SE. Fonte: o autor.

7.2.2 Gamaespectrometria

Para interpretar os mapas das concentrações do radioelementos (K, eU, eTh e CT e a composição ternária RGB) deve-se levar em conta as propriedades geoquímicas, a cristalografia, a abundância de cada elemento e suas principais ocorrências (RIBEIRO, 2013).

Segundo Ribeiro (2013), embora a respostas das informações gamaespectrométricas tenha pouco alcance em profundidade, estas informações obtidas para interpretação indicam contatos geológicos superficiais e/ou afloramentos de uma de uma formação.

O primeiro mapa gerado foi o do canal de Contagem Total, pois este canal contém o somatório de todos os outros canais, conforme ilustrado na Figura 42. Este mapa apresenta valores variando de 234,21 a 2240,79 Cps, no mapa é possível notar como está realçado o contato do complexo Rio Negro com sua confrontantes, a SO o Grupo Raposo (unid. Arcádia Areal) e SE a Suíte Serra do Órgãos.

É possível identificar três grandes anomalias no mapa. A primeira está na região SO da área, inserida no Grupo Raposo (unid. Conservatória), com direção SO-NE alongada, cuja anomalia tem valores superiores a 1600 Cps.

Uma segunda anomalia, com valores bem menos intensos, aparece por toda a extensão do Grupo Raposo (unid. Arcádia Areal) de forma alongada, bordejando todo o limite com o CTB, com valores de concentração variando de 1600 a 2100 Cps.

Por último, existe um conjunto de anomalias que abrangem a serra da Boa Vista, serra do Capim, serra dos Órgãos e serra Maravilha, inseridas na unidade geológica da Suíte Serra dos Órgãos. Esta anomalia bordeja todo contato da Suíte serra dos Órgãos com Complexo Rio Negro, com valores de concentração acima de 2000 Cps.

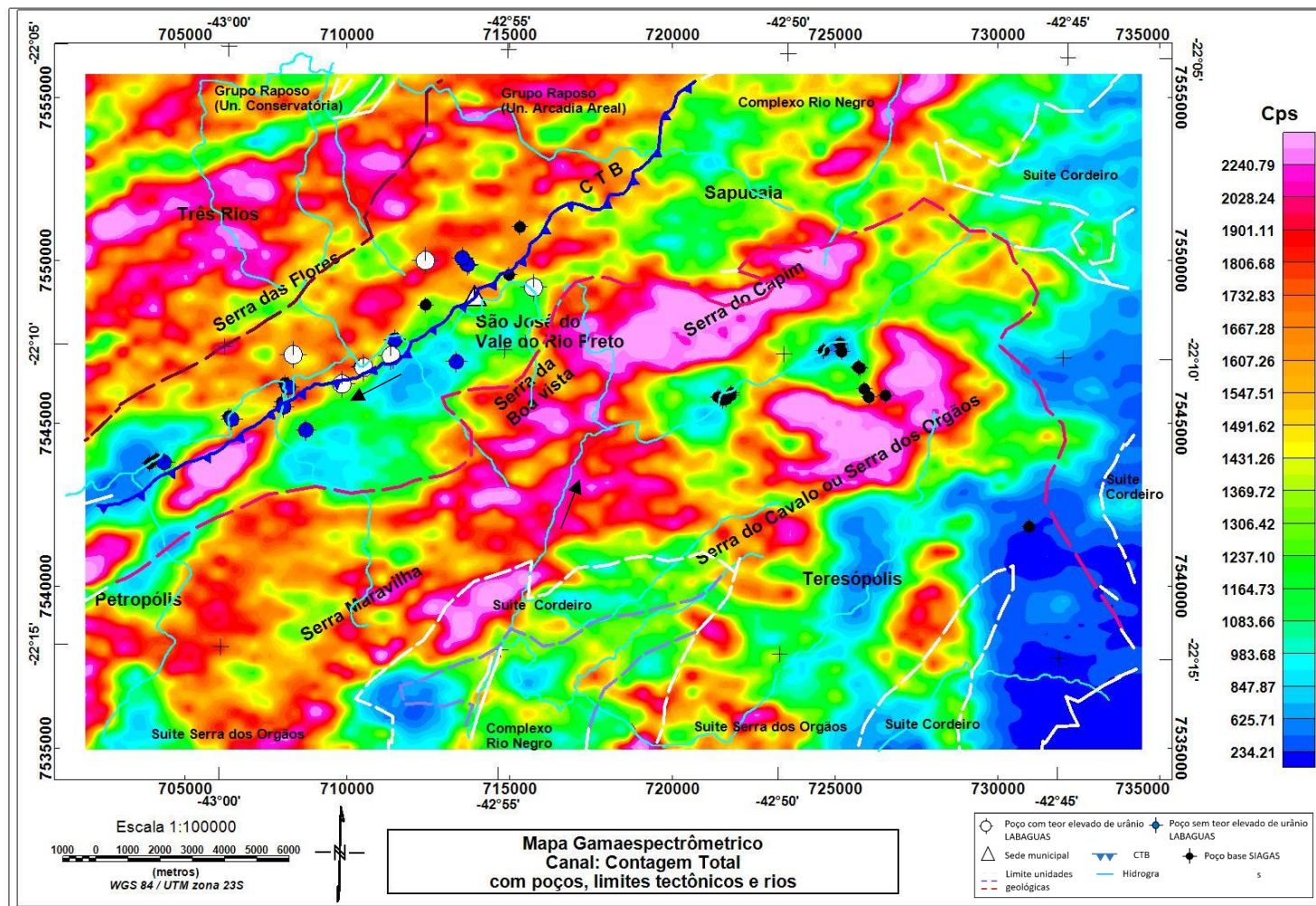


Figura 42 – Mapa Gamaespectrométrico da Contagem Total – nele estão sobrepostos os principais rios, a falha de empurrão do CTB e a serras. As setas pretas indicam o fluxo do rio Preto. Fonte: o autor.

O mapa do canal do potássio (Figura 43), por sua vez, apresenta valores variando de 1,06 a 150,04 %. No mapa também é possível observar que existe um grupo de anomalias alinhadas ao longo do CTB em toda a sua extensão na área.

Na área foram identificadas cinco anomalias de grande concentração, sendo as seguintes:

- 1- Anomalia A – Localizada na região a NO do Grupo Raposo (unid. Arcádia Areal), que apresenta valores acima de 90 %. Esta anomalia bordeja a Serra das Flores e tem uma forma alongada, na direção do *trend* regional. Associado a esta anomalia tem uma de menor intensidade (A1), aparentando ser uma continuação da anomalia A.
- 2- Anomalia B – Esta anomalia tem maior concentração na região da Serra do Capim, apresentado uma extensão na direção SO-NE ao longo do CTB e do rio Preto para o Sul da área. Esta região corresponde a um vale entre as Serras (do Capim, da Boa Vista, Maravilha e dos Órgãos) e fica inserida inteiramente na Suíte Serra dos Órgãos. Existe ainda um núcleo B1 ao lado que representa uma porção associada a anomalia B.
- 3- Anomalia C – A anomalia C tem uma grande concentração na região da Serra dos Órgãos e tem uma extensão para SO. Apresenta valores acima de 90 % e fica inserida toda na Suíte Serra dos Órgãos. Existe ainda um núcleo C1 abaixo que representa uma porção associada a anomalia C.
- 4- Anomalia D - A anomalia tem uma grande concentração na região da Serra Maravilha, apresenta valores de concentração acima de 90 % e fica inserida toda na Suíte Serra dos Órgãos. Existe ainda um núcleo D1 abaixo que representa uma porção associada a anomalia D.
- 5- Anomalia E e F – Estas anomalias são de menor expressão e apresentam valores de concentração variando de 50% a 100%, assim como outras anomalias isoladas.

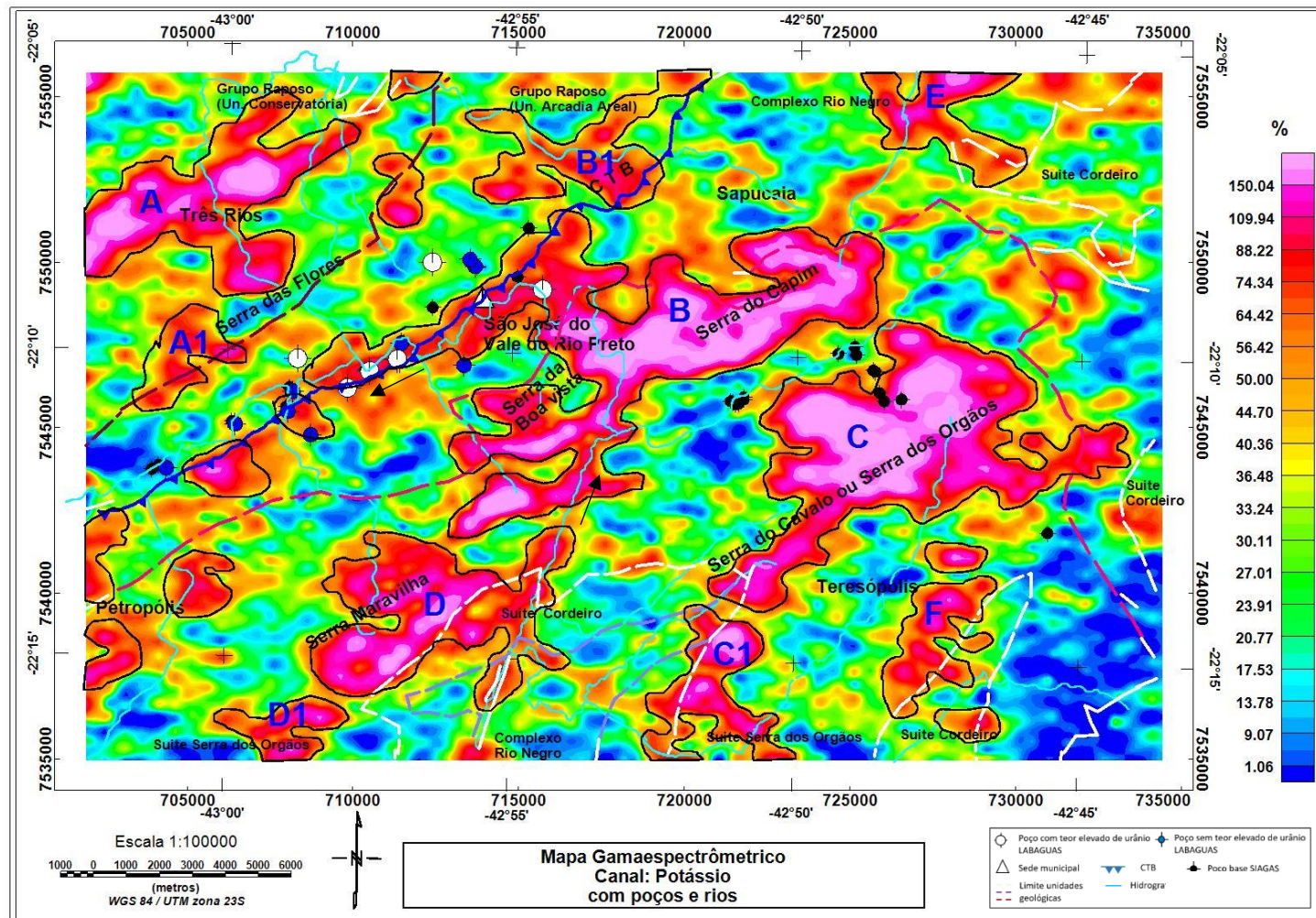


Figura 43 – Mapa Gamaespectrométrico - canal Potássio – nele estão sobrepostos os principais rios, a falha de empurrão do CTB e as serras. As setas pretas indicam o fluxo do rio Preto. Fonte: o autor.

