

AVALIAÇÃO DA DINÂMICA HÍDRICA SUBTERRÂNEA DA FONTE DONA BEJA (MG) POR MEIO DE ENSAIO COM TRAÇADOR

José Luiz de Souza Louzada¹, Daniel Perez Bertachini², Maurício de Assis Nicolau Bertachini³, Michele Cintra Abud Mariano⁴, Luiz Gustavo Moraes de Macedo⁵, Rafael Coutinho Soares⁶

Resumo – A região da fonte Dona Beja, importante nascente localizada no município de Araxá (MG), está inserida no contexto do Complexo Carbonatítico do Barreiro, um corpo intrusivo com composição predominantemente alcalina, onde predominam rochas carbonatíticas e filitos. Este ambiente apresenta um sistema aquífero poroso-fraturado, com compartimentações estruturais que influenciam fortemente os processos de recarga e descarga. Estudos anteriores (Beato et al., 2000; Raposo & Pereira, 2013; Silva et al., 2015) destacam a importância das zonas de fraturamento e os processos de alteração e lixiviação com desenvolvimento de alteritos de diferentes profundidades como principais controladores do fluxo subterrâneo e da conectividade entre unidades hidroestratigráficas. A Fonte Dona Beja, situada em zona de descarga, é um importante exutório natural deste sistema, cuja dinâmica de fluxo subterrâneo ainda é objeto de investigação. Neste contexto, foi conduzido um ensaio com traçador fluorescente com o objetivo de avaliar a conectividade hidráulica entre os poços de monitoramento e a nascente, bem como obter informações sobre os padrões de fluxo e tempos de trânsito. Os resultados obtidos contribuem para o entendimento da dinâmica hídrica local, e indicam potencial para o desenvolvimento de estratégias de recarga gerenciada de aquíferos visando a manutenção das vazões da fonte e a conservação do sistema aquífero associado.

Palavras-Chave – Hidrogeologia, traçador, carbonatito, Fonte Dona Beja, recarga de aquífero.

Abstract – The region of the Dona Beja Source, an important spring located in Araxá (MG), is part of the Barreiro Carbonatite Complex, a fractured-porous aquifer system composed of carbonatitic and phyllitic rocks. The region features structural compartmentalization that controls subsurface flow and groundwater recharge-discharge processes. Previous studies (Beato et al., 2000; Raposo & Pereira, 2013; Silva et al., 2015; Oliveira et al., 2020) emphasize the role of fault zones, weathering and leaching processes and the development of lateritic profiles at different depths as major controls of flow and connectivity between hydrostratigraphic units. The Dona Beja Spring, located in a discharge area, is a key hydraulic outlet of this system. A tracer test was carried out to assess the hydraulic connectivity between monitoring wells and the spring. The results support a better understanding of the local groundwater dynamics and reinforce the potential for managed aquifer recharge strategies to ensure spring sustainability.

Key Words – Hydrogeology, tracer, carbonatite, Dona Beja Source, aquifer recharge.

¹ Geólogo, MDGEO Hidrogeologia e Meio Ambiente, 28999857217, jose.louzada@mdgeo.com.br

² Geólogo, MSc, MDGEO Hidrogeologia e Meio Ambiente, 3192190696, daniel@mdgeo.com.br

³ Geólogo, MSc, MDGEO Hidrogeologia e Meio Ambiente, 3194193228, mauricio@mdgeo.com.br

⁴ Engenheira de Minas, MOSAIC, 3488177097, michelle.abud@mosaicco.com

⁵ Geólogo, MOSAIC, 34998145107, luizgustavo.macedo@mosaicco.com

⁶ Geólogo, MDGEO Hidrogeologia e Meio Ambiente, 28999523882, rafael.coutinho@mdgeo.com.br

1. INTRODUÇÃO

A Fonte Dona Beja, importante nascente em termos históricos e turísticos, localizada em Araxá (MG), está inserida no Complexo Carbonatítico do Barreiro, uma intrusão alcalina composta predominantemente por rochas carbonatíticas, com ocorrência de filitos e zonas de alteração hidrotermal. O sistema aquífero local caracteriza-se como poroso-fraturado, com fluxo subterrâneo fortemente condicionado pelo desenvolvimento de alteritos com grande variação de profundidade, cujo desenvolvimento foi controlado por fraturas, falhas e contatos litológicos. Nesse contexto, compreender a conectividade hidráulica e os tempos de trânsito entre pontos de recarga e exutórios naturais, como a Fonte Dona Beja, é essencial para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

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.

