Utilização de Métodos Geofísicos na Análise de Contaminação de Água Subterrânea em Urânia - SP

São Paulo
2021

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Utilização de Métodos Geofísicos na Análise de Contaminação de Água
Subterrânea em Urânia - SP**

MARINA FERNANDES SANCHES BARROS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia para obtenção do título de Mestre

Área de concentração: Hidrogeologia e Meio Ambiente

Orientador(a): Prof. Dr. Vinicius Hector Abud Louro

Coorientador(a): Dr. Fernando Augusto Saraiva

**São Paulo
2021**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP
Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados
fornecidos pelo(a) autor(a) via programa desenvolvido pela
Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de
catalogação da publicação: Sonia Regina Yole Guerra -
CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Fernandes Sanches Barros, Marina

Utilização de Métodos Geofísicos na Análise
de Contaminação de Água Subterrânea em Urânia
- SP / Marina Fernandes Sanches Barros;
orientador Vinicius Hector Abud Louro;
coorientador Fernando Saraiva. -- São Paulo,
2021.

101 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-
Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia) -
- Instituto de Geociências, Universidade de São
Paulo, 2021.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Utilização de Métodos Geofísicos na Análise de
Contaminação de Água Subterrânea em Urânia – SP**

MARINA FERNANDES SANCHES BARROS

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Hector Abud Louro

Dissertação de Mestrado

Nº 865

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Vinicius Hector Abud Louro

Dr. Vagner Roberto Elis

Dr. Emerson Rodrigo Almeida

SÃO PAULO
2021

Dedico esta dissertação aos meus pais e a todos os
professores que me guiaram até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Vinicius Louro por aceitar trabalhar nesse projeto comigo e estar sempre presente. Ao Geólogo Fernando Saraiva por me ajudar desde o processo seletivo até as etapas finais. Aos Profs. Ricardo Hirata e Vagner Elis por todo auxílio.

Aos meus amigos também geólogos da turma da UFMT por me ouvir incansáveis vezes e me ajudar a resolver as minhas dificuldades. Geólogo Cleudson Eduardo obrigada por sempre tirar as minhas dúvidas sobre os *softwares*, Geólogas Verônica Jorge e Jéssica Moreira, obrigada pelas dicas e pelos artigos sugeridos.

Ao Prof. Dr. Paulo C. Correa da Costa por acreditar em mim e me auxiliar desde o primeiro ano da graduação como meu orientador de iniciação científica até a entrada no mestrado mesmo em outra universidade. Ao Prof. Dr. Frederico Soares por toda parte prática de campo em geofísica.

Aos companheiros de campo Samuel, Paulinho, Rafael e Carlos, que tornaram o trabalho de campo muito melhor.

À CAPES por financiar esta pesquisa.

Ao meu noivo pela paciência e por estudar geologia/geofísica para poder entender o que eu falava e me ajudar. Aos meus pais e irmã pelo apoio e incentivo.

“Na vida, não existe nada a temer, mas a entender”

Marie Curie

RESUMO

A cidade de Urânia enfrenta problemas de contaminação do Aquífero Adamantina desde a década de 1970, assim como muitas áreas urbanas paulistas. É de extrema importância detectar e monitorar ambientes contaminados para prevenção e reparo, uma das limitações é o difícil acesso ao aquífero, para o estabelecimento dos níveis aquíferos e das características litológicas da zona não saturada. Este trabalho identifica as áreas de recarga do aquífero na região mais suscetíveis à degradação antrópica e delimita áreas contaminadas utilizando contrastes de eletrorresistividade. Sondagens Elétricas Verticais (SEVs) e Caminhamentos Elétricos foram realizados e distribuídos de forma a obter um conjunto de dados representativo do município. Os resultados obtidos através das SEVs e poços de monitoramento determinaram o índice de vulnerabilidade, definido através do parâmetro de condutância longitudinal de Dar Zarrouk, aliado às características do aquífero como o tipo de aquífero, o nível d'água e litologia da zona não saturada. Os perfis de resistividade obtidos pelos Caminhamentos Elétricos mostraram valores abaixo de 0.5 Ohm.m na zona nordeste da cidade, próximo à região de descarga do aquífero, onde há concentração de contaminantes orgânicos. A partir do mapa de vulnerabilidade foi possível indicar a área sudeste da região de estudo como mais propensa a contaminação devido ao material geológico permeável e pouca espessura da zona não saturada. As anomalias de baixa resistividade (< 0.5 Ohm.m) foram comparadas a análises químicas anteriormente publicadas, corroborando com as avaliações levantadas, e apresentando as áreas contaminadas no aquífero dentro e nas imediações da área urbana de Urânia.

Palavras-chave: Resistividade; Contaminação; Dar Zarrouk; Aquífero Adamantina.

ABSTRACT

The city of Urânia has been experiencing contamination problems in the Adamantina Aquifer since the 1970s, like many urban areas in São Paulo. It is extremely important to detect and monitor contaminated environments for prevention and repair, but one of the limitations is the limited access to the aquifer, especially establishing aquifer levels and the lithological characteristics of the unsaturated zone. This work identifies the aquifer recharge areas in Urânia most susceptible to anthropic degradation, by electroresistance contrasts. Vertical Electrical Surveys (VES) and Electrical Profiling provided a representative electrical dataset of the municipality. VESs and monitoring wells supported calculating the Dar Zarrouk Longitudinal Conductance Parameter and, further, the vulnerability index. The investigation also counted with other aquifer characteristics, such as its type, water level and lithology of the unsaturated zone. The resistivity profiles obtained by the Electric Walks showed values below 0.5 Ohm.m in the northeastern part of the city, close to the aquifer discharge region, where there is a concentration of organic contaminants. The vulnerability map indicated the southeast area as the most prone to contamination due to its permeable geological material and low thickness of its unsaturated zone. Low resistivity anomalies (<0.5 Ohm.m) were compared to previously published chemical analyzes, corroborating with their assessments, and showing the aquifer contaminated areas in and around the urban area of Urânia.

Keywords: Resistivity; Aquifer Contamination; Dar Zarrouk; Adamantina Aquifer

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	3
3.1. Grupo Bauru	4
3.2. Formação Adamantina.....	6
3.3. Formação Serra Geral – Grupo São Bento.....	7
4. HIDROGEOLOGIA	8
4.1. Unidades hidroestratigráficas	8
4.1.1. Aquífero Adamantina.....	9
4.1.2. Aquífero Serra Geral	10
4.2. Características hidrogeoquímicas.....	10
4.2.1. Histórico de contaminação	12
5. METODOLOGIA.....	15
5.1. Método da Eletrorresistividade	15
5.1.1. Parâmetros de Dar Zarrouk.....	17
5.1.2. Caminhamento elétrico (CE)	19
5.1.3. Sondagem Elétrica Vertical (SEV).....	20
5.2. Inversão de dados geoeletricos	21
5.2.1. Caminhamento elétrico – Res2dinv.....	21
5.2.2. Inversão SEV – Ipi2Win	23
5.3. Aquisição dos dados.....	24
5.3.1. Caminhamento Elétrico	26
5.3.2. Sondagem Elétrica Vertical	27
6. RESULTADOS	29
ARTIGO CIENTÍFICO: Sondagens Elétricas Verticais na cartografia da vulnerabilidade à contaminação do Aquífero Adamantina em Urânia (SP)	29
ARTIGO CIENTÍFICO: Geoelectrical Anomalies Associated To Groundwater Contamination In Urânia (SP, Brazil).	54
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICE A - Características dos caminhamentos elétricos realizados	86
APÊNDICE B - Características das Sondagens Elétricas Verticais	87
ANEXO A	88
ANEXO B	89

Lista de Figuras

Figura 1. Mapas de localização da área de estudo.	3
Figura 2. Área de estudo nos domínios da Bacia do Paraná (adaptado de Milani et al., 1998).....	4
Figura 3. Estratigrafia do Grupo Bauru (modificado de Soares et al., 1980).....	5
Figura 4. Carta Cronoestratigráfica (extraído de Fernandes e Coimbra, 2000)	6
Figura 5. Mapa de Domínios Hidrogeológicos destacando a área de trabalho.....	8
Figura 6. Perfil esquemático das Formações Geológicas (extraído de Rivera, 2002).9	
Figura 7. Mapa de isoconcentração de nitrato na zona rasa (extraído de Cagnon, 2003).....	13
Figura 8. Separação de Zonas a partir do número de fossas/km ² (extraído de Marques et al., 2019).....	14
Figura 9. Fluxo de corrente elétrica nas camadas. Onde T é a resistência transversal, ρ é a resistividade da camada, E é a espessura de cada camada e S é a condutância longitudinal (extraído de Orellana, 1972).	17
Figura 10. Índice de vulnerabilidade do aquífero (extraído de Braga, 2008).	19
Figura 11. Arranjo Dipolo-Dipolo AB-MN, em que “a” representa a distância entre A-B, enquanto “n” sinaliza os diferentes espaçamentos entre os pares de eletrodos, indicando diferentes profundidades de investigação (extraído de Kearey et al., 2009).	20
Figura 12. Ilustração esquemática da configuração espacial do método da resistividade (extraído de Braga, 2006).	20
Figura 13. Programa de inversão IPI2Win. A linha vermelha representa a curva de inversão e a linha azul as camadas.	24
Figura 14. Caminhamentos elétricos e SEVs realizadas.	25
Figura 15. Área de estudo, incluindo sombreamento da topografia, localizações de poços, sondagens elétricas verticais.	26
Figura 16. (a) Aquisição com Syscal Pro e (b) detalhe do resistivímetro.....	27
Figura 17. Aquisição por SEV utilizando o resistivímetro Terrameter SAS.....	28
Fig. 18. Study area with topography and groundwater flow.	59

1. INTRODUÇÃO

A concentração populacional e consequente aumento na produção de resíduos domésticos e industriais tem gerado grande preocupação com a contaminação de solo e do sistema hídrico. Diversas atividades antrópicas resultam na disposição inadequada de resíduos sólidos ou líquidos causando sérios problemas ao meio ambiente.

É de extrema importância detectar e monitorar ambientes contaminados para prevenção e reparo. O tratamento inadequado de resíduos pode levar a infiltração de substâncias contaminantes através da percolação em águas pluviais. Ao atingirem reservatórios de águas subterrâneas, comprometem sua qualidade. Em concentrações maiores que 45 mg/L, o nitrato (NO_3^-) pode causar problemas de saúde para a população, como a metahemoglobinemia (Fernícola e Azevedo, 1981) e para os animais que dependem destes reservatórios.

Ao atingir a zona saturada, a pluma de contaminação acompanha o fluxo das águas subterrâneas e pode se espalhar por uma região maior que a ocupada pelos resíduos. Substâncias contaminantes comumente causam variações das propriedades elétricas dos meios em que se encontram, pois, quanto maior a concentração de íons na água, maior a condutividade e, portanto, menor a resistividade (Mirlean et al., 2000).

Aquisições geofísicas são poderosas ferramentas em projetos ambientais, pela rápida produção de informações, por suas naturezas não invasivas, penetratividades adequadas e ampla cobertura das áreas investigadas (Souza e Gandolfo, 2012). A possibilidade de integrar a geofísica com outras áreas das Ciências da Terra, como geologia e geoquímica, acrescenta consideravelmente o valor, confiabilidade e importância à sua interpretação. Métodos geoeletricos avaliam contrastes de propriedades elétricas de solos e rochas, dentre os quais destaca-se o método da Eletorresistividade.

A resistividade está ligada às suas assembléias minerais, conteúdos de fluidos, porosidades, salinidades, temperaturas e graus de saturação em fluídos intraporosos (Kearey et al., 2009). Quanto maior o teor de umidade dos solos e a quantidade de sais dissolvidos na água, menor será a resistividade, permitindo assim estimar a presença de contaminantes. Como produtos, a Eletorresistividade pode oferecer tanto um perfil vertical, quanto uma seção de resistividade aparente. Estes produtos

permitem localizar zonas anômalas que podem ser relacionadas a contaminações, topo rochoso, nível freático, entre outros.

A técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) indica contrastes em um perfil vertical de resistividades elétricas, estes contrastes podem estar relacionados com características petrofísicas e à saturação do meio. A variação da saturação de água numa rocha causa alteração em sua resistividade elétrica, a partir disso é possível inferir a profundidade do nível freático e assim elaborar um mapa de fluxo das águas subterrâneas.

A aplicação de métodos elétricos no estudo de contaminação foi utilizada nos trabalhos de Urish (1983), Meju (2000), Gallas et al. (2005), Fachin (2007), Cavalcanti et al. (2014). Stollar e Roux (1975) e Kelly (1976), destacam a confiabilidade dos dados e o baixo custo do estudo. Elis et al. (2008) demonstrou que o arranjo dipolo-dipolo pode estimar espessuras de zonas saturadas e não saturadas, além de indicar áreas contaminadas.

Lima et al. (1995) utilizam Sondagens Elétricas Verticais (SEVs) e perfis de caminhamento elétrico combinados com poços de monitoramento, permitindo associar e verificar baixas resistividades com áreas contaminadas. Silva (2008) mostra correlação entre a condutividade elétrica com o nitrato e cloreto, podendo ser destacadas como bons indicativos de anomalias na qualidade das águas.

A área de estudo está localizada na área urbana do município de Urânia, noroeste do Estado de São Paulo (Figura 1), onde Bertolo (2001), Cagnon (2003), Bertolo e Hirata (2000) e Almodovar (1995) mostram focos de contaminações por nitrato (NO_3) e poluição por cloreto de amônio (NH_3Cl) no aquífero Adamantina. Segundo Cagnon (2003), a fonte de contaminação é antrópica e as maiores concentrações de nitrato formam “ilhas” no aquífero. A autora nota também variações temporais das concentrações nas estações secas e úmidas. A contaminação de aquíferos por nitrato não é um problema restrito à cidade de Urânia, uma vez que vários municípios da região tiveram processos de ocupação territorial semelhantes.

Mapa de Localização

Figura 1. Mapas de localização da área de estudo.

2. OBJETIVOS

Delimitar a pluma de contaminação através de métodos geoelétricos, comparando os resultados com parâmetros geoquímicos de trabalhos anteriores. Estimar o índice de vulnerabilidade à contaminação das áreas próximas a zona urbana, construir mapa potenciométrico da área estudada e identificar o material geológico das zonas saturada e não saturada a partir de valores de resistividade.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

A região de estudo está inserida na Bacia do Paraná (Figura 2), caracterizada por uma fossa tectônica no escudo pré-cambriano, preenchida por sedimentos continentais, marinhos e basaltos da Formação Serra Geral. Afloram nesta área sedimentos da Formação Adamantina pertencente ao Grupo Bauru, Cretáceo (Fernandes e Coimbra, 2000), depositados de forma direta e discordante sobre os basaltos da Formação Serra Geral pertencente ao Grupo São Bento (IPT, 1981).

Figura 2. Área de estudo nos domínios da Bacia do Paraná (adaptado de Milani et al., 1998).

3.1. Grupo Bauru

O Grupo Bauru foi proposto por Soares et al. (1980), constituído de quatro formações definidas como Formação Caiuá, Formação Santo Anastácio, Formação Adamantina e Formação Marília (Figura 3). Fernandes e Coimbra (2000) propõem uma revisão estratigráfica para parte oriental da Bacia Bauru, na qual o Grupo Caiuá é constituído pelas formações Santo Anastácio, Rio Paraná e Goio Erê. O Grupo Bauru é composto pelas Formações Uberaba (Hasui, 1968), Marília, Vale do Rio do Peixe, Araçatuba, São José do Rio Preto, Presidente Prudente (Fernandes, 1998) e os Analcimitos Taiuvá (Fernandes e Coimbra, 1992). Este assenta-se sobre os basaltos do Grupo São Bento (Formação Serra Geral) e apresenta transição lateral gradual para o Grupo Caiuá (Figura 4).

GRUPO	FORMA ÇÃO	ESP. MÁX.	SISTEMA DEPOSICIONAL	IDADE
Bauru	Marília	160 m	Leques Aluviais	Cretáceo superior
	Adamantina	190 m		
	Santo Anastácio	80 m	Fluvial Meandrante pelítico à Sul psamítico à leste e norte	Cretáceo médio
	Caiuá	200 m	Fluvial meandrante à anastomosado psamítico	
S. Bento	Serra Geral	+1500 m	Desértico	Cretáceo Inferior

Figura 3. Estratigrafia do Grupo Bauru (modificado de Soares et al., 1980).

A Formação Adamantina definida por Soares et al. (1980) corresponde a grande parte da Formação Vale do Rio do Peixe e partes das formações Presidente Prudente e Araçatuba.

