

## ESTIMATIVA DAS RESERVAS HÍDRICAS DO SISTEMA AQUÍFERO TERMAL DA FALHA SÃO JOAQUIM, CHAPADA DOS VEADEIROS, GOIÁS

 Cristiane Oliveira de Moura<sup>1\*</sup>,  José Eloi Guimarães Campos<sup>1</sup>,  Flávio Henrique Freitas e Silva<sup>1</sup>,  Tassiane Pereira Junqueira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil.  
E-mails: cmoura.geo@gmail.com, eloi@unb.br, fhfsilva@unb.br, tassijunqueira.geo@gmail.com

\*Autor correspondente



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License.

### RESUMO

A região da Chapada dos Veadeiros, nordeste do estado de Goiás, apresenta ocorrências de águas termais associadas a estruturas fraturadas em rochas supracrustais dos grupos Araí, Traíras, Paranoá e da Suíte Aurumina. Este trabalho visa estimar o volume de água e disponibilidade hídrica do sistema aquífero termal associado à Falha São Joaquim, mediante análise de parâmetros hidrogeológicos como índice de fraturamento, espessura saturada e coeficiente de armazenamento. O método adotado baseou-se no modelo conceitual de fluxo hidrotermal proposto para a região por Junqueira et al. (2022), no qual os principais condicionantes para a ocorrência de água quente são o fluxo regional da água subterrânea, gradiente geotérmico e presença de fraturas abertas em profundidades mínimas de cerca de 1 km. A reserva explotável ou disponibilidade foi obtida como um percentual da reserva permanente, a qual foi definida, considerando critérios conservadores quanto aos parâmetros de entrada nas equações. As áreas de recarga efetiva das águas termais correspondem às porções topográficas mais elevadas das serras do Rio Preto e Santana, situadas no setor nordeste da Chapada dos Veadeiros, caracterizadas por altitudes superiores a 1.100 m e declividades inferiores a 20%. Nesses setores, a infiltração ocorre principalmente em áreas de exposição rochosa ou em perfis de solos rasos. A maior altitude estabelece um gradiente hidráulico regional que direciona a água infiltrada para níveis profundos, onde o gradiente geotérmico natural eleva a temperatura do fluxo, viabilizando sua ascensão e exsudação termal ao longo de vias estruturais (falhas/fraturas). Nas estimativas das reservas hídricas, foram adotados: (i) índice de fraturamento interconectado entre 2,0 e 2,5% nas áreas de ocorrência comprovada de água naturalmente quentes; (ii) espessuras saturadas dos aquíferos variando conforme as unidades hidroestratigráficas consideradas; e (iii) 5% da reserva permanente (composta pelas parcelas de saturação e pressão), definido como a fração explotável integrante das disponibilidades. A comparação com estudos realizados na região de Caldas Novas (GO) e no sul do Distrito Federal mostra semelhanças na complexidade estrutural e no comportamento anisotrópico dos aquíferos fraturados, porém com valores distintos de disponibilidades, devido às diferenças do relevo, tipos de solos, contexto geológico e grau de estagnação da água no aquífero. Os resultados obtidos deverão subsidiar as ações para a operação, gestão dos sistemas de exploração e proteção dos recursos hídricos subterrâneos, fundamentais para manter a sustentabilidade das águas termais frente às crescentes demandas. Dentre as boas práticas de gestão que devem ser aplicadas ao aquífero da região destacam-se o monitoramento ativo da potenciomетria dos poços e das vazões das nascentes e da qualidade das águas.

*Palavras-chaves:* Nascentes termais; Recursos hídricos subterrâneos; Aquífero Araí; Aquífero Traíras; Falha São Joaquim.

## ABSTRACT

ESTIMATE OF WATER RESERVES IN THE SÃO JOAQUIM FAULT THERMAL AQUIFER SYSTEM, CHAPADA DOS VEADEIROS, GOIÁS. The Chapada dos Veadeiros region, northeast of Goiás State, Central Brazil, shows occurrences of thermal waters associated with fractured structures in Aurumina Suite granitic rocks and metasedimentary rocks of the Araí, Traíras and Paranoá groups. The aim of this study was to estimate the volume of water available in the thermal aquifer system associated with the São Joaquim Fault, through the analysis of hydrogeological parameters such as fracturing index, saturated thickness and storage coefficient. The methodology was based on the hydrothermal flow conceptual model proposed for the region by Junqueira et al. (2022), in which the main controlling factors for the occurrence of thermal waters are regional groundwater flow, the geothermal gradient, and the presence of open fractures at minimum depths of about 1 km. The exploitable reserve or availability was obtained as a percentage of the permanent reserve, which was defined, considering conservative criteria regarding the input parameters in the equations. The aquifer system associated with the São Joaquim Fault is conditioned by the presence of open fractures at depths of up to 1 km, which enable the deep hydrothermal flow. The effective recharge areas of the thermal waters correspond to the highest topographic portions of the Rio Preto and Santana ranges, located in the northeastern sector of Chapada dos Veadeiros, characterized by elevations above 1.100 m and slopes below 20%. In these sectors, infiltration occurs mainly on exposed rock surfaces or within shallow soil profiles. The higher elevation establishes a regional hydraulic gradient that directs infiltrated water to deeper levels, where the natural geothermal gradient raises the temperature of the flow, enabling its ascent and thermal exudation along structural conduits (faults/fractures). For the reserve estimates, the following parameters were adopted: (i) an interconnected fracturing index ranging from 2.0 to 2.5% in the confirm areas of naturally warm water occurrence; (ii) saturated thicknesses of the aquifer varying according to the hydrostratigraphic units considered; and (iii) 5% of the permanent reserve (comprising the saturation and pressure components), defined as the exploitable fraction in the availability estimates. Studies carried out in the Caldas Novas region, Southeast Goiás State, and in the Federal District show similarities in the structural complexity and anisotropic behavior of the fractured aquifers, but with different aquifer potential, due to differences in relief, soil types, geological context and degree of water stagnation in the aquifer. The results obtained should support the actions for the operation, management of exploitation systems and protection of groundwater resources, fundamental to maintain the sustainability of thermal waters in the face of growing demands. Among the good management practices that must be applied to the region aquifer, the following stand out: active monitoring of the potentiometric levels of wells and spring flows; and monitoring of water quality.

*Keywords:* Thermal springs; Groundwater resources; Araí Aquifer; Traíras Aquifer; São Joaquim Fault.

## RESUMEN

ESTIMACIÓN DE LAS RESERVAS DE AGUA EN EL SISTEMA ACUÍFERO TÉRMICO DE LA FALLA DE SÃO JOAQUIM, CHAPADA DOS VEADEIROS, GOIÁS. La región de la Chapada dos Veadeiros, en el noreste del estado de Goiás, presenta ocurrencias de aguas termales asociadas a estructuras fracturadas en rocas de la Suite Aurumina y en unidades supracrustales de los grupos Araí, Traíras y Paranoá. Este trabajo tiene por objetivo estimar el volumen de agua y la disponibilidad hídrica del sistema acuífero termal asociado a la Falla São Joaquim, mediante el análisis de

parâmetros hidrogeológicos como o índice de fraturamento interconectado, o espesor saturado e o coeficiente de armazenamento. O método adotado se baseou no modelo conceitual de fluxo hidrotermal proposto para a região por Junqueira et al. (2022), no qual os principais condicionantes da ocorrência de água quente são o fluxo regional de água subterrânea, o gradiente geotérmico e a presença de fraturas abertas a profundidades mínimas de aproximadamente 1 km. A reserva explotável (disponibilidade) foi obtida como uma porcentagem da reserva permanente, definida com critérios conservadores para os parâmetros de entrada nas equações. As áreas de recarga efetiva das águas termais correspondem às porções topográficas mais elevadas das serras de Rio Preto e Santana, situadas no setor nordeste da Chapada dos Veadeiros, caracterizadas por altitudes superiores a 1.100 m e declives inferiores a 20%. Em setores, a infiltração ocorre principalmente em áreas de rocha exposta ou em perfis de solos someros. A maior altitude estabelece um gradiente hidráulico regional que dirige a água infiltrada para níveis profundos, onde o gradiente geotérmico natural eleva a temperatura do fluxo, possibilitando sua ascensão e exsurgência termal ao longo de condutos estruturais (falhas/fraturas). Para as estimativas de reservas foram adotados: (i) um índice de fraturamento interconectado entre 2,0 e 2,5% em áreas com ocorrências comprovadas de águas naturalmente quentes; (ii) espessores saturados variáveis segundo as unidades hidroestratigráficas consideradas; e (iii) o 5% da reserva permanente (composta pelas parcelas de saturação e de pressão), definido como a fração explotável que integra a disponibilidade. A comparação com estudos realizados na região de Caldas Novas (GO) e no sul do Distrito Federal mostra semelhanças na complexidade estrutural e no comportamento anisotrópico dos aquíferos fraturados, porém valores de disponibilidade distintos devido a diferenças no relevo, tipos de solos, contexto geológico e grau de estancamento da água no aquífero. Espera-se que os resultados respaldem as ações de operação, gestão dos sistemas de exploração e proteção dos recursos hídricos subterrâneos, fundamentais para manter a sustentabilidade das águas termais frente à crescente demanda. Entre as boas práticas de gestão recomendadas para o aquífero regional destacam o monitoramento ativo dos níveis piezométricos dos poços, dos caudais dos mananciais e da qualidade da água.

