

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E IDENTIFICAÇÃO DE PLUMAS DE CONTAMINAÇÃO POR MEIOS DE ENSAIOS DE ELETRORRESISTIVIDADE

Diego Daniel Silva ¹; André de Sousa Pires²; Rodolfo Pedroso Garcia³

Resumo – A eletrorresistividade é um método geofísico amplamente utilizado na caracterização hidrogeológica e no mapeamento de plumas de contaminação, particularmente em ambientes complexos como áreas industriais. Essa metodologia permite identificar variações na resistividade elétrica do subsolo, possibilitando a distinção entre diferentes litologias, zonas de saturação e fraturas permeáveis. No contexto de um complexo industrial, onde a presença de contaminantes pode comprometer a qualidade da água subterrânea, a eletrorresistividade torna-se uma ferramenta essencial para detectar anomalias condutivas associadas a plumas de contaminação. Íons dissolvidos na água subterrânea tendem a alterar sua condutividade elétrica, tornando possível a identificação de áreas impactadas. Esse método auxilia na caracterização hidrogeológica local, permitindo avaliar a interação entre aquíferos, identificar zonas preferenciais de fluxo e apoiar a gestão ambiental e a tomada de decisões relacionadas ao monitoramento e remediação.

Abstract – Electrical resistivity is a widely used geophysical method for hydrogeological characterization and mapping contamination plumes, particularly in complex environments such as industrial areas. This methodology identifies variations in the electrical resistivity of the subsurface, enabling the distinction between different lithologies, saturated zones, and permeable fractures. In the context of an industrial complex, where the presence of contaminants can compromise groundwater quality, electrical resistivity becomes an essential tool for detecting conductive anomalies associated with contamination plumes. Dissolved ions in groundwater alter its electrical conductivity, making it possible to identify impacted areas. This method also aids in the local hydrogeological characterization, allowing the evaluation of aquifer interactions, identification of preferential flow zones, and supporting environmental management and decision-making related to monitoring and remediation efforts.

Palavras-Chave – Eletrorresistividade; pluma de contaminação; hidrogeologia.

¹ Geól., MSc, Geo Supply Soluções Geológicas Tal, (11) 99326-3886, diego.silva@geosupply.com.br

² Geól., MSc, Geo Supply Soluções Geológicas Tal, (11) 99175-2564, andre.pires@geosupply.com.br

³ Geól., MSc, Geo Supply Soluções Geológicas Tal, (31) 99146-3797, rodolfo.pedroso@geosupply.com.br

1. INTRODUÇÃO

O mapeamento de plumas de contaminação e a caracterização hidrogeológica são aspectos cruciais para a gestão de recursos hídricos e a prevenção de impactos ambientais, especialmente em áreas industriais. A eletrorresistividade, como método geofísico, tem se mostrado eficaz na identificação de variações no subsolo que indicam a presença de zonas saturadas, fraturadas e potenciais áreas contaminadas. O presente estudo tem como foco a análise de perfis geofísicos de resistividade, com o objetivo de identificar as características hidrogeológicas da região de um complexo industrial, e mapear possíveis plumas de contaminação que possam afetar a qualidade da água subterrânea. Os resultados obtidos foram correlacionados com os níveis d'água dos poços de monitoramento e indicam a presença de diferentes feições geológicas e hidrogeológicas, como camadas insaturadas, zonas saturadas e fraturadas, além da identificação de áreas com baixa resistividade, sugestivas de contaminação. As conclusões deste estudo, além de fornecer subsídios para a gestão hídrica, também geraram recomendações para a continuidade do monitoramento da área e para o acompanhamento da evolução das plumas de contaminação.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização e malha geofísica

A área de estudo corresponde a um complexo industrial. A Figura 1 apresenta o mapa de localização da área, incluindo a posição dos ensaios de eletrorresistividade.



Figura 1. Localização da área de estudo e malha geofísica.

2.2. Metodologia

A eletrorresistividade investiga a distribuição da resistividade elétrica no subsolo, sendo amplamente utilizada no mapeamento de plumas de contaminação. O método baseia-se na injeção de corrente elétrica no solo por um par de eletrodos e na medição da diferença de potencial por outro par, permitindo a determinação da resistividade (Telford et al., 1990). Fatores como porosidade, grau de saturação e concentração de sais dissolvidos na água e solo influenciam esse parâmetro.

