

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DA DINÂMICA HÍDRICA SUBTERRÂNEA PARA ALTERNATIVA DE RECARGA DO AQUÍFERO DO BARREIRO

*Michelle Cintra Abud Mariano¹ ; Maurício de Assis Nicolau Bertachini²; Hildor Jose Seer³;
Robson Carlos Gomes⁴; Marcelo Henrique Silva de Oliveira⁵; Thaísa Isabel da Silva Dornelas
Cortes Inácio⁶; Daniel Perez Bertachini⁷; José Luiz de Souza Louzada⁸.*

Abstract: The study area is located in Araxá, Minas Gerais (Brazil), within the Barreiro Carbonatite Complex, an intrusive body of predominantly alkaline composition. The aquifer system is characterized as a porous-fractured type, influenced by fracture zones and hydrothermal alteration processes. In this context, electrical resistivity techniques, a fluorescent tracer test (Tinopal CBS-X), and numerical modeling using FEFLOW were applied. The results indicate hydraulic connectivity between well PA-01 and the Dona Beja Spring, with transit times ranging from 30 to 40 days, reinforcing the potential for implementing managed aquifer recharge as an alternative to the existing dam. The integration of geophysical methods, tracer testing, and modeling supports the development of sustainable water management strategies for the region.

Resumo: A área de estudo está localizada em Araxá (MG), inserida no Complexo Carbonatítico do Barreiro, um corpo intrusivo de composição predominantemente alcalina. O sistema aquífero é do tipo poroso-fraturado, influenciado por zonas de fraturamento e processos de alteração hidrotermal. Neste contexto, foram aplicadas técnicas de eletrorresistividade, ensaio com traçador fluorescente (Tinopal CBS-X) e modelagem numérica com FEFLOW. Os resultados indicam conectividade hidráulica entre o poço PA-01 e a Fonte Dona Beja, com tempos de trânsito entre 30 e 40 dias, reforçando o potencial de implantação de recarga gerenciada como alternativa à barragem existente. A integração dos métodos geofísicos, traçadores e modelagem subsidia estratégias de manejo hídrico sustentáveis para a região.

Palavras-Chave – Hidrogeologia; Geofísica, Traçador; Fonte Dona Beja; Recarga de aquífero.

1) Mosaic: Avenida Arafertil, 5000, Área Suburbana, Araxá-MG, 38180-000, (34)98817-7097, michelle.abud@mosaicco.com
2) MDGEO: R. Santa Bárbara, 162 - Sagrada Família, Belo Horizonte - MG, 31030-150, (31)99419-3228, mauricio@mdgeo.com.br
3) CEFET-MG: Av. Min. Olavo Drumond, 25, Araxá-MG, 38180-510, (34)98811-0178, hildorseer@cefetmg.br
4) Mosaic: Avenida Arafertil, 5000, Área Suburbana, Araxá-MG, 38180-000, (34) 98827-9964, robson.gomes@mosaicco.com
5) Mosaic: Avenida Arafertil, 5000, Área Suburbana, Araxá-MG, 38180-000, (13)99629-4834, marcelo.oliveira@mosaicco.com
6) Mosaic: Avenida Arafertil, 5000, Área Suburbana, Araxá-MG, 38180-000, (34) 99238-9445, thaisa.inacio@mosaicco.com
7) MDGEO: R. Santa Bárbara, 162 - Sagrada Família, Belo Horizonte - MG, 31030-150, (31)99219-0696, daniel@mdgeo.com.br
8) MDGEO: R. Santa Bárbara, 162 - Sagrada Família, Belo Horizonte - MG, 31030-150, (28)99985-7217, jose.louzada@mdgeo.com.br

1. INTRODUÇÃO

A Fonte Dona Beja, importante atrativo histórico e turísticos de Araxá (MG), está inserida no Complexo Carbonatítico do Barreiro, uma intrusão alcalina composta principalmente por rochas carbonatíticas, alojada em quartzitos e filitos neoproterozóicos e circundada por zonas de alteração hidrotermal. O aquífero local, de natureza poroso-fraturada, tem seu fluxo subterrâneo condicionado por alteritos de profundidade variável, influenciados por fraturas, falhas e contatos litológicos.

A região foi impactada pela atividade mineradora pelo rebaixamento do aquífero, que foi mitigado com construção de barragens à montante. Nesse contexto, compreender a conectividade hidráulica e os tempos de trânsito entre as zonas de recarga e exutórios naturais, como a Fonte Dona Beja, é essencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

O estudo propõe a recarga artificial como alternativa mais eficiente e segura em comparação aos métodos tradicionais, como barragens.