*Palavras chave:* Mananciais termais; Recursos hídricos subterrâneos; Aquífero Arai; Aquífero Traíras; Falha São Joaquim.

## 1 INTRODUÇÃO

A estimativa de reservas hídricas subterrâneas é essencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos, sobretudo em sistemas hidrotermais e fraturados, nos quais a heterogeneidade estrutural e a complexidade do aquífero impõem desafios adicionais. Nesse contexto, os modelos conceituais assumem papel central, pois em estágios iniciais, devem refletir o nível de conhecimento existente e servir de base para o refinamento metodológico (Anderson et al., 2015; Campos & Almeida, 2012; Rosen & LeGrand, 2000; Wang & Anderson, 1995).

Seguindo essa linha, Coimbra (1987) forneceu diretrizes práticas para estimativas de reservas explotáveis no Distrito Federal, fundamentadas no balanço hídrico e no conceito de armazenamento efetivo, diferenciando reservas renováveis das ex-

plotáveis e recomendando critérios conservadores (10% a 20% da recarga efetiva), para não comprometer as descargas naturais.

Na mesma perspectiva, Campos e Almeida (2012) aplicaram esses princípios aos aquíferos termais de Caldas Novas (GO), combinando parâmetros dimensionais (área de recarga, espessura saturada e índices de fraturamento interconectado) com balanço hídrico, além de análises de recarga artificial e balanço térmico. Como resultado, estimaram reservas permanentes da ordem de  $1,8 \times 10^8 \text{ m}^3$  (Sistema Paranoá) e  $4,5 \times 10^7 \text{ m}^3$  (Sistema Araxá), com reservas renováveis anuais de  $9,0 \times 10^6 \text{ m}^3$  e  $2,25 \times 10^6 \text{ m}^3$ , respectivamente. Considerando 10% da reserva renovável e operação de 20 h/dia, isso corresponde a vazões explotáveis de  $\sim 123,3 \text{ m}^3/\text{h}$  (Paranoá) e  $\sim 30,8 \text{ m}^3/\text{h}$  (Araxá), totalizando  $\sim 154,1 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Mais recentemente, Junqueira et al. (2022) estruturaram um modelo conceitual de fluxo regional para a Chapada dos Veadeiros, integrando dados isotópicos ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) e aplicando o método volumétrico adaptado a zonas de fraturas. A partir dessa abordagem, estimaram-se reservas totais da ordem de  $7,6 \times 10^7 \text{ m}^3$ , correspondentes ao somatório dos diferentes grupos de águas termais identificados na região.

Em perspectiva complementar e no plano internacional, a literatura mostra a evolução metodológica ao longo das últimas décadas. Kruseman e Ridder (1990) consolidaram o uso dos testes de bombeamento como ferramenta primária para a determinação de parâmetros hidráulicos e a extrapolação de reservas explotáveis. Custodio e Llamas (1983), por sua vez, sistematizaram os conceitos hidrogeológicos aplicados à realidade espanhola, destacando a variabilidade dos tipos de aquíferos e a importância do contexto geológico na definição de reservas. Posteriormente, a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO, 2004), por meio do programa GRAPHIC, enfatizou a importância da avaliação integrada de recursos subterrâneos frente às mudanças climáticas, especialmente em zonas áridas e semiáridas. Foster e Loucks (2006) avançaram esse enfoque, propondo critérios socioeconômicos para a gestão sustentável de aquíferos não renováveis em países do norte da África e Oriente Médio, recomendando tratá-los como estoques finitos de uso estratégico, com planejamento participativo, metas de depleção controlada, monitoramento contínuo para ajustar captações.

Em síntese, os estudos analisados evidenciam a diversidade metodológica para a estimar reservas de águas subterrâneas e a necessidade de integrar dados geológicos, hidrogeológicos e isotópicos, especialmente em sistemas complexos como os aquíferos fraturados e termais do Brasil Central. O avanço na modelagem conceitual e no uso de técnicas isotópicas tem ampliado a precisão na delimitação de zonas de recarga, no tempo de residência da água e volumes efetivamente explotáveis, aspectos fundamentais para orientar políticas públicas de uso racional dos recursos hídricos subterrâneos (Feitosa et al., 2008). Persistem, porém, desafios significativos para a quantificação do potencial desses sistemas, especialmente devido à escassez de dados sistemáticos e a mistura de águas com diferentes idades e origens, que dificultam a quantificação robusta das reservas.

Esse debate se conecta diretamente com a Chapada dos Veadeiros (GO), região de expressivo interesse econômico, turístico e ambiental, sobretudo em áreas cujas estruturas geológicas favorecem a circulação e aquecimento das águas subterrâneas, onde o arcabouço estrutural e a circulação em meios fraturados foram organizados em um modelo conceitual, com distinção de circuitos rasos, intermediários e profundos (Junqueira, 2020; Junqueira et al., 2022).

Este estudo avança sobre esse quadro regional ao quantificar as reservas e a disponibilidade explotável do sistema aquífero termal associado à Falha São Joaquim, com base em dados próprios de campo e em parâmetros hidrogeológicos compatíveis com o arcabouço hidroestrutural da área. O conjunto de dados utilizado inclui (i) ensaio de bombeamento em poço tubular profundo, (ii) interpretação morfoestrutural para delimitação da área de contribuição em topos elevados e baixa declividade, com área de ocorrência dos aquíferos termais definida a partir das faixas de surgências comprovada de águas aquecidas, englobando pontos de descarga natural e captação em poço tubular profundo, e (iii) parâmetros de entrada derivados do teste hidráulico e da análise estrutural (espessura saturada, índice de fraturamento interconectado, coeficiente de armazenamento e área do sistema).

Metodologicamente, a estimativa é conduzida por abordagem volumétrica adaptada a meios fraturados, integrando duas componentes da reserva permanente — por saturação e por pressão — como base para calcular a reserva explotável sob critérios conservadores. Essa estratégia mantém aderência ao comportamento confinado observado no ensaio (elevada transmissividade, baixa resposta ao rebaixamento e recuperação rápida).

Com isso, o estudo fornece valores operacionais de referência para planejamento e gestão do uso de águas termais na Chapada dos Veadeiros, alinhando a quantificação de reservas às evidências de campo e ao controle estrutural regional, e contribuindo para a definição de limites operacionais, priorização de usos e medidas de proteção do aquífero.