O imageamento elétrico possibilita a identificação de variações laterais de resistividade, sendo eficaz na detecção de contaminações subterrâneas. A técnica envolve a aquisição de dados ao longo de perfis, permitindo a construção de seções de resistividade. Neste estudo, utilizou-se o arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros, com cabos multi-eletrodos.

2.3. Geologia regional

O substrato local é composto pelo manto de intemperismo e por rochas das Formações Serra Geral e Marília, conforme definidas por Milani et al. (2007).

Segundo Milani et al. (1994), a Supersequência Gondwana III, denominada "Sequência Neojurássica-Eocretácica", abrange o intervalo do registro estratigráfico da Bacia do Paraná onde ocorrem os arenitos eólicos da Formação Botucatu e as rochas magmáticas da Formação Serra Geral. Segundo Milani et al. (2007), a Formação Serra Geral é composta por basaltos toleíticos, andesitos basálticos e subordinadamente riolitos. O magmatismo fissural intracontinental gerou derrames horizontais, formando soleiras e alguns diques locais, associados ao rifteamento do Atlântico.

A Supersequência Bauru é uma cobertura siliciclástica psamítica de ambiente semiárido, posicionada acima dos basaltos da Formação Serra Geral, com contato basal marcado por discordância. É composta por arenitos imaturos dos Grupos Bauru e Caiuá, além de conglomerados com clastos angulosos de basalto erodido (Milani et al., 1994; Milani et al., 2007)

O Grupo Bauru inclui a Formação Marília, subdividida em três membros:

- Serra da Galda: Arenitos amarelados de granulometria variada, com intercalações de lamitos e conglomerados, associados a um ambiente de leque aluvial mediano;
- Ponte Alta: Arenitos imaturos com cimentação carbonática, além de calcários arenosos a conglomeráticos e finos, com laminações devido a variações litológicas entre argilitos e folhelhos carbonosos;
- Echaporã: Arenitos rosados imaturos, com estratos tabulares, originados da deposição de lençóis de areia em ambientes sedimentares correlacionados aos outros membros.

2.4. Geologia local

A caracterização da geologia local foi realizada com base em sondagens e perfurações de poços, analisando seus respectivos perfis estratigráficos. Onde foi possível observar os diferentes horizontes geológicos:

- Sedimentos: Na parte superior, até 60m de profundidade, predominam solos de cor marrom avermelhada, com intercalações ocre e granulometria de argilo siltoso a areno siltoso, podendo apresentar seixos e matéria orgânica nas camadas superiores. Esses sedimentos provavelmente correspondem ao manto de intemperismo da Formação Marília, especialmente ao Membro Serra Galda.

- Intertrap de Basalto: Entre 20 e 35m de profundidade, encontra-se um corpo basáltico tabular, pouco fraturado, intercalado entre camadas sedimentares.

- Arenito: Entre 60m e 90m de profundidade, há arenitos de cores amarelada, marrom claro e avermelhada, possivelmente do Membro Serra da Galda da Formação Marília. Ocasionalmente,

há intercalações com calcarenitos escuros e de granulação fina, correlacionados ao Membro Ponte Alta.

- Basalto: Abaixo de 120m, encontra-se basalto de coloração cinza escura, com fraturas e juntas, provavelmente correspondente à Formação Serra Geral.

2.5. Unidades hidrogeológicas

A dinâmica hidrogeológica local foi entendida com base em dois principais sistemas hidrogeológicos: o Aquífero Fraturado, que é o mais extenso, predominante nas áreas de rochas da Formação Serra Geral, e o Aquífero Granular, presente nas coberturas detrítico-lateríticas ou manto de intemperismo, sobreposto ao Aquífero Fraturado, com boa capacidade de infiltração e possível função de recarga para o primeiro.

No contexto da área de estudo, as unidades hidrogeológicas locais foram definidas como:

- Aquífero poroso livre: Correspondente ao manto de intemperismo, sobreposto ao "intertrap" basáltico, com nível de água variando entre 7 e 18 metros de profundidade. Apresenta fluxo horizontal e descendente, sendo a unidade hidrogeológica associada aos poços de monitoramento.