Figura 4. Carta Cronoestratigráfica (extraído de Fernandes e Coimbra, 2000)

3.2. Formação Adamantina

A Formação Adamantina é caracterizada por bancos de arenitos de granulação fina a muito fina, com estratificações cruzadas, e espessuras variando entre 2 a 20 m intercalados a bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamííticos, maciços ou com acamamento plano-paralelo, frequentemente com marcas de onda. Esta formação apresenta algumas variações regionais o que leva diferentes autores a apresentarem denominações diferentes (Soares et al., 1980). Trata-se da unidade de maior distribuição em superfície no Estado de São Paulo, aflorando na região de estudo, em contato discordante com os basaltos da Formação Serra Geral com conglomerado basal. Rivera (2002), determinou a espessura da Formação Adamantina em Urânia, que varia de 66 m a 165 m, a partir de Sondagens Elétricas Verticais.

Soares et al. (1980) conclui que o ambiente deposicional da formação Adamantina é de extenso sistema fluvial meandrante predominantemente pelítico, gradando para psamítico, em transição para anastomosado. A estratificação cruzada dos arenitos passando para plano paralelo ou maciço indica depósitos em barra de pontal ou transversais realizadas no canal. Siltitos e lamitos aparecem depositados em planícies de inundação, várzeas e lagoas. Os arenitos apresentam

microestratificação cruzada por rompimento de diques marginais e espriamento na planície.

A mineralogia dos sedimentos da Formação Adamantina apresenta quartzo, feldspato e os argilo minerais caulinita, montmorilonita e palygorskita (Brandt Neto, 1984). Análises macroscópicas de Almodovar (2000), no município de Urânia, descrevem areias finas e siltosas a muito argilosas, de cor marrom, variando para tonalidades de vermelho. Amostras mais profundas são representadas por areia fina siltosa de cor marrom escuro a claro com níveis mais argilosos cinza claros. A cor marrom mais escura está associada a quantidades significativas de matéria orgânica, enquanto a tonalidade mais avermelhada está associada a concentrações mais elevadas de ferro.

3.3. Formação Serra Geral – Grupo São Bento

A Formação Serra Geral é uma das maiores províncias de basaltos continentais do mundo, com sua fase principal de atividade entre 133 e 130 Ma (Nardy et al., 2008). É uma província magmática relacionada a rochas extrusivas e intrusivas que recobrem parte da Bacia do Paraná, sendo constituída por basaltos e basalto-andesitos de filiação toleítica (Fernandes et al., 2010). Em São Paulo, esta formação superpõe-se a Formação Botucatu e é sobreposta pelos grupos Bauru e Caiuá (Fernandes e Coimbra, 2000).

Nardy et al. (2002) propõem três unidades para a Formação Serra Geral, sendo elas a Unidade Básica Inferior, o Membro Palmas e o Membro Chapecó. A Unidade Básica Inferior compreende 95% do volume das rochas vulcânicas da Bacia do Paraná. Almodovar (2000) descreve amostras de rochas basálticas na cidade de Urânia, caracterizando-as como melanocráticas de textura fanerítica fina. De acordo com Rivera (2002), na área de estudo, rochas dessa formação são encontradas em altitudes que variam de 307 m a 369 m.

4. HIDROGEOLOGIA

4.1. Unidades hidroestratigráficas

Na região de estudo são encontradas duas unidades hidroestratigráficas (Figura 5): O Aquífero Adamantina e o Aquífero Serra Geral, pertencentes respectivamente às formações homônimas. A cidade de Urânia encontra-se no contexto hidrogeológico do Sistema Aquífero Bauru, limitado em profundidade pelos basaltos da Formação Serra Geral (Almodovar, 1995). Este sistema tem seus divisores de bacia hidrográfica coincidentes aos das bacias hidrográficas. No contexto hidrográfico, a área de estudo está localizada sobre os divisores hidrográficos das unidades São José dos Dourados, a Sul e Turvo/Grande a norte (DAEE, 1976).

Figura 5. Mapa de Domínios Hidrogeológicos destacando a área de trabalho

4.1.1. Aquífero Adamantina

O Aquífero Adamantina é do tipo livre a semiconfinado, lateralmente homogêneo e isotrópico, possuindo espessuras de 60 m a 120 m (Figura 6) (Rivera, 2002). A recarga deste aquífero ocorre naturalmente pela infiltração da chuva e a geomorfologia da área influencia suas superfícies potenciométricas. É, assim como o Sistema Aquífero Bauru, limitado em sua porção inferior pelos basaltos da Formação Serra Geral (DAEE, 1976).

Figura 6. Perfil esquemático das Formações Geológicas (extraído de Rivera, 2002).

As linhas de fluxo deste aquífero convergem para os rios, tendo caráter efluente (Bertolo, 2001). Localmente, poços tubulares de Urânia e regiões mostram espessura saturada média de 100 m (Rivera, 2002), com transmissividade entre 7×10^{-3} e $9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e condutividade hidráulica variando de 7×10^{-5} a $8 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Estas características aparecem em sedimentos permeáveis que atribuem velocidade de caminhamento das águas de $1,20 \times 10^{-5}$ a $6,2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ (Hirata et al., 2020). A perda do potencial energético das águas ao se deslocarem da área de recarga para a área de descarga é pequena, demonstrado pelo gradiente hidráulico que oscila entre 1% e 2,5% (Hirata et al., 2020). O fluxo de água subterrânea ocorre em direção a parte nordeste da cidade, com o Córrego Comprido funcionando como área de descarga (Almodovar, 2000).

4.1.2. Aquífero Serra Geral

O aquífero Serra Geral é do tipo fraturado, livre, anisotrópico e heterogêneo, possuindo espessura média de 150 m (Riviera, 2002). Em escala local, o intemperismo das rochas pode caracterizar um sistema limitado poroso (Almodovar, 1995). O modelo hidrogeológico proposto por Rebouças e Fraga (1988), subdivide os derrames basálticos da Formação Serra Geral no aquífero em duas unidades. A unidade superior é caracterizada pela alteração intempérica dos basaltos, limitado por uma descontinuidade física que resulta em uma zona de alta permeabilidade. A unidade inferior, localizada abaixo dessa descontinuidade, é caracterizada por estruturas vesiculares, intenso faturamento horizontal e é associada ao topo dos derrames.

As águas do aquífero Serra Geral são classificadas como bicarbonatadas cálcicas e cálcio-magnesianas. Apresentam baixa condutividade elétrica, baixo conteúdo de sólidos totais dissolvidos, com variação de pH, resultando em águas desde ácidas a alcalinas (DAEE, 1976). A água subterrânea está relacionada com falhas, fraturas, horizontes vesiculares e interderrames de arenito. O potencial hídrico deste aquífero está associado à quantidade e espessura dos fraturamentos, ao grau de alteração dos horizontes vesiculares e aos sistemas de interpelação com outros aquíferos.

4.2. Características hidrogeoquímicas

A Formação Adamantina é caracterizada por águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e águas bicarbonatadas sódicas. Secundariamente águas cloro-sulfatadas cálcicas ou magnesianas e cloro sulfatadas sódicas (Campos, 1987). As águas são pouco mineralizadas e com sólidos totais dissolvidos inferiores a 240 mg/l. O Sistema Aquífero Bauru possui pH ácido a básico de 4,59 a 9,64 (Campos, 1993), com águas têm adequadas para o consumo. Teores de compostos acima do limite máximo permitido são associados a contaminações locais, podendo ser causadas por más construções de poços e/ou ausência de proteção sanitária (Almodovar, 2000).

Almodovar (2000) classifica as águas subterrâneas do município de Urânia em três zonas: Profunda de 150 m a 270 m, intermediária de 21 m a 150 m e Rasa de até 21 m. A Zona Profunda representa as águas mais antigas do aquífero, onde

predominam as águas bicarbonatadas cálcicas e magnesianas. Na Zona Intermediária predominam as famílias das bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e das cloro-nitratadas cálcicas ou magnesianas. E por último a Zona Rasa, de recarga do aquífero, na qual predominam as águas cloro-nitratadas cálcicas ou magnesianas.

Almodovar (1995) indica que o cromo está relacionado às águas mais profundas, enquanto o nitrato é encontrado nas zonas mais rasas. O Eh e a condutividade elétrica diminuem da zona Rasa para a Profunda. Sendo assim, os menores valores de resistividade, o inverso da condutividade, são encontrados na área mais próxima a superfície (Tabela 1).

Tabela 1. Média dos parâmetros físico-químicos medidos em campo nas águas dos diferentes tipos de poços de Urânia, com coletas durante junho e novembro de 1998, e março e junho de 1999 (extraído de Almodovar, 2000).

Parâmetros	Zona Profunda (71 amostras)	Zona Intermediária (40 amostras)	Zona Rasa (56 amostras)
Temperatura do ar (°C)	27,02	26,27	28,61
Temperatura da água (°C)	25,49	24,74	25,48
pH	8,31	6,57	5,78
Eh (mV)	467,76	496,83	519,25
O ₂ (mg/L)	3,79	4,11	3,28
Condutividade elétrica (μS/Cm)	190,63	215,05	273,97

Bertolo (2001) descreve a porção não-saturada no município de Urânia como caracterizada pelo avançado estágio de intemperismo e composta por quartzo e caulinita. Nela, a água é classificada como bicarbonatada cálcica, porém com elevadas concentrações de nitrato. Conta ainda com condições propícias para a dissolução dos minerais primários e formação de caulinita.

Segundo Bertolo (2001), a água caracteriza-se por maiores concentrações de nitrato, cálcio e magnésio no horizonte de 0 a 2 m de profundidade e possui valores elevados de condutividade elétrica. O horizonte de 2 a 7 m, apresenta menor concentração de íons dissolvidos. No horizonte de 7 m do aquífero, a concentração de nitrato volta a subir. No aquífero, o pH sofre um aumento, assim como a quantidade de íons, indicado pela forte elevação na condutividade elétrica.

4.2.1. Histórico de contaminação

Almodovar (1995) realizou um estudo em municípios do oeste paulista, constatando concentrações anômalas e acima dos limites de potabilidade de Cr nas águas. A ocorrência natural desse elemento acima das normas é incomum. Robertson (1975) descreve que o elemento pode estar associado a minerais de argila.

Hirata e Rodolfi (1993 apud Almodovar, 2000) constatarem que o Cr ocorre de forma natural no município de Urânia, visto que é um elemento distribuído de forma ampla na região. Sua maior concentração foi detectada em poços de grandes profundidades e não há indícios de atividade contaminante.

A ocorrência de cromo nesta área pode estar associada aos minerais de argila das rochas sedimentares da Formação Adamantina. Bertolo et al. (2009) relaciona a ocorrência em Urânia como cromo-diopsídio (1000 a 6000 ppm Cr). A montmorillonita comporta a substituição atômica de alguns elementos em sua estrutura, entre eles o cromo trivalente. As águas presentes na formação Serra Geral não possuem valores de cromo anômalos como os da Formação Adamantina (Almodovar, 1995).

Segundo Cagnon (2003), as águas do Aquífero Adamantina no município de Urânia encontram-se contaminadas por nitratos, com maiores concentrações nas zonas Rasa e Intermediária, em formatos circulares (“ilhas”), chegando a teores acima de 80 mg/L, somadas a poluição por cloreto e amônio (Figura 7). O Ministério da Saúde considera que águas com concentrações maiores que 45 mg/L de NO_3^- são impróprias para o consumo, podendo causar doenças como a metahemoglobinemia na população local (Fernícola e Azevedo, 1981), e outras comorbidades em animais que dependem destes reservatórios. As concentrações anômalas de nitrato estão relacionadas a valores anômalos de cloreto e condutividade elétrica.

A contaminação é do tipo antrópica e multipontual na região de Urânia, com nitrato de origem orgânica (razão isotópica ^{15}N), proveniente de dejetos humanos e de animais, mas sem evidências de fertilizantes inorgânicos (Cagnon, 2003). A correlação é positiva entre os íons cloreto e nitrato tanto na Zona Rasa, quanto na Zona Intermediária, o que indica que o cloreto e o nitrato devem ter a mesma origem. Comparando ambas, nota-se que na Rasa aparecem os maiores valores de nitrato, cloreto e condutividade elétrica. Os valores de condutividade elétrica aumentam na direção norte/nordeste.

Figura 7. Mapa de isoconcentração de nitrato na zona rasa (extraído de Cagnon, 2003).

Como fontes potenciais de contaminação, Cagnon (2003) cita o sistema de saneamento *in situ* caracterizado por fossas negras. Fossas negras são fontes do tipo multipontual e possuem dimensão de 1,5 m de diâmetro e cerca de 5 a 10 m de profundidade, ultrapassando muitas vezes o nível de água. Esta autora identificou fossas negras ativas e inativas por toda a área de estudo, com as maiores concentrações de nitrato na parte nordeste da cidade, onde há maior densidade de fossas por quilômetro quadrado (48 fossas/km²) e a zona de descarga do aquífero no Córrego Comprido. São observadas cinco “ilhas” principais na Zona Rasa, localizadas nas proximidades das fossas. Enquanto na Zona Intermediária, as principais ilhas

foram identificadas na região onde a ocupação urbana é mais antiga, indicando que a poluição por nitrato já atingiu as águas da zona intermediária.

Marques et al. (2019) dividem a área urbana do município de Urânia em três grupos (Figura 8). O grupo A, representado pelo setor Nordeste, teve uma urbanização precoce na década de 1970, porém sua rede de esgoto foi instalada apenas em 1996. As concentrações de nitrato ultrapassaram 150 mg/L NO_3^- ao longo dos anos de 1998 a 2018. O Grupo B, no setor Sul do município, teve uma urbanização tardia e concomitante à instalação de rede de esgoto. Este grupo conta com a menor densidade de fossas negras (17 fossas/km²) e apresenta o menor grau de contaminação. O Grupo C, no setor Noroeste, teve a rede de esgoto instalada em 1980, contando com uma densidade de fossas negras cadastradas de 23 fossas/km². Ainda assim, as concentrações de nitrato são relativamente altas (100-150 mg/l NO_3^-) devido a vazamentos de rede.

Figura 8. Separação de Zonas a partir do número de fossas/km² (extraído de Marques et al., 2019).

5. METODOLOGIA

5.1. Método da Eletrorresistividade

Os métodos geoeletricos desempenham um papel de extrema importância em estudos relacionados a águas subterrâneas. Podem ser utilizados nas fases de investigação preliminar, onde é possível caracterizar a geologia e identificar áreas vulneráveis, e nas fases de investigação confirmatória, observando possíveis alterações do meio na presença de determinados contaminantes (Braga, 2016).

A condutividade pode ser utilizada para estimar a concentração de sais na água através da capacidade dos íons de conduzirem corrente elétrica. Quanto maior a concentração de íons na água, maior a condutividade e, portanto, menor a resistividade (Mirlean et al., 2000). A aplicação de métodos elétricos no estudo de contaminação também foi utilizada em trabalhos de Stollar e Roux (1975) e Kelly (1976), onde destacam a confiabilidade dos dados e o baixo custo do estudo. Silva (2008) mostra uma boa correlação entre a condutividade elétrica com nitratos e cloretos, podendo ser destacados como vetores de anomalias de qualidade das águas. Através de experiências de campo, Braga (2016) constata que a presença de chorumes em sedimentos arenosos pode diminuir em até dez vezes sua resistividade.

A condução da corrente elétrica depende da natureza do material e seu estado físico. A condução pode ser do tipo eletrônica, quando a propagação é feita por elétrons móveis que envolvem os íons metálicos de materiais condutores e semicondutores; ou do tipo eletrolítica, quando a condução de corrente elétrica se deve aos íons presentes na água contida nos poros e fissuras da rocha (Luiz e Silva, 1995).

Os métodos elétricos relacionam o fluxo de corrente elétrica em subsuperfície com a condutividade elétrica de rochas e solos. Estes métodos utilizam fenômenos puramente galvânicos, nos quais a corrente pode ser introduzida no terreno através de eletrodos, e a diferença de potencial medida por um segundo par de eletrodos (Luiz e Silva, 1995). A resistividade (ρ) compreende a resistência oferecida por um material ao fluxo de corrente elétrica quando submetido a um campo elétrico externo. A resistividade elétrica depende de aspectos dos materiais geológicos como composição mineral, conteúdo de fluido, porosidade, salinidade, temperatura e grau de saturação de água (Loke, 2004) (Tabela 2). A resistividade pode ser expressa pela Lei de Ohm (Eq. 01):

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \quad \text{Eq. 01}$$

onde $\vec{E}$ é o campo elétrico em V/m, $\vec{J}$ representa a densidade da corrente elétrica em A/m², e ρ refere-se à resistividade em $\Omega \cdot m$.

Se o meio for homogêneo a resistividade será igual em qualquer local e independentemente da posição dos eletrodos, porém ao existir heterogeneidades a resistividade não será constante. A Equação 02 é utilizada para calcular a resistividade denominada aparente. Para estimar a resistividade verdadeira é necessário fazer o processo de inversão.

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} k \quad \text{Eq. 02}$$

Onde k (Equação 03) é fator geométrico próprio que depende da geometria relacionada à disposição dos eletrodos.

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad \text{Eq. 03}$$

Tabela 2. Propriedades elétricas para diferentes materiais geológicos (extraído de Telford et al., 1990).