## 2 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA ÁREA

A área de estudo localiza-se na porção nordeste do Estado de Goiás (Figura 1), abrangendo parte da Chapada dos Veadeiros e, em particular, o sistema de falhas São Joaquim. Trata-se de uma região caracterizada por relevo acidentado, com escarpas abruptas



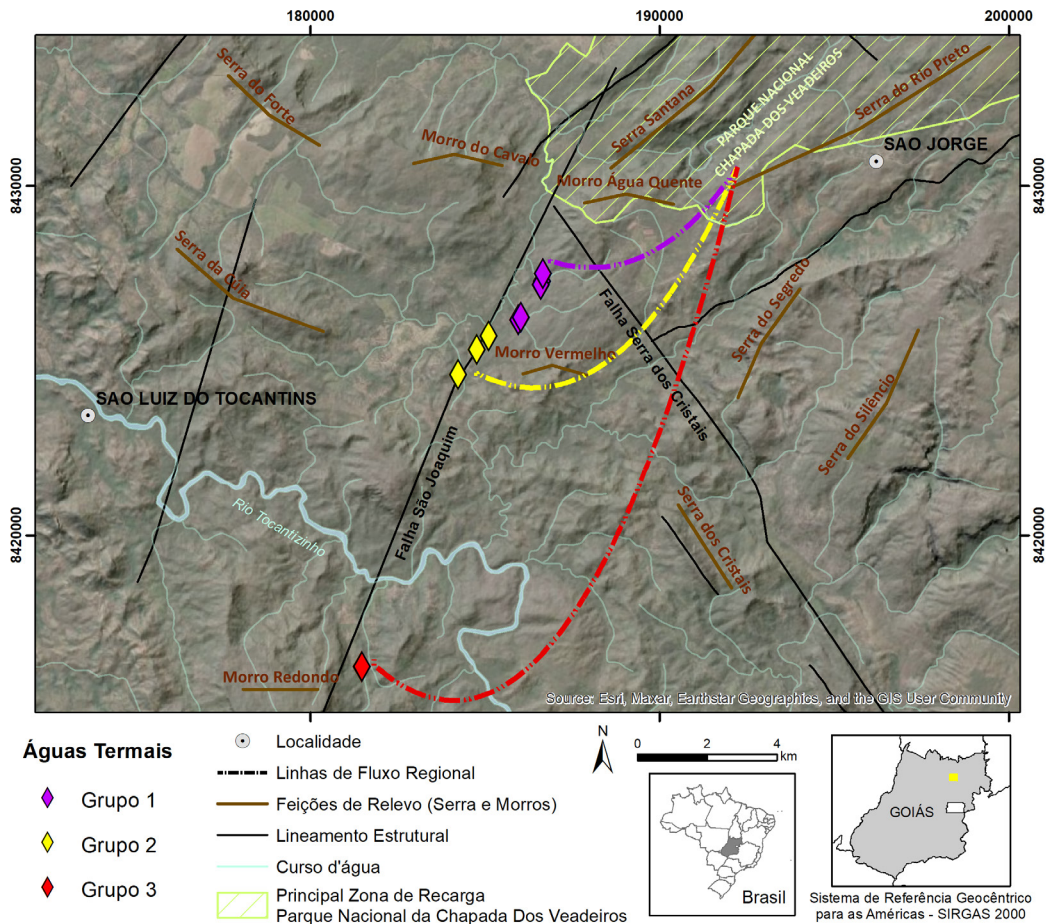


FIGURA 1 – Linhas regionais de fluxos desde a área de recarga até as nascentes de águas termais. Distâncias entre área de recarga e zonas de descarga: Grupo 1 ~15 km; Grupo 2 ~ 20 km; e Grupo 3 ~ 30 km. Com o aumento da distância do fluxo regional, há aumento proporcional da profundidade.

FIGURE 1 – Regional flow paths from the recharge area to the thermal spring outlets. Distances between the recharge area and discharge zones: Group 1 ~15 km; Group 2 ~20 km; and Group 3 ~30 km. With increasing distance along the regional flow, there is a proportional increase in depth.

e vales profundos, além de superfícies planas e elevadas situadas a nordeste no interior do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, que atuam como importantes zonas de recarga. A vegetação predominante é o Cerrado nativo, incluindo principalmente campos rupestres, cerrado *sensu strictu* e formações campestres, incluindo áreas com predomínio herbáceo (campo limpo) e áreas com presença esparsa de subarbustos e indivíduos lenhosos (campo sujo). A região apresenta clima tropical sazonal, com período chuvoso concentrado entre outubro e março, favorecendo taxas expressivas de infiltração em áreas de menor alteração antrópica.

Do ponto de vista estrutural, o embasamento cristalino e as sequências metassedimentares dos grupos Araí, Traíras e Paranoá são afetados por ex-

tensos sistemas de falhas e fraturas, dentre os quais se destacam os sistemas de falhas São Joaquim e da Serra dos Cristais (Martins-Ferreira et al., 2018a, b, c). Essas estruturas, orientadas predominantemente em direções NE-SW e NW-SE, controlam não apenas a compartimentação do relevo, mas também a circulação das águas subterrâneas em profundidade. A Falha São Joaquim age como uma barreira ao fluxo que é canalizado a partir das serras no interior do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. As zonas de fraqueza de direção preferencial N60E seguem o sentido preferencial de fluxo de NE para SW, sendo interceptado pela zona de falha que coloca rochas anquimetamórficas, representadas por quartzitos e siltitos, em contato com rochas metamórficas na zona da clorita, compostas por filitos e

calcifilitos. Neste contexto estrutural, o aquecimento da água se dá por grau geotérmico, onde as águas infiltram até mais de 1.000 m a partir de sua zona de recarga, até a faixa de descarga ao longo da zona de falha no Vale do Ribeirão São Joaquim (Junqueira, 2020; Junqueira et al., 2022).

A análise hidrogeológica da Chapada dos Veadeiros baseia-se nos grupos de aquíferos termais descritos por Junqueira (2020), com ênfase no domínio do aquífero fraturado termal, hospedado principalmente nas rochas supracrustais do Supergrupo Veadeiros (Martins-Ferreira et al., 2018b, c; Tanizaki et al., 2015) com duas unidades hidroestruturais que se destacam: o Sistema Aquífero Araí que corresponde aos reservatórios de águas subterrâneas associados às litologias conglomeráticas e quartzíticas do Grupo Araí e o Sistema Aquífero Traíras dominado por rochas sito-argilosas, com menor contribuição arenosa compondo aquíferos fraturados com potencial de armazenamento mais restrito. Ambos os sistemas são representados por aquíferos fraturados muito heterogêneos e anisotrópicos, livres ou confinados, termais, com extensão lateral controlada pela distribuição das zonas de fraturamento (Junqueira et al., 2022).

## 2.1 Modelo hidrogeológico conceitual

O modelo de fluxo de águas termais proposto por Junqueira et al. (2022) descreve o sistema da Chapada dos Veadeiros como resultante da circulação profunda de águas subterrâneas em aquíferos fraturados. O aquecimento ocorre em função da percolação por zonas de falhamento que conduzem os fluxos a profundidades maiores que 1.000 m, onde o gradiente geotérmico natural promove o aumento da temperatura (Figura 2).

As evidências isotópicas e radiogênicas ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$  e  $^{14}\text{C}$ ) apresentadas por Junqueira et al. (2022) indicam a coexistência de fluxos subterrâneos rasos e profundos: as águas mais jovens, com presença de trítio e recarga sub moderna (< 150 anos), associadas a trajetórias de até 300 m, contrastam com águas mais antigas, de 7.000 e 9.000 anos e isentas de trítio, representativas do fluxo regional profundo que percorre maiores distâncias antes de emergir nas fontes termais.

Nesse contexto, Junqueira (2020) e Junqueira et al. (2022) distinguiram três grupos de águas termais na região (Figura 2; Tabela 1):

(i) *Grupo 1* – águas de circulação rasa, associadas a trajetórias curtas e temperaturas mais baixas, geralmente próximas às áreas de recarga;

### HIDROGEOLOGIA - DOMÍNIO FRATURADO

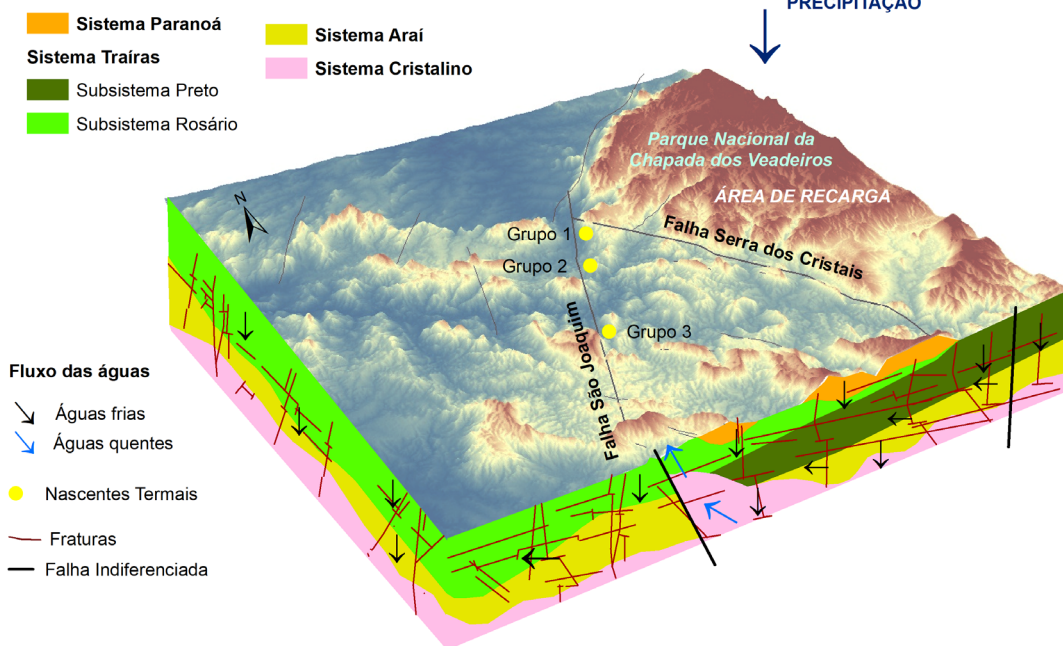


FIGURA 2 – Modelo conceitual do fluxo de águas subterrâneas da área de estudo. Adaptado de Junqueira (2020).