- Aquitardo basáltico: Relacionado ao corpo basáltico tabular pouco fraturado, possui baixa condutividade hidráulica e, dependendo da presença de fraturas e falhas, pode se comportar como um aquitardo local. No entanto, ainda não há dados suficientes para confirmar a continuidade lateral de suas falhas.

- Aquífero poroso semiconfinado/confinado: Representa a espessa camada arenítica abaixo do aquitardo basáltico e sobreposta à Formação Serra Geral, possivelmente correlacionada à Formação Marília. Esta unidade pode apresentar conectividade com as unidades superiores e inferiores.

- Aquífero fraturado basáltico: Correspondente à camada basáltica da Formação Serra Geral, com intenso fraturamento e alta condutividade hidráulica, caracterizando esta unidade como um aquífero de alto rendimento, sendo parte da seção filtrante de alguns poços tubulares presentes na região.

2.6. Poços de monitoramento e teste de bombeamento

Para analisar o comportamento do fluxo de água subterrânea, foram utilizados os dados de cargas hidráulicas dos poços de monitoramento do aquífero poroso livre. Esses dados permitiram a elaboração de um mapa potenciométrico, com as linhas equipotenciais e setas indicando a direção do fluxo. A Figura 2 apresenta a localização dos poços rasos existentes na área, ilustrando o resultado da interpretação do fluxo de água para o aquífero poroso livre na porção rasa