De acordo com o observado no mapa do potássio, as anomalias estão localizadas nas regiões das planícies aluvionares do rio Preto e nos principais maciços rochosos da região (áreas fonte). Este fato se deve alta mobilidade durante o intemperismo e em ambientes de alteração hidrotermal, principalmente ambientes de clima tropical a subtropical (WILFORD et al., 1997). Uma vez que o potássio é lixiviado dos minerais primários, ele pode ser facilmente absorvido por argilominerais como illita, montmorilonita e, em menor proporção, caulinitas (Ribeiro, 2013). A principal ocorrência de potássio em associações minerais se dá nos feldspatos potássicos.

Segundo Boyle (1982), tanto o Tório quanto o Urânio estão comumente presentes em minerais acessórios, de variadas rochas ígneas e metamórficas quartzo-feldspáticas. Dickson & Scott (1997), descreveram que a maioria dos minerais com alto teor de Tório, como a monazita e o zircão, é estável durante o intemperismo e pode se acumular em depósitos de areia contendo minerais pesados. Desta forma, as regiões de falhas e planícies aluvionares são propícias ao acúmulo deste mineral, além das rochas geradoras.

O mapa do Tório (Figura 44), por sua vez, apresenta valores variando de 2,09 a 21,72 ppm. No mapa é possível notar que está bem definido o contato do complexo Rio Negro com sua confrontantes, de um lado a NO o Grupo Raposo (unid. Arcádia Areal) e do outro lado a SE a Suíte Serra do Órgãos, como já observado no mapa de Contagem Total.

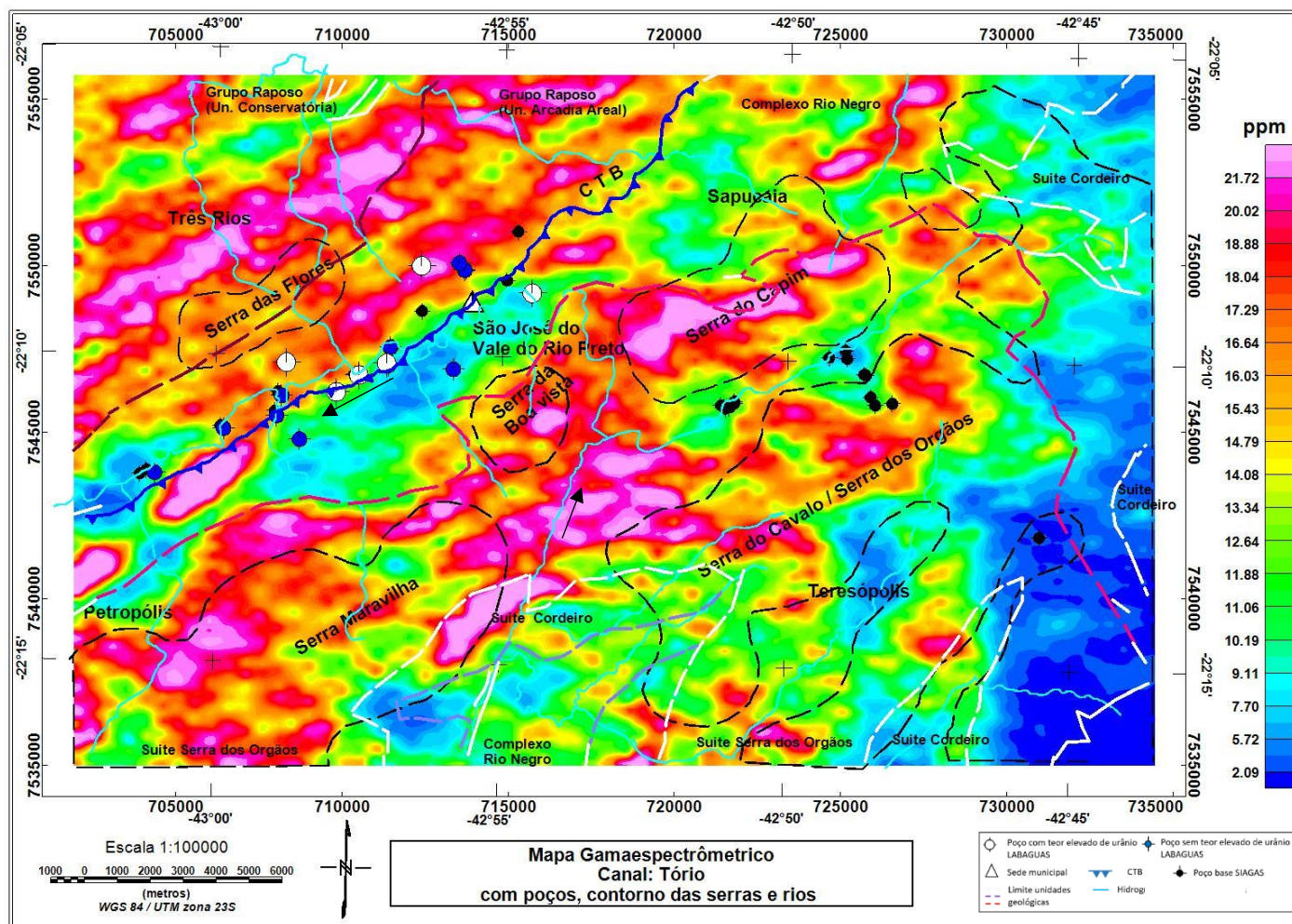


Figura 44 – Mapa Gamaespectrométrico, canal Tório – nele estão sobrepostos os principais rios, a falha de empurrão do CTB e as serras. As setas pretas indicam o fluxo do rio Preto. Fonte: o autor.

Nesse mapa é possível observar duas áreas ou dois domínios predominantes. O primeiro engloba a região localizada na região a NO do Grupo Raposo (unid. Conservatória) que apresenta valores de concentração variando de aproximadamente 14 até 21 ppm, esta anomalia bordeja a Serra das Flores, e tem uma forma alongada na direção do *trend* regional SO-NE.

Associado a esta anomalia tem uma de menor concentração, aparentando ser uma continuação da maior. Esta segunda anomalia com valores bem menos intensos aparece por toda a extensão do Grupo Raposo (unid. Arcádia Areal) de forma alongada, bordejando todo o limite com o CTB, com valores de concentração superiores a 22 ppm.

Por último, é possível observar um conjunto de anomalias que abrange toda a Suíte Serra dos Órgãos. Esta anomalia pode se dividir em dois grupos: a região da serra do Capim com maior concentração e a área de planície aluvionar do rio Preto entre a Serra Maravilha, Serra da Boa Vista, Serra dos Órgãos e Serra do Capim. No mapa também é possível identificar um outro conjunto de anomalias de menor concentração ao redor da Serra Maravilha Serra dos Órgãos. No contexto geral, esse conjunto de anomalias reflete todo o contato da Suíte Serra dos Órgãos com o Complexo Rio Negro.

Em relação ao mapa do Urânio (Figura 45), é possível observar que este não apresenta altos valores de concentração, conforme pode ser observado em todo o mapa. De acordo com Silva (2006), este radioelemento pode formar minerais solúveis, diminuindo assim a concentração deste, embora minerais tidos como insolúveis desse elemento tendem a não migrar, exceto no caso de serem transportados.

Nos sedimentos arenosos, o teor de urânio geralmente é menor que 1 ppm devido à facilidade de lixiviação desse elemento (RIBEIRO, 2013). No entanto, este autor relata que quando os sedimentos são originados a partir da erosão de rochas ígneas com minerais resistentes de tório e urânio, estes podem formar depósitos com concentrações anômalas de ambos os elementos, como é o caso de depósitos de tipo aluvionar ou litorâneos (VASCONCELLOS, 1994).

O mapa de urânio (Figura 45) apresenta valores variando entre 0,17 e 2,64 ppm. No mapa, na região da serra do Capim e da serra da Boa Vista, dentro da Suíte

Serra dos órgãos, é possível observar que ambas correspondem a duas anomalias com alta concentração de urânio. Possivelmente estas seriam as regiões das rochas fontes deste mineral. Ademais, em outras serras, como a serra Maravilha, serra das Flores e Serra dos Órgãos, não é possível observar anomalias no mapa de urânio.

Ainda na Figura 45 é possível observar que na região do Grupo Raposo (Unid. Conservatória) as rochas apresentam altas concentrações de urânio com valores acima de 2,6 ppm, estas anomalias têm direção SO-NE ao longo do contato desta unidade com o Grupo Raposo (Unid. Arcádia Areal). Mais uma vez é possível observar que ocorre uma anomalia alongada de direção SO-NE ao longo de toda falha de empurrão CTB. As rochas desta área, assim como as da unidade ao lado tem alta concentração de urânio.

Na unidade do Complexo Rio Negro, apenas na parte NE na divisa com o município de Sapucaia é possível observar que a rochas que a compõem apresentam alta concentração de urânio.

É possível destacar, ainda, a existência de duas regiões com alta concentração de urânio: A primeira seria na região aluvionar entre a serra do Capim e a serra dos Órgãos, na Suíte serra dos Órgãos. A segunda seria mais ao sul, na região aluvionar do rio Preto entre a serra Maravilha e serra dos Órgãos, na região da Suíte Cordeiro.

Conforme citado por Dickson & Scott (1997), estes minerais assim como, o tório pode se acumular em depósitos de areia contendo minerais pesados, como é o caso desta região de planície aluvionar.