FIGURE 2 – Conceptual model of groundwater flow in the study area. Adapted from Junqueira (2020).

TABELA 1 – Parâmetros isotópicos, profundidade estimada e idade das águas subterrâneas nas amostras termais da Chapada dos Veadeiros. Temp\* = temperatura atribuída pelo geotermômetro; Temp.\*\* = temperatura medida nas nascentes. Fonte: Junqueira et al. (2022).

TABLE 1 – Isotopic parameters, estimated depth, and groundwater age in thermal samples from the Chapada dos Veadeiros. Temp\* = temperature inferred by the geothermometer; Temp.\*\* = temperature measured at the springs. Source: Junqueira et al. (2022).

| <i>Grupo de Água<br/>Termal</i> | <i>Trítio</i> | <i>Idade<br/>(anos AP)</i> | <i>Profundidade<br/>(m)</i> | <i>CE<br/>(<math>\mu\text{S/cm}</math>)</i> | <i>Temp.*<br/>(<math>^{\circ}\text{C}</math>)</i> | <i>Temp.**<br/>(<math>^{\circ}\text{C}</math>)</i> |
|---------------------------------|---------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1                               | Presença      | ~ 1.000                    | ~ 300                       | < 40                                        | 28 - 30                                           | 27 - 28,5                                          |
| 2                               | Ausência      | ~ 2.500                    | ~ 750                       | ~ 85                                        | 39 - 45                                           | 30 - 34                                            |
| 3                               | Ausência      | > 7.000                    | ~ 1.050                     | > 240                                       | 46 - 54                                           | 42 - 43                                            |

(ii) *Grupo 2* – águas vinculadas a trajetórias intermediárias, que combinam recarga relativamente recente com maior tempo de residência, apresentando temperaturas moderadas;

(iii) *Grupo 3* – águas de circulação profunda, sem trítio detectável, com idades superiores a 7.000 anos, longas trajetórias de fluxo e temperaturas mais elevadas, emergindo em fontes ligadas a falhas de maior profundidade.

Com base no enquadramento hidrogeológico dos grupos termais, os autores aplicaram um procedimento volumétrico próprio de meios fraturados, estimando reservas totais da ordem de  $7,6 \times 10^7 \text{ m}^3$ . Esses valores representam uma primeira aproximação quantitativa do potencial hídrico do sistema hidrotermal regional, ainda condicionada pela heterogeneidade estrutural e pela variabilidade da recarga.

Em continuidade às proposições de Junqueira (2020) e Junqueira et al. (2022), o presente estudo refina o arcabouço conceitual ao: (i) demonstrar, com base em evidências hidráulicas, que o sistema opera sob confinamento efetivo e alta transmissividade, implicando armazenamento dominado por volumes saturados e parcela sob pressão; (ii) ampliar as unidades reservatório reconhecidas, incorporando granitóides fraturados da Suíte Aurumina associados a falhas profundas do Sistema São Joaquim, além dos grupos Arai e Traíras; (iii) atribuir a área de contribuição efetiva aos compartimentos elevados da serras do Rio Preto e Santana ( $\geq 1.100 \text{ m}$ ; declividade  $< 20\%$ ), com suporte morfoestrutural e hipsométrico (Figura 1); e (iv) delimitar a área de ocorrência das fontes termais, contemplando com maior precisão as sub-bacias que aportam as águas aquecidas. Em conjunto, esses elementos fortalecem a interpretação de fluxo regional em

meio fraturado heterogêneo e sustentam a necessidade de considerar reserva por saturação e por pressão na quantificação das disponibilidades.

### 3 METÓDOS ANALÍTICOS E DADOS DE ENTRADA

A estimativa das reservas hídricas termais foi conduzida a partir da integração de dados de campo e parâmetros hidrogeológicos previamente definidos para a área de estudo. As informações essenciais derivam do ensaio de bombeamento em poço tubular profundo (Figuras 3 e 4), de interpretações morfoestruturais e da configuração hidroestrutural regional. Esses elementos forneceram a base para a definição dos parâmetros fundamentais aplicados ao cálculo volumétrico em meio fraturado, assegurando consistência com as hipóteses conceituais do sistema aquífero termal.

- *Perfuração de poço tubular profundo*: o poço atingiu 108 m e interceptou aquífero fraturado em metassedimentos do Grupo Traíras e em biotita-granito da Suíte Aurumina, sendo classificado como representativo do Grupo 3, em função das características físico-químicas determinadas nas análises realizadas em 2023 pelo LAMIN/Serviço Geológico do Brasil (CPRM), coerentes com os padrões caracterizados por Junqueira (2020). A ocorrência de água termal nesse contexto confirma a relevância das zonas fraturadas do embasamento cristalino como condutos hidrotermais. Embora os grupos Arai e Traíras sejam tradicionalmente apontados como principais unidades aquíferas, a perfuração evidencia que granitos fraturados do embasamento também devem ser considerados como reservatórios quando associados a falhas profundas do Sistema São Joaquim.

- *Ensaio hidráulico*: como parte da presente investigação foi realizado um ensaio de bombeamento





FIGURA 3 – Vista aérea da casa de proteção do poço tubular profundo representativo do Grupo 3, utilizado nos ensaios de bombeamento e monitoramento hidrogeológico.

FIGURE 3 – Aerial view of the protective house of the deep tubular well representative of Group 3, used in pumping tests and hydrogeological monitoring.

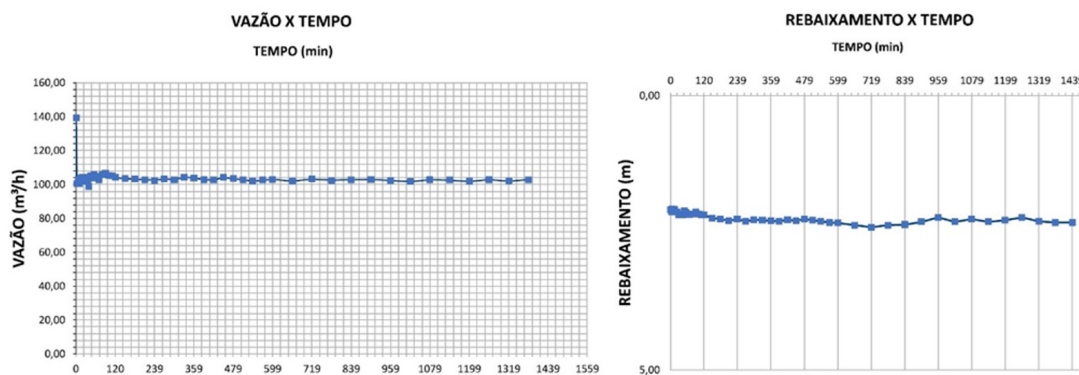


FIGURA 4 – Apresentação gráfica dos resultados do teste de bombeamento de 24 horas do poço tubular profundo Grupo 3.