Foram utilizados métodos geofísicos para mapear zonas favoráveis à infiltração (fraturas) e materiais alterados, auxiliando na identificação de áreas aquíferas e direções de fluxo.

O uso de traçadores é uma ferramenta consagrada em estudos hidrológicos e hidrogeológicos, especialmente para a identificação de conexões entre diferentes pontos de entrada e saída de sistemas subterrâneos. A técnica é amplamente empregada em aquíferos cársticos, porosos e fissurais, permitindo a avaliação de trajetórias de fluxo, áreas de seção transversal, volumes de condutos e parâmetros relacionados ao transporte de contaminantes. A análise da variação da concentração do traçador ao longo do tempo também fornece informações relevantes sobre a estrutura interna do meio subterrâneo.

O traçador corante *Tinopal CBS-X* foi empregado neste estudo, devido às suas propriedades físico-químicas favoráveis e à baixa visibilidade em concentrações reduzidas, característica importante considerando a proximidade da área de estudo com regiões turísticas.

Simulação numérica no modelo hidrogeológico (*Feflow*) foram realizadas para avaliar a variação das cargas hidráulicas e a interferência na disponibilidade hídrica local, com a inserção de poços para recarga artificial, que foi possível validar que houve o acréscimo de vazão da Fonte Dona Beja, principal nascente na área e condicionante ambiental da empresa.

O estudo sugere a recarga artificial por meio de infiltração utilizando-se um poço piloto, visando aumentar a vazão da Fonte Dona Beja e reduzir os impactos do rebaixamento causado pela mineração com o objetivo de ser uma alternativa à barragem e reduzir os impactos ambientais decorrentes do rebaixamento da lavra. Essa abordagem, conforme Dillon (2005), é uma ferramenta eficaz na gestão de aquíferos, oferecendo uma alternativa mais sustentável às barragens.

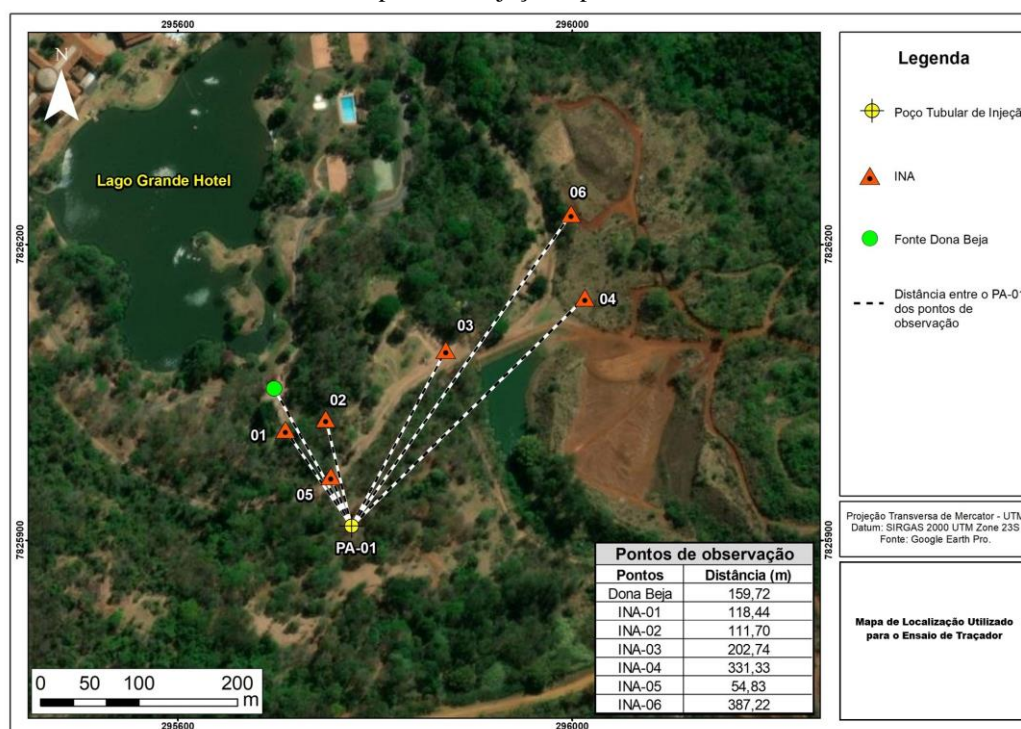
2. MATERIAIS E MÉTODOS

O método geofísico utilizado foi o de eletrorresistividade (RES), técnica de campo de Caminhamento Elétrico (CE) cujo arranjo dos eletrodos foi o Dipolo-Dipolo (DDP), sendo realizadas 14 linhas de caminhamento elétrico, totalizando aproximadamente 8.500 metros.