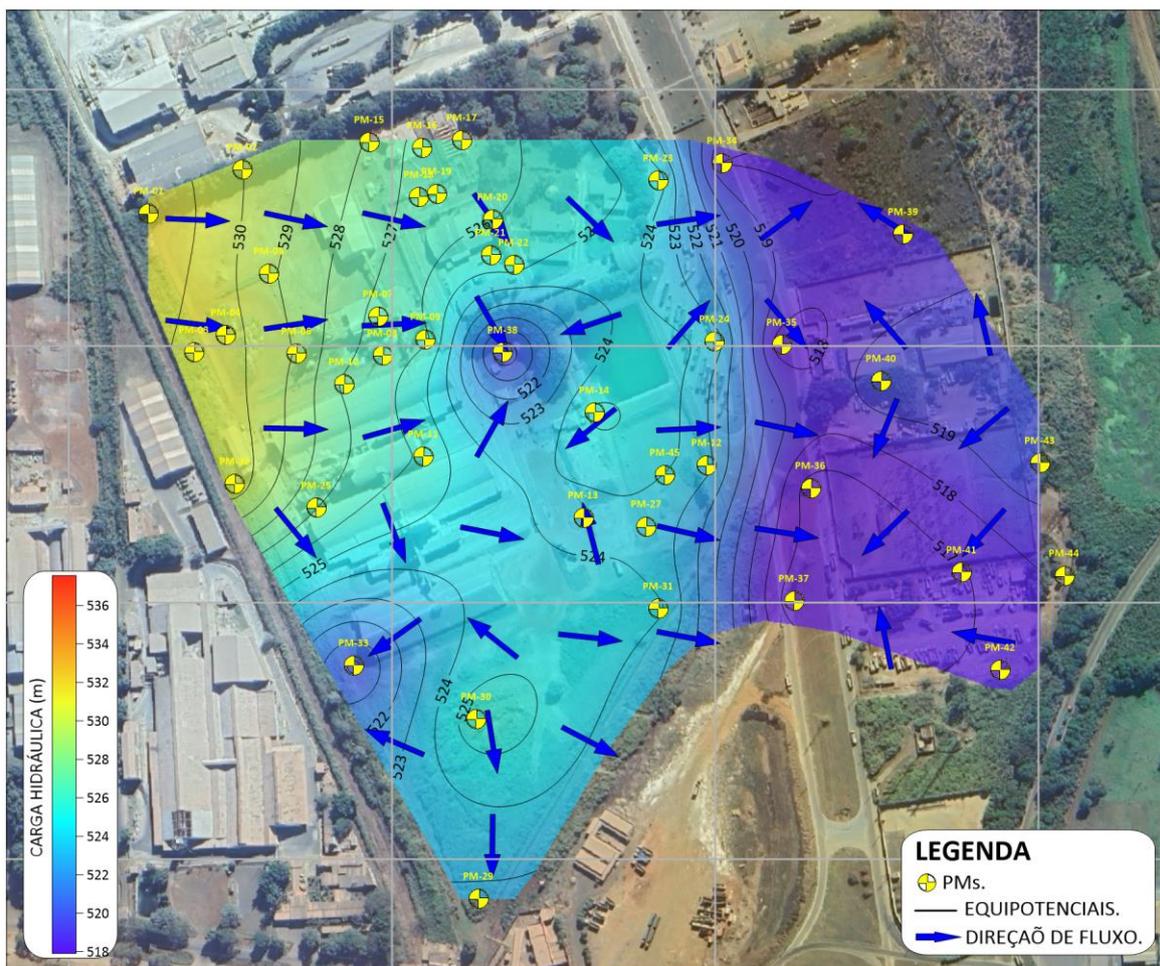


Figura 2. Localização dos poços de monitoramento e mapa potenciométrico da área de estudo.

Os resultados da campanha de monitoramento qualitativo das águas subterrâneas mostraram que, em pelo menos um dos parâmetros analisados em cada poço, os valores excederam os limites estabelecidos pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 8/2022. As análises identificaram concentrações anômalas de alumínio (Al), bário (Ba), boro (B), chumbo (Pb), cobalto (Co), ferro (Fe), manganês (Mn), níquel (Ni) e zinco (Zn).

Foram realizados testes de bombeamento em dois poços tubulares profundos na área de estudo. O primeiro não apresentou interferência nos poços rasos monitorados, indicando a presença de uma camada confinante entre os aquíferos e a ausência de conectividade no ponto avaliado. Já no segundo mostrou interferência em dois dos três poços rasos monitorados. Esse resultado sugere a possível descontinuidade lateral do intertrap basáltico ou variações em seu grau de fraturamento. A Figura 3 mostra o raio de influência causado pelo bombeamento, representado pelas linhas de contorno do cone de rebaixamento, obtidas a partir da interpretação das curvas de tempo versus rebaixamento.