FIGURE 4 – Graphical presentation of the 24-hour pumping test results from the deep tubular well of Group 3.

mento no poço tubular profundo, cujos dados revelaram o comportamento confinado no trecho do aquífero fraturado associado às maiores temperaturas (Grupo 3). No teste contínuo de 24 h, operando a uma vazão estabilizada de 100 m³/h, o rebaixamento máximo foi de 2,4 m após 12 h, com curva suave e quase horizontal (Figura 4). A capacidade específica de 44,5 m³/h/m demonstra elevada transmissividade e potencial de exploração em grandes vazões, com baixa resposta inicial ao bombeamento. O curto tempo de recuperação do nível estático (~15 min) reforça o elevado grau de confinamento, justificando o coeficiente de armazenamento da ordem de  $10^{-4}$  (Figura 4).

- *Delimitação das áreas de contribuição*: a recarga foi atribuída às serras do Rio Preto e Santana (Martins-Ferreira & Campos, 2017), incluindo compartimentos topográficos situados acima de 1.100 m e declividade inferior a 20% (Figura 5).

A delimitação da bacia hidrogeológica seguiu as diretrizes propostas por Arraes e Campos (2007) e Campos e Galvão (2023), integrando: (i) lineamentos estruturais, que definem blocos aquíferos e direções preferenciais de fluxo; (ii) hipsometria, que reflete os gradientes de relevo regional; (iii) drenagem superficial, utilizada como critério secundário de refinamento dos limites; e (iv) estratigrafia, considerada para identificar unidades de caráter mais plástico que restringem o fluxo em profundidade. A área definida apresenta assimetria em relação à bacia hidrográfica e é limitada a nordeste por lineamento NW–SE, a oeste pela Falha São Joaquim, e a noroeste por cotas de 1.100 m e pela drenagem local (Figura 5).

- *Medições de vazão em nascentes termais*: foram realizadas medições de vazão nas principais nascentes da área de influência da Falha São Joaquim, em um total de 13 pontos de leitura com o



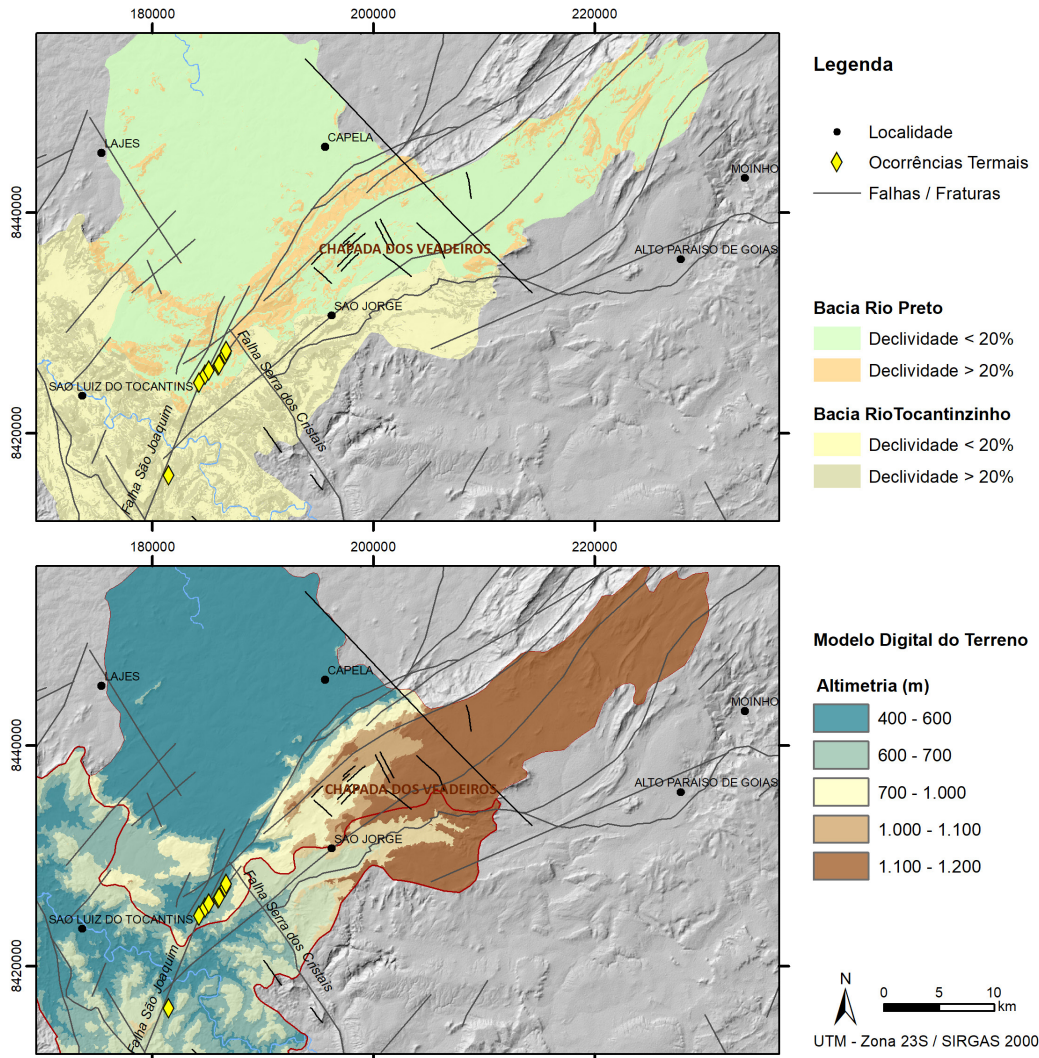


FIGURA 5 – Área de contribuição principal do sistema termal da Falha São Joaquim, associada à região da Chapada dos Veadeiros, com cotas acima de 1.100 m e declividade <20%.

FIGURE 5 – Main contribution area of the thermal system of the São Joaquim Fault, associated with the Chapada dos Veadeiros region, with elevations above 1,100 m and slope <20%.

uso do FlowTracker (ADV – *Acoustic Doppler Velocimeter*), equipamento adequado para ambientes naturais e de baixa profundidade, conforme a metodologia recomendada para pequenos cursos d'água. O somatório das vazões médias obtidas para os três grupos termais resultou em 335 m<sup>3</sup>/h (Tabela 2). Esses valores foram utilizados como referência comparativa às estimativas de disponibilidade hídrica apresentadas neste estudo.

• *Critérios conceituais e classes de reserva:* entre os conceitos-chave empregados neste trabalho, adotam-se as definições de (Campos & Freitas-Silva, 1998; Costa, 1997), segundo as quais as

reservas hídricas subterrâneas podem ser são classificadas em:

- Reserva renovável (Rr) ou reserva reguladora: parcela do volume hídrico que se renova anualmente via recarga natural;
- Reserva permanente (Rp) ou reserva secular: volume total de água armazenado nos espaços vazios saturados do meio rochoso;
- Reserva explotável (Re) ou disponibilidade: fração das reservas renovável e permanente passíveis de explotação sem comprometer a sustentabilidade do aquífero.

TABELA 2 – Vazões médias (m<sup>3</sup>/h) medidas em nascentes termais da Chapada dos Veadeiros, organizadas por grupos hidrogeológicos (1, 2 e 3). São apresentados os valores individuais por ponto de amostragem e as médias por grupo. As coordenadas geográficas estão expressas no sistema de referência SIRGAS 2000, Zona 23S.

TABLE 2 – Average discharges (m<sup>3</sup>/h) measured in thermal springs of the Chapada dos Veadeiros, organized by hydrogeological groups (1, 2, and 3). Individual values are presented for each sampling point, along with group averages. Geographic coordinates are expressed in the SIRGAS 2000 reference system, Zone 23S.

| Grupo | Ponto   | Vazão m <sup>3</sup> /h | SIRGAS 2000 / ZONA 23S |           |
|-------|---------|-------------------------|------------------------|-----------|
|       |         |                         | UTM X (m)              | UTM Y (m) |
| 1     | PS1-AT  | 100                     | 186031                 | 8426230   |
|       | CH1-AT  | 81                      | 186598                 | 8427175   |
|       | HM1-AT  | 339                     | 185072                 | 8425961   |
|       | VG1-AT  | 124                     | 185839                 | 8426484   |
| MÉDIA |         | 161                     |                        |           |
| 2     | 1ED-AT  | 22                      | 184099                 | 8425313   |
|       | 1JQ-AT  | 122                     | 185073                 | 8425949   |
|       | 2JQ-AT  | 201                     | 185073                 | 8425949   |
|       | 1JQA-AT | 93                      | 185073                 | 8425949   |
|       | 4JQ-AT  | 278                     | 185059                 | 8425960   |
| MÉDIA |         | 143                     |                        |           |
| 3     | 3TC-AT  | 32                      | 181470                 | 8416224   |
|       | 4TC-AT  | 23                      | 181470                 | 8416224   |
|       | 5TC-AT  | 34                      | 181470                 | 8416224   |
|       | 6TC-AT  | 35                      | 181470                 | 8416224   |
| MÉDIA |         | 31                      |                        |           |

Na presente análise, optou-se por um critério mais restritivo, em que apenas uma fração da reserva permanente é considerada explotável, sendo desconsiderada a existência de reserva renovável por se tratar de aquífero confinado. A reserva renovável deve ser considerada a longo prazo, depois de ampliado o volume de bombeamento do aquífero e ativação do sistema de circulação, que nas condições atuais de equilíbrio é considerado estagnado ou sem fluxo significativo.