E para melhor avaliação da dinâmica hídrica, foi realizado o estudo com traçadores. O traçador utilizado foi o corante Tinopal CBS-X, escolhido por ser quase incolor em baixas concentrações, uma consideração importante devido à proximidade de áreas turísticas. Para a injeção, a solução resultante foi injetada no poço PA-01 com o auxílio de uma mangueira, abrangendo toda a zona saturada do poço para garantir a distribuição do traçador na seção do aquífero.

O monitoramento da presença do traçador foi realizado em sete campanhas com periodicidade aproximadamente semanal. Foram monitorados os INA's e a Fonte Dona Beja (Figura 1). O método de análise empregado foi quantitativo, com coleta de amostras de água e carvão ativado granular nos pontos de monitoramento. Os resultados das análises das amostras de água e carvão ativado ao longo das sete campanhas permitiram avaliar a presença e a evolução do traçador nos diferentes pontos de monitoramento.

Figura 1: Mapa de localização indicando o ponto de injeção (PA-01) e os pontos de monitoramento com indicativo das distâncias entre o ponto de injeção e pontos de monitoramento.



E para melhor avaliação da dinâmica e previsão de como poderia se comportar a alternativa de recarga, foi construído o modelo hidrogeológico numérico desenvolvido para a área do Barreiro foi submetido a um processo de calibração e validação rigoroso usando o software Feflow. Os resultados alcançados refletem a robustez e aplicabilidade do modelo nas decisões de gestão hídrica da região, com destaque para os seguintes aspectos:

A validação independente do modelo confirmou sua capacidade de prever de forma precisa as condições hidrogeológicas sob diferentes cenários operacionais. Isso foi crucial para estabelecer a confiança nas simulações futuras e nas decisões baseadas nestas projeções.

Foi realizada uma análise de sensibilidade que identificou os parâmetros mais influentes nas previsões do modelo. Esta análise ajudou a entender as incertezas associadas aos resultados e a ajustar os parâmetros de entrada para melhorar a precisão das simulações.

Os parâmetros hidráulicos, como condutividade e porosidade, foram ajustados com base em extensivos dados de campo e técnicas de otimização. Esses ajustes foram essenciais para alinhar o modelo com as condições reais observadas durante os períodos de monitoramento.

Os dados de monitoramento, incluindo níveis de água e vazões, foram essenciais para calibrar o modelo em regimes permanente e transiente. Essa correlação direta com dados reais garantiu que o modelo refletisse de maneira confiável as condições hidrogeológicas do Barreiro.

Para a simulação, foi adotada a configuração de Cava Final da mina do Barreiro e a injeção de água pelo poço PA-01. Os resultados da calibração indicam que o modelo pode ser uma ferramenta valiosa na gestão de recursos hídricos, especialmente em áreas afetadas pela mineração. As simulações podem ajudar a prever os impactos de diferentes estratégias de manejo, fornecendo uma base para decisões informadas e sustentáveis.

Utilizando o modelo calibrado, foram realizadas projeções para diversos cenários de uso da água e mudanças climáticas. Essas projeções são fundamentais para planejar intervenções futuras e para a elaboração de políticas de gestão adaptativa dos recursos hídricos da região.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os perfis de Eletorresistividade permitiram a verificação de anomalias em profundidades de até 120 metros, aproximadamente. Os dados levantados foram consistentes na diferenciação das anomalias de resistividades altas, baixas e intermediárias. As análises das seções geofísicas consideraram a diferenciação dos perfis em virtude da sua magnitude em Zonas de Alta Resistividade (ZAR), Zonas de Baixa Resistividade (ZBR), e Zonas de Resistividade Intermediária (ZIR).

As seções de Eletorresistividade apresentaram similaridades em relação à disposição das zonas de resistividade. Em diferentes seções, foi possível a delimitação de três pacotes geofísicos principais e distintos em virtude da magnitude e concentração dos valores de resistividade.

A primeira porção (identificada como 1 na Figura 2), superficial, pode estar relacionada a material inconsolidado proveniente do processo pedogenético das rochas, material disseminado e inserido antropicamente no local, assim como área de aterro. Pela literatura geofísica, sabe-se que material inconsolidado e/ou solos apresentam valores heterogêneos de resistividade com tendência resistiva, principalmente quando os poros estão preenchidos por ar, o que corrobora, portanto, com as interpretações acima descritas.

O segundo pacote (identificado como 2 na Figura 2), intermediário, apresentou-se, em geral, mais espesso que o anterior, sendo formado essencialmente por valores de baixa resistividade (ZBR) e valores intermediários (ZIR). Os valores de baixa resistividade aparente podem estar relacionados a rochas/materiais com maior grau de alteração e/ou com preenchimento por água, o que configura possíveis zonas aquíferas rasas. Tais regiões podem ser influenciadas por descontinuidades que favorecem a percolação de água.