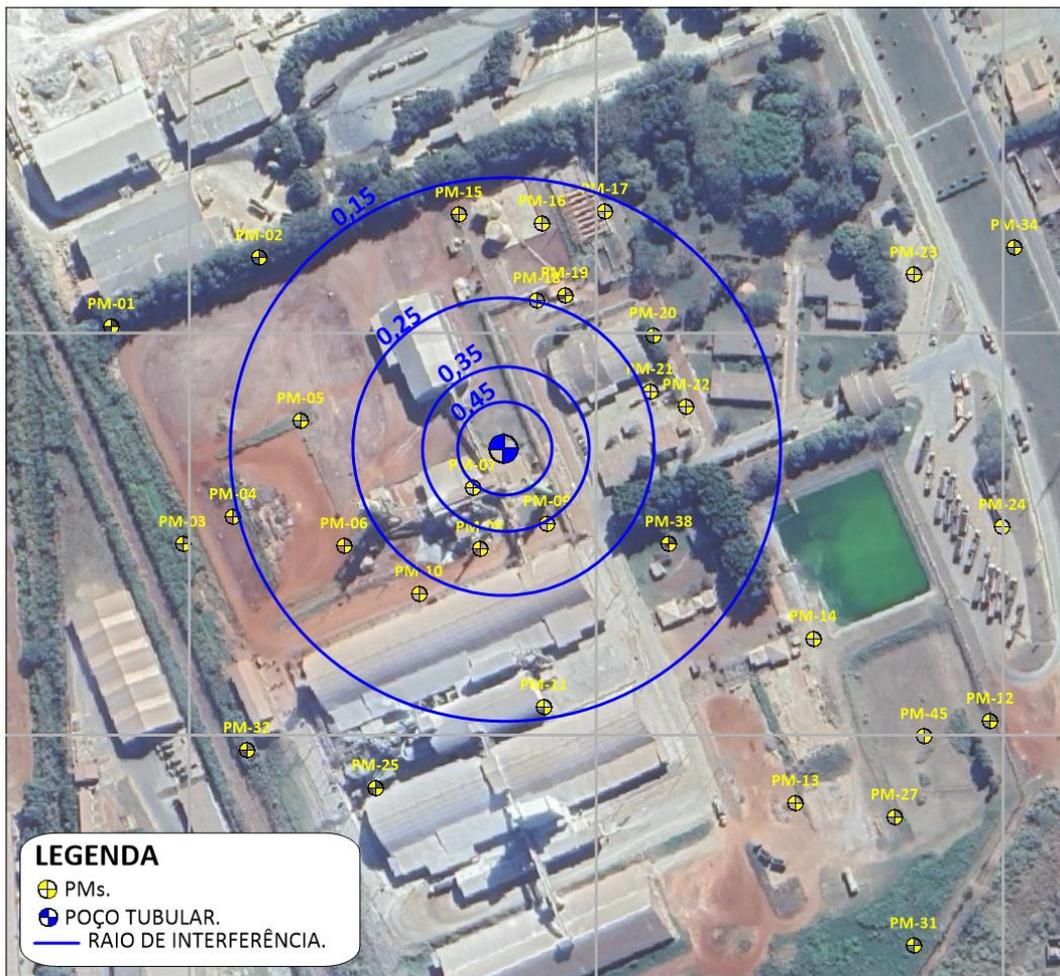


Figura 3. Raio de influência do teste de bombeamento

3. RESULTADOS GEOFÍSICOS

Os dados geofísicos adquiridos mostraram variações de resistividade de 1 a 1000 ohms.m, permitindo a diferenciação de zonas de baixa (1 a 30 ohms.m), intermediária (30 a 100 ohms.m) e alta resistividade (acima de 100 ohms.m). A baixa escala de resistividade observada pode ser influenciada pela presença de água subterrânea rasa, alta pluviosidade no momento da aquisição ou contaminação, fatores que aumentam a condutividade elétrica.

A interpretação das seções geofísicas permitiu identificar as seguintes feições:

- Camada insaturada superficial: Associada a altos valores de resistividade, acima do nível d'água, indicando solos não saturados, com influência na infiltração e retenção hídrica.

- Zona saturada: Caracterizada por baixos valores de resistividade abaixo do nível d'água, indicando aquíferos ou porções com maior concentração de elementos dissolvidos (contaminação).

- Zonas fraturadas: Apresentam valores de resistividade baixos a intermediários, podendo atuar como vias preferenciais para o fluxo de água subterrânea.

- Intertrap basáltico pouco fraturado: Associado a altos valores de resistividade em profundidade, com estrutura coesa e baixa permeabilidade. Esse litotipo se mostrou descontínuo lateralmente, permitindo conectividade entre os aquíferos rasos e profundos em alguns pontos.

A seção de eletrorresistividade apresentada na Figura 4 revela diferentes zonas hidrogeológicas na área estudada. A camada insaturada, caracterizada por altos valores de resistividade, indica solos não saturados na porção superior. Abaixo, zonas saturadas com baixa

resistividade sugerem a presença de água subterrânea. Possíveis zonas fraturadas foram identificadas, o que pode favorecer a circulação da água e indicando uma possível interconexão entre os aquíferos. Em profundidade, o intertrap basáltico pouco fraturado atua como uma barreira hidráulica, mas com descontinuidades que podem permitir comunicação entre aquíferos.