• *Parâmetros de entrada e equações:* para efeitos das estimativas, as equações originalmente aplicadas a meios intergranulares (Costa, 1997) foram adaptadas para os aquíferos fraturados, substituindo a porosidade efetiva pelo índice de fraturamento interconectado (Ifi), que expressa a fração dos espaços planares secundários efetivamente disponíveis para o fluxo.

Os parâmetros de entrada foram definidos a partir de múltiplas fontes de informação:

- a espessura saturada (b) foi estimada em 300 m. Embora as unidades apresentem espessura total superior, para efeito das estimativas de reservas hídricas considerou-se apenas a fração efetivamente saturada, vinculada ao hidrotermalismo em profundidade. Essa interpretação mostra-se

consistente com as estimativas de profundidade de circulação das águas termais obtidas por métodos geoquímicos e isotópicos (Junqueira et al., 2022), que indicam trajetórias profundas coerentes com o intervalo adotado.

- o índice de fraturamento interconectado (Ifi) de 2,5% adotado neste estudo segue os valores médios propostos por Junqueira (2020) para aquíferos quartzíticos e foi corroborado por análises morfoestruturais. Esse valor é coerente com o reservatório, distinto dos sistemas fraturados cristalinos, pois apresenta maior densidade de aberturas secundárias ligadas a fraturas, deslocamentos em planos de acamamento e processos neotectônicos atuando em meios heterogêneos.
- altura entre a base da camada confinante e a superfície potenciométrica (h) foi estimada em 400 m, valor compatível com a espessura de filitos do Grupo Traíras — reconhecidos na literatura como unidade de comportamento mais plástico (Martins-Ferreira et al., 2018b) — e sustentada pelo caráter jorrante do poço tubular profundo, que reforça o papel desta unidade como confinante regional.

iv. o coeficiente de armazenamento ( $S$ ) foi definido a partir da interpretação dos ensaios de bombeamento conduzidos no mesmo poço, com valor da ordem de  $10^{-4}$ .

Considerando o elevado grau de confinamento do sistema, a reserva renovável do meio natural foi desconsiderada, e a reserva permanente do Grupo 3 foi estimada a partir dos volumes por saturação e por pressão, conforme as seguintes equações:

$$Rps = A \times b \times Ifi;$$

$$Rpp = A \times h \times S;$$

$$Rpt = Rps + Rpp.$$

Onde  $Rps$  é a reserva permanente por saturação ( $m^3$ );  $Rpp$  é a reserva permanente por pressão ( $m^3$ );  $Rpt$  a reserva permanente total ( $m^3$ );  $A$  é a área de ocorrência do aquífero termal ( $m^2$ );  $b$  espessura saturada ( $m$ );  $Ifi$  índice de faturamento interconectado (adimensional);  $h$  a elevação da base da camada confinante até a altura da superfície potenciométrica ( $m$ ); e  $S$  coeficiente de armazenamento (adimensional).

A reserva explotável ( $Re$ ) foi estimada a partir da equação:

$$Re = Rpt \times \%ano,$$

onde  $Re$ : reserva explotável ( $m^3/ano$ );  $Rpt$ : reserva permanente total ( $m^3$ ); e  $\%ano$  representa o per-

centual por ano da reserva permanente que pode compor a disponibilidade.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO: POTENCIAL HÍDRICO DO SISTEMA TERMAL

As estimativas apresentadas nesse estudo permitem quantificar o potencial hídrico do sistema aquífero termal associado a Falha São Joaquim, evidenciando volumes expressivos de água armazenada em profundidade. Os parâmetros de entrada aplicados nas equações foram definidos de forma a refletir adequadamente o meio estudado e, em alguns casos, adotados de forma deliberadamente subdimensionados, com a finalidade de ampliar a assertividade metodológica e assegurar que os resultados se mantenham dentro de cenários conservadores.

A delimitação da área de ocorrência foi atribuída a partir da faixa de surgências comprovada de águas aquecidas, englobando tanto os pontos de descarga natural, quanto o ponto de captação em poço. Com base nesse critério, definiu-se uma área de  $10 \text{ km}^2$ , considerada representativa para o Grupo 3 das águas termais da região (Figura 6).

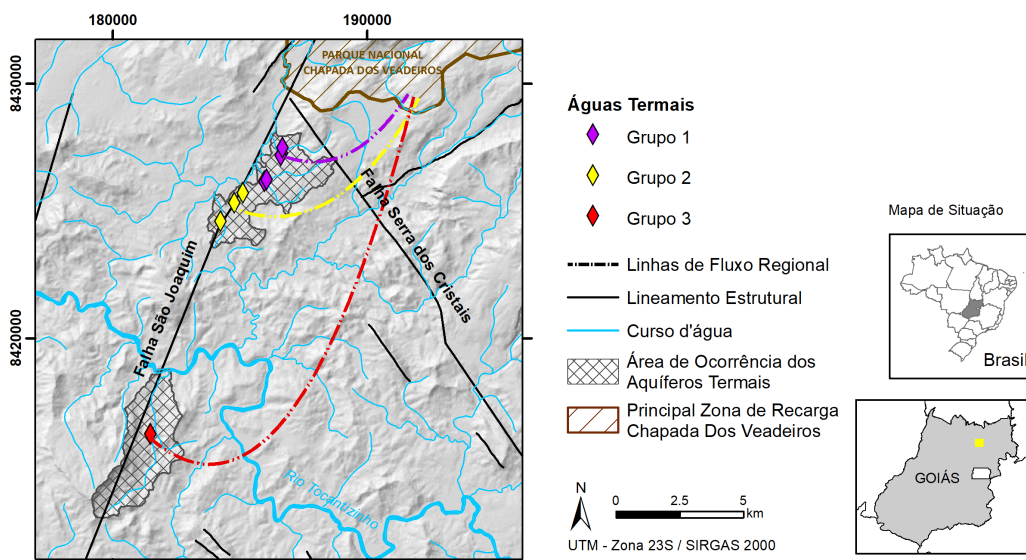


FIGURA 6 – Áreas dos aquíferos termais associados à Falha São Joaquim, delimitadas a partir das faixas de ocorrência comprovada de águas aquecidas, incluindo pontos de descarga natural e captação em poço tubular profundo.

FIGURE 6 – Thermal-aquifer areas associated with the São Joaquim Fault, delineated from zones of proven heated-water occurrence, including natural discharge points and abstraction at a deep tubular well.

O percentual da reserva permanente considerado como disponibilidade foi de 5%, em conformidade com critérios voltados à manutenção da sustentabilidade do sistema hidrogeológico. O aproveitamento dessa fração mostra-se tecnicamente justificável, uma vez que, com o início da exploração, ocorre a criação de espaço no sistema aquífero confinado após exaustão da reserva sob pressão, o que induz um gradiente adicional capaz de reativar o fluxo regional e promover a recarga a partir das áreas de maior elevação (Fetter, 2004), situadas a mais de 300 m acima da área de exudação natural do aquífero termal.

A seguir são apresentados os resultados dos cálculos das reservas hídricas e disponibilidade a partir dos parâmetros físicos e hidrodinâmicos propostos e apresentados anteriormente.