Rocha	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Condutividade (mS/m)
Argila (úmida e seca)	1 – 100	10 – 1000
Areia (úmida e seca)	1 - 10000	0,1 – 1000
Água doce (20°C)	80	12,5
Água subterrânea	0,5 - 300	3,3 – 2000

O método da eletrorresistividade permite a aquisição de dados por técnicas de Caminhamento Elétrico (CE) e Sondagem Elétrica Vertical (SEV). No CE, a investigação se dá pelo mapeamento da variação da condutividade elétrica ao longo de uma seção horizontal, onde serão investigados níveis de profundidade. Na SEV, esta investigação ocorre pontualmente, sobre um perfil vertical localizado no centro do arranjo.

Resistivímetros multieletrodos realizam aquisição de dados de maneira automatizada. É possível realizar diversas medidas em curto intervalo de tempo e utilizar vários tipos de arranjos em uma mesma linha de investigação, produzindo uma boa amostragem espacial e de alta resolução. A partir de caminhamentos elétricos

realizados em diferentes áreas da cidade foi possível elaborar perfis e identificar zonas anômalas causadas por contaminação.

5.1.1. Parâmetros de Dar Zarrouk

Os parâmetros de Dar Zarrouk se caracterizam por utilizar uma combinação da espessura e resistividade de cada camada geoeletrica através da multiplicação ou divisão (Orellana, 1972). Tais parâmetros auxiliam na interpretação e entendimento do modelo geoeletrico, além de estimar a proteção natural de um aquífero (Braga, 2016).

A corrente elétrica, quando aplicada no subsolo, segue perpendicular ou paralelamente a estratificação da camada (Figura 9). No fluxo perpendicular, as camadas se comportam como condutores em série, onde as resistências serão somadas. No fluxo paralelo à estratificação as resistências não podem ser somadas, portanto é necessário utilizar a sua inversa, a condutância longitudinal (S) da camada denominada de S_i (Equação 04):

$$S_i = E_i/\rho_i \quad \text{Eq. 04}$$

Onde onde E_i é a espessura da camada em metros e ρ_i a resistividade da camada em Ohm.m.

Figura 9. Fluxo de corrente el\u00e9trica nas camadas. Onde T \u00e9 a resist\u00eancia transversal, ρ \u00e9 a resistividade da camada, E \u00e9 a espessura de cada camada e S \u00e9 a condut\u00eancia longitudinal (extra\u00eddo de Orellana, 1972).

O parâmetro de condutância longitudinal é utilizado em estudos da vulnerabilidade de aquíferos frente a contaminantes. Braga et al. (2005) aplicaram o parâmetro de condutância longitudinal em estudo de proteção de um aquífero livre, em que identificam áreas de vulnerabilidade e com restrições a instalação de fontes poluidoras.

Quanto maior a condutância longitudinal na zona não saturada, maior será o grau de proteção do aquífero. Isto ocorre, pois, quanto maior a espessura da camada, mais tempo o poluente levará para atingir a zona saturada e, portanto, maior será sua retenção (Braga, 2016).

Para calcular o valor de resistividade da zona não saturada, é necessário realizar um ajuste, pois o solo pode apresentar grandes variações de resistividade, não refletindo a geologia local. O ajuste adaptado de Orellana (1972) utiliza a Lei de Archie, considerando o grau de saturação, a porosidade da rocha, e a resistividade da água de percolação (Braga, 2016).

A porosidade e o grau de saturação podem ser estimados através dos valores de resistividade das camadas saturadas (ρ_{SAT}) e não saturadas (ρ_{INSAT}). A equação 5 possibilita estimar uma resistividade ajustada.

$$\rho_{aj} = \left[0,54 \left(\frac{\rho_{sat}}{\rho_{insat}} \right)^{-2.25} \left(\frac{\rho_{insat}}{\rho_{sat}} \right)^{-2} \right] \rho_{sat} \quad \text{Eq. 05}$$

Com o valor de resistividade ajustada (ρ_{AJ}), é possível calcular o parâmetro de condutância longitudinal e classificar o aquífero quanto sua vulnerabilidade. Os parâmetros de Dar Zarrouk só devem ser aplicados em áreas não contaminadas, pois a existência de contaminantes modifica os valores naturais de resistividade (Braga, 2016).

O termo “vulnerabilidade à contaminação de aquífero” representa o nível de proteção natural relacionado a capacidade de atenuação de contaminantes na zona não saturada. A produção de um mapa de vulnerabilidade, no entanto, envolve simplificações das condições geológicas e dos processos hidrológicos (Foster et al., 2013).

A classificação da vulnerabilidade do aquífero pode ser caracterizada, entre outros fatores, pela acessibilidade da zona saturada à penetração de contaminantes e a capacidade de atenuação resultante de retenção físico-química (Foster et al.,

2013). Para estimar o índice de vulnerabilidade natural do aquífero, foi utilizado a sequência elaborada por Braga (2008) (Figura 10).

Figura 10. Índice de vulnerabilidade do aquífero (extraído de Braga, 2008).

5.1.2. Caminhamento elétrico (CE)

A aquisição geolétrica por CE se dá pela injeção de corrente elétrica ao longo de uma seção horizontal, na qual serão observadas as variações de potencial em vários níveis/horizontes de investigação (Braga, 2006). A aplicação desta técnica pode ser desenvolvida a partir de vários tipos de arranjos. Arranjos Dipolo-Dipolo apresentam valores de espaçamento “a” entre os pares de eletrodos A e B e M e N (Figura 11). Os eletrodos de corrente A e B permanecem fixos, movimentando-se apenas os eletrodos de potencial M e N em intervalos regulares “n”. O termo “n” refere-se ao fator entre as distâncias de B-M pela distância A-B do arranjo. As informações obtidas pelo CE estão relacionadas ao ponto central dos segmentos $\overline{BM}$ a partir de linhas oblíquas com angulação de 45°. Cada avanço dos eletrodos M e N representará

uma nova profundidade de investigação, fornecendo novos valores de resistividade ao longo de linhas paralelas (Kearey et al., 2009).

Figura 11. Arranjo Dipolo-Dipolo AB-MN, em que “a” representa a distância entre A-B, enquanto “n” sinaliza os diferentes espaçamentos entre os pares de eletrodos, indicando diferentes profundidades de investigação (extraído de Kearey et al., 2009).

5.1.3. Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

A SEV pode ser utilizada para determinar a profundidade da contaminação. Trata-se de um tipo de investigação pontual, na qual são usados quatro eletrodos alinhados em relação a um ponto central. Durante o levantamento, o aumento da distância entre os eletrodos levará ao aumento a profundidade de investigação (Figura 12).

Figura 12. Ilustração esquemática da configuração espacial do método da resistividade (extraído de Braga, 2006).

O arranjo *Schlumberger*, utilizado na SEV, possui uma configuração composta de quatro eletrodos, 2 responsáveis pela injeção de corrente elétrica no solo (A e B) e

2 eletrodos responsáveis por captar a variação do potencial elétrico (M e N). O ponto de investigação será verticalmente coincidente com o ponto central do arranjo. A profundidade de investigação tem relação direta com a configuração estabelecida dos eletrodos, estando A e B colinearmente nas extremidades da linha de investigação. Os eletrodos M e N estarão em posições mais internas, distantes do centro do arranjo de forma simétrica para ambos os lados. A distância do centro do arranjo para o eletrodo A ou B é conhecida como $AB/2$, e a distância de M ou N para o centro do arranjo é chamada de $MN/2$. O valor de $MN/2$ deve respeitar a relação $MN/2 \leq (AB/2)/5$. A profundidade de investigação (Z) pode ser estimada de forma genérica pela relação $(AB/2)/3 \leq Z \leq (AB/2)/2$.

5.2. Inversão de dados geoeletricos

A inversão de dados é uma ferramenta numérica iterativa que calcula a variação de uma propriedade qualquer a partir de um conjunto de dados coletados. Esta ferramenta simula feições no subsolo através de medições feitas na superfície. O modelo construído deve se ajustar aos dados medidos em campo para determinar sua validade matemática, sem deixar de respeitar variáveis geológicas observadas em campo. Para isso, no processo de inversão são considerados os desvios entre a resistividade medida e a calculada (Oliveira, 2009). Programas de inversão normalmente usam métodos iterativos. A partir de um modelo inicial o programa procura diminuir a diferença entre os valores de resistividade medidos e calculados.

5.2.1. Caminhamento elétrico – Res2dinv

A rotina de inversão usada pelo programa *Res2dinv* é baseada no método de mínimos quadrados restrito à suavidade (*Smoothness-constrained method*) (deGroot-Hedlin e Constable, 1990; Loke et al., 2003; Oliveira, 2009). Esse método é baseado na seguinte equação:

$$(J^T J + \mu F) d = J^T g - \mu F r \quad \text{Eq.06}$$

Onde: F é a matriz-filtro; J , a matriz das derivadas parciais; r , o vetor com o logaritmo dos valores de resistividade; μ é o fator de amortecimento; d , o vetor de perturbação de modelo; e g , o vetor de erro ou discrepância.

O vetor de erro (g) representa a diferença entre as resistividades medidas e calculadas, o programa procura reduzir este vetor através de tentativas de encontrar o melhor modelo após cada interação. O vetor de perturbação é a variação entre o modelo inicial e o modelo melhorado. O fator de amortecimento controla o peso dado ao modelo no processo de inversão, quanto maior esse fator, mais suave é modelo, entretanto maior o grau de incerteza. (Geotomo, 2019)

A Equação 06 pode ser modificada de várias formas para obter melhores resultados. Os elementos de matriz-filtro podem ser modificados para dar mais ênfase as variações verticais ou horizontais. Em alguns casos a geologia da área apresenta variações bruscas entre regiões, portanto é melhor utilizar uma formulação que enfatize as variações absolutas do modelo (Loke, 1999).

Esse método permite ajustar o fator de amortecimento de acordo com os tipos de dados. Partindo de um modelo inicial, o programa calcula a mudança dos parâmetros para reduzir a diferença entre as medidas de resistividades aparente e calculadas. O ajuste da resistividade dos blocos do modelo fica sujeita às restrições de suavidade usadas. A medida dessa diferença é dada pelo Erro Quadrático Médio (*Root-Mean-Squared error* – RMS). Entretanto o modelo com o menor RMS possível pode mostrar variações no modelo de resistividade que não correspondem à geologia. O erro RMS depende do número de valores anômalos e suas magnitudes, um único valor anômalo pode aumentar significativamente o valor do erro (Geotomo, 2019).

O modelo 2D de inversão consiste em uma malha de blocos retangulares, onde o arranjo dos blocos é dado segundo a distribuição dos pontos na pseudoseção. A profundidade da malha de blocos é definida para ser aproximadamente igual à profundidade mediana de investigação dos pontos com o maior espaçamento dos eletrodos (Edwards, 1977).

O Software Res2dinv calcula a mudança nos parâmetros do modelo que reduzirá a diferença entre os valores de resistividade aparente calculados e medidos. O ajuste da resistividade dos blocos do modelo está sujeito às restrições de suavidade usadas (Geotomo, 2019). Uma sub-rotina de modelagem por diferenças finitas ou elementos finitos é usada para calcular os valores de resistividade aparente, e uma técnica de otimização por mínimos quadrados restrita por suavidade e não-linear é

usada para calcular a resistividade dos blocos do modelo (deGroot-Hedlin e Constable 1990).

5.2.2. Inversão SEV – Ipi2Win

O software Ipi2win foi projetado para realizar inversões automáticas 1D em dados de SEVs e Polarização Induzida. As medidas obtidas em campo foram inseridas em uma tabela do programa com a qual foi gerado uma curva de resistividade aparente. A inversão é realizada através do método de regularização de Gauss-Newton para o número mínimo de camadas ou o algoritmo de minimização de erro pela aproximação de Tikhonov. As informações sobre resistividade e profundidade podem ser usadas para regularizar os processos de minimização de erros de ajuste (Geoscan, 2000).

Foi necessário ajustar a curva de resistividade aparente com a curva calculada. Para isso o número de camadas foi inserido manualmente. O ajuste lateral controla a espessura da camada enquanto o ajuste vertical influencia na resistividade (Figura 13). O número de camadas e as espessuras foram ajustadas para que as duas curvas fiquem o mais semelhante possível e com isso um erro quadrático médio (RMS) fique menor, o ajuste foi feito a partir de informações de poços próximos ao local. Ao final, o programa gera uma tabela com os dados de resistividade (ρ), a espessura da camada (h), a profundidade (d) e a altimetria (Alt).

Figura 13. Programa de inversão IPI2Win. A linha vermelha representa a curva de inversão e a linha azul as camadas.

5.3. Aquisição dos dados

A metodologia do trabalho consistiu em 3 etapas: revisão bibliográfica, aquisição de dados em campo e processamento dos dados. A primeira etapa foi caracterizada pela revisão bibliográfica sobre os aspectos geológicos e hidrológicos da área. Com base em estudos geoquímicos realizados em Urânia e mapas de isoconcentração de nitrato, foi realizado um planejamento para a etapa de campo.

A etapa de campo foi executada em três incursões na cidade de Urânia, em dezembro de 2018, maio de 2019 e março de 2020. Na primeira viagem foram realizados seis perfis de caminhamento elétrico (CE) com o arranjo Dipolo-Dipolo e espaçamento de 5 m entre os eletrodos (Figura 14). Dois perfis foram realizados em estradas de terra a sudeste da cidade, próximo a poços com alta concentração de nitrato de acordo com o mapa de isoteores (Figura 7) (Cagnon, 2003). Dois perfis foram realizados em áreas contaminadas dentro da cidade e nas proximidades de uma estação de tratamento de esgoto da SABESP. Um perfil foi alocado em uma estrada de terra a sudoeste, longe dos poços contaminados, e por último um caminhamento na extremidade da rodovia.

Foram produzidas três sondagens elétricas verticais (SEVs) e 9 caminhamentos elétricos (CEs) na segunda campanha. A oeste foram realizados três CEs nos mesmos locais que as três SEVs. Um perfil foi alocado dentro da área urbana transversalmente a um perfil realizado no primeiro campo, dois CEs foram executados nas proximidades de um córrego. A leste foram realizados dois perfis paralelos em estrada de terra, e por último um perfil ao sul alocado no final da área urbana (Apêndice A).

Figura 14. Caminhamentos elétricos e SEVs realizadas.

A terceira campanha teve a finalidade de gerar um mapa potenciométrico e um estudo de estimativa de vulnerabilidade a contaminação a partir de 18 SEVs, além das três SEVs realizadas anteriormente (Figura 15; Apêndice B). A localização dos pontos de estudo foi baseada na distribuição espacial, de forma a obter um conjunto de dados representativo da área, concentração anômala de nitrato evidenciada em trabalhos anteriores, recursos financeiros e tempo disponível de aquisição.

Figura 15. Área de estudo, incluindo sombreamento da topografia, localizações de poços, sondagens elétricas verticais.

A terceira etapa foi a análise e processamento dos dados coletados. Para isso foram utilizados os softwares *Prosys* e *Res2dInv* para realizar a inversão de dados, e o software *IPI2Win* para os dados da SEV.

5.3.1. Caminhamento Elétrico

Para elaborar o Caminhamento elétrico foi utilizado o arranjo Dipolo-Dipolo com espaçamento de 5 m entre os eletrodos. Nesta aquisição foram utilizados um resistímetro *Syscal Pro*, uma bateria 12V, bobinas, 48 eletrodos de metal, marretas, solução de água com sal, GPS e 48 Cabos “garra jacaré”.

O *Resistivímetro Syscal Pro* injeta corrente através dos eletrodos A e B e mede a diferença de potencial pelos eletrodos M e N. Este equipamento troca automaticamente os eletrodos e armazena as medições para transferência posterior

para o software de processamento. Dois cabos de 120 m cada foram acoplados ao *Syscal* permitindo a conexão de 48 eletrodos de metal.

Antes da aquisição, os parâmetros utilizados foram configurados no *software ElectrePro*: o arranjo Dipolo-Dipolo, o número de 48 eletrodos e o espaçamento de 5 metros. No momento do levantamento o resistivímetro *Syscal Pro* foi conectado a uma bateria de 12V e a dois cabos multieletródos (Figura 16). Cada eletrodo foi conectado ao fio através de um cabo garra jacaré. Ao final da aquisição, os dados foram descarregados através do *software Prosys*, foram investigados 24 níveis de dados.

Figura 16. (a) Aquisição com Syscal Pro e (b) detalhe do resistivímetro.

5.3.2. Sondagem Elétrica Vertical

Para realizar as SEVs, foi utilizado o arranjo *Schlumberger*. Foram utilizados na aquisição um resistivímetro Terrameter SAS (Figura 17), trenas para medição de aberturas, bobinas, marreta, GPS e quatro eletrodos. As SEVs foram feitas conectando dois fios com os eletrodos de corrente (A e B) e outros dois fios com os eletrodos de potencial (M e N) ao resistivímetro. O espaçamento de AB/2 iniciou em 1 m, aumentando gradativamente até 200m.