Neste estudo, optou-se pelo uso do traçador corante Tinopal CBS-X 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. Os dados obtidos contribuem para a compreensão do comportamento hidrogeológico local e podem subsidiar futuras ações de monitoramento e manejo ambiental na região da Fonte Dona Beja, importante descarga do Aquífero Barreiro.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

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, 3 kg de Tinopal foram diluídos em 200 litros de água, sendo a solução resultante injetada no poço PA-01 em 14 de outubro de 2022. A injeção foi realizada com o auxílio de uma mangueira, abrangendo toda a zona saturada do poço para garantir a distribuição do traçador na seção do aquífero. Após a injeção, água foi bombeada para o poço utilizando um caminhão pipa.

O monitoramento da presença do traçador foi realizado em sete campanhas com periodicidade aproximadamente semanal. Foram monitorados os INA's 01, 02, 04 e 05, 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. O carvão ativado, acondicionado em material de alta porosidade (meia calça), foi inserido nos instrumentos e na nascente para adsorver o traçador ao longo do tempo. Na nascente da Beja, também foram realizadas coletas esporádicas de água. Amostras de água nos poços e INA's foram coletadas após purga com um bailler individualizado para cada ponto. As amostras foram armazenadas em recipientes escuros para evitar a degradação do traçador pela luz.

Para a análise laboratorial, foi utilizado um fluorímetro Turner GGUN-FL30 modelo 1650 – Schnegg. Para garantir a confiabilidade das análises, foi realizado um teste de bancada para avaliação do Tinopal CBS-X e calibração do equipamento. Uma amostra do traçador foi diluída em água ultrapura para produzir soluções de diferentes concentrações, que foram analisadas no fluorímetro. O processo de calibração identificou valores com erros mínimos para padrões de 60 ppb, 175 ppb e 500 ppb, dentro da precisão do equipamento (1 a 1000 ppb).

O carvão ativado coletado em campo foi seco em estufa a aproximadamente 200°C e tratado com hidróxido de potássio a 5% em álcool para liberar o traçador adsorvido. A solução resultante desse processo foi então analisada no fluorímetro Turner. 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.

