





## Caracterização Hidrodinâmica do Aquífero Batalha na Região Noroeste de Minas Gerais

*Hydrodynamic Characterization of the Batalha Aquifer in the Northwest Region of Minas Gerais, State, Brazil*

Guilherme Neiva Rodrigues Oliveira<sup>1</sup> , José Eloi Guimarães Campos<sup>1</sup> ,  
André Walczuk Gomes<sup>1</sup>  & Florença das Graças Moura<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal de Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia, Catalão, GO, Brasil

E-mails: [gneiva\\_geo@gmail.com](mailto:gneiva_geo@gmail.com); [eloi@unb.br](mailto:eloi@unb.br); [walczuk.andre@gmail.com](mailto:walczuk.andre@gmail.com); [fmoura@ufg.br](mailto:fmoura@ufg.br)

### Resumo

O Aquífero Batalha corresponde a um reservatório subterrâneo livre, intergranular, isotrópico e homogêneo, hospedado em material inconsolidado, que ocorre entre os municípios de Paracatu/MG e Guarda-Mor/MG, disposto em um trend estrutural N-S com área total estimada de 745 km<sup>2</sup>. Dados de 220 poços tubulares indicam que o Aquífero Batalha apresenta vazão média de 45,5 m<sup>3</sup>/h, descarga obtida em poços relativamente rasos, com profundidade média de 42,5 m e média de espessura saturada de 33 m. A zona não saturada do aquífero é constituída principalmente por latossolos argilosos com condutividade hidráulica da ordem de 10<sup>-4</sup> m/s em superfície, sotoposta a uma espessa camada de solo residual argiloso e saprolito arenoso formado pelo intemperismo de filitos e quartzitos da Formação Serra da Batalha, do Grupo Canastra. Os parâmetros hidrodinâmicos obtidos para a zona saturada correspondem a uma condutividade hidráulica de 3,6 x 10<sup>-5</sup> m/s, uma transmissividade de 9,5 x 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s e uma vazão específica (Sy) média de 0,2. A compilação dos dados hidrodinâmicos somados às informações geológicas, geomorfológicas e pedológicas permitiram a caracterização do Aquífero Batalha, bem como permitiram a definição de seus limites. Este aquífero pode ser considerado uma anomalia regional por apresentar vazões elevadas em poços rasos que, apesar do bombeamento expressivo, ainda não está sob regime de sobreexploração.

**Palavras-chave:** Aquífero Batalha; Porosidade intergranular; Caracterização hidrodinâmica

### Abstract

The Batalha Aquifer corresponds to an unconfined, intergranular, isotropic and homogeneous groundwater reservoir, hosted in unconsolidated material, distributed between Paracatu and Guarda-Mor counties, Minas Gerais State, Brazil, and arranged in an N-S trend with an estimated area of 745 km<sup>2</sup>. Data from 220 tubular wells indicate that the Batalha Aquifer has an average flow rate of 45.5 m<sup>3</sup>/h, discharge from relatively shallow wells, with an average depth of 42.5 m and an average saturated thickness of 33.3 m. The unsaturated zone of the aquifer consists mainly of clayey oxisols with hydraulic conductivity about 10<sup>-4</sup> m/s in surface, with a thick layer of residual clayey soil and sandy saprolite formed by the weathering of phyllite and quartzite from Serra da Batalha Formation (Canastra Group). The hydrodynamic parameters obtained for the saturated zone correspond to a hydraulic conductivity of 3.6 x 10<sup>-5</sup> m/s, a transmissivity of 9.5 x 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s and a mean specific flow of 0.2. The compilation of the acquired hydrodynamic data, together with the obtained geological, geomorphological and pedological information, allowed the characterization of the Batalha Aquifer, as well as the mapping of its limits. This aquifer can be considered a regional anomaly, once it shows high yields in shallow wells that, despite expressive pumping rates, is not yet under over exploitation regime.

**Keywords:** Batalha Aquifer; Intergranular porosity; Hydrodynamic characterization

## 1 Introdução

O aquífero estudado cujos resultados são apresentados no presente artigo é classificado como do tipo intergranular livre associado a material não consolidado (Freeze & Cherry, 1979; Fetter, 1994). Pela sua capacidade de reservação e transmissão de água em uma espessura relativamente restrita o reservatório é considerado atípico, tanto pelo volume atualmente captado, quanto por sua condição de recarga favorável (estar situado em região de relevo plano com solos espessos e com abundância de chuvas).

Para sua caracterização foram aplicados métodos tradicionalmente utilizados em pesquisa hidrogeológica, entretanto, os resultados mostraram que se trata de um aquífero de extremo potencial.

Na região do noroeste do estado de Minas Gerais (Figura 1) fazendeiros tem retirado água subterrânea em grandes volumes para irrigação de lavouras nos últimos

anos, o que tem chamado a atenção dos gestores ambientais e pesquisadores da região. A exploração desse recurso ocorre em centenas de poços relativamente rasos e de baixo custo de instalação, e de elevada produção, permitindo a irrigação de grandes áreas, aumentando a produção agrícola da região e proporcionando o plantio de até três safras anuais.

Segundo Fitts (2002) toda água que flui em um curso d'água natural tem origem pela precipitação, entretanto essa água toma várias rotas até chegar ao seu destino. Parte flui diretamente sobre a superfície do solo até um canal por meio de escoamento superficial. Parte se infiltra parcialmente no solo e flui lateralmente através da zona não saturada até um canal (interfluxo). Outra parte se infiltra até porções mais profundas do aquífero e se armazena na zona saturada, podendo descarregar de volta à superfície em uma nascente, lago ou canal de curso d'água, através do fluxo de base.