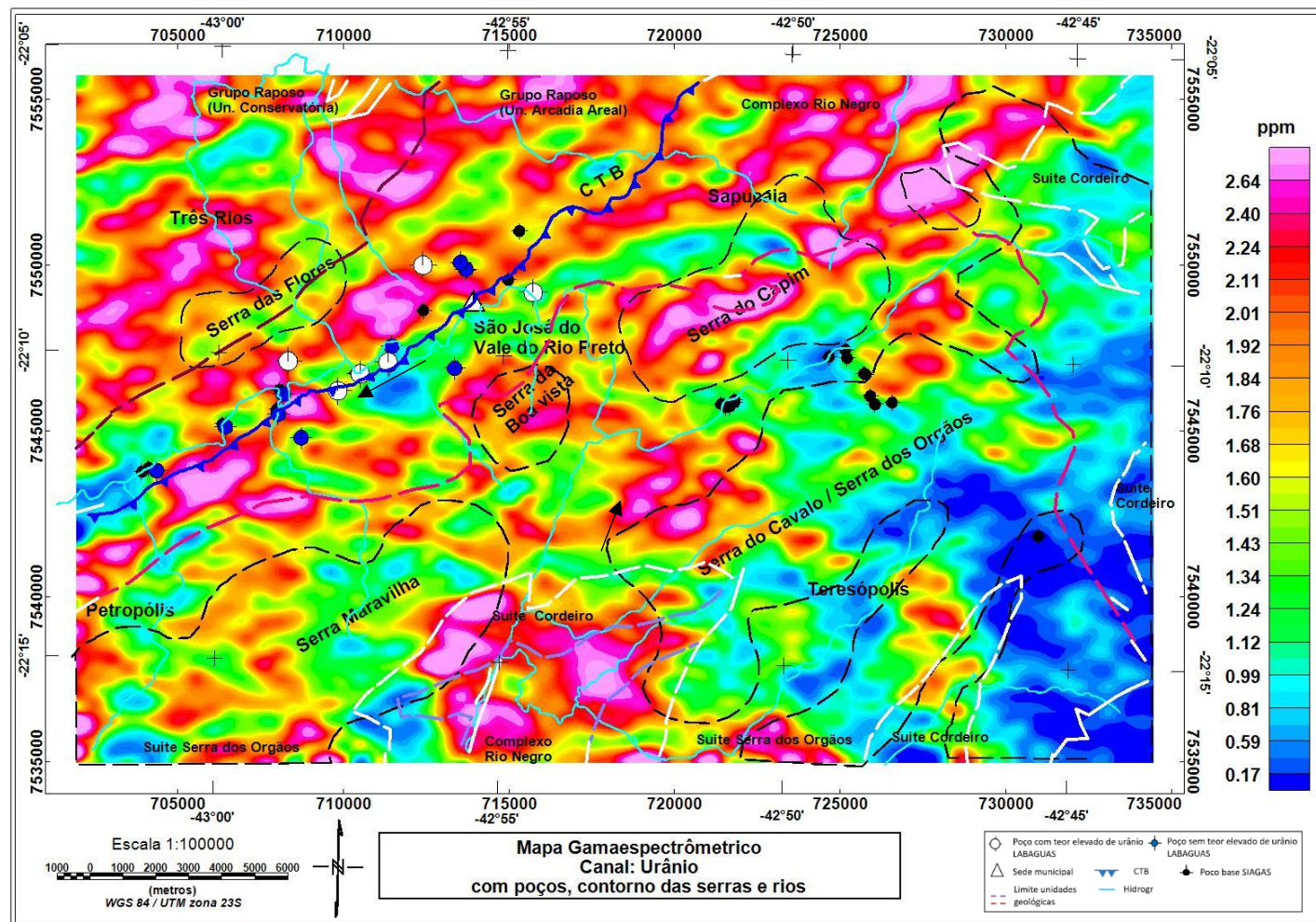


Figura 45 – Mapa Gamaespectrométrico, canal Urânio – nele estão sobrepostos os principais rios, a falha de empurrão do CTB e as serras. As setas pretas indicam o fluxo do rio Preto. Fonte: o autor.

Segundo o relatado no boletim da (IAEA, 2003), as razões entre os canais (K , eTh e eU) realçam o enriquecimento ou empobrecimento de um canal em relação a outros, onde os fatores ambientais como umidade do solo, presença de vegetação e variação topográfica não ficam evidentes.

De maneira geral, apresentam uma correlação elevada com unidades litológicas, podendo resultar em variações sutis referentes a mudança de litologia não visível nas grades originais (IAEA, 2003). Ademais, as razões também podem ser utilizadas para suprimir efeitos causados pela variação litológica e realçar assinaturas mais sutis dos radioelementos (MINTY, 2011).

O aumento do teor de sílica resulta em maiores concentrações dos três radioelementos, no entanto, o aumento no teor de Th é muito mais significativo do que o no teor de urânio. Dessa forma, a razão eU/eTh , conforme ilustrado na Figura 46, pode ser utilizada para investigar o grau de diferenciação dentro de uma suíte ígnea (DICKSON & SCOTT, 1997).

O mapa da razão U/Th (Figura 46) apresenta valores que variam de 0,05 a 0,23 nos domínios delimitados como principais áreas de concentração. Este mapa indica a existência de 5 domínios com alta concentração: A, B, C, D e E. No mapa da razão U/Th é possível observar que os domínios estão alinhados na direção SO-NE, e não correspondem as regiões dos maciços das serras da área.

Os domínios A, B, C estão localizados na região entre a serra das Flores e a serra da Boa Vista e do Capim, envolvendo a região aluvionar. Os valores de razão variam de 0,11 a valores superiores a 0,20. Estes domínios bordejam a Suíte Serra dos Órgãos e estão ocupando parte do Complexo Rio Negro e Grupo Raposo (Arcádia Areal). A anomalia do domínio "A" tem forma alongada e é possível identificar o padrão concêntrico, representado por intercalações de altas e baixas razões de eU/eTh , estando localizada na região NE da área de estudo. Parte deste domínio está em contato com a falha do CTB.

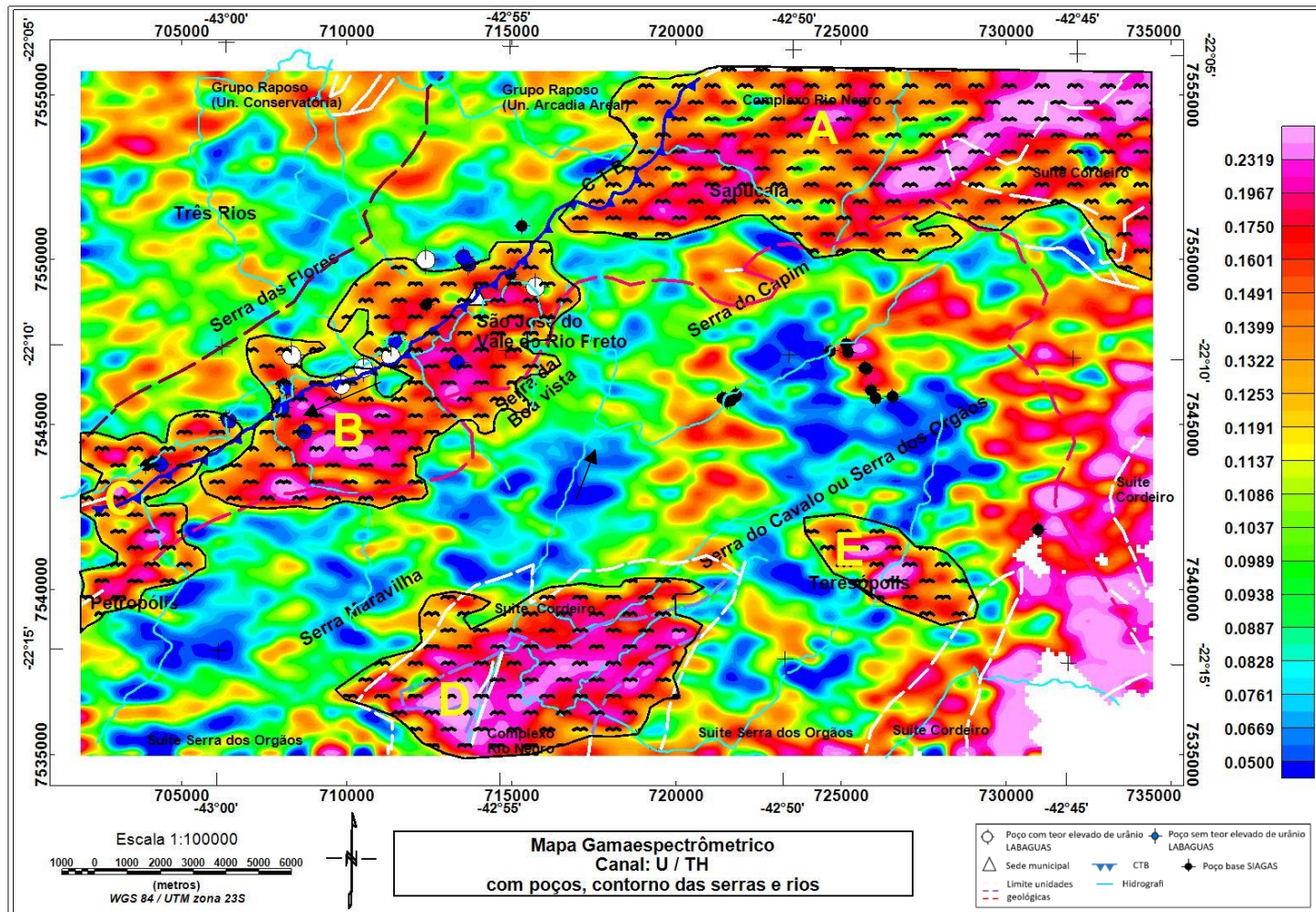


Figura 46 – Mapa Gamaespectrométrico, canal Razão U/Th – nele estão sobrepostos os principais rios, a falha de empurrão do CTB e as serras. As setas pretas indicam o fluxo do rio Preto. Fonte: o autor.

A anomalia do domínio “B” tem forma alongada de direção SO-NE, englobando toda região da área da localização dos poços contaminados na cidade de São José do Vale do rio Preto, tendo como limites laterais as serras das Flores e da Boa Vista e Maravilha, sobre a falha do CTB.

A anomalia do domínio “C” está localizada a SO do domínio “B” e apresenta as mesmas características deste domínio. Provavelmente esse domínio seria na realidade uma parte do domínio “B”, separado por alguma falha.

A anomalia do domínio “D” tem forma elíptica de direção O-E, na região de um vale, formando uma planície aluvionar do rio Preto, englobando toda região da área da Suíte Cordeiro, tendo como limites laterais a serra Maravilha e a serra do Órgãos.

A anomalia do domínio “E” tem forma elíptica de direção NO-SE, na região de um vale, formando uma planície aluvionar de um afluente do rio Preto, está completamente inserida na serra do Órgãos.

Dessa forma, é possível avaliar que as anomalias observadas nestes domínios estão nas planícies aluvionares, tendo sido carreados por meio do processo de lixiviação. A área do domínio B evidencia que está localizada numa planície, que é recortada por falhas de direção NO-SE, traçadas no mapa magnético da Derivada em X. Estas falhas podem ser os elementos estruturais carreadores das fontes geradoras, nas regiões mais elevadas, para as planícies, regiões mais deprimidas, propiciando a contaminação dos poços com profundidades acima de 100m.

Vale ressaltar que a área de estudo está inserida na região serrana do estado, e que apresenta índice pluviométrico altíssimo. Segundo INMET (2014) a precipitação anual no município de São José do Vale do rio Preto varia entre 618 a 1712 mm, apresentando seus maiores índices durante os anos de 2008 e 2009, com média de 1.650 mm/ano. Sendo assim, a precipitação/infiltração da água da chuva constitui um fator importante no processo de lixiviação e carreamento dos sedimentos para as planícies aluvionares. Ademais, a região vem apresentando problemas de eventos pluviométricos extremos, que são responsáveis pela ocorrência de escorregamentos nas encostas e escarpas das regiões mais elevadas.