Reserva permanente por saturação:

$$Rps = 1,0 \times 10^7 \text{ m}^2 \times 300 \text{ m} \times 0,025$$

$$Rps = 75.000.000 \text{ m}^3$$

Reserva permanente por pressão:

$$Rpp = 1,0 \times 10^7 \text{ m}^2 \times 400 \text{ m} \times 10^{-4}$$

$$Rpp = 400.000 \text{ m}^3$$

Reserva permanente total:

$$Rpt = 75.400.000 \text{ m}^3$$

Disponibilidade ou reserva explotável:

$$Re = 75.400.000 \text{ m}^3 \times 0,05/\text{ano}$$

$$Re = 3.770.000 \text{ m}^3/\text{ano}, \text{ equivalente a } 10.328 \text{ m}^3/\text{dia} \text{ ou ainda } 430 \text{ m}^3/\text{h}.$$

As estimativas da reserva explotável (Re) para a bacia hidrogeológica do sistema termal, considerando apenas o Grupo 3, resulta em uma vazão de 430 m<sup>3</sup>/h. Caso parâmetros semelhantes sejam estendidos aos grupos de águas termais 1 e 2 (Tabela 3), a disponibilidade total do sistema pode superar 935 m<sup>3</sup>/h (Tabela 3).

Esse valor, obtido como estimativa teórica pelo método volumétrico, pode ser confrontado

com a soma das vazões médias naturais dos grupos termais atualmente reconhecidos na Chapada dos Veadeiros, estimada em 335 m<sup>3</sup>/h, conforme medições realizadas em 13 nascentes (Tabela 2). A comparação evidencia que a descarga natural representa cerca de 36% da reserva explotável total estimada para as três áreas de ocorrência de águas naturalmente aquecidas.

No caso, das águas do Grupo 1, o fato de o sistema apresentar nascentes com vazões expressivas e ainda manter estabilidade térmica sugere que o sistema hidrotermal opera em equilíbrio, com misturas de águas quentes de fluxos profundos com misturas de águas frias rasas, evidenciadas pela presença de trítio (Junqueira et al., 2022).

Ainda assim, a vazão média de 335 m<sup>3</sup>/h observada nas nascentes corresponde a uma fração significativa da capacidade estimada para exploração sustentável, reforçando a importância de controle e monitoramento das captações, especialmente frente a cenários de crescimento turístico e perfuração de poços.

A comparação entre os resultados obtidos na Chapada dos Veadeiros e estudos semelhantes realizados em Caldas Novas (Campos & Almeida, 2012) evidencia tanto semelhanças estruturais quanto diferenças relevantes em termos de contexto hidroambiental. Em ambas as regiões, a circulação de águas termais ocorre predominantemente em aquíferos fraturados, confinados, com comportamento anisotrópico, fortemente condicionado pela tectônica regional. A presença de falhas e zonas de fraturamento profundo, além dos planos de acamamento sedimentar, favorecem a percolação das águas a grandes profundidades, onde são aquecidas por gradiente geotérmico natural.

No entanto, enquanto em Caldas Novas o sistema apresenta ampla cobertura de solos espessos (latossolos de textura média) nas principais

TABELA 3 – Parâmetros para estimativa das disponibilidades hídricas subterrâneas dos aquíferos termais na Chapada dos Veadeiros, para cada grupo de ocorrência. Rpt = reserva permanente total (Rps + Rpp). Vazões calculadas considerando 20 horas de bombeamento diário.

TABLE 3 – Parameters for estimating groundwater availability in the thermal aquifers of Chapada dos Veadeiros, for each occurrence group. Rpt = total permanent reserve (Rps + Rpp). Discharges calculated considering 20 hours of daily pumping.

| Grupo Termal | A (m <sup>2</sup> )   | Ifi (%) | b (m) | h (m) | S                | Rpt (m <sup>3</sup> ) | Disponibilidade (m <sup>3</sup> /h) * |
|--------------|-----------------------|---------|-------|-------|------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| 1            | 8,0 x 10 <sup>6</sup> | 2,0     | 200   | 200   | 10 <sup>-3</sup> | 33.600.000            | 230                                   |
| 2            | 1,0 x 10 <sup>7</sup> | 2,0     | 250   | 300   | 10 <sup>-4</sup> | 40.300.000            | 275                                   |
| 3            | 1,0 x 10 <sup>7</sup> | 2,5     | 300   | 400   | 10 <sup>-4</sup> | 75.400.000            | 430                                   |
| Total        |                       |         |       |       |                  | 1,5 x 10 <sup>8</sup> | 935                                   |



áreas de recarga, na Chapada dos Veadeiros, a elevação topográfica da área de recarga é desprovida de manto de intemperismo, sendo representada por rochas expostas, além de neossolos litólicos. Essas condições contrastantes devem refletir diretamente nas estratégias de gestão, de forma que na região da Chapada dos Veadeiros, a exploração deve ser conduzida com maior controle dos critérios técnicos para emissão de outorgas de direito de uso.

No Distrito Federal, Campos e Cunha (2015) também identificaram circulação de águas termais em aquíferos fraturados. Contudo, o sistema da Chapada dos Veadeiros apresenta maior complexidade estrutural, maiores profundidades e temperaturas mais elevadas. Enquanto no Distrito Federal as temperaturas atingem até 28,9 °C a 150 m de profundidade, na região da Falha São Joaquim, as temperaturas podem ultrapassar os 40 °C, com profundidades de circulação superiores a 1.000 m, conforme os dados de geotermometria e isótopos estáveis (Junqueira et al., 2022). Na região da Chapada dos Veadeiros as falhas que controlam o hidrotermalismo são herdadas dos sistemas de rifte do Paleoproterozoico (Dardenne et al., 1999), ao contrário do Distrito Federal e Sudeste do Estado de Goiás (Caldas Novas), onde as falhas são mais rasas e com rejeitos menores.

Esses resultados reforçam o entendimento de que a sustentabilidade dos aquíferos termais depende não apenas dos processos de recarga e do sistema de fluxo regional, mas sobretudo das reservas permanentes, uma vez que grande parte destas reservas são recursos estagnados e não vinculados ao fluxo regional contínuo.

A possibilidade de uso de parte da reserva permanente como disponibilidade deve-se ao fato de que ao se retirar a reserva sob pressão e iniciar o uso da reserva de saturação, há a indução de recarga adicional a partir das zonas de exposição do aquífero. A recarga induzida tende a ocupar o espaço aberto no sistema aquífero com a ativação do fluxo regional que, naturalmente, é limitado em função da estagnação do sistema com moderado a elevado grau de confinamento. A estagnação regional do reservatório é vinculada à própria natureza dos aquíferos classificados como confinado sem contribuição de água armazenada no aquífero ou sistema totalmente confinado por um aquífugo (Fetter, 2004).

No caso específico dos sistemas aquíferos termais Araújo e Trairas na região da Chapada dos Veadeiros a estagnação do fluxo é também con-

trolada pela Falha São Joaquim que limita o fluxo em direção a oeste. As nascentes de águas termais representam uma componente de fluxo vertical ascendente em zonas de intersecção de estruturas que permitem a liberação localizada do volume de água estagnada.

A gestão integrada dos recursos deve considerar a complexidade dos sistemas de fluxo e envolver as seguintes ferramentas de gestão: i) monitoramento eficiente das cargas potenciométricas (incluindo medições automáticas de pressão e controle das vazões de bombeamento); ii) medições periódicas das vazões das nascentes de águas termais; iii) controle da qualidade e temperatura das águas; iv) otimização das estimativas de disponibilidades (após ampliação do conjunto de informações com a instalação de novos poços na região).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- A aplicação do modelo conceitual de fluxo hidrotermal proposto por Junqueira (2020) e Junqueira et al. (2022) mostrou-se eficaz para representar os principais processos de recarga, circulação e aquecimento das águas subterrâneas na Chapada dos Veadeiros, especialmente em contextos de aquíferos fraturados profundos. Sua aplicação contribui para a compreensão hidrogeológica regional, podendo ser progressivamente aprimorada com a incorporação de novos dados e análises futuras. Novos dados deverão ser incorporados ao acervo atual, com a ampliação do número de poços tubulares profundos, que deverão prover informações sobre as espessuras das camadas confinantes, elevação da superfície potenciométrica nos diferentes blocos, dados hidrodinâmicos e capacidade específica média do aquífero.

- A limitação das áreas ocorrência para as estimativas das disponibilidades permite ponderar e quantificar a fração da água efetivamente envolvida no sistema hidrotermal, tornando as estimativas mais conservadoras e realistas frente à complexidade estrutural da região. O uso apenas da reserva permanente se deve ao fato de o aquífero termal estar sob estagnação do fluxo, em função de seu confinamento e da Falha São Joaquim. As áreas relativamente restritas (de 8 a 10 km<sup>2</sup>) converge para os princípios da gestão dos recursos hídricos subterrâneos que devem privilegiar a análise localmente, em detrimento da avaliação regional dos sistemas (Figura 6).