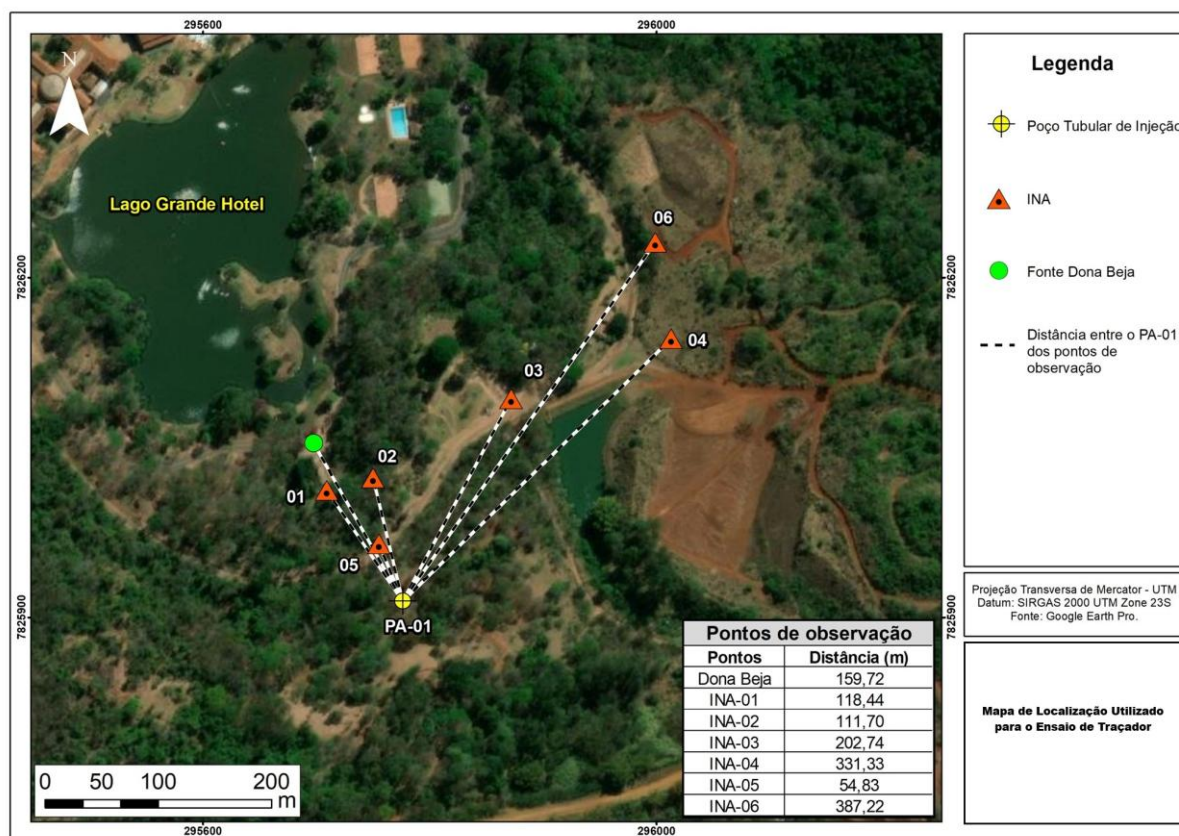
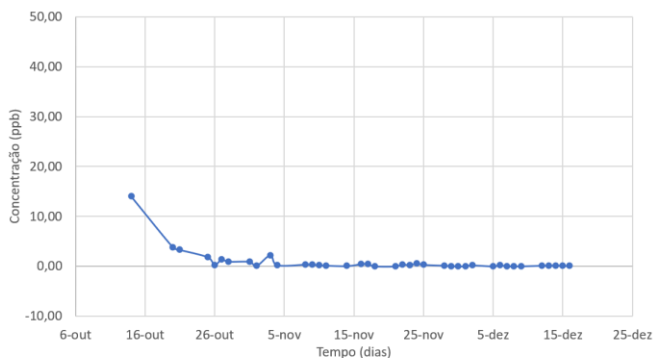


Figura 1: Mapa de localização indicando o ponto de injeção (PA-01) e os pontos de monitoramento com indicativo das distâncias entre o ponto de injeção e pontos de monitoramento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Fonte Dona Beja as amostras de água consistentemente apresentaram baixa concentração de Tinopal (Figura 2). 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 3). 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.

Amostras de Água						
Nº	Data da amostragem	Data da análise	Condutividade elétrica	pH	Tinopal (mV)	Tinopal (ppb)
1	14-out	18/10/2022	200,50	7,68	2,65	14,05
2	20-out	04/11/2022	197,20	7,42	2,82	3,85
3	21-out	05/11/2022	227,50	7,34	2,50	3,32
4	25-out	04/11/2022	199,00	7,57	1,69	1,85
5	26-out	08/11/2022	199,50	7,52	0,65	0,27
6	27-out	08/11/2022	198,30	7,61	1,35	1,40
7	28-out	08/11/2022	197,70	7,63	1,04	0,95
8	31-out	08/11/2022	198,10	7,66	1,05	0,92
9	1-nov	14/11/2022	197,10	7,18	0,53	0,07
10	3-nov	14/11/2022	203,90	7,24	1,85	2,22
11	4-nov	14/11/2022	195,80	7,18	0,63	0,24
12	8-nov	14/11/2022	195,90	7,20	0,71	0,36
13	9-nov	14/11/2022	193,50	7,23	0,71	0,37
14	10-nov	14/11/2022	194,90	7,25	0,61	0,21
15	11-nov	14/11/2022	195,10	7,32	0,57	0,15
16	14-nov	25/11/2022	198,60	6,90	0,50	0,06
17	16-nov	25/11/2022	201,60	7,03	0,76	0,44
18	17-nov	25/11/2022	200,80	7,24	0,77	0,45
19	18-nov	25/11/2022	196,80	7,28	0,43	0,01
20	21-nov	25/11/2022	199,10	7,25	0,42	0,00
21	22-nov	06/12/2022	199,10	6,79	0,72	0,38
22	23-nov	06/12/2022	198,30	6,94	0,64	0,26
23	24-nov	06/12/2022	198,30	7,09	0,83	0,57
24	25-nov	06/12/2022	195,60	7,15	0,69	0,32
25	28-nov	06/12/2022	207,90	7,03	0,54	0,14
26	29-nov	06/12/2022	198,80	7,07	0,48	0,03
27	30-nov	06/12/2022	197,10	7,21	0,44	0,01
28	1-dez	06/12/2022	195,80	7,29	0,44	0,01
29	2-dez	06/12/2022	197,50	7,33	0,61	0,20
30	5-dez	15/12/2022	197,70	6,92	0,45	0,01
31	6-dez	15/12/2022	197,40	7,10	0,60	0,18
32	7-dez	15/12/2022	196,60	7,18	0,35	0,02
33	8-dez	15/12/2022	198,50	7,31	0,30	0,02
34	9-dez	15/12/2022	195,00	7,31	0,38	0,02
35	12-dez	25/01/2023	199,50	6,68	0,20	0,13
36	13-dez	25/01/2023	192,30	6,95	0,33	0,11
37	14-dez	25/01/2023	196,20	7,02	0,28	0,16
38	15-dez	25/01/2023	189,10	7,16	0,04	0,09
39	16-dez	25/01/2023	192,60	7,28	0,01	0,06