Uma técnica importante nos estudos da gamaespectrometria é a geração do mapa ternário dos radioelementos, usando a composição da proporção dos valores

de concentração relativas de cada um desses radioelementos (Potássio, Tório e Urânio), e da associação deles a determinadas cores, vermelho verde, azul (imagem colorida composta RGB). O espectro de cores varia desde o branco, quando coincidente as máximas concentrações relativas nos três radioelementos, até o preto, para os mínimos teores relativos (CPRM, 2020).

No Mapa Ternário, apresentado na Figura 47, de forma geral é possível notar que boa parte do mapa tem a tonalidade verde que corresponde ao radioelemento do tório. Um desses pontos de destaque é a serra das Flores e parte da serra Maravilha, no entanto, na região SE e NE do mapa existe uma forte predominância da tonalidade vermelha, mostrando uma predominância do radioelemento potássio.

Cabe destacar, entretanto, que dentro do foco deste trabalho deve-se destacar a cor branca, que representa a presença dos três elementos e que pode ser observada na serra do Capim, e seguindo a calha do rio Preto na direção sul e outras regiões pontuais na serra dos Órgãos, acima da serra das Flores.

Em relação à presença do radioelemento urânio, é possível observar uma alta concentração no sul da área, região entre a serra Maravilha e a serra dos Órgãos, que corresponde a calha do rio Preto e de dois afluentes, que podem estar servindo de carreadores dos sedimentos para região de menor altitude, na área urbana do município.

Na Figura 47 também é possível observar outras regiões pontuais ao redor da serra da Capim e na extremidade da falha do CTB, no norte da área. Entretanto, a concentração observada de maior importância se destaca na região urbana do município, onde existem poços com confirmação de contaminação de urânio. Ademais, é possível observar uma concentração de urânio intercalada com concentração de potássio em toda essa região.

Dessa forma, é possível avaliar que as regiões observadas com alta concentração de urânio estão em ponto de maior altitude e próximo à calha de rios e afluentes, com sentido de descolamento para a cidade de São José do Vale do Rio Preto, onde poderia ser observada uma depressão tectônica, e uma área de deposição de sedimentos de material pesado.

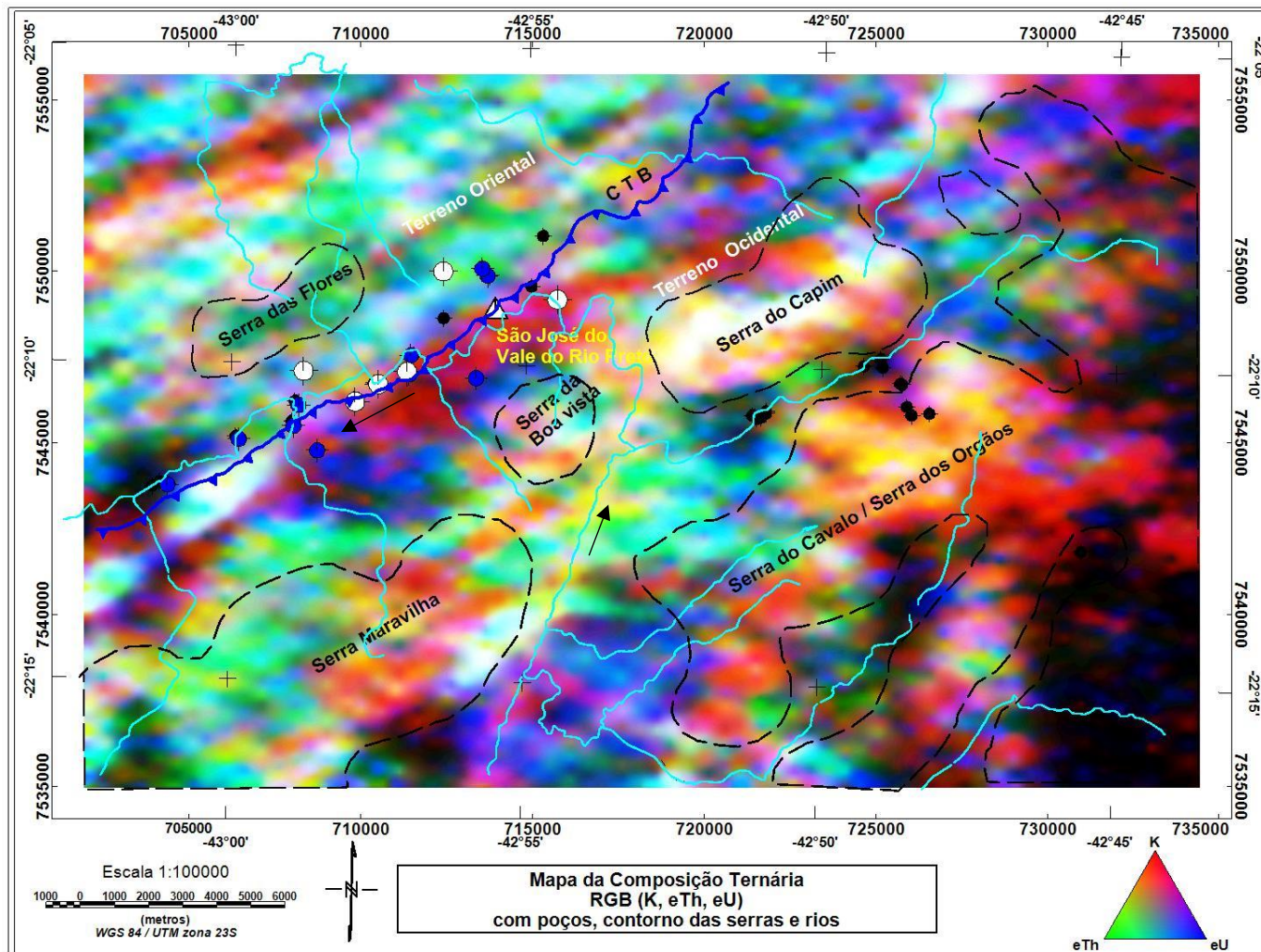


Figura 47 – Mapa Gamaespectrométrico, canal ternário – nele estão sobrepostos os principais rios, a falha de empurrão do CTB e as serras. As setas pretas indicam o fluxo do rio Preto. Fonte: o autor.

7.2.3 Geotermia

Para investigar a relação entre as ocorrências de urânio em altos teores nos poços na área de estudo frente a geração de calor radiogênico e a ocorrência de anomalias geotérmicas, foram utilizados os dados físico-químicos dos poços analisados pelo LABAGUAS (PUC-Rio) para estimar o fluxo de calor pelo método geoquímico.

Em seu trabalho, Alexandrino & Hamza (2018) aplicaram a termometria química para águas não termais extraídas de poços subterrâneos no Brasil, utilizando os dados do SIAGAS (CPRM), que apesar de possuir 349560 poços cadastrados no Brasil, apenas 5% desses registros contêm dados sobre análises químicas e que foram utilizados os dados sobre o teor de sílica nas águas subterrâneas. Apesar de os dados de diversas porções do Brasil terem sido trabalhados por Alexandrino & Hamza (2018), cabe destacar que a região da área de estudo, na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro possui poucos dados para o mapeamento do fluxo geotérmico, conforme ilustrado na Figura 48.

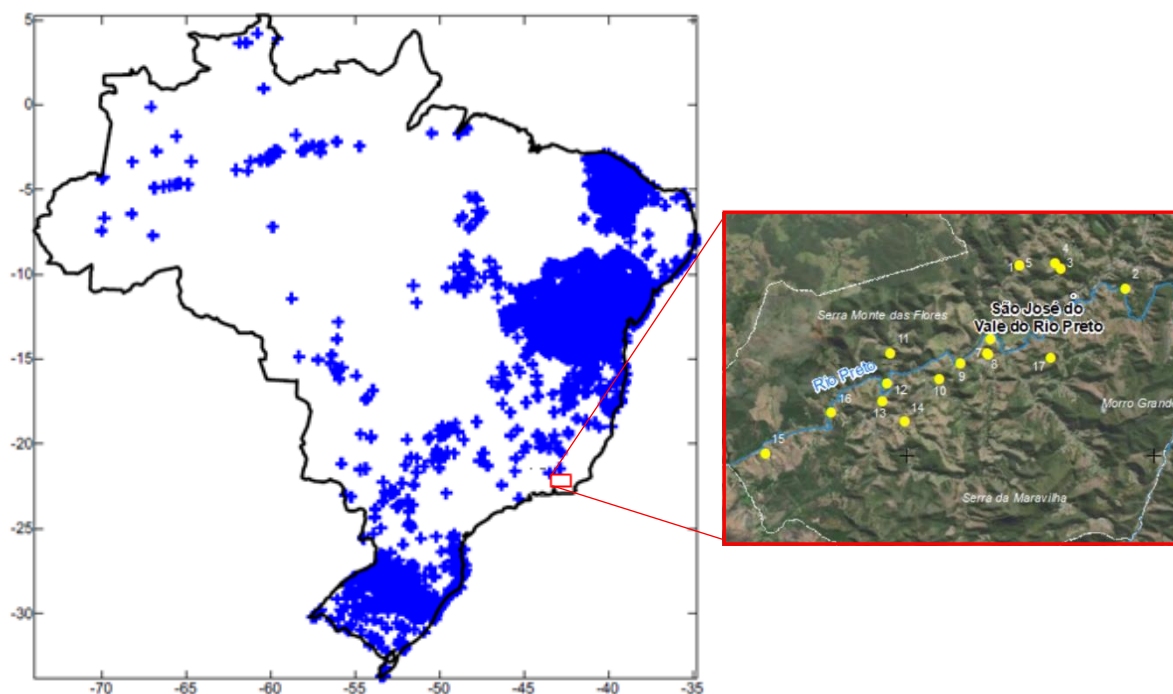


Figura 48 – Localização dos poços de água subterrânea utilizados no trabalho desenvolvido por Alexandrino & Hamza (2018). O polígono vermelho destaca o local aproximado da área de estudo da presente pesquisa e o frame vermelho aponta a malha de pontos amostrados pelo LABAGUAS na região (pontos amarelos), onde há a ausência de dados hidrogeoquímicos na base SIAGAS.

Fonte: Adaptado de Alexandrino & Hamza (2018).

A partir da relação geral descrita pela Eq.18 foi realizado o cálculo da temperatura, utilizando os parâmetros descritos por Alexandrino & Hamza (2018) indicados na Tabela 11 para os dados dos 25 poços analisados pelo laboratório LABAGUAS da PUC-Rio na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro e apresentados em Fraifeld (2018). Cabe destacar que dos 25 poços analisados, 17 estão na área de estudo da presente pesquisa.

Tabela 11 – Parâmetros descritos por Alexandrino & Hamza (2018) utilizados para o cálculo da temperatura.