- A estagnação do fluxo é corroborada pelas

idades das águas, pela presença da falha que coloca porções crustais distintas em contato (rochas anquimetamórficas em contato com rochas metamórficas, na fácies xisto-verde baixo, zona da clorita), elevado grau de confinamento, comportamento do rebaixamento e recuperação dos níveis no teste de bombeamento e caráter físico-químicos das águas. O modelo hidrotermal adotado está de acordo com as distâncias progressivamente maiores das regiões com registros de hidrotermalismo, sendo determinadas como aproximadamente 15, 20 e 30 km da zona de recarga, respectivamente com relação aos grupos 1, 2 e 3.

- As reservas explotáveis estimadas para as três áreas em que comprovadamente existem aquíferos termais (em função da existência de nascentes de águas naturalmente quentes) totalizaram 8.190.600 m<sup>3</sup>/ano. Para a obtenção deste valor foi considerado um cenário restritivo para os cálculos e uso de apenas 5% da reserva permanente.

- A vazão média das nascentes termais da região (335 m<sup>3</sup>/h) representa 36% da reserva explotável estimada, sugerindo que o sistema natural se mantém sob estagnação e sob pressão potiométrica. O início de operação de poços tubulares deverá abrir o sistema para receber recarga induzida. A reposição de água no sistema deverá ser quantitativamente importante em razão da diferença de cota entre a área de recarga e as zonas de descarga. Estima-se que em longo prazo um novo equilíbrio dinâmico entre recarga e descarga seja estabelecido.

- O comportamento confinado do aquífero fraturado, verificado por meio de ensaio de bombeamento do poço tubular profundo e do modelo conceitual do aquífero, corrobora a viabilidade de exploração das águas termais, desde que respeitados os limites definidos pelo presente estudo de estimativas de reservas.

- Este estudo reforça que a gestão sustentável das águas termais deve combinar estimativas quantitativas robustas, monitoramento sistemático e políticas públicas que garantam a conservação ambiental e a segurança hídrica em regiões de alto valor ecológico, turístico e estratégico como a Chapada dos Veadeiros.

## 6 AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos aos editores e relatores da Revista Derbyana pelas valiosas contribuições ao manuscrito. Estendem, ainda, especial reconhecimento ao Dr. Uarian

Ferreira, pelo apoio prestado, pela constante motivação e pela autorização para utilização de parte dos dados que subsidiaram esta pesquisa.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic Press.
- Arraes, T. M., & Campos, J. E. G. (2007). Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(1), 81-89.
- Campos, J. E. G., & Almeida, L. (2012). Balanço térmico aplicado à recarga artificial dos aquíferos da região de Caldas Novas-GO. *Revista Brasileira de Geociências*, 42(1), 196-207. <https://doi.org/10.5327/Z0375-75362012000500016>
- Campos, J. E. G.; & Cunha, L. S. (2015). Caracterização hidrogeológica da ocorrência de aquífero termal no Distrito Federal. *Geociências*, 34(2), 210-223.
- Campos, J. E. G.; & Freitas-Silva, F. H. (1998). *Hidrogeologia do Distrito Federal. Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal*. (Relatório Técnico). Instituto de Ecologia e Meio Ambiente do Distrito Federal, Secretaria do Meio Ambiente, Ciência e Tecnologia/Universidade de Brasília.
- Campos, J. E., & Galvão, M. F. (2023). Bacias hidrogeológicas: conceitos e aplicações. *Derbyana*, 44, Artigo 786. <https://doi.org/10.14295/derb.v44.786>
- Coimbra, A. R. S. R. (1987). *Balanço hídrico preliminar do Distrito Federal*. Inventário Hidrogeológico do Distrito Federal (pp. 50-78). Brasília, GDF/CAESB.
- Costa, W. D. (1997). Uso e gestão de água subterrânea. In F. A. C. Feitosa., & J. M. Manoel Filho (Eds.), *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações* (pp. 341-365). Serviço Geológico Brasileiro.

- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrogeologia subterrânea* (2<sup>a</sup> ed.). Ediciones Omega.
- Dardenne, M. A., Campos, J. E. G., Alvarenga, C. J. S., Martins, F. A. L., & Botelho, N. F. (1999). A sequência sedimentar do Grupo Araí na região da Chapada dos Veadeiros, Goiás. *Anais do Simpósio de Geologia do Centro Oeste e Simpósio de Geologia de Minas Gerais*. Brasília, p. 100.
- Feitosa, A. C. F., Manoel Filho, J., Feitosa, E. C., & Demétrio, J. G. A. (2008). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Laboratório de Hidrogeologia (UFPE/CTG)*.
- Fetter, C. W. (2004). *Applied Hydrogeology* (4<sup>th</sup> ed). MacMillan College Publishing Company.
- Foster, S., & Loucks, D. P. (2006). *Non-renewable groundwater resources: a guidebook on socially-sustainable management for water-policy makers*. UNESCO.
- Junqueira, T. P. (2020). *Modelo conceitual das águas termais da região da Chapada dos Veadeiros (GO): Estudos estruturais, hidroquímicos e isotópicos* [Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília]. Repositório Institucional da UNB. <http://repositorio.unb.br/handle/10482/39021>
- Junqueira, T. P., Campos, J. E. G., Martins-Ferreira, M. A. C., Garnier, J., Garnier, J., & Freitas-Silva, F. H. (2022). Hydrochemical and age constraints of the Chapada dos Veadeiros geothermal reservoir, central Brazil. *Groundwater for Sustainable Development*, 17, Article 100724. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100724>
- Kruseman, G. P., & Ridder, N. A. (1990). *Analysis and evaluation of pumping test data*. International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Martins-Ferreira, M. A. C., & Campos, J. E. G. (2017). Compartimentação geomorfológica como suporte para estudos de evolução geotectônica: aplicação à região da Chapada dos Veadeiros, GO. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 18(3), 501–519. <https://doi.org/10.20502/rbg.v18i3.1119>
- Martins-Ferreira, M. A. C., Campos, J. E. G., & Huelsen, M. G. (2018a). Tectonic evolution of the Paranoá basin: New evidence from gravimetric and stratigraphic data. *Tectonophysics*, 734–735, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.04.004>
- Martins-Ferreira, M. A. C., Campos, J. E. G., Huelsen, M. G., & Neri, B. L. (2018b). Paleorift structure constrained by gravity and stratigraphic data: The Statherian Araí rift case. *Tectonophysics*, 738, 64–82. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.05.014>
- Martins-Ferreira, M. A. C., Chemale Jr., F., Dias, A. N. C., Campos, J. E. G. (2018c). Proterozoic intracontinental basin succession in the western margins of the Sao Francisco Craton: Constraints from detrital zircon geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 81, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.11.018>
- Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura. (2004). *Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity and Climate Change* (GRAPHIC). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Rosen, L., & LeGrand, H. E. (2000). Systematic makings of early stage hydrogeologic conceptual models. *Groundwater*, 38(6), 887–893. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2000.tb00688.x>
- Tanizaki, M. L. N, Campos, J. E. G., & Dardenne, M. A. (2015). Estratigrafia do Grupo Araí: Registro de rifteamento paleoproterozoico no Brasil Central. *Brazilian Journal of Geology*, 45(1): 95–108.
- Wang, H. F., & Anderson, M. P. (1995). *Introduction to groundwater modelling: Finite Difference and Finite Element Methods*. Academic Press.

*Manuscrito submetido em 12 de maio de 2025, aceito em 29 de outubro de 2025.*

*Como citar:* Moura, C. O., Campos, J. E. G., Freitas e Silva, F. H., & Junqueira, T. P. (2025). Estimativa das reservas hídricas do sistema aquífero termal da Falha São Joaquim, Chapada dos Veadeiros, Goiás. *Derbyana*, 46, Artigo e860.

*Contribuição dos autores:* C.O.M: Conceituação, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Redação - revisão e edição. J.E.G.C.: Conceituação, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Redação - revisão e edição. F.H.F.S: Conceituação, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Redação - revisão e edição. T.P.J.: Redação - revisão e edição.

*Conflito de interesses:* Os autores declaram que não há conflito de interesses.



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License.