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



Figura 2: Resultados de amostras de água da fonte Dona Beja.

Amostras de Carvão Ativado				
Nº	Data da amostragem	Data da análise	Tinopal (mV)	Tinopal (ppb)
1	14-out	18/10/2022	1,71	0,73
2	21-out	04/11/2022	2,04	0,67
3	28-out	08/11/2022	1,52	0,32
4	3-nov	14/11/2022	1,45	0,12
5	10-nov	14/11/2022	1,43	0,10
6	18-nov	25/11/2022	19,22	23,49
7	25-nov	06/12/2022	11,44	16,37
8	2-dez	06/12/2022	4,29	1,44
9	9-dez	15/12/2022	2,79	1,11
10	16-dez	25/01/2023	1,75	0,24

- Tempo de chegada entre ~28 dias
- Tempo de pico ~ 34 dias
- Concentração de pico 23,49 ppb
- Tempo médio de trânsito ~37 dias
- Velocidade média de fluxo ~4 m/dia

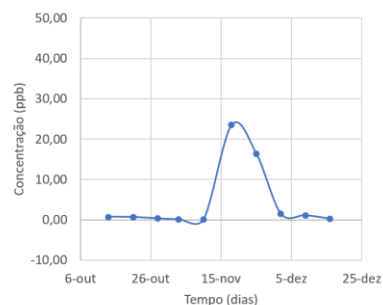


Figura 3: Resultados de amostras de carvão ativado da fonte Dona Beja.

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 4).

Amostras de Carvão Ativado				
Nº	Data da amostragem	Data da análise	Tinopal (mV)	Tinopal (ppb)
1	14-out	18/10/2022	2,95	0,45
2	21-out	04/11/2022	2,50	0,24
3	28-out	08/11/2022	1,57	0,13
4	3-nov	14/11/2022	1,96	0,05
5	10-nov	14/11/2022	1,93	0,03
6	18-nov	25/11/2022	25,78	44,3
7	25-nov	06/12/2022	5,43	4,41
8	2-dez	06/12/2022	3,55	1,91
9	9-dez	15/12/2022	3,63	0,73
10	16-dez	25/01/2023	2,61	0,05

- Tempo de chegada entre ~28 dias
- Tempo de pico ~ 34 dias
- Concentração de pico 44,30 ppb
- Tempo médio de trânsito ~35 dias
- Velocidade média de fluxo ~3 m/dia

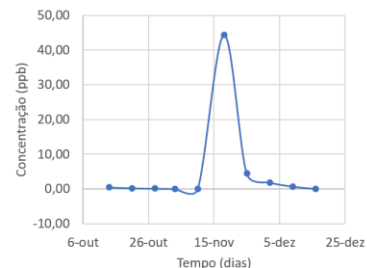


Figura 4: Resultados de amostras de carvão ativado do INA-01.

No INA 02 a presença do traçador nas amostras de carvão foi detectada em 18 de novembro, com concentrações 37 vezes maiores que o background. A chegada do traçador ocorreu aproximadamente 28 dias após o lançamento, com um trânsito total de 42 dias e velocidade

média de 2,5 m/dia. Em 9 de dezembro, a pluma estava dissipada, com valores até menores que o background, o que pode estar relacionado a precipitações que diluíram os resultados (Figura 5).