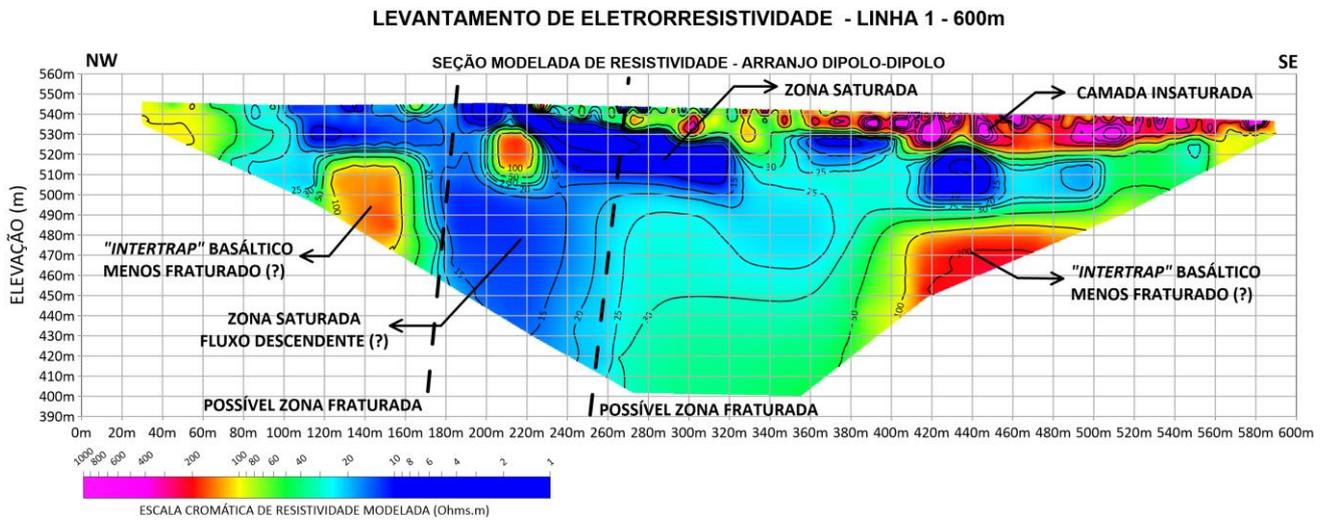


Figura 4. Seção de eletrorresistividade com suas respectivas interpretações.

As seções de resistividade foram comparadas com os níveis d'água dos poços de monitoramento para avaliar a correlação entre a distribuição de resistividades e a potenciomетria dos aquíferos. Observou-se uma transição de altos para baixos valores de resistividade próximo ao nível d'água, evidenciando boa correspondência com os dados hidrogeológicos. Poços com parâmetros hidroquímicos acima dos limites normativos foram destacados nas seções geofísicas, revelando possível relação entre essas inconformidades e zonas de baixa resistividade, sugerindo a presença de plumas de contaminação Figura 5.

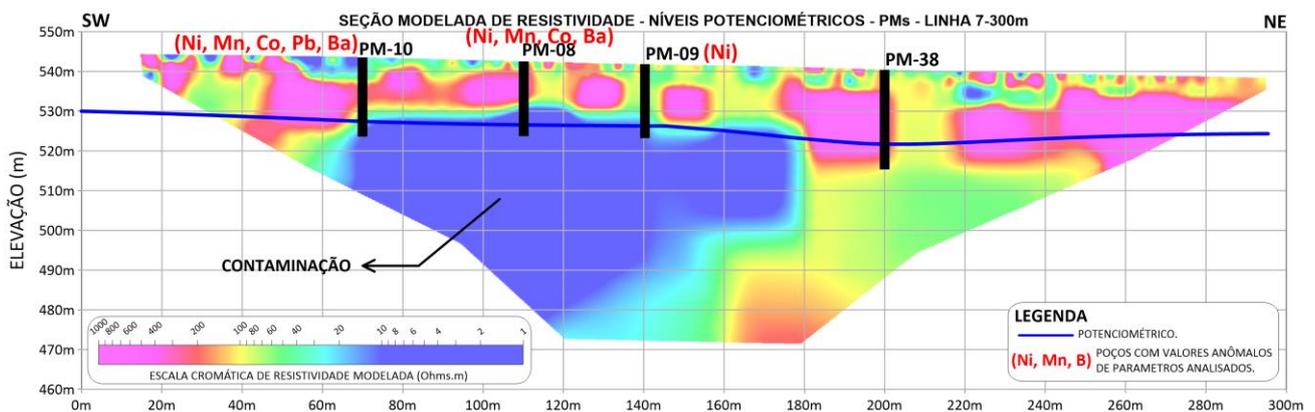


Figura 5. Seção de eletrorresistividade com poços de monitoramento.

Para aprimorar a visualização dos dados de resistividade, foi realizado um modelamento tridimensional (Figura 6), a partir do qual foram extraídas informações essenciais, como mapas de resistividade em planta para diferentes cotas topográficas e superfícies representando intervalos específicos de resistividade.