Figura 17. Aquisição por SEV utilizando o resistivímetro Terrameter SAS.

Foi registrada a cota topográfica obtida através do GPS e o nível da água indicado pela SEV para cada ponto de observação (Apêndice A). Os valores adquiridos pelo GPS em campo foram comparados com modelos de elevação obtidos pela plataforma *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), de resolução aproximada de 30 m, com o objetivo de confirmar e complementar as informações.

Um mapa potenciométrico foi elaborado através da interpolação das resistividades aparentes vinculadas aos níveis d'água de três poços de monitoramento. Após a interpretação dos dados das SEVs, foi definido o nível de água e subtraído da cota de superfície, e então desenvolvido o mapa potenciométrico.

6. RESULTADOS

ARTIGO CIENTÍFICO: Sondagens Elétricas Verticais na cartografia da vulnerabilidade à contaminação do Aquífero Adamantina em Urânia (SP)

Marina Fernandes Sanches Barros^{1,3}, Vinicius Hector Abud Louro^{1,2}, Rafael Terada², Carlos Henrique Gil Marques², Fernando Augusto Saraiva² Ricardo Hirata²

¹ – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo

² – Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS|USP), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo

³ – Rua do Lago, 562 - Butantã, São Paulo - SP, 05508-080. Telefone: (65) 98122-3057.

Marinafernandes@usp.br; vilouro@usp.br; rafael.terada@usp.br;
carlos.henrique.marques@usp.br; fasaraiv@usp.br; rhirata@usp.br

Artigo submetido na revista Geologia USP – Série científica em 14 de agosto de 2020, e aceito em 10 de dezembro de 2020 (Anexo A).

RESUMO

A cidade de Urânia enfrenta problemas de contaminação do Aquífero Adamantina desde a década de 1970, assim como muitas áreas urbanas paulistas. Uma das ferramentas fundamentais para o planejamento territorial é a cartografia da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos. Uma das limitações de tal técnica é o difícil acesso ao aquífero, para o estabelecimento dos níveis aquíferos e das características litológicas da zona não saturada. Assim, este trabalho identifica as áreas de recarga do aquífero na região que são mais susceptíveis à degradação antrópica, a partir de uma técnica geofísica de sondagem elétrica vertical (SEV). Os resultados foram obtidos através das SEVs e poços de monitoramento, o índice de vulnerabilidade foi definido através do parâmetro de condutância longitudinal de Dar Zarrouk, aliado às características do aquífero como o tipo de aquífero, o nível d'água e litologia da zona não saturada. A partir do mapa de vulnerabilidade foi possível indicar a área sudeste da região de estudo como mais propensa a contaminação devido ao material geológico permeável e pouca espessura da zona não saturada.

Palavras-Chave: Resistividade; Condutância Longitudinal; Contaminação de Aquífero.

ABSTRACT

The municipality of Urânia has faced problems with contamination of the Adamantina aquifer since the 1970s, as well as many urban areas in São Paulo. One of the fundamental tools for territorial planning is the mapping of vulnerability to aquifer contamination. One of the limitations of such a technique is the difficult access to the aquifer, for the establishment of the aquifer levels and the lithological characteristics of the unsaturated zone. Thus, this paper identifies the aquifer recharge areas that are most susceptible to anthropogenic degradation, using a geophysical technique vertical electrical sounding (VES). The results were obtained through VESs and shallow monitoring wells, the vulnerability index was defined through the parameter of longitudinal conductance of Dar Zarrouk, combined with the characteristics of the aquifer. The vulnerability map indicated the southeast study area as the most prone to contamination due to the permeable geological material and the low thickness of the unsaturated zone.

Keywords: Resistivity; Longitudinal Conductance; Aquifer Contamination.

INTRODUÇÃO

A concentração populacional e consequente aumento na produção de resíduos domésticos e industriais são algumas das principais fontes de contaminação do solo e do sistema hídrico. O tratamento inadequado de resíduos e sua deposição incorreta pode levar à infiltração de substâncias contaminantes aos aquíferos, comprometendo a sua qualidade.

Na cidade de Urânia (SP; Figura 1), o Aquífero Adamantina encontra-se contaminado por nitrato nas zonas rasas, até 21m de profundidade, e intermediárias, de 57 a 104m de profundidade, (Cagnon, 2003; Marques et al., 2019). Onde as maiores concentrações encontram-se na zona rasa. A pluma contaminante de nitrato se estende por toda a zona urbana, e em alguns locais supera a 150 mg/L-NO_3^- . O Ministério da Saúde considera que águas com concentrações maiores que 45 mg/L-NO_3^- são impróprias para o consumo humano (Brasil, 2017). Ademais, esta contaminação encontra-se associada a concentrações elevadas de cloreto e outros íons (Cagnon, 2003).

Considerando o crescimento da área urbana de Urânia, assim como as atividades agrícolas na área rural, é de extrema importância avaliar áreas mais susceptíveis à contaminação antrópica. Desta forma é possível preservar determinadas regiões frente a atividades potencialmente poluidoras. O termo vulnerabilidade à contaminação de aquífero representa o nível de proteção natural relacionado ao acesso hidráulico, à capacidade de atenuação de contaminantes na zona não saturada e a produção de um mapa de vulnerabilidade envolve simplificações das condições geológicas e dos processos hidrológicos (Foster et al., 2013).

Figura 1. Área de estudo, incluindo sombreamento da topografia, localizações de poços, sondagens elétricas verticais

Aquisições geofísicas são poderosas ferramentas em projetos ambientais, pela rápida produção de informações, por suas naturezas não invasivas, podendo alcançar grandes profundidades de investigação e um vasto número de medidas em um intervalo reduzido de tempo (Souza e Gandolfo, 2012).

A técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) indica contrastes em uma dimensão (vertical) de resistividades elétricas em materiais no meio investigado. Estes contrastes podem estar relacionados às alterações litológicas, às características petrofísicas e à saturação do meio. A variação da saturação de água numa rocha, por exemplo, tenderá a causar uma redução em sua resistividade elétrica. A partir disso é possível inferir a profundidade o nível freático de um aquífero (espessura da camada não saturada) e, destes dados, elaborar um mapa do fluxo das águas subterrâneas.

A resistividade elétrica auxilia na identificação do material geológico, onde os valores indicam áreas com maiores ou menores porcentagens de material permeável (areia). Os materiais mais permeáveis têm menor capacidade de retenção por adsorção de contaminantes (Braga, 2008). A partir da relação entre espessura da

camada e sua resistividade, é possível calcular a Condutância Longitudinal (Orellana, 1972).

Este parâmetro pode ser utilizado na estimativa da vulnerabilidade do aquífero à infiltração de poluentes, visto que quanto maior a espessura da camada, mais tempo o contaminante leva para chegar ao aquífero. Quando aplicado ao estudo de proteção de aquíferos livres, esta propriedade revelou resultados satisfatórios nos trabalhos de Braga et al. (2005) e Monteiro et al. (2014), onde foram identificadas litologias definidas por camadas de argila e areia e indicados áreas de riscos prováveis de contaminação.

Utilizando a Condutância Longitudinal, aliada às características do aquífero, como o tipo de aquífero, o nível d'água e litologia da zona não saturada, foi possível construir um mapa de vulnerabilidade para os arredores do núcleo urbano no município de Urânia. Poços de monitoramento da base de dados de Marques (2019) foram utilizados com o objetivo de apurar os resultados obtidos pelo método da resistividade.

CONTEXTO HIDROGEOLOGICO

A região de estudo está inserida na porção centro-norte da Bacia Vulcano-Sedimentar do Paraná. A bacia é caracterizada por uma fossa tectônica no escudo pré-cambriano, preenchida por sedimentos continentais e marinhos da Formação Adamantina, depositados de forma direta e discordante sobre basaltos da Formação Serra Geral (IPT, 1981). A Formação Adamantina pertence ao Grupo Bauru, Cretáceo (Fernandes e Coimbra, 2000), apresenta bancos de arenitos com espessuras variando de 2 a 20 m, granulação fina a muito fina e com estratificações cruzadas. Os arenitos se dispõem intercalados a bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos, maciços ou com acamamento plano-paralelo (Soares et al., 1980). Esta formação é a unidade de maior distribuição em superfície no Estado de São Paulo, aflorando na cidade de Urânia.

Os sedimentos da Formação Adamantina são compostos por quartzo, feldspato e por argilo-minerais como caulinita, montmorilonita e palygorskita (Brandt

Neto, 1984). Análises macroscópicas de amostras coletadas na cidade de Urânia foram descritas como areia fina siltosa a muito argilosa, de cor marrom, variando para tonalidades de vermelho (Almodovar, 2000). Bertolo (2011) elaborou uma descrição macroscópica do aquífero adamantina em relação a profundidade (Tabela 1).

Tabela 1. Descrição macroscópica do aquífero Adamantina.

Profundidade (m)	Material	Descrição
0,0 – 1,20	Solo – Horizonte A	Areia fina argilosa – siltosa marrom escura, com matéria orgânica, raízes e macroporos verticais
1,20 – 4,50	Solo – Horizonte B	Areia fina argilosa – siltosa, marrom escura a avermelhada do topo para a base. Quantidades de matéria orgânica raízes e macroporos diminuem do topo para a base
4,50 – 10	Rocha mãe alterada – Horizonte C	Areia fina argilosa – siltosa, com seixos dispersos de caulinita e laterita. Presença de camadas finas de areia fina a média. A cor varia de avermelhado a vermelho escuro do topo para a base. A compactação do material geológico aumenta com a profundidade.
Lençol Freático 10 – 30 30 - ~ 100	Arenito	Areia muito fina a fina, bem selecionada e sem cimento carbonático. Areia predominantemente fina, moderadamente selecionada,

		com intercalações de areia muito fina a média. Cimento de carbonato predominante e localmente, observa-se a presença de concreções carbonáticas. A cor varia de avermelhado ao marrom arroxeado.
> ~ 100	Basalto	

Fonte: Bertolo, 2011

O Aquífero Adamantina pertence ao Sistema Aquífero Bauru, na cidade de Urânia é caracterizado como livre a semi-confinado, lateralmente homogêneo e isotrópico, possuindo uma espessura média de 60 a 120 m (Rivera, 2002). A recarga deste aquífero ocorre naturalmente pela infiltração da chuva em sua área de afloramento, que junto às áreas de descarga e a geomorfologia da área, controlam a superfície potenciométrica (DAEE, 1976). O fluxo de água subterrânea ocorre em direção nordeste da cidade, onde o Córrego Comprido atua com área de descarga (Almodovar, 2000).

Poços tubulares instalados em Urânia mostram espessura saturada média de 100 m. Almodovar (2000) classificou as águas subterrâneas do município de Urânia em três zonas, sendo a zona profunda a partir de 150 m, a zona intermediária de 21 m a 150 m e a zona rasa de até 21 m. A zona profunda representa as águas mais antigas do aquífero, onde predominam as águas bicarbonatadas cálcicas e magnesianas. Na zona intermediária predominam as famílias das bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e das cloro-nitratadas cálcicas ou magnesianas. E por último a zona rasa, recarga do aquífero, predominam as águas cloro-nitratadas cálcicas ou magnesianas.

Figura 2. Mapa potenciométrico – outubro de 2001 (Cagnon, 2003).

A partir das cotas dos níveis de água estáticos, Cagnon (2003), confeccionou um mapa potenciométrico (Figura 2), estabelecendo as direções principais de fluxo de água subterrânea na área urbana da cidade de Urânia. De acordo com o mapa a direção preferencial do fluxo aponta para a área nordeste da cidade, onde fica localizado o córrego comprido.

METODOLOGIA

Métodos elétricos se baseiam na variação do fluxo de corrente elétrica em subsuperfície em função da condutividade elétrica de solos e rochas. Estes métodos utilizam fenômenos puramente galvânicos, nos quais a corrente pode ser introduzida no terreno através de eletrodos, com a diferença de potencial medida por outro par de eletrodos (Orellana, 1972). A resistividade elétrica é dada pela resistência oferecida por um material ao fluxo de corrente elétrica quando submetido a um campo elétrico externo. A resistividade elétrica depende de aspectos dos materiais geológicos como composição mineral, porosidade, salinidade, temperatura do meio e grau de saturação de água (Loke, 2004; Tabela 2).

Tabela 2. Propriedades elétricas para diferentes materiais geológicos.

Rocha	Resistividade ($\Omega.m$)	Condutividade (mS/m)
Argila (úmida e seca)	1 – 100	10 – 1.000
Areia (úmida e seca)	1 – 10.000	0,1 – 1.000
Água doce (20°C)	80	12,5
Água subterrânea	0,5 – 300	3,3 – 2.000

Fonte: Telford et al., 1990

Se o meio for homogêneo, a resistividade será igual em qualquer local e independentemente da posição dos eletrodos. Porém, existindo heterogeneidades, a resistividade não será constante. O valor calculado é denominado de resistividade elétrica aparente, que é adquirida durante a aquisição geoeletrica (Equação 01), sendo utilizada para calcular a resistividade elétrica verdadeira por meio de algoritmos de inversão.

$$\rho = \frac{\Delta V}{i} k \quad 01$$

Onde:

ΔV é diferença de potencial (volt)

i é a corrente elétrica em A (ampère)

k é fator geométrico do arranjo (m)

A Sondagem Elétrica Vertical (SEV) é uma técnica geoeletrica usada para determinar a profundidade do nível d'água, assim como identificar litologias e estimar suas espessuras. Trata-se de uma investigação indireta, pontual, na qual são usados quatro eletrodos alinhados em relação a um ponto central. Durante o levantamento, o aumento da distância entre os eletrodos permite uma maior profundidade de investigação.

Neste trabalho foi utilizado um resistivímetro Terrameter SAS em arranjos Schlumberger. O arranjo *Schlumberger* possui uma configuração composta de quatro eletrodos, 2 responsáveis pela injeção de corrente elétrica no solo (eletrodos A e B) e 2 eletrodos responsáveis por captar a variação do potencial elétrico (eletrodos M e N). O ponto de investigação será verticalmente coincidente com o ponto central do arranjo. Os espaçamentos entre os eletrodos devem ser fixos, suas movimentações simultâneas e de mesmo valor métrico.

Vinte e uma SEVs foram realizadas no município de Urânia (Figura 1). As sondagens contaram com aberturas MN/2 de 0,5 a 5,0 m, e com AB/2 variando de 1,5 m ao espaçamento máximo de 200 m. O *software Ipi2win* foi utilizado para realizar inversões dos dados das SEVs. Para ajustar a curva de resistividade aparente com a curva calculada, o número de camadas foi inserido manualmente baseado em observações de descrições de perfis geológicos de três poços de monitoramento (Tabela 3). O ajuste lateral controla a espessura da camada enquanto o ajuste vertical influencia na resistividade. O número de camadas e as espessuras foram então invertidas, minimizando o erro quadrático médio (RMS) entre as curvas de resistividades aparente e calculada.

Tabela 3. Características dos poços de monitoramento.

Poço	X	Y	Diâmetro do tubo	Posição do filtro (m)	Comprimento do filtro (m)	Prof (m)	Nível d'água (m)
1	537689	7761559	4"	34 - 40	6 m	40	10,41
2	537110	7760681	4"	24 - 30	6 m	30	11,56
3	536823	7761421	4"	26 - 32	6 m	32	11,18

Com base no espaçamento médio das SEVs (aproximadamente 500 m) e da abertura de seus arranjos, foram definidos os parâmetros para a interpolação e plotagem dos mapas de resistividade, potenciométrico e de vulnerabilidade. O algoritmo de interpolação utilizado foi o de mínima curvatura disponível no *software Seequent Oasis*, com células de 100 m e corte do mapa para distâncias acima de 500 m da SEV mais próxima.

Um mapa potenciométrico foi elaborado através da interpolação dos níveis d'água vinculadas as resistividades aparentes e os poços de monitoramento (Figura 1). Os níveis d'água nos três poços (Tabela 3) foram determinados a partir de um medidor elétrico de nível d'água modelo HSNA da Hidrosuprimentos com cabo de 100 m. As medições foram realizadas simultaneamente as SEVs. Os poços contam com filtros de 6 metros, espaço anular preenchido, pré-filtro instalado envolta da

seção filtrante, selo de bentonita e uma mistura de sedimento nativo e bentonita para prevenir a mistura de água subterrânea por migração vertical.

Para cada ponto de observação foi registrada a cota topográfica obtida através do GPS e o nível da água indicado pela SEV (Anexo A). Os valores adquiridos pelo GPS em campo foram comparados com modelos de elevação obtidos pela plataforma *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), de com células de 30 m, resolução vertical de aproximadamente 6,2 m e resolução horizontal de 9 m (para a América do Sul; Rodriguez, 2005), com o objetivo de confirmar e complementar as informações.