Constante	Intervalo 61-47
A	-41,85
B	0,33
C	-0,00067
D	33,09

Fonte: Alexandrino & Hamza (2018).

Conforme é possível observar no histograma da concentração de sílica e no histograma da temperatura correspondente, apresentados na

Figura 49 e na Figura 50, a concentração de sílica varia entre 8,03 e 33,63 ppm, com média de 17,90 +- 5, 26 ppm, enquanto a temperatura varia entre 29,69 e 89,69 °C, com valor médio de 57,2 +- 12,59°C.

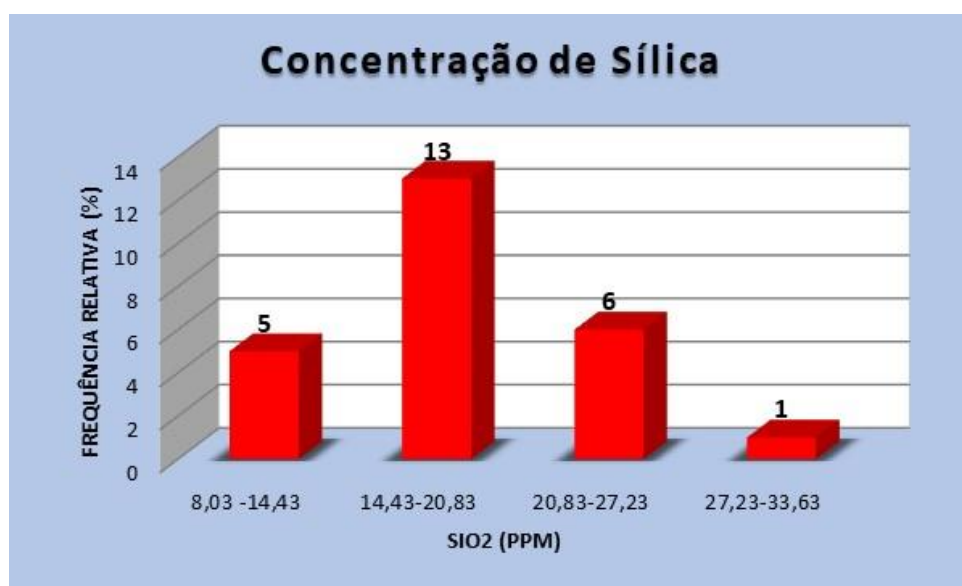


Figura 49 – Histograma da concentração de sílica. Fonte: o autor.

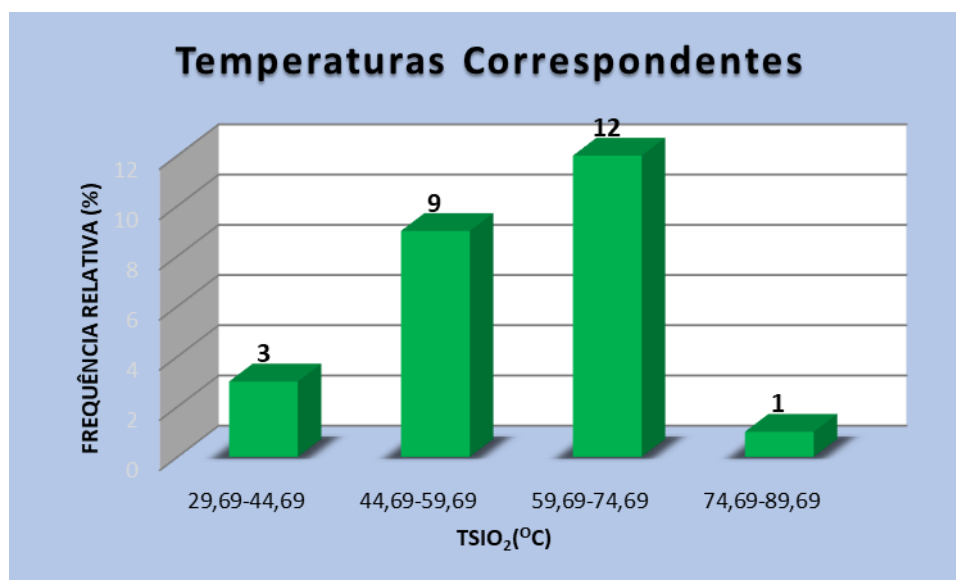


Figura 50 – Histograma de temperaturas correspondentes. Fonte: o autor.

Os resultados de temperatura obtidos a partir dos dados hidrogeoquímicos da água subterrânea também podem ser utilizados para se obter estimativas de primeira ordem do fluxo de calor em províncias tectônicas estáveis, por meio de uma abordagem fundamentada no uso da relação empírica entre o teor de sílica dissolvida em águas termais e valores regionais de fluxo de calor.

Tal qual apresentado por Alexandrino & Hamza (2018), no presente trabalho foi assumido que as relações empíricas semelhantes também podem ser desenvolvidas para concentrações de sílica em águas não termais extraídas de poços subterrâneos. Utilizando a relação empírica proposta por Swanberg e Morgan (1978) e apresentada na Eq.18, foi estimado o fluxo de calor do teor de sílica, sendo $TSiO_2$ a temperatura do reservatório derivada do teor de sílica, q o fluxo de calor superficial e m e b são constantes. A constante m está relacionada com a profundidade de circulação, enquanto b indica a temperatura média anual da superfície.

Para a presente pesquisa, o valor obtido para b foi de 24°C e o valor de m , de 1071 Cm^2/W , foi utilizado o valor de Alexandrino & Hamza (2018), que está relacionado a maiores profundidades de circulação de águas subterrâneas em regiões tectônicas estáveis do Brasil. Os resultados obtidos seguem apresentados na Figura 51.

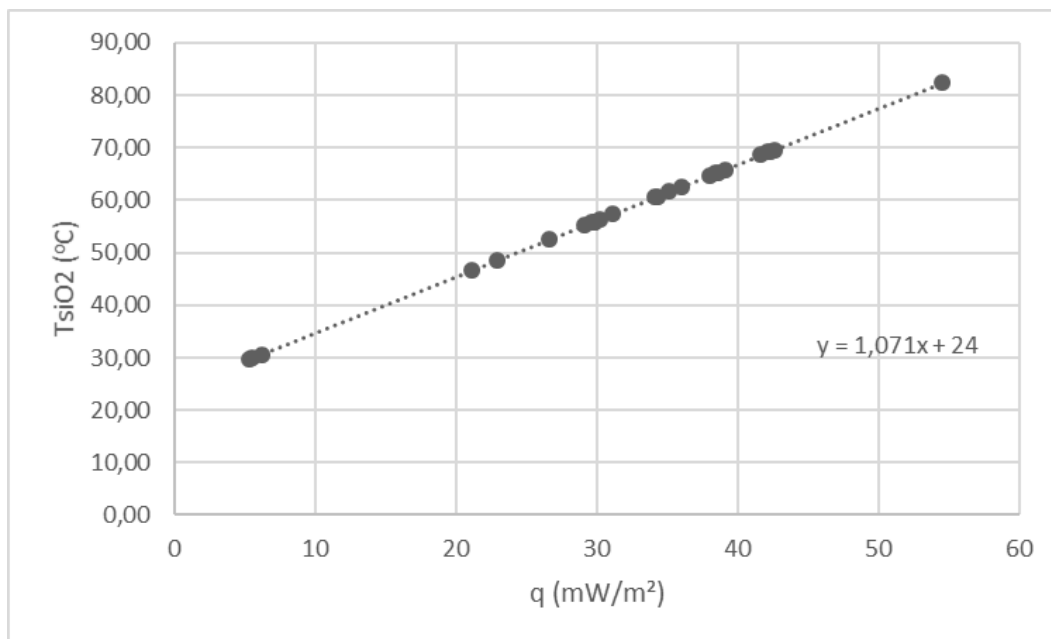


Figura 51 – Relação de temperatura e fluxo de calor. Fonte: o autor.

Após os cálculos da temperatura e fluxo, foi realizada a interpolação pelo método IDW da temperatura na sub-bacia próxima ao núcleo urbano de São José do Vale do Rio Preto, inserida na área de estudo. Conforme é possível observar na Figura 52, há a presença de pontos com maiores valores de temperatura associados à zona de descarga identificada no rio Preto, justamente onde foram observados poços com teores elevados de urânio.

Enquanto os dados de temperatura gerados a partir dos dados hidrogeoquímicos indicam valores relacionados ao fundo dos reservatórios, os dados de fluxo de calor são relativos à superfície. Dessa forma, segue apresentado na Figura 53 o fluxo de calor na sub-bacia próxima ao núcleo urbano de São José do Vale do Rio Preto. Tal qual para o mapa de temperatura da água subterrânea, o mapa de fluxo indica a presença de pontos com fluxo mais elevado que se correlacionam aos pontos onde há o registro de teores elevados de urânio, evidenciando a geração de radiogênico na região.