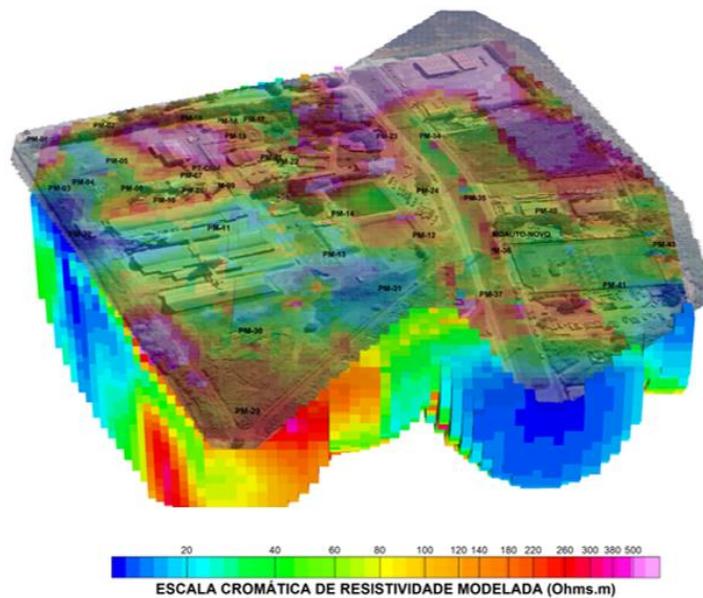


Figura 6. Modelo tridimensional das resistividades modeladas adquiridas na área de estudo.

A Figura 7 exibe o mapa em planta extraído do modelo tridimensional de resistividade, possibilitando a visualização das distribuições de resistividade. São observadas baixas resistividades a oeste, possivelmente associadas a uma fonte de contaminação e à conexão entre os aquíferos raso e profundo. Nas proximidades do poço tubular onde ocorre interação com os poços de monitoramento, os baixos valores de resistividade podem indicar a presença de zonas fraturadas e saturadas, fortalecendo a hipótese de interação entre os aquíferos.

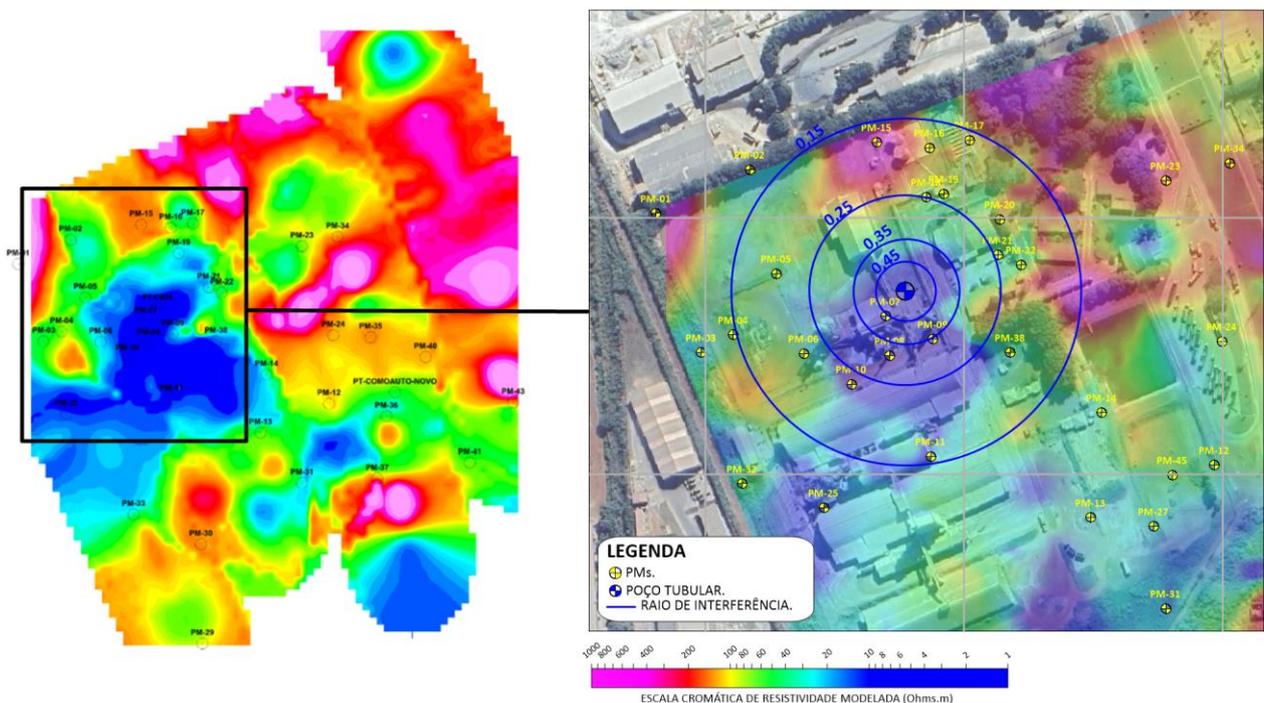


Figura 7. Mapa em planta de resistividade associados aos poços de monitoramento e poço tubular.