Parâmetros de Dar Zarouk

A interpretação de modelos geoeletricos pode ser complementada pelos parâmetros de Dar Zarouk, cujos produtos permitem estimar a proteção natural de um aquífero a partir da zona não saturada (Braga, 2016). Estes parâmetros se caracterizam pela combinação da espessura e resistividade de cada camada geoeletrica, através de multiplicação (resistência transversal) ou divisão (condutância longitudinal). A corrente elétrica, quando aplicada no subsolo, segue perpendicular ou paralelamente a estratificação da camada (Figura 3). No fluxo perpendicular as camadas se comportam como condutores em série, onde as resistências serão somadas.

Figura 3. Fluxo de corrente elétrica nas camadas, onde T é a resistência transversal, ρ é a resistividade da camada, E é a espessura de cada camada e S é a condutância longitudinal (Orellana, 1972).

No fluxo paralelo à estratificação, as resistências não podem ser somadas. Portanto, é necessário utilizar a condutância longitudinal da camada (S_i ; Equação 02), dada em Siemens:

$$S_i = \frac{E_i}{\rho_i} \quad 02$$

Onde:

E_i é a espessura da camada em metros

ρ_i a resistividade da camada em Ohm.m

A condutância longitudinal é utilizada em estudos da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos. Quanto maior o valor da condutância longitudinal na zona não saturada, maior será o grau de proteção do aquífero. Isso se deve à relação em que, quanto maior a espessura da camada, mais tempo o poluente irá demorar para atingir a zona saturada. Quanto menor o valor de resistividade, mais argiloso e, portanto, mais impermeável (Braga, 2016).

O valor de resistividade da zona não-saturada requer um ajuste, já que a porção de solo apresenta grandes variações de resistividade, não necessariamente refletindo a geologia local. O ajuste utiliza a Lei de Archie (Orellana, 1972), e considera o grau de saturação, a porosidade da rocha, e a resistividade elétrica da água de percolação (Braga, 2016). A porosidade e o grau de saturação podem ser estimados através dos valores de resistividade das camadas saturadas e não-saturadas. A equação 3 possibilita estimar uma resistividade ajustada:

$$\rho_{aj} = \left[0,54 \left(\frac{\rho_{sat}}{\rho_{insat}} \right)^{-2,25} \left(\frac{\rho_{insat}}{\rho_{sat}} \right)^{-2} \right] \rho_{sat} \quad 03$$

Onde:

ρ_{aj} é a resistividade ajustada,

ρ_{sat} representa a resistividade da camada saturada

ρ_{insat} é a resistividade da camada insaturada, os valores de resistividade são dados em $\Omega.m$

Com o valor de resistividade ajustada (ρ_{aj}), é possível calcular o parâmetro de condutância longitudinal (Tabela 4). Os parâmetros de Dar Zarouk só devem ser

aplicados em áreas não contaminadas, pois a existência do contaminante modifica os valores naturais de resistividade (Braga, 2016). Os parâmetros foram empregados apenas em locais onde não foram encontrados indícios de contaminação segundo Cagnon (2003), o que foi confirmado pelos valores de resistividade dentro do normal para água subterrânea (Telford, 1990).

A classificação da vulnerabilidade do aquífero pode ser caracterizada pela acessibilidade da zona saturada à penetração hidráulica de contaminantes e a capacidade de atenuação resultante de retenção e degradação bio-físico-química (Foster et al., 2013). Para estimar o índice de vulnerabilidade natural do aquífero (Figura 4; Tabela 5) foi utilizada a sequência elaborada por Braga (2008).

Figura 4. Índice de vulnerabilidade do aquífero (Braga, 2008).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapa potenciométrico (Figura 5) construído a partir das SEVs e poços de monitoramento mostra que o fluxo de água segue a topografia do terreno, convergindo

para a parte nordeste da cidade. O Córrego Comprido está localizado no baixo topográfico desta parte de Urânia, para onde a água subterrânea flui, comportando-se assim como área de descarga. O mapa abrange uma área maior do que o mapa potenciométrico proposto por Cagnon (2003), entretanto ambos apontam a região do Córrego Comprido como área de descarga.

Figura 5. Potencimetria do aquífero na área urbana de Urânia, a partir de dados de SEV e Poços de monitoramento. As setas indicam o sentido do fluxo subterrâneo.

A caracterização litológica, e por extensão da permeabilidade do meio, é um dos parâmetros mais difíceis de ser obtido em estudos de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos (Foster et al., 2002; Foster et al., 2013). Para auxiliar nesta questão foram elaborados mapas de resistividade das zonas saturadas e não saturadas (Figura 6) a partir dos resultados das SEVs. Os valores de resistividade tanto nas zonas saturadas quanto nas zonas não saturadas indicam uma variação na

porcentagem entre areia e argila em diferentes partes da cidade. Parte da área noroeste da região de estudo conta com resistividades mais baixas quando comparada à sudeste, indicando maiores concentrações de argila.

Figura 6. Cotas topográficas (mapa superior) e superfície potenciométrica (mapa inferior), indicando as resistividades nas zonas não-saturadas e saturada. MDE: Modelo digital de elevação.

Estimativa de Vulnerabilidade à Contaminação do Aquífero

O conjunto de SEVs 1, 2, 3, 11, 14, 16, 17 e 18 foi usado para o estudo de vulnerabilidade natural à contaminação do Aquífero Adamantina na área rural não contaminada da cidade de Urânia. Os altos valores de resistividade da zona não saturada, atingindo até 6414 Ohm.m, foram atribuídas a arenitos com porcentagens de argila que podem variar de um ponto para o outro (Figura 7A). As resistividades da zona saturada variaram de 1 a 179 Ohm.m, sendo compatíveis com a literatura para água subterrânea, que admite valores entre 0,5 a 300 Ohm.m (Telford et al., 1990; Figura 7B).

Figura 7 – (A) Resistividade da zona não saturada; e (B) da zona saturada na área externa à urbanização de Urânia.

As SEVs 5, 6, 7, 12 e 13 foram realizadas em um alto topográfico na parte sudeste da área de estudo, fora do perímetro urbano. As medidas de resistividade deste conjunto apresentam valores mais altos quando comparado as outras SEVs (Figuras 8 e 9), tanto nos horizontes saturados quanto nos não-saturados. Isso indica uma porcentagem menor de argila e maior de areia, o que altera a capacidade de retenção de contaminantes na zona não-saturada. Não foram constatadas anomalias de baixa resistividade ($<0,5 \text{ Ohm.m}$, Telford et al., 1990) que indiquem contaminantes que modifiquem os valores naturais de resistividade, viabilizando o emprego destas SEVs no cálculo de índice de vulnerabilidade.

Figura 8. Curvas de Resistividade Aparente do conjunto de SEVs 5, 6, 7 e 12.

Figura 9. Curvas de Resistividade Aparente do conjunto de SEVs 1, 2, 3, 11, 14, 16, 17 e 18.

A partir do método proposto por Braga (2008), a condutância longitudinal foi calculada a partir da espessura da camada e da resistividade ajustada (Tabela 4). Aliada ao tipo de aquífero, a profundidade do nível da água e a resistividade da zona não saturada foram utilizadas para classificar o índice de cada ponto (Tabela 5).

O índice de ocorrência de água subterrânea (I_o) não sofre variações pois o aquífero se apresenta de forma não confinada em toda a área estudada. A profundidade do nível de água (I_{na}) em sua maioria é menor que 10 m, com exceção a SEV 3 onde registra profundidade de 14 m. O índice de resistividade (I_r) varia entre os valores mínimos e máximos da classificação devido a diferença de porcentagem de areia e argila em cada ponto. O índice de condutância longitudinal (I_s) foi obtido através da divisão da espessura da camada não saturada por sua resistividade ajustada. Com base nos índices calculados foi construído um mapa de vulnerabilidade à contaminação (Figura 10).

Tabela 4 – Resistividades Saturadas, Insaturadas e Ajustadas utilizadas na estimativa de vulnerabilidade natural do Aquífero. Espessura da zona não saturada em água e condutância calculada para a camada.

Resistividade Saturada ($\Omega.m$)	Resistividade Insaturada ($\Omega.m$)	Resistividade e Ajustada ($\Omega.m$)	Espessura (m)	Condutância (S)
--	--	--	---------------	-----------------

SEV 1	23,40	386,00	25,47	6,91	0,27
SEV 2	1,90	923,00	4,82	7,54	1,56
SEV 3	6,29	152,00	7,53	14,45	1,92
SEV 5	33,40	3385,50	57,23	2,84	0,05
SEV 6	105,00	1669,00	113,21	2,86	0,02
SEV 7	179,00	6414,00	236,49	2,07	0,01
SEV 11	10,70	347,00	13,79	8,71	0,63
SEV 12	31,30	4500,00	58,53	3,89	0,07
SEV 13	4,15	620,00	7,83	3,00	0,38
SEV 14	5,67	139,00	6,81	3,07	0,45
SEV 16	0,65	139,00	1,34	2,82	2,10
SEV 17	2,26	138,00	3,41	3,54	1,04
SEV 18	13,50	327,00	16,17	5,82	0,36

Tabela 5 – Parâmetros para a estimativa do Índice de Vulnerabilidade Natural de Aquífero. I_r – Resistividade, I_s – Condutância Longitudinal, I_o – Ocorrência da água subterrânea, I_{na} – Profundidade do Nível da água.

	I_r	I_s	$I_g = (I_r + I_s) / 2$	I_o	I_{na}	$I_g \times I_o \times I_{na}$	Índice de vulnerabilidade à contaminação
SEV 1	0,2	0,7	0,45	1,0	1,0	0,45	Médio
SEV 2	0,1	0,4	0,25	1,0	1,0	0,25	Baixo
SEV 3	0,1	0,4	0,25	1,0	0,8	0,20	Baixo
SEV 5	0,3	0,9	0,60	1,0	1,0	0,60	Alto

SEV 6	0,4	0,9	0,65	1,0	1,0	0,65	Alto
SEV 7	0,7	0,9	0,80	1,0	1,0	0,80	Extremo
SEV 11	0,1	0,4	0,25	1,0	1,0	0,25	Baixo
SEV 12	0,3	0,9	0,60	1,0	1,0	0,60	Alto
SEV 13	0,1	0,5	0,30	1,0	1,0	0,30	Médio
SEV 14	0,1	0,5	0,30	1,0	1,0	0,30	Médio
SEV 16	0,1	0,4	0,25	1,0	1,0	0,25	Baixo
SEV 17	0,1	0,4	0,25	1,0	1,0	0,25	Baixo
SEV 18	0,1	0,5	0,30	1,0	1,0	0,30	Médio

Figura 10. Vulnerabilidade natural à contaminação do Aquífero Adamantina nos arredores da cidade de Urânia

O noroeste da região de estudo foi classificado com índices baixos e médios, dentre os três pontos com índice médio (SEVs 1, 14 e 18), dois deles contam com espessuras da zona não saturada entre 6 e 7 m, porém com resistividades maiores que 15 Ohm.m. No terceiro ponto a zona não-saturada é menos espessa, porém a resistividade também é mais baixa. Dessa forma, quanto menor a espessura da camada não-saturada e maior sua resistividade, menor a proteção frente a contaminantes.

A área com maior vulnerabilidade encontra-se estabelecida em um alto topográfico a sudeste, onde a zona não saturada tem espessura de 2 a 4 m, indicando pouca proteção frente aos contaminantes pois o nível da água está muito próximo a superfície. Resistividades entre 57 e 236 Ohm.m registram a existência de um material mais arenoso que permite que a água flua com maior facilidade para a zona saturada, carregando consigo possíveis contaminantes.

Os índices de vulnerabilidades a contaminação mais altos são caracterizados por apresentarem material geológico mais arenoso na zona não saturada, o que aponta a importância da definição da litologia no estudo.

CONCLUSÕES

O método de sondagem elétrica vertical (SEV) se mostrou eficiente na determinação do nível d'água, com o qual foi possível construir um mapa de fluxo de água subterrânea. O fluxo de água subterrânea converge para a região do córrego comprido, concordando com trabalhos anteriores realizados por monitoramento de poços. Os valores de resistividade também foram eficazes na identificação da litologia da zona saturada e não saturada. A partir desses dados foi possível indicar áreas mais vulneráveis frente a contaminantes. A caracterização litológica e a permeabilidade da zona não saturada são parâmetros difíceis de serem obtidos em estudos de vulnerabilidade. Geralmente a simplificação que os profissionais adotam é assumir que a litologia da zona saturada seja igual à da zona não saturada. Assim, o uso de SEV nesse intento avança na precisão dos estudos de vulnerabilidade de aquíferos.

Os valores de resistividade elétricas mostraram que a área a sudeste possivelmente dispõe de materiais mais arenosos do que a região noroeste nas zonas

saturada e não-saturada, o que influencia na permeabilidade da zona não-saturada. A região sudeste, além de material mais arenoso e portando mais permeável, conta ainda com profundidades do nível d'água menores que 5 m. O material permeável aliado a um nível d'água muito próximo à superfície aponta a região sudeste com um alto índice de vulnerabilidade a contaminantes, o que requer atenção especial para atividades potencialmente poluidoras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS|USP), do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, da CAPES (Processo 88882.461730/2019-01), da FAPESP (Processos 2019/20544-1, 2015/038061) e do CNPq (Processo 422501/2016-6). Assim como aos técnicos Paulo Rodrigues de Lima e Samuel Pedro Egidio envolvidos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Almodovar, M. L. N. (2000). *A origem natural da poluição por cromo no aquífero Adamantina, município de Urânia (SP)*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, USP. <https://doi.org/10.11606/T.44.2000.tde-12022015-143410>
- Braga, A.C.O. (2008). Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. *Revista Brasileira de Geofísica*. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2008000100005>
- Braga, A.C.O. (2016). *Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrologia*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Brandt Neto, M. (1984). *O Grupo Bauru na região centro-norte do Estado de São Paulo*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, USP. <https://doi.org/10.11606/T.44.1984.tde-22072015-085122>
- Brasil. (2017). Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria de Consolidação nº5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- Bertolo, R., Bourotte C., Marcolan L., Oliveira S., Hirata R. (2011). Anomalous content of chromium in a Cretaceous sandstone aquifer of the Bauru Basin, state of São Paulo, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 31, p. 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2010.10.002>
- Cagnon, F.A. (2003). *Origem e hidroquímica do nitrato nas águas subterrâneas do aquífero Adamantina em Urânia, SP*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, USP. <https://doi.org/10.11606/D.44.2003.tde-25092015-144139>
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica. (1976). Estudo de Águas Subterrâneas, Região Administrativa 7, 8 e 9, Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba, 4v., São Paulo.
- Fernandes, L. A., Coimbra, A. M. (2000). Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 4, p. 723-734. [10.25249/0375-7536.2000304717728](https://doi.org/10.25249/0375-7536.2000304717728)

- Foster, S.S.D., Hirata, R.C.A., Gomes, D., Dyelia, M., Paris, M. (2002). *Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies*. Washington: The World Bank.
- Foster, S., Hirata, R., Andreo, B. (2013). The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? *Hydrogeology*, 21, 1389-1392. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1019-7>
- IPT, 1981. *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. Escala 1:500.000. São Paulo.
- Loke, M.H. (2004). A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies.
- Marques, C.H.G., Terada, R., Galvão, P., Hirata, R. (2019). Evolução espacial e temporal da contaminação por nitrato no aquífero urbano de Urânia (SP). *Águas Subterrâneas*, 33(3), 258-269. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i3.29524>
- Orellana E. (1972). *Prospeccion geoeletrica en corriente continua*. Madrid: Paraninfo.
- Rivera, M.I.P. (2002). *A numerical model as a tool to understand groundwater circulation in Urânia (SP, Brazil)*. Dissertação (Mestrado). Suécia: Universidade de Tecnologia de Lulea.
- Rodriguez, E. (2005). A Global Assessment of the SRTM Accuracy. The Shuttle Radar Topography Mission: Data Validation and Applications Workshop, Virginia, EUA, 12-13.
- Soares, P. C., Landim, P. M. B., Fúlfaro, V. J., Neto, A. F. S. (1980). Ensaio de caracterização estratigráfica do cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 10.
- Souza, L.A.P., Gandolfo, O.C.B. (2012). Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental. *Revista Brasileira de Geologia e Engenharia e Ambiental*, 2(2), 10-27.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.

ANEXO A

Tabela A1. Localização das SEVs, altitude, e profundidade e cota do nível d'água (NA).