O último pacote (identificado como 3 na Figura 2), mais profundo, apresentou tendência de valores de resistividade mais elevados. Tal fato pode estar relacionado à presença de rochas do embasamento, com menor grau de alteração/fraturamento.

Através de marcações associadas a possíveis regiões fraturadas nas seções de eletrorresistividade, foi possível sugerir possíveis alinhamentos estruturais a partir de feições correlacionadas a fraturamentos e identificadas nas seções geofísicas paralelamente dispostas. Tais alinhamentos mostraram-se coincidentes com a tendência estrutural regional obtida a partir de análise bibliográfica regional preliminar e dados estruturais locais (i.e. direções NW-SE e NE-SW). As interseções de alguns alinhamentos interpretados, a partir de perfis geofísicos adquiridos e dispostos ortogonalmente entre si correspondem a locais de destaque para zonas de maior faturamento associado (Figura 3 e 4).

Figura 2: Identificação de horizontes geofísicos a partir da seção geofísica de Eletrorresistividade

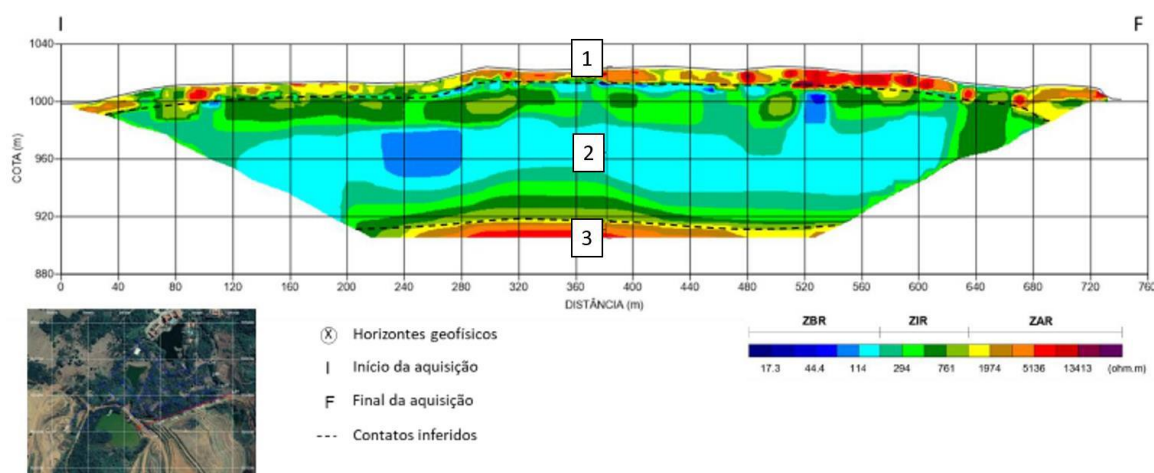
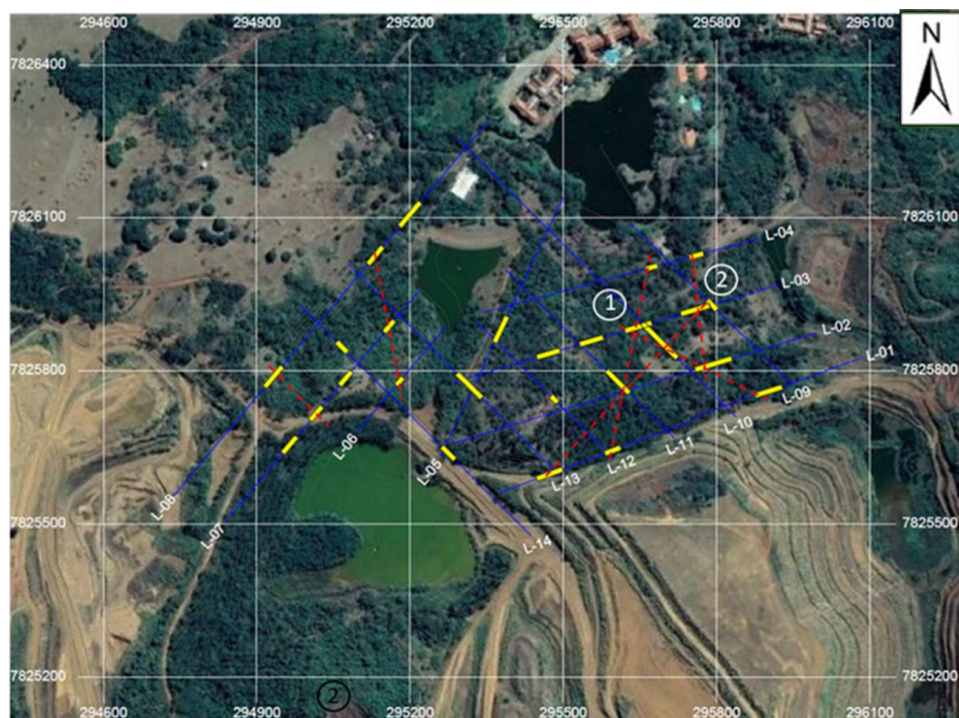