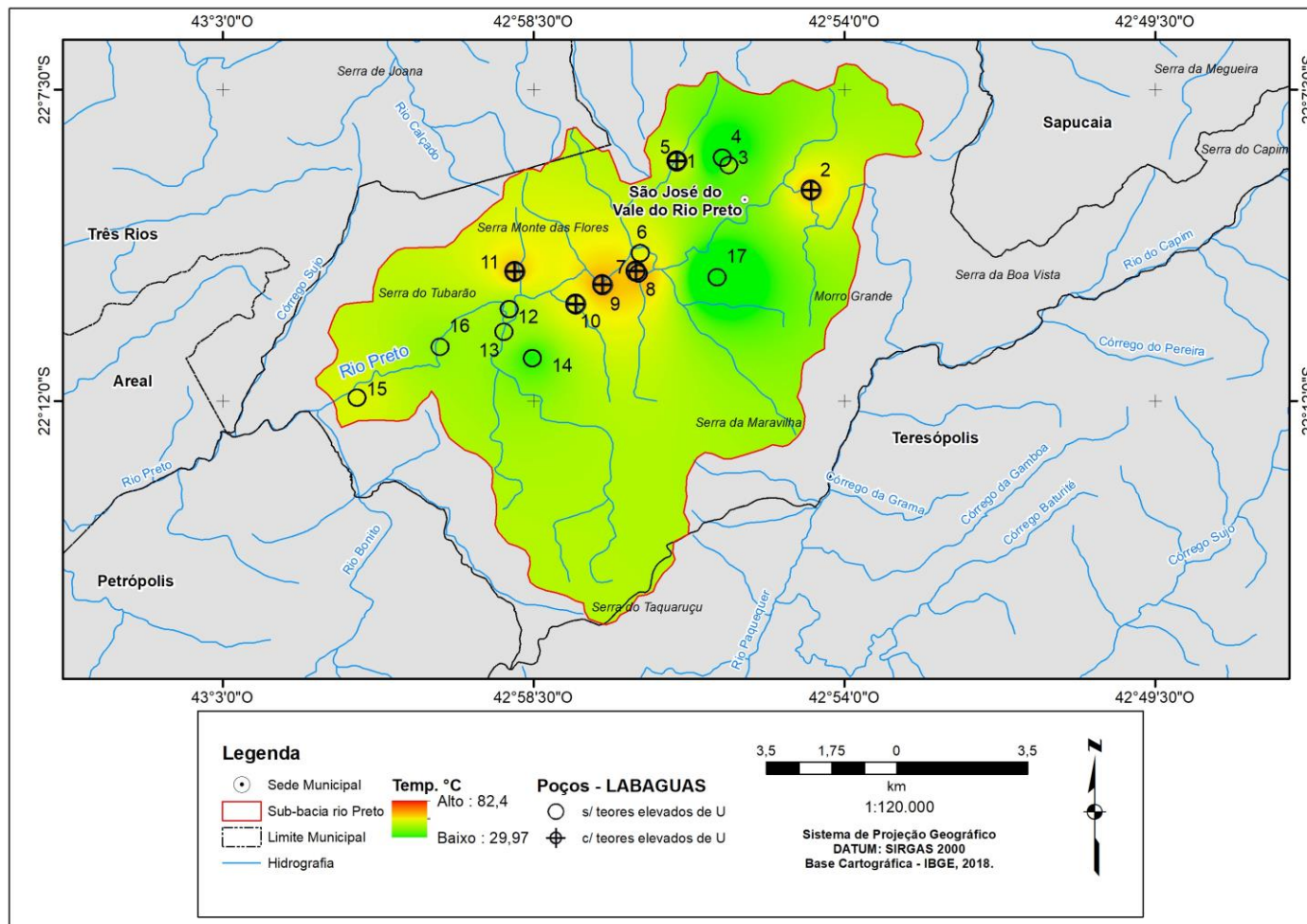


Figura 52 – Modelo IDW de temperatura da água subterrânea na área de estudo. Fonte: o autor.

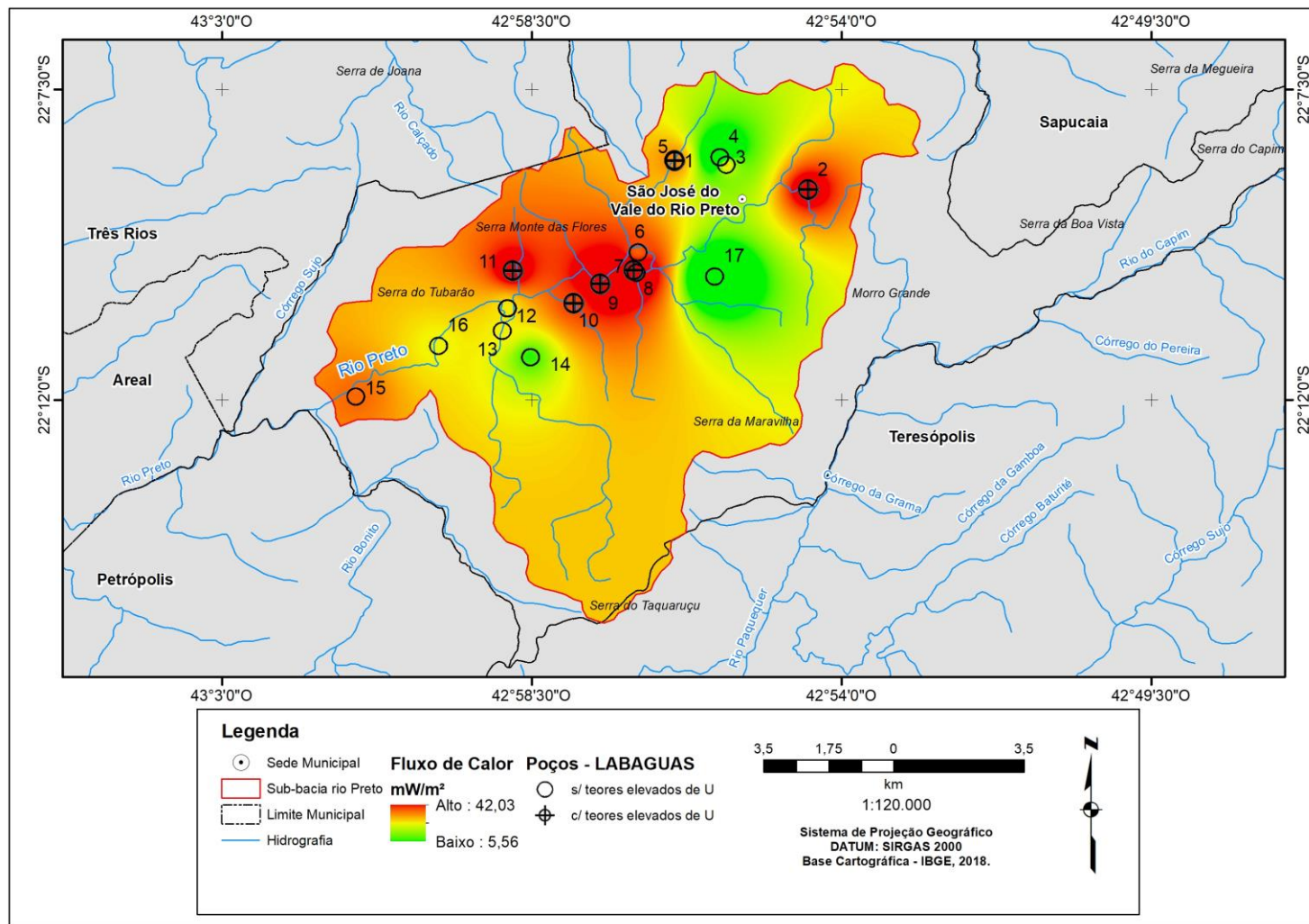


Figura 53 – Modelo IDW de fluxo de calor na área de estudo. Fonte: o autor.

7.3 Compilação dos Resultados: Geofísica, Hidrogeoquímica e Hidrogeologia

Conforme foi possível observar no Modelo IDW da carga hidráulica obtida para a área de estudo (Figura 26), o fluxo de água subterrânea ocorre a partir das regiões que apresentam carga hidráulica mais elevada para zonas de menor carga hidráulica, o que faz com que a água flua das áreas de recarga localizadas nas serras, onde é observada uma maior carga hidráulica, para as zonas de descarga, onde a carga hidráulica é menor, como observado ao longo da calha do rio Preto.

Sendo assim, na área de estudo é possível observar a presença de níveis de carga hidráulica mais elevada nas regiões com cotas mais altas. As cotas de nível d'água mais elevadas registradas nos poços cadastrados na área de estudo são relativas aos poços mais afastados dos fundos de vale, nas porções mais movimentadas do relevo, enquanto nas áreas mais deprimidas observam-se as menores cotas de nível d'água. Portanto, a partir desta avaliação foi possível identificar que, de maneira geral, na área de estudo os níveis de carga hidráulica tendem a acompanhar a superfície do terreno.

Dessa forma, a partir da análise dos dados foi possível elaborar um modelo de dinâmica hídrica subterrânea, que segue ilustrado na Figura 54. Na imagem, que representa uma seção esquemática no rio Preto dentro da área de estudo, é possível observar duas zonas de recarga, uma localizada na Serra das Flores e outra na Serra do Capim, sendo a zona de descarga associada ao vale do rio Preto.

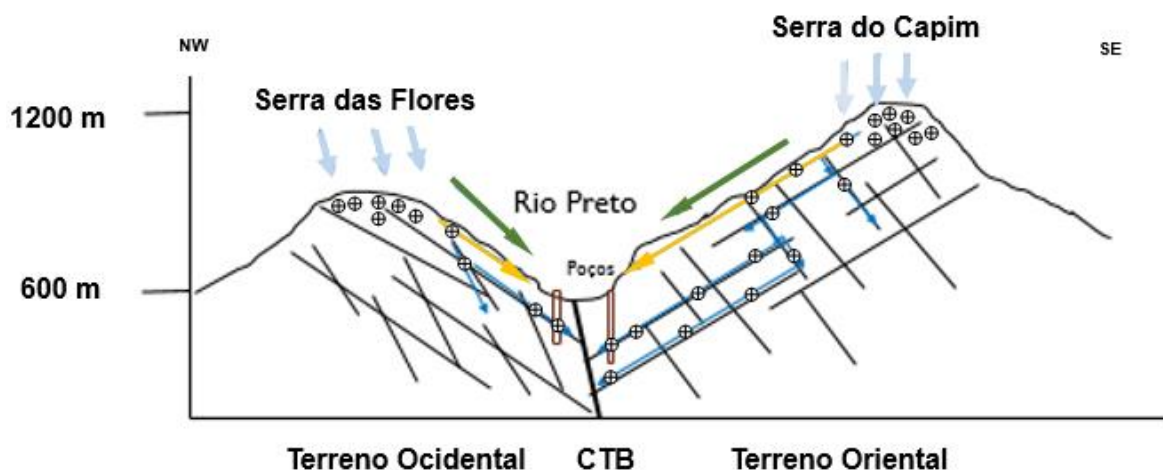


Figura 54 – Modelo esquemático em corte da dinâmica do fluxo subterrâneo na área de estudo. Legenda: as linhas pretas representam as estruturas geológicas, as setas azuis claras indicam a chuva sobre a zona de recarga, as setas verdes indicam o gradiente regional do fluxo subterrâneo, as setas amarelas representam o fluxo subterrâneo no aquífero livre, as setas azuis indicam o fluxo subterrâneo no sistema aquífero fissural, os círculos brancos com uma cruz representam os radioelementos e os polígonos vermelhos indicam a localização dos poços. Fonte: o autor.

Em relação ao fluxo subterrâneo, a imagem acima ilustra duas dinâmicas principais, sendo uma associada ao sistema aquífero inconsolidado (granular), cujos fluxos se dão próximo à superfície e possuem um potencial de resposta relacionada ao urânio na interpretação dos mapas gamaespectrométricos, e outra em profundidade, associada ao fluxo nas fraturas e descontinuidades existentes no sistema aquífero fissural. A imagem também revela a CTB, a zona de cisalhamento transpressiva que sutura os terrenos tectônicos oriental e ocidental e que concentra os fluxos subterrâneos da região.

A partir da avaliação do modelo hidrogeológico para a área de estudo, em associação aos dados magnetométricos e gamaespectrométricos foi possível delimitar lineamentos magnéticos que podem estar associados a falhas e fraturas que apresentam relações com as zonas de recarga/descarga.

Portanto, tendo em vista o conhecimento das zonas de recarga e descarga, em associação aos fluxos subterrâneos nos sistemas aquíferos granulares e fissural, em conjunto com a avaliação das estruturas geológicas identificadas no mapa magnético da derivada em X (Figura 41) e concentrações relativas de U/Th observadas na Figura 46, foi possível observar a presença de três grandes zonas marcantes onde as mesmas condições geológicas/hidrogeológicas são observadas.

Sendo assim, a Figura 46 ilustra as áreas com alto potencial para a ocorrência de poços com elevadas concentrações de urânio (polígonos A, B, C, D e E), com base na análise e interpretação dos dados levantados no presente projeto de pesquisa. Na imagem é possível observar que a área ao longo do vale do rio Preto, onde foram registrados os poços com teores elevados de urânio se destaca no mapa, próximo à cidade de São José do Vale do Rio Preto.