Pontos	Longitude (m)	Latitude (m)	Cota topográfica (m)	Profundidade NA (m)	Cota NA (m)
SEV 1	536347	7762128	465	7,0	458,0
SEV 2	536474	7761800	465	7,5	457,5
SEV 3	536097	7761318	455	10,6	444,4
SEV 4	536163	7760046	456	10,9	445,1
SEV 5	537895	7759498	479	2,8	476,7
SEV 6	537806	7760517	475	2,9	472,1
SEV 7	538222	7760432	468	2,1	465,9
SEV 8	537491	7761406	438	2,9	435,1
SEV 9	538244	7761133	451	5,7	445,3
SEV 10	537556	7761891	461	7,4	453,6
SEV 11	537546	7762282	468	8,7	459,3
SEV 12	537400	7759615	483	3,9	479,1
SEV 13	537932	7759148	473	3,0	470,0
SEV 14	535395	7761657	445	3,1	441,9
SEV 15	536026	7759555	452	7,0	445,0
SEV 16	536075	7760979	442	2,8	439,2
SEV 17	535575	7761076	444	3,5	440,5
SEV 18	536260	7761752	473	5,8	467,2
SEV 19	536548	7761422	460	10,8	449,2
SEV 20	536578	7761095	460	5,7	454,3
SEV 21	536318	7760770	445	-	-
Poço 1	537689	7761559	441	10,4	430,6
Poço 2	537110	7760681	455	11,6	443,4
Poço 3	536823	7761421	453	11,2	441,8

ARTIGO CIENTÍFICO: Geoelectrical Anomalies Associated To Groundwater Contamination In Urânia (SP, Brazil).

Marina Fernandes Sanches Barros¹; Vinicius Hector Abud Louro¹; Rafael Terada²; Carlos Henrique Gil Marques²; Fernando Augusto Saraiva²; Emerson Rodrigo Almeida³; Ricardo Hirata².

1 – University of Sao Paulo, USP, São Paulo, Brazil

2 – Groundwater Research Centre (CEPAS|USP)

3 – Federal University of Uberlândia

E- mail: Marinafernandes@usp.br

Submission to Journal of Applied Geophysics on 01/27/2021 (Annex B)

ABSTRACT

The city of Urânia (SP) has presented cases of contamination of the Adamantina Aquifer since the 1970s. This work maps contaminated regions using electroresistance contrasts. Vertical Electrical Surveys (SEVs) and Constant-Separation Traversing (CST) provided a representative resistivity dataset of the municipality. The results show resistivities below 0.5 Ohm.m in the northeast area of the city, close to the aquifer discharge region, where there is a concentration of organic contaminants. The resistivity anomalies, constrained by previously published chemical analyzes, highlighted contaminated areas in the aquifer within and next to the city.

Keywords: Electroresistance; Aquifer Contamination; Adamantina Aquifer.

RESUMO

A cidade de Urânia (SP) apresenta casos de contaminação do Aquífero Adamantina desde a década de 1970. Este trabalho busca mapear regiões contaminadas utilizando contrastes de eletrorresistividade. Sondagens Elétricas Verticais (SEVs) e Caminhamentos Elétricos foram realizados e distribuídos de forma a obter um conjunto de dados representativo do município. Os resultados mostram valores de resistividade abaixo de 0.5 Ohm.m na zona nordeste da cidade, próximo à região de descarga do aquífero, onde há concentração de contaminantes orgânicos. Anomalias de resistividade, vinculadas a análises químicas publicadas anteriormente, destacaram áreas contaminadas no aquífero dentro e próximas a cidade.

Palavras-chave: Eletrorresistividade; Contaminação de Aquífero; Aquífero Adamantina.

INTRODUCTION

Urban area expansion with inadequate wastewater collection system can contaminate all the city's water resources. The inappropriate disposal of domestic and industrial wastes can lead to infiltration of contaminants into the aquifer. The absence of a proper sewage network culminates in disposing the effluents into private cesspits (Marques et al., 2019). The Adamantina Aquifer has been facing contamination problems since the 1960s, due to such process in Urânia city (west of São Paulo State, Brazil), which groundwater is contaminated by nitrate and polluted by chloride. Moreover, the contamination plume spreads under the urban area, with the highest concentrations up to 100 m below the surface (Cagnon, 2003).

The Brazilian Ministry of Health considers water with more than 45 mg/L NO_3^- unsuitable for human consumption (Brasil, 2017), causing morbidities as methemoglobinemia (Fernícola and Azevedo, 1981). In some portions of the city of Urânia, nitrate concentration exceeds 150 mg/L. The region still has an anomalous concentration of potable chromium, which are also above the recommended limits (Almodovar, 1995).

Geophysical methods are powerful tools in environmental assessments, due to the rapid production of information, their non-invasive nature, and coverage (Souza and Gandolfo, 2012). Their integration with other Earth Sciences, such as geology and geochemistry, considerably adds value, reliability, and importance to geophysical interpretation. Lima et al. (1995) use electrical methods, combining Constant-Separation Traversing (CST or Electrical Profiling) and the Vertical Electrical Surveys (VES) with monitoring wells, allowing to associate low resistivities with contaminated areas. Silva (2008) shows a correlation between electrical conductivity with nitrate and chloride concentrations in water. This author reported anomalies coherent with variations in the water, indicating the appropriateness for such cases.

Stollar and Roux (1975) and Kelly (1976) apply electrical methods in the study of contamination and highlighted the general reliability of the data and its low-cost acquisitions. Urish (1983), Meju (2000), Gallas et al. (2005), Fachin (2007), Cavalcanti et al. (2014), and others report the use of geoelectric methods in contamination studies. Elis et al. (2008) demonstrate that the Dipole-Dipole array can estimate the thickness

of saturated and unsaturated zones, providing indications of the contaminated part of the geoelectrical profile.

This paper presents the extension of the contaminated regions in the district of Urânia (SP) using electrical methods. The results presented here are valuable sources for the development of policies regarding groundwater monitoring and protection programs.

GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL CONTEXT

The study region lies within the boundaries of the Paraná Basin. This basin is characterized by a tectonic trench in the Precambrian shield, filled with continental, marine sediments and basalt from the Serra Geral Formation (IPT, 1981). The Adamantina Formation outcrop in this area, belonging to the Cretaceous Bauru Group (Fernandes and Coimbra, 2000), deposited directly and discordantly on the basalts of the Serra Geral Formation (São Bento Group).

Adamantina Formation

The Adamantina Formation is characterized by banks of fine to very fine-grained sandstones, with cross-stratifications, and thickness ranging from 2 to 20 m. The sandstones intersperse with banks of lamites, siltstones and lamitic sandstones, massive or with plane-parallel bedding, often with waves marks (Soares et al., 1980). These sediments have quartz, feldspar, kaolinite, montmorillonite and palygorskite (Brandt Neto, 1984). Almodovar (2000) describes silty to very clayey, fine-grained sand samples of Urânia; varying from brown to red shades. The darker brown colour is associated with significant amounts of organic matter, whereas the reddish tones are associated with higher iron concentrations.

The Adamantina Aquifer belongs to the Bauru Aquifer System. It is unconfined to semiconfined, laterally homogeneous and isotropic, with thicknesses from 60 m to 120 m (Rivera, 2002). Its recharge occurs naturally through rain infiltration, with the geomorphology influencing the potentiometric surfaces. The Serra Geral Formation

basalts limit the lower portion of this aquifer (DAEE, 1976). The aquifer hydraulic conductivity in Urânia oscillates between 7×10^{-5} and 8×10^{-6} m/s (Hirata et al., 2020).

According to Bertolo (2001), the water has higher nitrate, calcium and magnesium concentrations within the 0 to 2 m horizons, represented by high electrical conductivity values. From 2 to 7 meters appears a lower concentration of dissolved ions; from 7 m to the water level, the nitrate concentration rises again; within the aquifer, the pH and number of ions increase, indicated by the local high electrical conductivity. This author describes the unsaturated zone in Urânia as quartz and kaolinites in an advanced weathering stage, with calcium bicarbonate water with high nitrate concentrations. It has favourable conditions for the dissolution of primary minerals and the formation of kaolinite.

Almodovar (2000) classifies the groundwater within the perimeter of the municipality of Urânia according to its depth and water geochemistry. The classes are the Deep Zone (DZ) from 270 m to 150 m, the Intermediate Zone (IZ) from 150 m to 21 m, and the Shallow Zone (SZ), from 21 m to the surface. The DZ represents the oldest water in the aquifer, where the calcium and magnesium bicarbonate predominate. In the IZ, families of calcium or magnesium bicarbonates and calcium or magnesium chloride-nitrates are dominant. Finally, the SZ, the aquifer's recharge zone, predominates chlorine-nitrated calcium or magnesium waters. The groundwater flows towards the northeast part of the city, where the Córrego Comprido stream serves as a discharge area (Fig. 1).

Fig. 18. Study area with topography and groundwater flow.

Contamination History

Almodovar (1995) describes anomalous concentration of Cr, above the limits of potability, in groundwater of the west of São Paulo State. Hirata and Rodolfi (1993 *apud* Almodovar, 2000) suggest that this element may occur naturally in the city of Urânia. Its highest concentrations appear in deep wells, with no evidence of contamination. Chromium is often associated with clay minerals, and it is uncommon to concentrate above the norms by itself (Robertson, 1975 *apud* Almodovar, 2000). Bertolo et al. (2009) claims that the Cr at Urânia is possibly associated with chromium-diopside (1000 to 6000 ppm Cr).

According to Cagnon (2003), the water of the Adamantina Aquifer in Urânia has nitrate contamination. The peak concentrations are in the SZ (up to 21 m depth) and IZ (from 57 to 104 m depth), in circular shapes (“islands”), reaching levels above 80

mg/L, added to chloride and ammonium pollution (Fig. 2). The anomalous nitrate concentrations are related to high chloride values and electrical conductivity. The highest anomalies are in the north of the city, where the highest density of cesspits appear (48 pits/km² and 23 pits/km²), together with the aquifer discharge area, the Córrego Comprido stream. Furthermore, leaks of the sewage network contribute to the contamination continuity (Marques et al., 2019).

Fig. 2. Nitrate isoconcentration in the shallow zone and groundwater flow (adapted from Cagnon, 2003).

Marques et al. (2019) analyze dug and tubular wells of the city. The dug wells diameters are between 1.2 and 1.5 m and depths between 3 and 21 m. The tubular wells have depths from 40 to 80 m. Among them, 81% of dug wells and 31% of tubular

wells have average nitrate concentrations above 45 mg/L (Table 1). Nitrate concentrations over the study period (1998-2018) remained stable.

Table 1. Maximum nitrate concentrations (Marques et al., 2019)

Date	Jul/18	Mar/09	Sep/08	Sep/01	Jun/99	Nov/98	Jun/98
Dug Well	PC 5	PC 7	PC 8	PC 11	PC 13	PC 9	PC 14
Maximum NO ₃ - (mg/L)	90.8	157.0	186.0	111.7	160.5	113.2	154.8
Tubular Well	PT 7	-	-	PT 5	-	-	-
Maximum NO ₃ - (mg/L)	76.2	-	-	52.1	-	-	-

METHODOLOGY AND DATA

The resistivity method introduces artificially generated electric currents into the ground and measures the electrical potential variation caused at the surface, permitting to evaluate soil and rocks electrical parameters (Orellana, 1972). The electrical resistivity (ρ , in Ohm.m) is the resistance offered by the volume of a given material to the electric current flow when subjected to an external electric field. Resistivity is one of the most variable physical properties in rocks, depending on aspects of geological materials such as mineral composition, porosity, degree of water saturation, fluid content and salinity (Loke, 2004; Table 2). The electrical conductivity (σ , in S/m) is the inverse of electrical resistivity, thus $\sigma = 1/\rho$.

Table 2. Conductivity and electrical resistivity values for different materials (extracted from Telford et al., 1990).

Rock	ρ (Ohm.m)	σ (mS/m)
Clay	1-100	10-1000
Sand	1-10000	0.1-1000
Fresh water	80	12.5
Ground water	0.5-300	3.3-2000
Salty water	0.1-1	1000-10000

Conductivity measurements highlight higher salts concentration in fluids through the ability of ions to conduct electrical current. The higher the concentration of ions in the water, for an example, the greater the conductivity and, therefore, the lower the resistivity (Mirlean et al., 2000). Braga (2016) reports, out of field experiments, that resistivity values can decrease up to ten times in sandy sediments if they are in association with leachate.

The VES acquires resistivity data through a vertical profile located at the centre of the electrode array, where the depth of investigation will depend on the distance between the electrodes for current injection. The increments in the distance between electrodes depend on the type of array. These increments are different for current and potential electrodes, considering the Schlumberger geometry used here. The CST investigates the electrical conductivity along a horizontal section, where the several investigation levels depend on the aperture between electrode pairs in Dipole-Dipole arrays (Braga, 2006).

We carried out three campaigns during December 2018, May 2019, and March 2020. We did 21 VES (Fig. 3) to determine the depth and area of contamination. The distance between electrodes M and N kept fixed most of the acquisition and only increased when potential measurements became too low, close to the noise level. In this case, relatively short increments provided consistent measurements again. Each array in our surveys started with an $AB/2$ spacing of 1 m, gradually increasing until 200 m. We used a Terrameter SAS resistivimeter for data acquisition and the Ipi2win software to invert and interpret the apparent resistivity curves.

Fig. 3. Electric Profiles (CST), Vertical Electrical Soundings (VES) and wells locations.

We did CSTs in 15 locations (Fig. 3) using a Syscal Pro resistivimeter with 48 steel electrodes, a 12 V battery as the external source of electrical current and a CuSO₄ diluted solution to prevent electrode polarization. The electrodes were equally spaced by 5 m, corresponding to 45 levels of investigation, and configured using the ElectrePro software. Two cables of 120 m each allowed the simultaneous connection of metal electrodes.

The inversion of CST data used the software Res2dinv, which routines run on the smoothness-constrained least-squares method (deGroot-Hedlin and Constable, 1990; Loke et al., 2003) and the data misfit measured by the RMS (Root-Mean-Squared) error. Res2dinv automatically calculates the changes needed in model parameters to minimize the RMS error. Damping factors control the weight given to the model in the inversion process. The higher this factor, the smoother is the model, but with a higher degree of uncertainty. The adjusts in the block model resistivities are subject to the used smoothness constraints (Geotomo, 2019).

A geoelectrical model with small RMS error may display large and unrealistic variations of resistivity. That means that such a model may not be the most accurate one from a geological perspective. A rigorous, joint geophysical and geological

interpretation, together with field observations, is essential for achieving a reliable geoelectrical model, even if it presents not-so-low RMS errors.

RESULTS AND ANALYSIS

We separated the CST and the VES into three groups based on the amplitude of the resistivity values. Each group has a specific colour bar to represent better the resistivities and facilitate the interpretation. The values from Table 1 were the standards to define the anomalies and constraining them to the existing lithologies in the area. The resistivity values varied for sands from 1 to 10.000 Ohm.m, for clays between 1 and 100 Ohm.m, and groundwater from 0.5 to 300 Ohm.m. The low resistivity anomalies were below 0.5 Ohm.m, indicating the presence of contamination in groundwater.

Group A

Group A is composed of CST and VES acquisitions and had little or no low resistivity anomalies indicating contamination. Two profiles (CST 1a and 1b; Fig. 4a and b, respectively), located at the Euclides da Cunha Highway, had a total length of 690 m. In the CST 1a section, the resistivity indicated sandy soil from the surface until 6 to 19 m. These horizons marked a decrease in the resistivity related to water level, approximately 6 m deep. Low values are present at the end of the CST 1a profile, with amplitudes smaller than 0.5 Ohm.m.

Resistivities below 20 Ohm.m usually represented groundwater. Higher resistivities, between 116 and 333 Ohm.m, appear near the surface and, in some sections, at greater depths. These values corresponded to the clay-bearing soil and sandstone of the Adamantina Formation. The east limit shows a resistivity anomaly in the CST 1a profile (Fig. 4a), but there is no continuity in the second (CST 1b, Fig. 4b).

Two profiles followed roads close to the urban area of Urânia (CST 2 and CST 3; Fig. 4c and d, respectively). We surveyed the CST 2 on an unnamed road close to the train track (Fig. 3). It had resistivity values are between 148 Ohm.m and 1860

Ohm.m in its first meters, compatible with dry and sandy soil. The resistivity decreased to 0.9 Ohm.m below 10 m in the centre of the profile, indicating water in the sedimentary rock pores. High resistivity values up to 6500 Ohm.m suggest a different lithology, as basalts. Such rocks appear as part of the Serra Geral Formation in the area.

The CST 3 followed the Getúlio Vargas Avenue (Fig. 3), further away from the urban area and the high nitrate levels found by Cagnon (2003). The horizon closest to the surface had resistivities from 70 Ohm.m to 700 Ohm.m. At approximately 7 m deep, the resistivity values decrease to 100 Ohm.m due to water presence and gradually continued this behaviour at greater depths given the increase in rock saturation. Below this layer, they are lower than 6.0 Ohm.m, coinciding with CST 2 profile, but registering lower resistivity values as CST 3 gets closer to the contamination zone. As CST 2, CST 3 displays high resistivities to its northmost portion, possibly caused by basalts.

Fig. 4. Profiles of Group A: (a) CST 1a, (b) CST 1b, (c) CST 2, and (d) CST 3. The CST 1a and b profiles are in the same area and orientation (Fig. 4). The profiles showed resistivity values compatible with soil in the first meters, and a decrease in resistivity indicating water presence (WT).