Figura 3: Mapa com identificação de feições associadas a fraturamentos a partir dos dados geofísicos.



LEGENDA

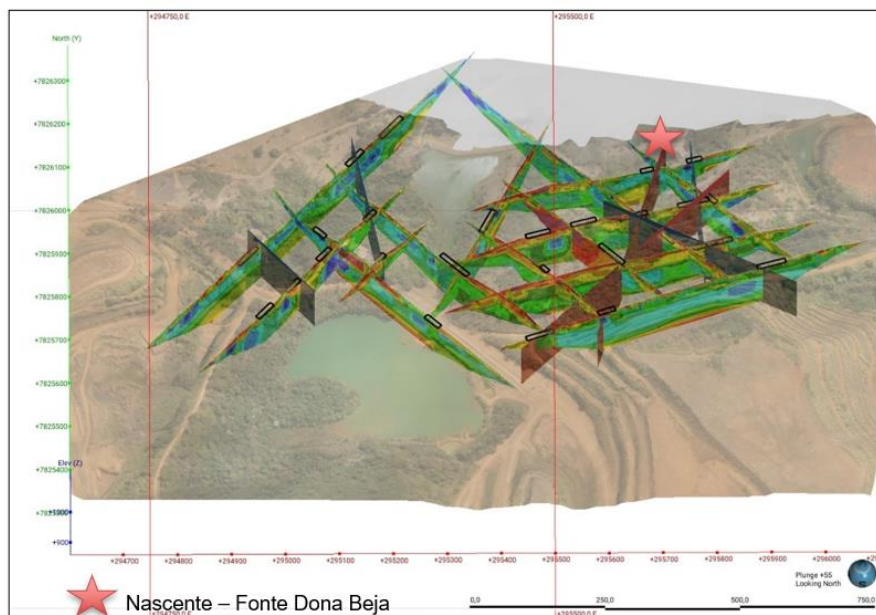
— Linhas geofísicas executadas

— Projeção na superfície de região com probabilidade de zonas fraturadas

--- Possíveis trends estruturais

⊗ Regiões de interseção

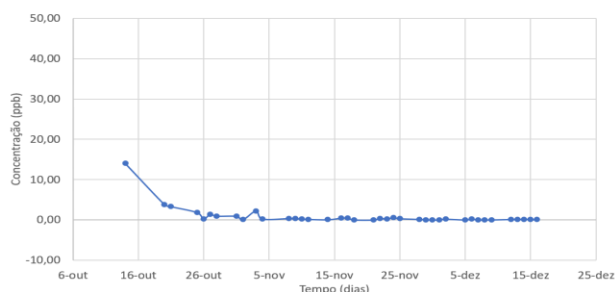
Figura 4: Estruturas de fraturamento juntamente com as seções geofísicas executadas.



Na Fonte Dona Beja as amostras de água consistentemente apresentaram baixa concentração de Tinopal (Figura 5). Devido à coleta manual e não contínua, a presença do traçador na água não foi registrada. O valor de background na água foi relativamente elevado, possivelmente devido a erros na coleta, mas isso não comprometeu as interpretações devido aos baixos valores posteriores e ao monitoramento com carvão ativado. Nenhuma amostra de água apresentou concentração superior a 3 ppb, contrastando com os 500 ppb observados no teste de bancada como tendo coloração translúcida. As amostras de carvão indicaram a presença do traçador em 18 de novembro, com concentrações 32 vezes maiores que o background de 14 de outubro (Figura 6). Este foi o pico de concentração, indicando a chegada do traçador aproximadamente 28 dias após o lançamento, com um trânsito total de 37 dias e velocidade média de 4 m/dia. Em 9 de dezembro, a pluma de Tinopal estava quase dissipada, com valores próximos ao background.

Figura 5: Resultados de amostras de água da fonte Dona Beja.