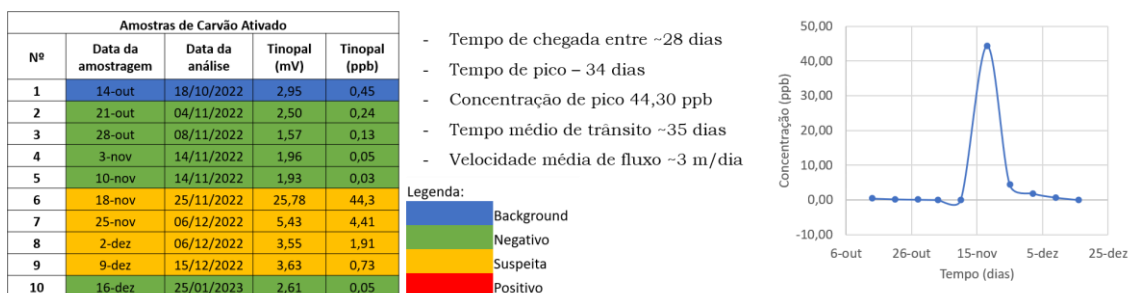


Figura 5: Resultados de amostras de carvão ativado do INA-02.

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 6). 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.

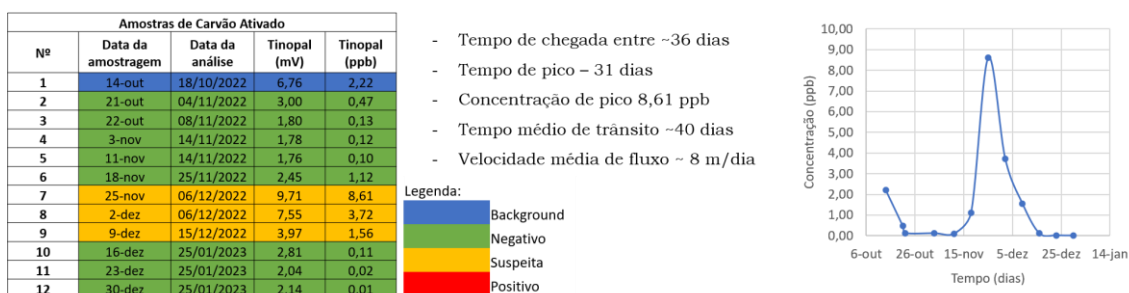


Figura 6: Resultados de amostras de carvão ativado do INA-04.

Por fim, no INA 05 as amostras de carvão indicaram a presença do traçador em 18 de novembro, com concentrações 23 vezes maiores que o background. A chegada do traçador foi estimada em 28 dias após o lançamento, com um trânsito total de 36 dias e velocidade média de 1 m/dia. Em 9 de dezembro, a pluma estava quase dissipada (Figura 7). A menor velocidade e concentração podem indicar que o pico de concentração ocorreu antes da coleta de 18 de novembro.

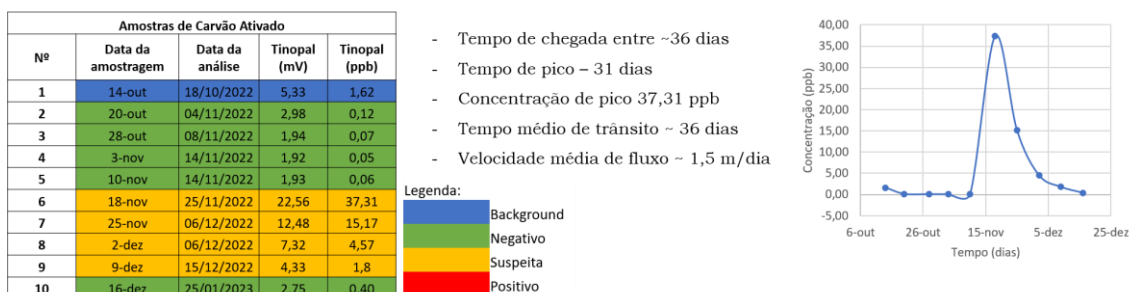


Figura 7: Resultados de amostras de carvão ativado do INA-05.