The VESs in the area displayed variations in the resistivity values according to the clay content. The VES 5, 6, 7 and 12 set (Fig. 5a) had higher resistivities in the saturated and unsaturated zones than the other soundings (Fig. 5b). This behaviour suggests a lower percentage of clay and a higher percentage of sand. The VES 16 displayed low resistivities within the depth range 2.82–6.15 m, interpreted as caused by its proximity to a flooded area. Low-resistivity contamination-related anomalies were not present.

Fig. 5. Models and apparent resistivity curves for (a) VES 5, 6, 7 and 12, and (b) VES 1, 2, 3, 11, 14, 16, 17 and 18.

Group B

Group B represents the profiles with lowest resistivity anomalies, below 0.5 Ohm.m. The sections surveyed at the farm, CST 4 and CST 5, were 250 m long. The farm is next to the Córrego Comprido stream and close to one of the wells with the highest nitrate contamination levels (PC 11, PC 08, PC 13, PC 05 and PC 14; Table 1). The CST 4 profile, performed during the first campaign (Fig. 6a), crossed the farm in the northwest-southeast direction, and displayed low resistivities. The values of apparent resistivity close to zero could not be processed by the Res2DInv, generating blanks and a high RMS error. The CST 5 profile was transversal to the CST 4 (Fig. 3), with even lower results (Appendix A). The resistivity values were considerably low than the other areas that also had the presence of water. That suggests a contaminant accumulation, especially with the low resistivity anomalies coinciding with higher nitrate concentration (Fig. 2).

Fig. 6. Electrical profiles (a) CST 4, in the farm, (b) CST 7, next to the landfill, and (c) CST 9, next to the cemetery. The profiles were in contaminated areas and showed low resistivity values.

The CST 7 (Fig. 6b) was carried out outside the urban area of Urânia, to compare profiles near and far from contamination sites (Cagnon, 2003). Again, considerably low resistivity measurements appeared in most of it. Values between 0.056 Ohm.m and 0.500 Ohm.m predominated, suggesting a strong influence of high-water salinity attributed to a nearby landfill.

The CST 8 to 14 profiles were close to the contamination zone, where values below 0.5 Ohm.m predominated (Table 3). Limitations in the inversion algorithm implemented in Res2dinv, when dealing with such low resistivities, could have caused the high RMS errors achieved in these profiles. We interpreted these low values as caused by water with extremely high salinity, suggesting severe contamination (PC 8, PC 9 and PC 13; Table 1). Values above 60 Ohm.m are compatible with the sandstone found at the site.

The CST 9 had low resistivity values almost uniformly distributed in the whole section (Fig. 6c). The area is near wells with high nitrate levels (PC 5; Table 1) and the Municipal Cemetery of Urânia, a possible contamination source due to organic compounds released during corpse decomposition (Silva and Malagutti Filho, 2009). This process causes an increase in microbial activity in the soil, accompanied by the electrical conductivity (Matos, 2001). Low resistivities were present at different depths and portions in the profile, suggesting severe water contamination. However, it was not safe to state the cause of such contamination, considering the two potential contamination sources in the vicinities – the cemetery and the contamination zone proposed by Cagnon (2003).

Table 3. Group B electrical profiles.

Name	Location	Lenght (m)	Depth (m)	Resistivity range (Ohm.m)
CST 4	Farm	250	30	0.0032 – 300.0
CST 5	Farm	250	30	0.0008 – 0.5
CST 7	Landfill	380	30	0.0008 – 20.0
CST 8	Goias Street	250	30	0.5000 – 230.0
CST 9	Maranhão St./Cemetery	250	30	0.0010 – 0.5
CST 10	José Ernesto Street	250	30	0.0010 – 2.8
CST 11	Dirt road	250	30	0.0008 – 1.5

CST 12	Dirt road	250	30	0.0050 – 15.0
CST 13	Housing Complex	250	30	0.0010 – 1.0
CST 14	Railroad	250	30	0.0060 – 350.0

We carried out four vertical electrical soundings in the urban area (Fig. 3), close to the CSTs that registered low resistance anomalies (CSTs 4, 5, 7, 9 and 10). The values display an apparent resistivity plot with more pronounced valleys than the other VES (Fig. 7), suggesting water contamination.

Fig. 7 – VES 4, 8, 10 and 15 models and apparent resistivity curves.

Group C

The CST 6 profile followed a dirt road connecting the Barão do Rio Branco Avenue to the local sewage treatment plant (Fig. 3). The resistivity values in the north limit varied between 150 and 550 Ohm.m (Fig. 8a). High resistivity values reached 5000 Ohm.m around 160 m, where a large anomaly appear bellow three smaller low points, these points are compatible with Adamantine sandstone sediments. At about 100 m, the high amplitude behaviour repeated punctually. At greater depths, the resistivity values decrease until 4 Ohm.m, in the profile centre. The CST 15 (Fig. 3 and 8b), carried out at the Barão do Rio Branco Avenue, presented high resistivities at its

eastern limit. The centre of the profile had lower values, reaching 0.5 Ohm.m in some points. Its eastern portion, near the CST 6, had high resistivity. The CST 15 western and the central areas were close to the Córrego Comprido stream, where they displayed low resistivity.

Fig. 8. CST 6 and CST 15 near the sewage treatment plant. The profiles show high resistivity values for the region.

The VES 9, in the vicinity of the sewage treatment plant, had high resistivity values (Fig. 3 and 9). This result confirmed the trend shown in the CST 6 and CST 15 profiles, indicating a change in geological material.

Fig. 9. VES 9 model and apparent resistivity curve.

The CSTs and the VESs resistivity results, together, produced a contamination map (Fig. 10). Low-resistivity anomalies, indicating contamination, crosscut the city from northwest to southeast and south. It also covered the aquifer discharge zone and part of the railroad. The cesspits are inactive in areas with sewage network. However, the contamination in the shallow horizons of the aquifer remained. Leakages in the sewage network can explain such behaviour. Locating the source of the contamination is necessary for an area remediation policy.

Fig. 10. Resistivity anomalies map from 1 to 28 meter deep.

CONCLUSIONS

The electrical method proved to be efficient for detecting low resistivity anomalies within a shallow aquifer saturated zone. The resistivities obtained by the electrical profiles displayed low values in the same areas of the wells that registered nitrate contamination. These areas suggested contamination close to the surface,

mainly in the northeastern part of the city. Their locations agree with the Urânia contaminants concentration map (Cagnon, 2003), where the Shallow Zone, up to 21 m deep, has higher nitrate concentrations than the deeper zones. Further studies are necessary to identify the source of contamination and evaluate a proper remediation strategy for this area. In addition to the contamination sites, we identified a possible saline source in the landfill.

The resistivity values between 20 Ohm.m and 350 Ohm.m were compatible with the sedimentary rocks of the Adamantina Formation, present in all sections. The resistivities were higher in the CST 6 and CST 15 sections. Further geophysical and chemical surveys are relevant to indicate the source of the high resistivity anomaly.

Remarkably low resistivity measurements are unusual even in contaminated areas. Our hypothesis is that water is combined with clay minerals and has a high concentration of dissolved salts. This scenario could have led to a unique condition for the anomalies displayed by the resistivity surveys.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the support from the Groundwater Research Centre (CEPAS|USP), the Institute of Geosciences of the University of São Paulo, from CAPES (Process 88882.461730/2019-01), FAPESP (Processes 2019/20544-1; 2015/03806-1) and CNPq (Process 422501/2016-6). As well as the technicians Paulo Rodrigues de Lima and Samuel Pedro Egidio involved in this work.

REFERENCES

- Almodovar, M.L.N., 1995, Estudo da anomalia de cromo nas águas subterrâneas da região noroeste do Estado de São Paulo [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, p. 115.
- Almodovar, M. L. N., 2000, A origem natural da poluição por cromo no aquífero Adamantina, município de Urânia (SP) [Tese Doutorado]: São Paulo, Instituto de Geociências, USP, <https://doi.org/10.11606/T.44.2000.tde-12022015-143410>.
- Bertolo, R. A., 2001, Hidrodinâmica e hidrogequímica da zona não saturada do aquífero Adamantina em Urânia (SP) [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, p. 231, DOI: 10.11606/T.44.2001.tde-20012014-174523.
- Bertolo, R. A., Marcolan, L. N. O., & Bourotte, C. L. M., 2009, Relações Água-Rocha e a Hidrogeoquímica do Cromo na Água Subterrânea de Poços de Monitoramento Multiníveis de Urânia: Geologia USP - Série Científica, V. 9, no. 2, p. 47-62, <https://doi.org/10.5327/Z1519-874x2009000200003>.
- Brandt Neto, M., 1984, O Grupo Bauru na região centro-norte do Estado de São Paulo [Tese de Doutorado]: São Paulo, Instituto de Geociências, USP, DOI: 10.11606/T.44.1984.tde-22072015-085122.
- Braga, A.C.O., 2006, Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: Uma abordagem metodológica e prática [Tese Livre-Docência]: Rio Claro, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, p.121.
- Braga, A.C.O., 2016, Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrologia: São Paulo, Oficina de Textos, 160p.
- Brasil, 2017, Ministério da Saúde, Gabinete do Ministro, Portaria de Consolidação nº5, de 28 de setembro de 2017, Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde, Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- Cagnon, F.A., 2003, Origem e hidroquímica do nitrato nas águas subterrâneas do aquífero Adamantina em Urânia, SP [Dissertação Mestrado]: São Paulo, Instituto de Geociências, USP, Doi: 10.11606/D.44.2003.tde-25092015-144139.
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica, 1976, Estudo de Águas Subterrâneas, Região Administrativa 7, 8 e 9, Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba, 4v., São Paulo.

- deGroot-Hedlin, C., Constable, S, 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data: *Geophysics*, V. 55, p.1613-1624.
- Elis, V. R., Mendonça, C. A., Porsani, J. L., Strobino, E. F., 2008, O Uso De Sondagens Dipolo-Dipolo Em Estudos Hidrogeológicos e de Depósitos De Resíduos: *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 26, no. 3, Doi: doi.org/10.1590/S0102-261X2008000300005.
- Fachin, S. J. S., 2007, Ensaios geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto – SP: avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do problema [Dissertação mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, Doi: 10.1590/S0102-261X2008000400018.
- Fernandes, L. A.; Coimbra, A. M., 2000, Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo): *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 723-734.
- Fernícola, N. G. G., Azevedo, F A., 1981, Metemoglobinemia e nitrato nas águas: *Rev. Saúde Pública*, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 242-248, Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-89101981000200009&lng=en&nrm=iso>.
- Gallas, J. D. F., Taioli, F., Silva, S. M. C. P., Coelho, O. G. W., Paim, S. G., 2005, Contaminação por chumbo e sua detecção por resistividade: *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 23.
- Geotomo., 2019, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method.
- Hirata, R., Rodolfi G., 1993, Presença de cromo nas águas subterrâneas em Urânia, São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente/ Instituto Geológico, Relatório Técnico, 24p.
- Hirata, R.; Cagnon, F.; Bernice, A.; Maldaner, C.H.; Galvão, P.; Marques, C.; Terada, R.; Varnier, C.; Ryan, M.C.; Bertolo, R., 2020, Nitrate Contamination in Brazilian Urban Aquifers: A Tenacious Problem: *Water*, Vol. 12, 2709.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1981, Mapa geológico do Estado de São Paulo, São Paulo, Escala 1:500.000.
- Kelly, W. E., 1976, Geoelectric sounding for delineating groundwater contamination: *Ground Water*, v. 14, n. 1.
- Lima, O.A.L., Sato, H.K., Porsani, M.J., 1995, Imaging Industrial Contaminant Plumes with Resistivity Techniques: *Journal of Applied Geophysics*, V.34, p.93-108, [http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)00014-3](http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851(95)00014-3).

- Loke, M.H. Acworth, I. and Dahlin, T., 2003, A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys: *Exploration Geophysics*, V.34, p.182-187.
- Loke, M. H., 2004, A practical guide to 2-D and 3-D surveys: *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*, 136p.
- Marques, C.H.G., Terada, R., Galvão, P., Hirata, R., 2019, Evolução espacial e temporal da contaminação por nitrato no aquífero urbano de Urânia (SP): *Águas Subterrâneas*, V.33, no.3, p.258-269, Doi: <https://doi.org/10.14295/ras.v33i3.29524>.
- Matos, B.A., 2001, Avaliação da ocorrência e do transporte de microrganismo no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, município de São Paulo [Tese de Doutorado]: São Paulo, Escola Politécnica da USP, p.113, Doi: 10.11606/T.44.2001.tde-19122001-082301.
- Meju, M. A., 2000, Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach: *Journal of Applied Geophysics*. V. 44, Doi: 10.1016/S0926-9851(00)00011-2.
- Mirlean, N., Vanz, A., Baisch, P., 2000, Níveis e origem da acidificação das chuvas na região de Rio Grande – RS: *Química Nova*, V. 23, no. 5.
- Orellana E., 1972, *Prospeccion geoeletrica en corriente continua*: Madrid, Paraninfo. 170p.
- Rivera, M.I.P., 2002, A numerical model as a tool to understand groudwater circulation in Urânia (SP, Brazil). [Dissertação Mestrado]: Suécia, Universidade de Tecnologia de Lulea.
- Robertson, F. N., 1975, Hexavalent Chromium in the ground water in Paradise Valley, Arizona: *Ground Water*, v.13, no.6, p. 516-527. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1975.tb03621.x>
- Silva, A. C., 2008, Estudo da contaminação do lençol freático através da integração de técnicas geoquímicas e geofísicas em Ji-Paraná, RO [Tese de doutorado]: Rio Claro Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 146 p.
- Silva, R. W. C., Malagutti Filho, W. O., 2009, Emprego de métodos geofísicos na fase de investigação confirmatória em cemitérios contaminados: *Engenharia Sanitaria Ambiental* V.14, no.3, p.89-105.
- Soares, P. C., Landim, P. M. B., Fúlfaro, V. J., Neto, A. F. S., 1980, Ensaio de caracterização estratigráfica do cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru: *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 10.

- Souza, L.A.P., Gandolfo, O.C.B., 2012, Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental: Revista Brasileira de Geologia e Engenharia e Ambiental, v.2, no.2, p.10-27.
- Stollar, R. L., Roux, P., 1975, Earth resistivity surveys: a method for delineating groundwater contamination: Ground Water, [S.I.], v. 13, n. 2.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics: Cambridge University Press, 770 p.
- Urish, D. W., 1983, The Practical Application of Surface Electrical Resistivity to Detection of Ground-Water Pollution: Groundwater, V. 21, no.2, Doi: 10.1111/j.1745-6584.1983.tb00711.x.

APPENDIX

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O método de sondagem elétrica vertical (SEV) se mostrou eficiente na determinação do nível d'água, com o qual foi possível construir um mapa de fluxo de água subterrânea. Assim como o caminhamento elétrico detectou anomalias de baixas resistividades na zona saturada.
- O fluxo de água subterrânea converge para a região do Córrego Comprido, concordando com trabalhos anteriores realizados por monitoramento de poços.
- Os valores de resistividade permitiram a avaliação de possíveis litologias da zona saturada e não-saturada. As resistividades entre 20 Ohm.m e 350 Ohm.m são compatíveis com as rochas sedimentares da Formação Adamantina. A caracterização litológica e a permeabilidade da zona não saturada são parâmetros difíceis de serem obtidos em estudos de vulnerabilidade. Geralmente, a simplificação que os profissionais adotam é assumir que a litologia da zona saturada seja igual à da zona não-saturada. Assim, o uso de SEV nesse intento avança na precisão dos estudos de vulnerabilidade de aquíferos.
- A partir da condutância longitudinal aliada as características do aquífero foi possível indicar áreas mais vulneráveis frente a contaminantes, apontando a região sudeste com um alto índice de vulnerabilidade.
- Os valores de resistividade elétricas mostraram que a área a sudeste possivelmente dispõe de materiais mais arenosos do que a região noroeste nas zonas saturada e não-saturada, o que influencia na permeabilidade da zona não-saturada.
- A região sudeste, além de material mais arenoso e portando mais permeável, conta ainda com profundidades do nível d'água menores que 5 m. O material permeável aliado a um nível d'água muito próximo à superfície aponta a região sudeste com um alto índice de vulnerabilidade a contaminantes, o que requer atenção especial para atividades potencialmente poluidoras.
- Os perfis elaborados através dos caminhamentos elétricos detectaram anomalias de baixa resistividade nas mesmas áreas onde os poços registraram altos valores de nitrato.
- A região com maior concentração de contaminantes, e menores valores de resistividade, está localizada próxima a superfície, principalmente na parte nordeste

da cidade. As áreas com anomalias de baixa resistividade coincidem com o mapa proposto por Cagnon (2003), onde são encontradas as maiores concentrações de nitrato até 21 m de profundidade.

- Foi possível identificar mais um ponto de contaminação próximo ao Aterro sanitário, localizado na parte sudeste da cidade.