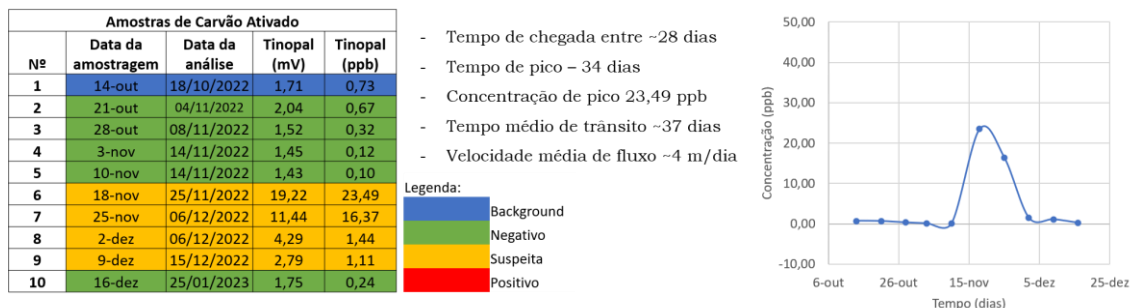
Amostras de Água					
Nº	Data da amostragem	Data da análise	Condutividade elétrica	pH	Tinopal (ppb)
1	14-out	18/10/2022	200,50	7,68	14,05
2	20-out	04/11/2022	197,20	7,42	3,85
3	21-out	05/11/2022	227,50	7,34	2,50
4	25-out	04/11/2022	199,00	7,57	1,69
5	26-out	08/11/2022	199,50	7,52	0,65
6	27-out	08/11/2022	198,30	7,61	1,35
7	28-out	08/11/2022	197,70	7,63	1,04
8	31-out	08/11/2022	198,10	7,66	1,05
9	1-nov	14/11/2022	197,10	7,18	0,53
10	3-nov	14/11/2022	203,90	7,24	1,85
11	4-nov	14/11/2022	195,80	7,18	0,63
12	8-nov	14/11/2022	195,90	7,20	0,71
13	9-nov	14/11/2022	193,50	7,23	0,71
14	10-nov	14/11/2022	194,90	7,25	0,61
15	11-nov	14/11/2022	195,10	7,32	0,57
16	14-nov	25/11/2022	198,60	6,90	0,50
17	16-nov	25/11/2022	201,60	7,03	0,76
18	17-nov	25/11/2022	200,80	7,24	0,77
19	18-nov	25/11/2022	196,80	7,28	0,43
20	21-nov	25/11/2022	199,10	7,25	0,42
21	22-nov	06/12/2022	199,10	6,79	0,72
22	23-nov	06/12/2022	198,30	6,94	0,64
23	24-nov	06/12/2022	198,30	7,09	0,83
24	25-nov	06/12/2022	195,60	7,15	0,69
25	28-nov	06/12/2022	207,90	7,03	0,54
26	29-nov	06/12/2022	198,80	7,07	0,48
27	30-nov	06/12/2022	197,10	7,21	0,44
28	1-dez	06/12/2022	195,80	7,29	0,44
29	2-dez	06/12/2022	197,50	7,33	0,61
30	5-dez	15/12/2022	197,70	6,92	0,45
31	6-dez	15/12/2022	197,40	7,10	0,60
32	7-dez	15/12/2022	196,60	7,18	0,35
33	8-dez	15/12/2022	198,50	7,31	0,30
34	9-dez	15/12/2022	195,00	7,31	0,38
35	12-dez	25/01/2023	199,50	6,68	0,20
36	13-dez	25/01/2023	192,30	6,95	0,33
37	14-dez	25/01/2023	196,20	7,02	0,28
38	15-dez	25/01/2023	189,10	7,16	0,04
39	16-dez	25/01/2023	192,60	7,28	0,01



- CE média = 0,87 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- pH média = 7,22
- Concentração Do Tinopal média = 0,87



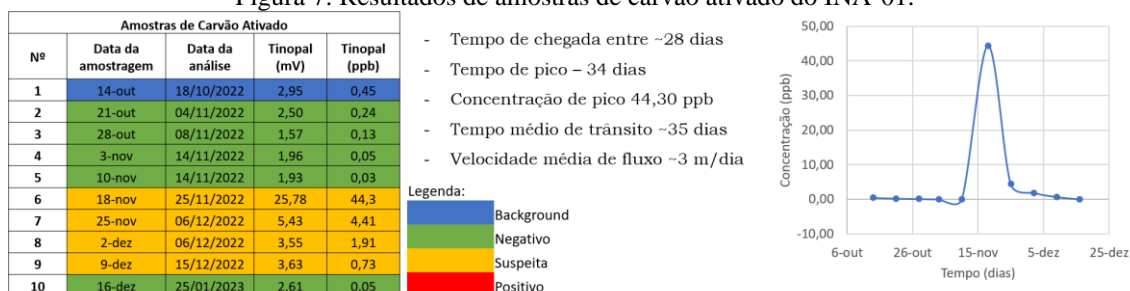
Figura 6: Resultados de amostras de carvão ativado da fonte Dona Beja.