Da mesma forma, na porção noroeste da Figura 46 (polígono A) e na porção sul foram identificadas duas anomalias (polígonos A e D) que indicam o potencial para a ocorrência de teores elevados de urânio na água subterrânea, com base nas análises e interpretações realizadas na presente pesquisa. Nessas áreas indica-se a realização de estudos hidroquímicos nas águas subterrâneas com vistas à identificação de novas áreas potencialmente perigosas à saúde humana.

8. CONCLUSÕES

Na presente dissertação foi possível constatar como a integração das técnicas dos métodos geofísicos contribuíram para a delimitação de zonas propícias à contaminação da água pelo radioelemento urânio.

Os mapas magnéticos temáticos identificaram importantes lineamentos correspondentes a falhamentos da região. O mapa da primeira derivada identificou grandes falhamentos de direção SO-NE que delimitam as unidades tectônicas. A junção das informações dos falhamentos SO-NE, com os NO-SE do mapa da derivada em X, nos mostram um conjunto de estruturas que podem servir de elementos carreadores e/ou formarem estruturas em subsuperfície propícias, para que águas pluviais contaminadas com urânio infiltrem até o aquífero fissural associado aos poços tubulares, causando a sua contaminação.

Os resultados indicam, ainda, que além da concentração de maiores temperaturas associadas aos poços com elevados teores de U existe uma associação com a dinâmica provocada pelo calor radiogênico. Ademais, a identificação de estruturas geológicas observadas a partir dos dados aeromagnéticos indicam que as mesmas, bem como a zona de cisalhamento transpressiva, que apresenta suas raízes profundas e limita a falha do CTB, estariam associadas com a localização destes poços.

Os mapas gamaespectrométricos permitiram identificar concentrações dos radioelementos, delimitando as principais unidades litológicas e duas grandes concentrações de urânio na serra da Boa Vista e serra do Capim. Além do mais, há concentrações deste elemento no mapa ternário na região entre a serra Maravilha e a Serra dos Órgãos, e outra na região urbana do município, onde estão localizados os poços tubulares com registros hidrogeoquímicos de alta concentração de urânio.

No que se refere aos diversos litotipos das unidades geológicas que ocorrem na área de estudo, foram identificados dois sistemas aquíferos principais, sendo eles o sistema aquífero inconsolidado (granular), formado por depósitos aluviais e manto de alteração das rochas, bem como o sistema aquífero de porosidade fissural, composto por gnaisses e granitos do Grupo Raposo, do Complexo Rio Negro, da Suíte Serra dos Órgãos e da Suíte Cordeiro).

Em relação à dinâmica do fluxo subterrâneo, a análise dos dados permitiu identificar que na área de estudo há uma tendência que os níveis de carga hidráulica acompanhem a superfície do terreno, de forma que nas porções mais elevadas do relevo são observados os maiores níveis de carga hidráulica, enquanto nas porções mais rebaixadas, como nos fundos de vale, são registradas as menores cargas hidráulicas.

Sendo assim, além da análise dos dados geotermiais terem apontado para a correlação entre maiores temperaturas da água subterrânea com os poços que apresentam teores elevados de urânio, a avaliação dos dados aerogeofísicos permitiu identificar a presença de falhamentos de direção SO-NE que recortam áreas com resposta elevadas na análise gamaespectrométrica e, em associação a avaliação das direções de fluxo subterrâneo preferencial, possibilitou identificar que a água flui por essas estruturas até o vale do rio Preto, que drena encaixado sob forte influência da zona de cisalhamento transpressiva que sutura terrenos tectônicos, justamente nos locais onde há o registro de elevados teores de urânio na água subterrânea.

Desse modo, a partir da análise dos dados geológicos, hidrogeológicos e topográficos foi possível elaborar um modelo de dinâmica hídrica subterrânea ao longo do vale do rio Preto, onde há a ocorrência dos poços com elevados teores de urânio. No que se refere às zonas de recarga, foram identificadas duas, sendo uma localizada na Serra das Flores e outra na Serra do Capim. A zona de descarga, por sua vez, ocorre ao longo do vale do rio Preto.

Portanto, o fluxo subterrâneo ao longo do vale do rio Preto, foi caracterizado por duas dinâmicas principais, sendo uma associada ao sistema aquífero inconsolidado (granular), que é marcado por fluxos que ocorrem em maior proximidade à superfície e possuem um potencial de resposta relacionada ao urânio na interpretação dos mapas gamaespectrométricos, conforme evidenciado no mapa do canal U/Th, além de outra em profundidade, associada ao fluxo nas fraturas e descontinuidades existentes no sistema aquífero fissural, que foram mapeadas por meio do mapa magnético da primeira derivada. Este mesmo mapa também revelou a presença da CTB, a zona de cisalhamento transpressiva que sutura os terrenos tectônicos oriental e ocidental e que concentra os fluxos subterrâneos da região.

Os resultados apresentados na presente pesquisa, portanto, evidenciaram que a utilização de técnicas integradas dos métodos geofísicos, em associação à utilização de dados hidráulicos, topográficos, gamaespectrométricos e magnéticos permitiram compreender a dinâmica hidrogeológica responsável pela ocorrência de altas concentrações de urânio nos poços tubulares em São José do Vale do Rio Preto.

Sendo assim, a utilização integrada de métodos geofísicos para identificar os condicionantes hidrogeológicos para a ocorrência de altas concentrações de urânio nas águas subterrâneas utilizados na presente pesquisa revelaram o potencial de utilização de novas ferramentas, que trabalham com dados remotos e possibilitam o mapeamento de grandes áreas. Dessa forma, estes mapeamentos podem auxiliar na definição de áreas prioritárias para a investigação de laudos de qualidade da água com vistas à preservação da saúde da população, tendo em vista os efeitos deletérios, como o potencial carcinogênico associado ao urânio presente naturalmente na água subterrânea da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDRINO, C. HAMZA. Terrestrial Heat Flow in Non-Thermal Ground Water Circulation Settings of Brazil. *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics*. v.1, n.1, p. 46-51. 2018.
- ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*. v.7 p.349-364. 1977.
- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. Origem e evolução da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Geociências*. v.28, n.2, p.135-150. 1998.
- BELLO, A. M. Avaliações comparativas de filtros espaciais para mapeamento de contatos geológicos com contrastes de densidades e suscetibilidades magnéticas. 2014. 56f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ. 2014.
- BLAKELY, R. J. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- BOYLE, R.W., *Geochemical Prospecting for Thorium and Uranium Deposits*. Amsterdam & New York: Elsevier, 1982.
- BONOTTO, D. M. *Radioatividade nas águas: da Inglaterra ao Guarani*. São Paulo: UNESP, 2004.
- BONOTTO, D. M.; SILVEIRA, E. G. da S. *Geoquímica do urânio aplicada a águas minerais*. São Paulo: UNESP, 2006.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação MS/GM nº 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Anexo XX - Do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União, Brasília*, 3 out. 2017, Suplemento:360-568.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento

das águas subterrâneas e dá outras providências. Publicada no DOU nº 66, de 7 de abril de 2008, Seção 1, páginas 64-68.

- BRIGGS I.C. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39 (1): 39-48. 1974.
- BÜCKER, C.; RYBACH, L. A simple method to determine heat production from gamma-ray logs. Elsevier Science Publishers, v.13, n.4, p.373-375. 1996.
- CASAGRANDE, M. F. S.; MOREIRA, C.A.; TARGA, D; A; ALBERTI, H. K. C., Integration of geophysical methods in the study of acid drainage in uranium mining waste. *Revista Brasileira de Geofísica*. v.36, n.4, p.439-450. 2018.
- CAPUCCI, E. B.; MARTINS, A. M.; MANSUR, K. L.; MONSORES, A. L. M. Poços tubulares e outras captações de águas subterrâneas: orientações aos usuários. Rio de Janeiro: SEMADS, 2001.
- CLARK, I.; FRITZ, P. Environmental Isotopes in the hydrogeology. New York: Lewis Pub, 1997.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Projeto Rio de Janeiro. Brasília. 2001. Disponível em: <https://www.cprm.gov.br/publique///Projetos/Projeto-Rio-de-Janeiro-315.html>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Nomenclatura de encartes geofísicos em mapa. Brasília. 2020. Disponível em: https://intranet.sgb.gov.br/publique/media/guias_orientativos/dgm/cartografia/gpt_2020_it_disege_02_nomenclatura_de_encartes_geofisicos_em_mapas_01_07_2020.pdf. Acesso em: 20 de dez. 2021.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos. In: Report Volume I, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. Secretaria de Geologia, Mineração E transformação Mineral, Minas Gerais. 2010.
- CPRM, Serviço Geológico do Brasil, 2012, Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/11555>. Acesso em 12 de jan. 2022.

- CPRM, Serviço Geológico do Brasil. 2022. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas-SIAGAS. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/>. Acesso em: 20 de dez. 2021.
- DAS, B. M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. São Paulo: Thomson, 2007.
- DELHAL, J.; LEDENT, D. & CORDANI, U.G., Ages U/Pb, Sr/Rb et Sud-Est du Brésil (États de Rio de Janeiro et Minas Gerais). Annales de la Société Géologique de Belgique. V.92, p. 271-283, 1969.
- DICKSON, B.L. and SCOTT, K.M. Interpretation of Aerial Gamma-Ray Surveys-Adding the Geochemical Factors. Journal of Australian Geology and Geophysics, v.17, p.187-200, 1997.
- DOI-RJ. RESOLUÇÃO CERHI-RJ Nº 107 DE 22 DE MAIO DE 2013. Disponível em: <https://www.comiteguandu.org.br/legislacoes/ResolucoesCERHI/Resolucao-CERHI-107.pdf>. Acesso em 16 de jan. 2022.
- DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. Mapa Hidrogeológico do Brasil. 1983.
- FERRARI, A. L. 2001. 412f. Evolução Tectônica do Graben da Guanabara. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 2001.
- FITTS, C.R. Águas Subterrâneas. Rio de Janeiro: Elsevier. 2015.
- FOURNIER, R. O.; ROWE, J. J. Estimating of underground temperature from Silica content of water from hot springs and wet steam wells, Am. J. Sci. v.264, p.685 – 697, 1966.
- FOURNIER, R.O. Chemical Geo-thermometers and Mixing Models for Geothermal Systems. Geothermics. v.5, p.41-50, 1977.
- FRAIFELD, F. Ocorrência de Elementos Radioativos nos Poços Tubulares das Regiões Serrana e Centro-Sul Fluminense do Estado do Rio de Janeiro. 78f. Trabalho de conclusão de curso. PUC-Rio. Rio de Janeiro. 2018.