Sugestões:

- Valores fora do padrão foram encontrados nos caminhamentos 6 e 15 (CST 6 e CST 15). Sugere-se que seja realizada uma sondagem direta para verificar a fonte desta anomalia de alta resistividade.
- Os baixos valores de resistividade encontrados na região são incomuns mesmo em áreas contaminadas. Uma hipótese levantada é a combinação da água com minerais de argila levando a uma alta concentração de sais dissolvidos. Sugere-se estudos geoquímicos para aferir esta hipótese ou avaliar possíveis outras causas para o fenômeno.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almodovar, M.L.N., 1995, Estudo da anomalia de cromo nas águas subterrâneas da região noroeste do Estado de São Paulo [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, p. 115.
- Almodovar, M. L. N., 2000, A origem natural da poluição por cromo no aquífero Adamantina, município de Urânia (SP) [Tese Doutorado]: São Paulo, Instituto de Geociências, USP, <https://doi.org/10.11606/T.44.2000.tde-12022015-143410>.
- Bertolo, R.A., Hirata, R.C.A., 2000, Monitoramento da zona não saturada: um estudo da hidráulica e hidroquímica na estação experimental de Urânia: Congresso Mundial de Águas Subterrâneas, São Paulo, Brasil, ABAS, p.16.
- Bertolo, R. A., 2001, Hidrodinâmica e hidrogequímica da zona não saturada do aquífero Adamantina em Urânia (SP) [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, p. 231, DOI: 10.11606/T.44.2001.tde-20012014-174523.
- Bertolo, R. A., Marcolan, L. N. O., & Bourotte, C. L. M., 2009, Relações Água-Rocha e a Hidrogeoquímica do Cromo na Água Subterrânea de Poços de Monitoramento Multiníveis de Urânia: Geologia USP - Série Científica, V. 9, no. 2, p. 47-62, <https://doi.org/10.5327/Z1519-874x2009000200003>.
- Brandt Neto, M., 1984, O Grupo Bauru na região centro-norte do Estado de São Paulo [Tese de Doutorado]: São Paulo, Instituto de Geociências, USP, DOI: 10.11606/T.44.1984.tde-22072015-085122.
- Braga, A.C.O., 2006, Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: Uma abordagem metodológica e prática [Tese Livre-Docência]: Rio Claro, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, p.121.
- Braga, A.C.O., 2008, Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal: Revista Brasileira de Geofísica, V. 26, no. 1, DOI: [dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2008000100005](https://doi.org/10.1590/S0102-261X2008000100005).
- Braga, A.C.O., 2016, Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrologia: São Paulo, Oficina de Textos, 160p.
- Braga, A.C.O., Malagutti Filho, W., Dourado, J.C., 2005, Resistivity (DC) method applied to aquifer protection studies: Journal of Environmental and Engineering Geophysics (JEEG) – The Environmental and Engineering Geophysical Society (EEGS) – USA, ISSN-1083-1363.

- Cagnon, F.A., 2003, Origem e hidroquímica do nitrato nas águas subterrâneas do aquífero Adamantina em Urânia, SP [Dissertação Mestrado]: São Paulo, Instituto de Geociências, USP, Doi: 10.11606/D.44.2003.tde-25092015-144139.
- Campos, H. C. N. S., 1987. Contribuição do estudo hidrogeoquímico do Grupo Bauru no Estado de São Paulo [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.
- Campos, H. C. N. S., 1993, Caracterização e cartografia das províncias hidrogeoquímicas do estado de São Paulo [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.
- Cavalcanti, M. M., Borges W. R., Stollberg, R., Rocha M. P., Cunha, L. S., Seimetz, E. X., Nogueira, P. V., Oliveira e Souza, F. R. F. R., 2014, Levantamento geofísico (eletrorresistividade) nos limites do aterro controlado do jokey clube, vila estrutural, Brasília-DF: Geociências (São Paulo), v. 33, n. 2, p. 298–313.
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica, 1976, Estudo de Águas Subterrâneas, Região Administrativa 7, 8 e 9, Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba, 4v., São Paulo.
- deGroot-Hedlin, C., Constable, S, 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models form magnetotelluric data: Geophysics, V. 55, p.1613-1624.
- Edwards, L.S., 1977, A modified pseudosection for resistivity and induced polarization: Geophysics, V.42, p.1020-1036.
- Elis, V. R., Mendonça, C. A., Porsani, J. L., Strobino, E. F., 2008, O Uso De Sondagens Dipolo-Dipolo Em Estudos Hidrogeológicos e de Depósitos De Resíduos: Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 26, no. 3, Doi: doi.org/10.1590/S0102-261X2008000300005.
- Fachin, S. J. S., 2007, Ensaios geoelétricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto – SP: avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do problema [Dissertação mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, Doi: 10.1590/S0102-261X2008000400018.
- Fernandes, L. A., Coimbra, A. M., 1992, A cobertura cretácea suprabasáltica no estado do Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): os grupos Bauru e Caiuá: Congresso Brasileiro de geologia, São Paulo, boletim de resumos expandidos, v. 2, p. 506-508.
- Fernandes, L. A., 1998, Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil) [Tese de doutorado]: Instituto de geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, p.216.

- Fernandes, L. A.; Coimbra, A. M., 2000, Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo): Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 723-734.
- Fernandes, A. J., Maldaner, C. H., Sobrinho, J. M. A., 2010, Estratigrafia dos Derrames de Basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto – SP) Baseada na Geologia Física, Petrografia e Geoquímica: Geologia USP, Série Científica, São Paulo, v.10. p.73-99.
- Fernícola, N. G. G., Azevedo, F A., 1981, Metemoglobinemia e nitrato nas águas: Rev. Saúde Pública, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 242-248, Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-89101981000200009&lng=en&nrm=iso>.
- Foster, S., Hirata, R., Andreo, B., 2013, The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? Hydrogeology, V. 21, p.1389–1392, Doi: doi.org/10.1007/s10040-013-1019-7.
- Gallas, J. D. F., Taioli, F., Silva, S. M. C. P., Coelho, O. G. W., Paim, S. G., 2005, Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade: Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 23.
- Geoscan-m, 2002, IPISWin (MT) V. 2.0 – User’s Guide, Geological Faculty, Moscow State University, Moscow.
- Geotomo., 2019, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method.
- Hasui, Y., 1968, A Formação Uberaba: Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, Anais, V.22, p. 167-179.
- Hirata, R., Rodolfi G., 1993, Presença de cromo nas águas subterrâneas em Urânia, São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente/ Instituto Geológico, Relatório Técnico, 24p.
- Hirata, R.; Cagnon, F.; Bernice, A.; Maldaner, C.H.; Galvão, P.; Marques, C.; Terada, R.; Varnier, C.; Ryan, M.C.; Bertolo, R., 2020, Nitrate Contamination in Brazilian Urban Aquifers: A Tenacious Problem: Water, Vol. 12, 2709.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1981, Mapa geológico do Estado de São Paulo, São Paulo, Escala 1:500.000.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2009, Geofísica de Exploração: São Paulo, Oficina de Textos, 440 p.
- Kelly, W. E., 1976, Geoelectric sounding for delineating groundwater contamination: Ground Water, v. 14, n. 1.

- Lima, O.A.L., Sato, H.K., Porsani, M.J., 1995, Imaging Industrial Contaminant Plumes with Resistivity Techniques: *Journal of Applied Geophysics*, V.34, p.93-108, [http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)00014-3](http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851(95)00014-3)
- Loke, M.H., 1999, Time-lapse resistivity imaging inversion: 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section Proceedings, Em1.
- Loke, M.H. Acworth, I. and Dahlin, T., 2003, A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys: *Exploration Geophysics*, V.34, p.182-187.
- Loke, M. H., 2004, A practical guide to 2-D and 3-D surveys: *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*, 136p.
- Luiz, J.G., Silva, L.M.C., 1995, *Geofísica de Prospecção*: Belém, UFPA, Cejup, 311 p.
- Marques, C.H.G., Terada, R., Galvão, P., Hirata, R., 2019, Evolução espacial e temporal da contaminação por nitrato no aquífero urbano de Urânia (SP): *Águas Subterrâneas*, V.33, no.3, p.258-269, Doi: <https://doi.org/10.14295/ras.v33i3.29524>.
- Meju, M. A., 2000, Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach: *Journal of Applied Geophysics*. V. 44, Doi: 10.1016/S0926-9851(00)00011-2.
- Milani, E.J., Faccini, U.F., Scherer, C.M.S., Araújo, L.M., Cupertino, J.A., 1998, Sequences and stratigraphy hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous): *Boletim do Instituto de Geociências/USP*, V.29, p.125–173.
- Mirlean, N., Vanz, A., Baisch, P., 2000, Níveis e origem da acidificação das chuvas na região de Rio Grande – RS: *Química Nova*, V. 23, no. 5.
- Nardy, A. J. R.; Oliveira, M. A. F.; Betancourt, R. H. S.; Verdugo, D. R. H.; Machado, F. B., 2002, Geologia e estratigrafia da Formação Serra geral: *Geociências*, v. 21, no. 1-2, p. 13-30.
- Nardy, A. J. R.; Machado, F.B.; Oliveira, M. A. F., 2008, As rochas vulcânicas mesozoicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, n. 1, p. 178-195.
- Oliveira, J. P. L., 2009, Caracterização da pluma de contaminação numa antiga lixeira com o método de resistividade eléctrica [Dissertação de Mestrado]: Universidade Nova de Lisboa.
- Orellana E., 1972, *Prospeccion geoeletrica en corriente continua*: Madrid, Paraninfo. 170p.

- Rebouças, A. C., Fraga, C. G., 1988, Hidrogeologia das rochas vulcânicas do Brasil: Revista Brasileira de Águas Subterrâneas, Vol. 12.
- Rivera, M.I.P., 2002, A numerical model as a tool to understand groundwater circulation in Urânia (SP, Brazil). [Dissertação Mestrado]: Suécia, Universidade de Tecnologia de Lulea.
- Robertson, F. N., 1975, Hexavalent Chromium in the ground water in Paradise Valley, Arizona: Ground Water, v.13, no.6, p. 516-527. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1975.tb03621.x>
- Silva, A. C., 2008, Estudo da contaminação do lençol freático através da integração de técnicas geoquímicas e geofísicas em Ji-Paraná, RO [Tese de doutorado]: Rio Claro Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 146 p.
- Soares, P. C., Landim, P. M. B., Fúlfaro, V. J., Neto, A. F. S., 1980, Ensaio de caracterização estratigráfica do cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru: Revista Brasileira de Geociências, vol. 10.
- Souza, L.A.P., Gandolfo, O.C.B., 2012, Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental: Revista Brasileira de Geologia e Engenharia e Ambiental, v.2, no.2, p.10-27.
- Stollar, R. L., Roux, P., 1975, Earth resistivity surveys: a method for delineating groundwater contamination: Ground Water, [S.I.], v. 13, n. 2.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics: Cambridge University Press, 770 p.
- Urish, D. W., 1983, The Practical Application of Surface Electrical Resistivity to Detection of Ground-Water Pollution: Groundwater, V. 21, no.2, Doi: 10.1111/j.1745-6584.1983.tb00711.x.

APÊNDICE A - Características dos caminhamentos elétricos realizados

Perfil	Coordenadas Começo	Coordenadas Final	Data	Direção	Prof	Comprimento
CE 1a	536854/ 7762213	537568/ 7762019	Dez/ 2018	Oeste/ leste	33m	690m
CE 1b						
CE 2	537813/ 7760791	538491/ 538491	Dez/ 2018	Noroeste/ Sudeste	30m	820m
CE 3	537821/ 7760492	537889/ 7759663	Dez/ 2018	Norte/ Sul	30m	820m
CE 4	537407/ 7761478	537542/ 7761284	Dez/ 2018	Noroeste/ Sudeste	30m	250m
CE 5	537583/ 7761474	537373/ 7761318	Maio/ 2019	Nordeste/ Sudoeste	30m	250m
CE 6	538123/ 7761402	538087/ 7761161	Dez/ 2018	Norte/ Sul	33m	250m
CE 7	535885/ 7759629	535726/ 7759376	Dez/ 2018	Nordeste/ Sudoeste	30m	350m
CE 8	536581/ 7761573	536520/ 7761287	Maio/ 2019	Norte/ Sul	30m	250m
CE 9	537889/ 7761816	537828/ 7761538	Maio/ 2019	Norte/ Sul	30m	250m
CE 10	536980/ 7760379	536733/ 7760297	Maio/ 2019	Nordeste/ Sudoeste	30m	250m
CE 11	538271/ 7760900	538115/ 7760753	Maio/ 2019	Nordeste/ Sudoeste	30m	250m
CE 12	538056/ 7761034	537957/ 7760848	Maio/ 2019	Nordeste/ Sudoeste	30m	250m
CE 13	536126/ 7760713	536364/ 7760774	Maio/ 2019	Oeste/ leste	30m	250m
CE 14	536267/ 7761144	536499/ 7761092	Maio/ 2019	Oeste/ leste	30m	250m
CE 15	537709/ 7761238	537943/ 7761189	Maio/ 2019	Oeste/ leste	30m	250m

APÊNDICE B - Características das Sondagens Elétricas Verticais

Pontos	Longitude (m)	Latitude (m)	Cota topográfica (m)	Profundidade (m)	Cota NA (m)
sev 1	536347	7762128	465	7.0	458.0
sev 2	536474	7761800	465	7.5	457.5
sev 3	536097	7761318	455	10.6	444.4
sev 4	536163	7760046	456	10.9	445.1
sev 5	537895	7759498	479	2.8	476.7
sev 6	537806	7760517	475	2.9	472.1
sev 7	538222	7760432	468	2.1	465.9
sev 8	537491	7761406	438	2.9	435.1
sev 9	538244	7761133	451	5.7	445.3
sev 10	537556	7761891	461	7.4	453.6
sev 11	537546	7762282	468	8.7	459.3
sev 12	537400	7759615	483	3.9	479.1
sev 13	537932	7759148	473	3.0	470.0
sev 14	535395	7761657	445	3.1	441.9
sev 15	536026	7759555	452	7.0	445.0
sev 16	536075	7760979	442	2.8	439.2
sev 17	535575	7761076	444	3.5	440.5
sev 18	536260	7761752	473	5.8	467.2
Sev 19	536548	7761422	460	10.8	449.2
Sev 20	536578	7761095	460	5.7	454.3
Sev 21	536318	7760770	445	-	-
Poço 1	537689	7761559	441	10.4	430.6
Poço 2	537110	7760681	455	11.6	443.4
Poço 3	536823	7761421	453	11.2	441.8

ANEXO A

Geologia USP - V.21 n.1 -Artigo GEO_021.0006 – 1ª Revisão de texto Caixa de entrada x

publigc USP sex., 19 de fev. 10:14 (há 10 dias) ☆ ↩ ⋮

para mim, Vinicius, Rafael, Carlos, Fernando, Ricardo ▾

Prezados autores,

Ref.: Artigo "Sondagens elétricas verticais na cartografia da vulnerabilidade à contaminação do Aquífero Adamantina, em Urânia (SP)"

Conforme informado, os textos em português e inglês foram revisados por especialistas a fim de melhorar ainda mais a qualidade do trabalho.

Pedimos que avaliem as correções indicadas no PDF, anexo, e verifiquem se concordam com as sugestões feitas pelos revisores e que respondam aos questionamentos feitos (lembrando que, os revisores não são da área de **geologia**, portanto se algum termo geológico foi solicitado para alteração e/ou alterado, vocês podem rejeitar, corrigir e/ou justificar).

Respondam todos os questionamentos e façam comentários que acharem necessário no próprio PDF, usando a caneta marca texto e os balões do próprio sistema.

Pedimos o seu retorno até 20-02-2021, com as modificações solicitadas.

Nesta rodada de correções, estamos enviando ao autor principal e aos co-autores, nas próximas rodadas de correções, se houverem, para agilizar o processo, encaminharemos apenas ao autor principal. Caso queiram que um segundo autor também receba, favor informar no retorno.

Devolver o arquivo PDF corrigido, neste mesmo e-mail.

Quaisquer dúvidas, por favor, entrem em contato.

ANEXO B

Submission to Journal of Applied Geophysics - manuscript number

1 mensagem

Journal of Applied Geophysics <em@editorialmanager.com>
Responder a: Journal of Applied Geophysics <appgeo-eo@elsevier.com>
Para: Marina Barros <marinafermandes@usp.br>

27 de janeiro de 2021 11:55

This is an automated message.

Manuscript Number: APPGEO-D-21-00048
GEOELECTRICAL ANOMALIES ASSOCIATED TO GROUNDWATER CONTAMINATION IN URÂNIA (SP, BRAZIL)

Dear Miss Barros,

Your above referenced submission has been assigned a manuscript number: APPGEO-D-21-00048.

To track the status of your manuscript, please log in as an author at <https://www.editorialmanager.com/appgeo/>, and navigate to the "Submissions Being Processed" folder.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,
Journal of Applied Geophysics