No INA 01 as amostras de carvão mostraram a presença do traçador em 18 de novembro, com concentrações 98 vezes maiores que o background de 14 de outubro. O pico de concentração ocorreu cerca de 28 dias após a injeção, com um trânsito total de 34 dias e velocidade média de 3 m/dia. Em 9 de dezembro, a pluma já estava quase dissipada (

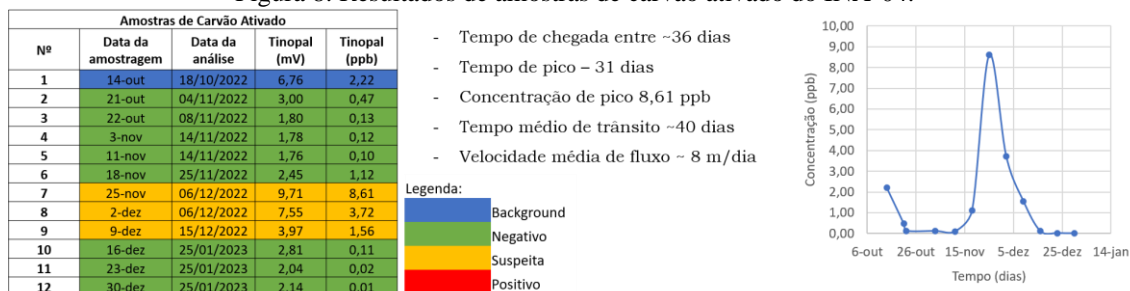
Figura 7).

Figura 7: Resultados de amostras de carvão ativado do INA-01.



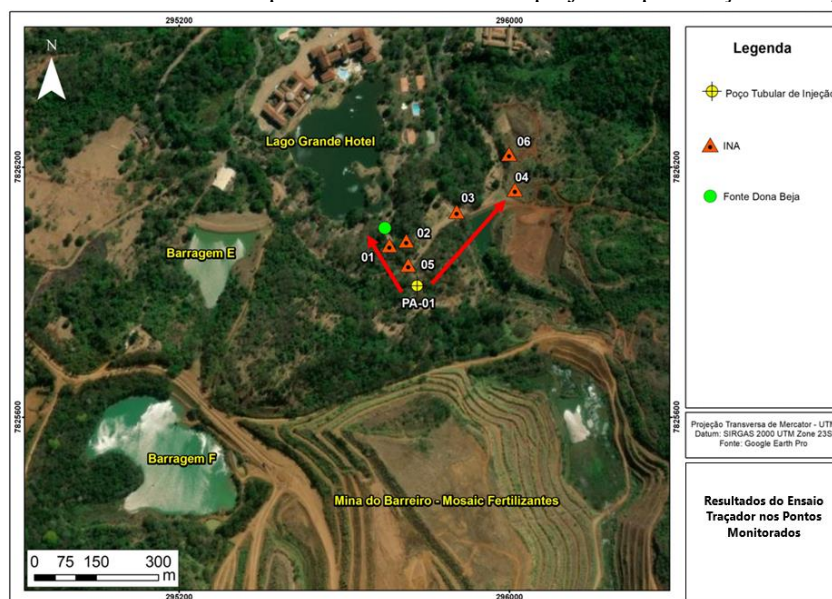
No INA 04 o traçador foi detectado nas amostras de carvão em 25 de novembro, com concentrações 4 vezes maiores que o background. O pico de concentração ocorreu cerca de 36 dias após a injeção, com um trânsito total de 40 dias e velocidade média de 8 m/dia. Em 9 de dezembro, a pluma estava dissipada (Figura 8). Diferentemente dos outros pontos (a noroeste do ponto de injeção), este ponto está localizado a nordeste. A maior velocidade e menor concentração relativa de Tinopal podem indicar uma região mais fraturada e com maior recarga.

Figura 8: Resultados de amostras de carvão ativado do INA-04.