- GABELMAN, J. W., 1977, Migration of uranium and thorium – exploration significance. Tulsa: Amer. Assoc. Petro. Geol. Studies in Geology, n. 3, p. 168.
- GEOINEA. Base de dados Geoespaciais. Instituto Estadual do Ambiente. Governo do Estado do Rio de Janeiro. 2021. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/biodiversidade-territorio/informacoes-geoespaciais/>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- GIULIANI, Glauber Minssen. Registro de radônio em solos e rochas do município de Porto Alegre, RS, como guia para a prospecção de água. 2015. 65f. Trabalho de conclusão de curso. UFRGS. Porto Alegre. 2015.
- GODOY, J. M.; GODOY, M. L. Natural radioactivity in Brazilian groundwater. *Journal of Environmental Radioactivity*. v.85. p.13. 2005.
- GODOY, J. M.; AMARAL, E. C. da S.; GODOY, M. L. Natural radionuclides in Brazilian mineral water and consequent doses to the population. *Journal of Environmental Radioactivity*. v.53, p.7, 2000.
- GODOY, J. M.; FERREIRA, P. R.; SOUZA, E. M. de.; SILVA, L. I. da.; BITTENCOURT, I. C. S.; FRAIFELD, F. High Uranium Concentrations in the Groundwater of the Rio de Janeiro State, Brazil, Mountainous Region. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. v.30. n.2, p.224-233, 2019.
- HASUI, Y. Evolução dos Continentes in: HASUI, Y; CARNEIRO, C. D. R; ALMEIDA, F. F. M; BARTORELLI, A. (Orgs.). *Geologia do Brasil- São Paulo: Beca, 2012. p.98-109.*
- HEILBRON, M.; EIRADO, L. G.; ALMEIDA, J. Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Rio de Janeiro. Belo Horizonte: CPRM, Escala 1:400.000. 2016, Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18458>. Acesso em: 13 de nov. 2021.
- HEILBRON, M.L., PEDROSA-SOARES, A.C., CAMPOS NETO, M.C., SILVA, L.C., TROUW, R. & JANASI, V.A. Província Mantiqueira. In: V.M. MANTESSO-NETO, A. BARTORELLI, C.D.R. CARNEIRO & BRITO

- NEVES, B.B. (Orgs.). Geologia do Continente Sul-Americano. São Paulo: Beca, 2004, p.180-203.
- HEILBRON, M.; VALERIANO, C.M.; PEIXOTO, C.; TUPINAMBÁ, M.; NEUBAUER F.; DUSSIN, I.; CORRALES, F.; BRUNO H.; LOBATO, M.; ALMEIDA, J.C.H.de.; EIRADO SILVA, L.G.do. Neoproterozoic magmatic arc systems of the central Ribeira belt, SE-Brazil, in the context of the West-Gondwana pre-collisional history: A review. *Journal of South American Earth Sciences*. 2020.
- HIRATA, R. SUHOGUSOFF, A. V. MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. São Paulo. Instituto Trata Brasil. 2019.
- IAEA, Airborne GammaRaySpectrometer Surveying. 1 ed. Vienna, Austria, 1991.
- IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. 1 ed. Vienna, Austria, 2003,
- IAEA. Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data. Vienna, 2003.
- IAEA. Mapping Using Gamma Ray. *Encycl. Atmos. Sci.*, v.4, p.1549-1555, 2003.
- IBGE. Diretoria de Geociências - DGC/ Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais- CREN. Mapa de Clima do Brasil. Rio de Janeiro, IBGE, 2002.
- INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Ministério da Agricultura, pecuária e Abastecimento. Normais Climatológicas do Brasil. Disponível em: <
<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em 6 de fevereiro de 2023.
- KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. Geofísica de Exploração. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

- KEITH, S.; FAROON, O.; RONEY, N.; SCINICARIELLO, F.; WILBUR, S.; INGERMAN, L.; LLADOS, F.; PLEWAK, D.; WOHLERS, D.; DIAMOND, G. Toxicological Profile for Uranium. Atlanta (GA): Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US), 2013.
- LAZZERINI, F. T. Fontes hidrominerais do Brasil: componentes biologicamente ativos (BAC) naturais. Rio Claro: UNESP, 2013.
- LI, Q.; CHENG, Q. VisualAnomaly: A GIS-based multifractal method for geochemical and geophysical anomaly separation in Walsh domain. Computers & Geosciences. v.32, pp.663–672. 2006.
- LIMA, T. C. S. de; MIOTO, R. C. T. Procedimento Metodológico na Construção do Conhecimento Científico: a pesquisa bibliográfica. Florianópolis, v.10, p.37 – 45, 2007.
- LOWRIE, W. Fundamentals of Geophysics. Inglaterra: Cambridge University Press, 2007.
- MAIDMENT, D.R. Handbook of Hydrology. Nova York: McGraw-Hill, 1993.
- MILLER, H. G., SINGH, V. J. Potential Field, tilt - A new concept for location field sources. Applied geophysics. v.32, p.213–217, 1994.
- MILSON, J. Field Geophysics: The Geological Field Guide Series. Londres: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- MINTY, B. Short note: on the use of radioelement ratios to enhance gamma-ray spectrometric data. Exploration Geophysics. v.42, n.1, p.116-120, 2011.
- MOHRIAK, W. U. Recursos energéticos associados à ativação tectônica mesozoico-cenozoica da América do Sul. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A., CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Orgs.). Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca. 2004, p.293–318.
- MOLINARI, B. S.; ROTUNNO FILHO, O. C. Diagnóstico da Qualidade da Água na Bacia do Rio Piabanha/RJ. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. p.4. 2017.

- MORAES, D. C. Medidas de Gradiente Geotérmico e Fluxo de Calor em Furos de Sondagem no Cráton do São Francisco. 2016. 61f. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Geologia e Geofísica Aplicada do Instituto de Geociências. UFBA. Salvador. 2016.
- NRIAGU, J.; NAM, D.; AYANWOLA, T. A.; DINH, H.; ERDENECHIMEG, E.; OCHIR, C.; BOLORMAA, T., High levels of uranium in groundwater of Ulaanbaatar, Mongolia. *Science of the Total Environment*. v.414, p.5, 2012.
- OLIVEIRA, N. V. Modelagem e Inversão 2D de Dados Magnetométricos Aplicados na Caracterização da Geometria do Sinclinal Sinclinal Gandarela e Homoclinal Curral – Quadrilátero Ferrífero, MG. 2005. 125f. Dissertação de Mestrado. FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO. Minas Gerais. 2005.
- PEIXOTO, C.A., HEILBRON, M., RAGATKY, D., ARMSTRONG, R., DANTAS, E., Valeriano, C.M., SIMONETTI, A, Tectonic evolution of the Juvenile Tonian Serra da Prata magmatic arc in the Ribeira belt, SE Brazil: Implications for early west Gondwana amalgamation. *Precambrian Research*,v.302, p.221-254. 2017.
- PERES, F.; MOREIRA, J. C. Saúde e ambiente em sua relação com o consumo de agrotóxicos em um polo agrícola do Estado do Rio de Janeiro. *Cad. Saúde Pública*. Rio de Janeiro. v.23, n.4, p.612-621, 2017.
- PERTLIK, F.; ROGER, J. J. M.; ADAMS, J. A. S., Uranium. In: WEDEPOHL, K. H. (Org.) *Handbook of Geochemistry*. Berlim: Springer Verlag, 1974.
- PICCIOTTO, E. F. Distribution de la radioactivité dans les roches éruptives. *Soc. Belge Géol. Bull*. v.59, p.9, 1950.
- PMSJVRP. Prefeitura Municipal de São José do Vale do Rio Preto. Dados do Município. Disponível em: <https://www.sjvriopreto.rj.gov.br/pagina/id/3/?dados-do-municipio.html>. Acesso em 06 de janeiro de 2023.
- REID, A. B., ALLSOP, J. M., GRNSER, H. Magnetic Interpretation in three dimensions using Euler deconvolution, *GEOPHYSICS*. v.55, n.1, p. 80–91, 1990.

- RIBEIRO, V. B., MANTOVANI, M. S. M., LOURO, V. H. A. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *TERRÆ DIDÁTICA*, v.10, n.1, p.29–51, 2013.
- RICCOMINI C, SANT'ANNA LG & FERRARI AL. Evolução geológica do rift continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO NETO V, BARTORELLI A, CARNEIRO CDR & NEVES BBB (Orgs). *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Editora Beca, 2004, p.383-405.
- SWANBERG, C.A. and Morgan, P. The linear relation between temperature based on the silica content of groundwater and regional heat flow: A new heat flow map of the United States, *Pure Appl. Geophys*, v.117, p.227-241, 1978.
- SIGMINE. Sistema de Informação Geográfica da Mineração. Disponível em: <https://geo.anm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=6a8f5ccc4b6a4c2bba79759aa952d908>. Acesso em 06 de janeiro de 2023.
- TARGA, D. A.; MOREIRA, C. A.; CAMARERO, P. L.; CASAGRANDE, M. F. S.; ALBERTI, H. L. C. Structural analysis and geophysical survey for hydrogeological diagnosis in uranium mine, Poços de Caldas (Brazil). *Springer Nature Applied Sciences*. v.1, n.4, p.1-299, 2019.
- TELLES, A.; RABELO, A. Seminário sobre Aerolevanteamento e Defesa: Potencialidade do Levantamento Aerogeofísico. Curitiba: LASA Prospecções S/A, 2013. Disponível em: <<http://www.anea.org.br/evento/PotencialidadeLevantamentoAerogeofisi co.pdf>>. Acesso em 03 de fevereiro de 2018
- THOMPSON, D. T. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *GEOPHYSICS*, v.47, n.1, p.31–37, 1982.
- TRUESDELL, A.H. Geochemical techniques in exploration. 2nd United Nations Symposium 482 on the Development and Use of Geothermal Resources. San Francisco, n1, p.53-79, 1976.

- TUPINAMBÁ, M. Evolução tectônica e magmática da Faixa Ribeira na região da Serra dos Órgãos. 1999. 186f. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- TUPINAMBÁ, M.; TEIXEIRA, W. HEILBRON, M. Evolução Tectônica e Mágica da Faixa Ribeira entre o Neoproterozoico e o Paleozoico Inferior na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. v.35, n.2, p.140-151, 2012.
- USEPA. United States Environmental Protection Agency. What is radon gas? Is it dangerous? Disponível em: <https://www.epa.gov/radiation/what-radon-gas-it-dangerous#:~:text=Breathing%20radon%20over%20time%20increases,causes%20more%20lung%20cancer%20deaths>. Acesso em 08 de janeiro de 2023.
- VASCONCELLOS, R. M.; METELO, M. J.; MOTTA, A. C.; GOMES, R. D. Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil. Rio de Janeiro: CPRM, 1994.
- WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N; CRAIG, M. A. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, v.17, n.2, p.201-216, 1997.
- YANG, Q.; SMITHERMAN, P.; HESS, C. T.; CULBERTSON, C. W.; MARVINNEY, R. G.; SMITH, A. E.; ZHENG, Y. Uranium and Radon in Private Bedrock Well Water in Maine: Geospatial Analysis at Two Scales. Environmental Science & Technology, v.48, p.4298-4306. 2014.