A Figura 8 exibe os baixos valores de resistividade tridimensionais, sugerindo áreas com possíveis contaminações, associadas a zonas fraturadas e saturadas, que podem facilitar a conexão entre os aquíferos raso e profundo.

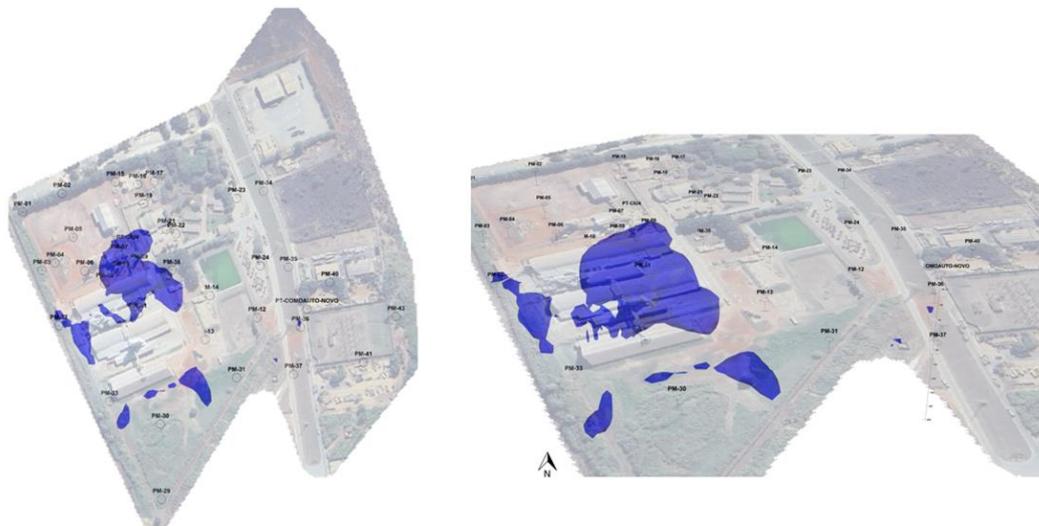


Figura 8. Visualização tridimensional dos baixos valores de resistividade na área de estudo.

4. CONCLUSÕES

A aplicação da eletrorresistividade demonstrou ser uma ferramenta eficaz para o mapeamento de plumas de contaminação, proporcionando informações detalhadas sobre a distribuição de resistividade no subsolo e facilitando a identificação de zonas impactadas por contaminação. A partir dos dados geofísicos adquiridos, foi possível distinguir diferentes zonas hidrogeológicas, incluindo camadas insaturadas, zonas saturadas, e zonas fraturadas que favorecem a mobilidade da água subterrânea. A correlação entre os dados de resistividade e os dados dos poços de monitoramento foi bem-sucedida, evidenciando a relação entre zonas de baixa resistividade e possíveis plumas de contaminação.

Essa abordagem geofísica pode ser de grande utilidade nos próximos passos de monitoramento e remediação, uma vez que permite a visualização das áreas mais afetadas, auxiliando na definição de estratégias mais eficazes para o controle da contaminação e a proteção dos aquíferos. A modelagem tridimensional proporcionou uma visão mais clara da extensão da possível contaminação e das interações entre os aquíferos, sendo um excelente suporte para o planejamento de ações de mitigação e recuperação ambiental.

REFERÊNCIAS

- CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (COPAM) E CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS (CERH). (2022). *Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH nº 8 de 21 de novembro de 2022 – Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*. 114 p.
- MILANI, E.J.; FRANÇA, A.B.; SCHNEIDER, R.L. (1994). *Bacia do Paraná*. Boletim de Geociências da PETROBRÁS, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 69-82, jan./mar.
- MILANI, E.J. (1997). *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental*. 2 v. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MILANI, E.J.; MELO, J.H.G.; SOUZA, P.A.; FERNANDES, L.A.; FRANÇA, A.B. (2007). *Bacia do Paraná*. Boletim de Geociências da PETROBRÁS, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287.
- TELFORD, W.M., GELDART, L.P., SHERIFF, R.E. (1990). *Applied Geophysics*. 2. ed. Cambridge University Press, 770 p.