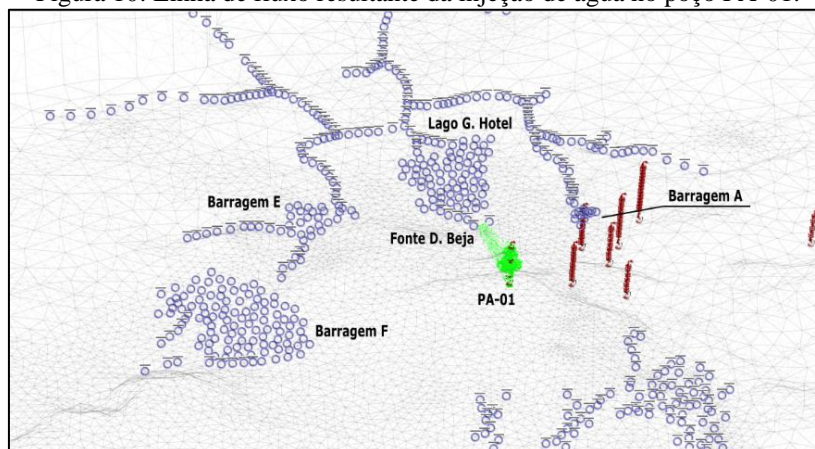
As análises dos resultados permitiram indicar conexões de fluxo entre todos os pontos monitorados (Figura 9). O sentido principal de fluxo foi para noroeste, indicado pelas maiores concentrações relativas encontradas. Observou-se também um fluxo de maior velocidade para nordeste, sugerindo maior potencial de recarga ou uma região mais fraturada. O trabalho demonstrou excelentes resultados, indicando uma conexão de aproximadamente 30 dias entre o ponto de injeção e os pontos de monitoramento. A unidade aquífera porosa exibe um fluxo disperso ligando todos os pontos, com velocidade aparente de cerca de 3 m/dia para noroeste e maior velocidade para nordeste.

Figura 9: Mapa indicando sentido de fluxo para noroeste e nordeste projetado pelo traçador aos pontos monitorados.



A Figura 10 mostra o resultado da inserção numérica do poço no modelo hidrogeológico, é possível observar a trajetória do fluxo da água injetada (linha verde) até atingir a Fonte Dona Beja.

Figura 10: Linha de fluxo resultante da injeção de água no poço PA-01.



CONCLUSÕES

O principal objetivo dos levantamentos geofísicos pelo método da Eletrorresistividade no atual trabalho foi atendido ao detectar feições/aspectos correlacionáveis a possíveis fraturamentos/falhas, aliados a informações litoestruturais retiradas da bibliografia regional/local, que sugerem porções com maior concentração de feições associadas a uma porosidade secundária das rochas e, portanto, possíveis regiões aquíferas.

O método de traçadores foi altamente efetivo na caracterização hidrogeológica, especialmente por sua capacidade de revelar informações diretas sobre o fluxo subterrâneo. Ele permitiu identificar conexões hidráulicas entre diferentes pontos do sistema aquífero, determinar velocidades de escoamento, direções de fluxo e tempos de trânsito da água. O ensaio permitiu caracterizar a conectividade hidráulica e a dinâmica do fluxo subterrâneo na região da Fonte Dona Beja, no aquífero Barreiro. Os resultados apontam para a existência de caminhos preferenciais de fluxo e tempos de trânsito compatíveis com aquíferos porosos, reforçando a importância de estratégias de monitoramento e gestão integrada. A identificação de conexão direta com a Fonte Dona Beja evidencia o potencial para ações de recarga gerenciada de aquíferos como medida de proteção hídrica e manutenção de vazões.

Foi possível correlacionar o estudo traçador com o levantamento geofísico, uma vez, que a unidade aquífera porosa exibe um fluxo disperso ligando todos os pontos monitorados, com velocidade aparente para noroeste de aproximadamente de 3m/dia, e velocidade maior para nordeste 8 m/dia. O que indica realmente um fraturamento intenso e preferencial (NW-SE e NE-SW) como evidenciado no levantamento geofísico.

Os resultados da simulação numérica indicaram que a injeção de 30 m³/h no poço PA-01 é eficiente para mitigar os impactos do rebaixamento causado pela mina do Barreiro. A simulação mostrou um aumento de vazão de aproximadamente 15 m³/h após a estabilização, demonstrando a viabilidade dessa solução como um sistema alternativo de recarga do aquífero do Barreiro que possibilite a descaracterização da barragem.

REFERÊNCIAS

Beato, D. A. C., Viana, H. S., & Davis, E. G. (2000). *Avaliação e Diagnóstico Hidrogeológico Dos Aquíferos De Águas Minerais Do Barreiro Do Araxá, Mg - Brasil*. Águas Subterrâneas. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24323>.

Dillon, P. (2005). *Future Management of Aquifer Recharge*. In Hydrogeol Journal. [S.l.].

Raposo, D. B. (2011) *Caracterização do aquífero associado ao Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, Oeste de Minas Gerais*. UNICAMP. Campinas.