As análises dos resultados permitiram indicar conexões de fluxo entre todos os pontos monitorados (Figura 8). 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.

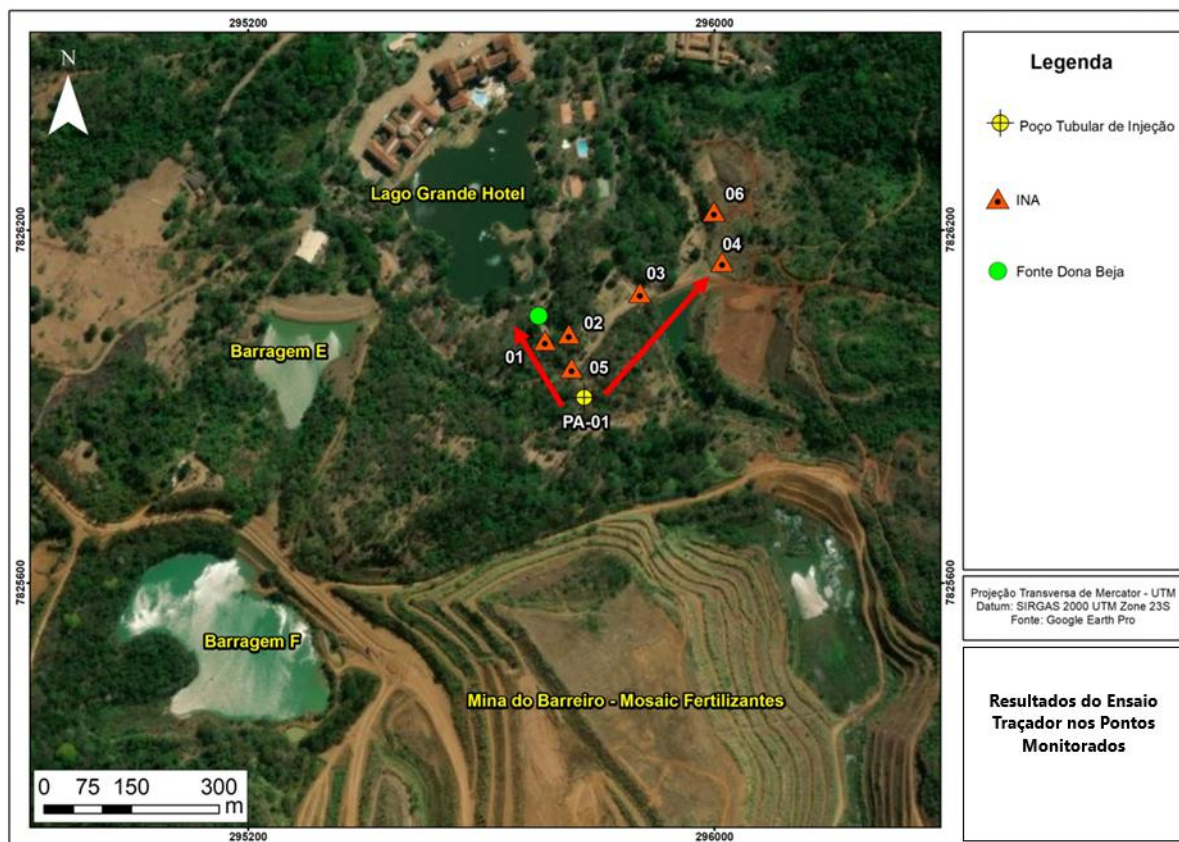


Figura 8: Mapa indicando sentido de fluxo para noroeste e nordeste projetado pelo traçador aos pontos monitorados.

CONCLUSÕES

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.

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>.

RAPOSO, D. B.; PEREIRA, S. Y. Caracterização litológica e hidrodinâmica do aquífero associado ao Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, oeste de Minas Gerais. Geociências (São Paulo. Impresso), São Paulo: UNESP, v. 32, n. 1, p. 33–40, 2013. Silva et al., 2015. (Similarmente, a referência completa não está detalhada na seção de referências, apenas mencionada no Resumo e Introdução).

Silva, A., Marchetto, M., & Souza, O. (1979). Geology of the Araxá (Barreiro) Carbonatite. s.n.t, p. 17