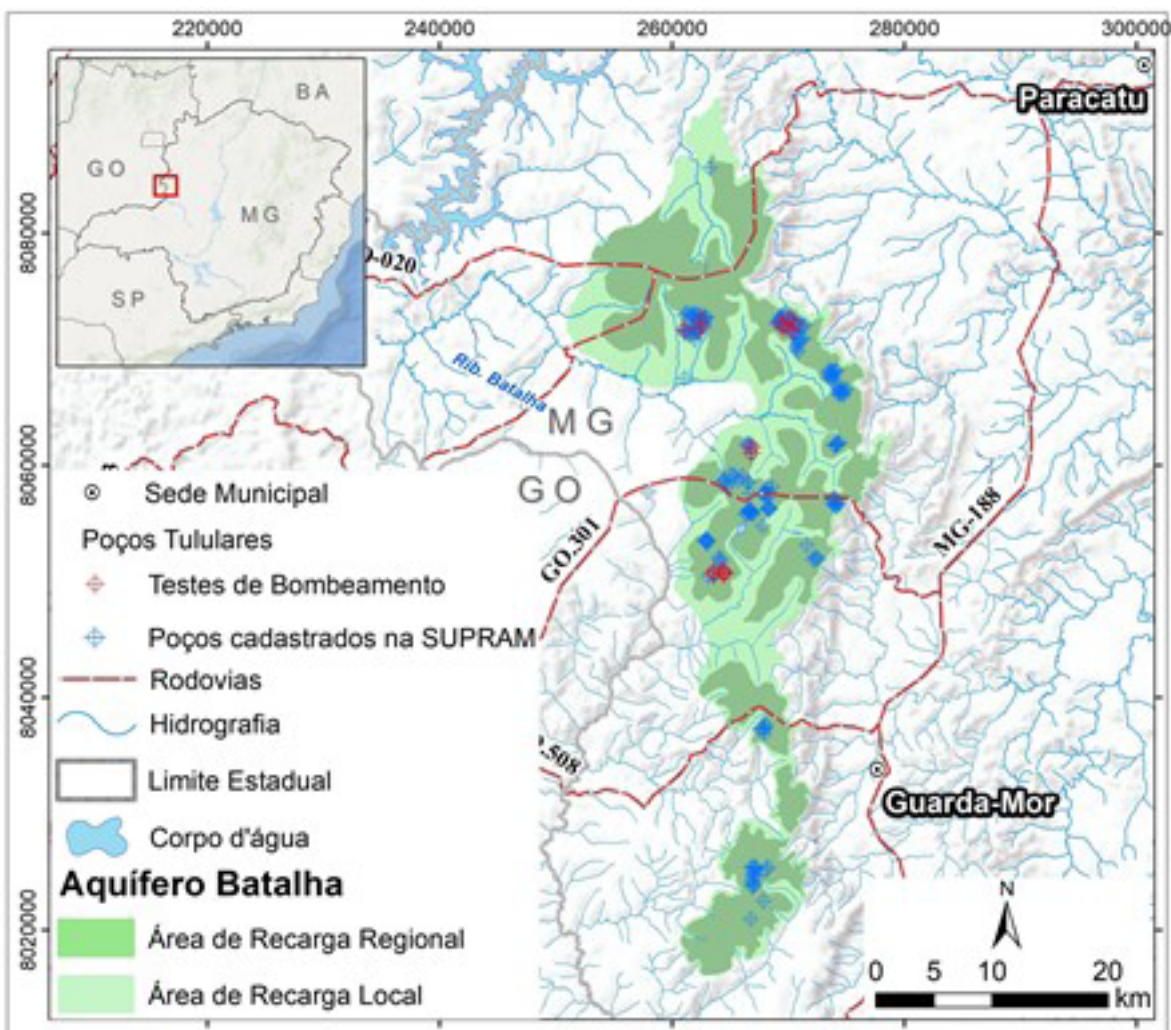


Figura 1 Mapa de localização do estudo e distribuição do Aquífero Batalha.

Se o material que compõe a zona não saturada apresentar baixa permeabilidade, a maior parte da precipitação não infiltra e o fluxo de base é apenas uma pequena parte da descarga do curso. No entanto, se o material geológico na bacia de um curso for muito permeável, como é o caso da região em estudo, o fluxo de base pode ser uma grande parte da descarga de cursos d'água, como observado nas campanhas de campo, onde ocorrem diversas veredas e córregos perenes, que apresentam fluxo de água de grande magnitude, sendo o fluxo de base o único contribuinte para as vazões durante o período de seca na região. O sistema aquífero em estudo apresenta potencial elevado (considerado anômalo), sendo que este aspecto é importante tanto para sua reserva de águas subterrâneas, quanto para a manutenção dos cursos de águas superficiais.

No entanto, esse aquífero carece de uma definição formal, que auxilie nos estudos relacionados a água subterrânea na região e que agregue conhecimento sobre as características hidrogeológicas do aquífero, de modo que permita subsidiar projetos de gestão e uso sustentável, com foco em reduzir os riscos de contaminação e sobreexploração de seus recursos. É importante salientar que este estudo é pioneiro, uma vez que não existe nenhum trabalho previamente realizado visando à caracterização ou à definição deste importante reservatório subterrâneo.

Nesse sentido, este trabalho objetiva agregar conhecimento sobre esse aquífero, a partir da análise integrada da geologia, da pedologia e da geomorfologia da região, juntamente com levantamentos geofísicos de eletrorresistividade e informações obtidas por meio de processos de outorga de direito de uso dos poços tubulares fornecidas pela SUPRAM Noroeste de Minas (Superintendência Regional de Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais), situada na cidade de Unaí. Adicionalmente, a pesquisa objetiva caracterizar hidráulicamente, determinar o potencial e delimitar esse reservatório, denominado por esse trabalho como Aquífero Batalha.

A área de ocorrência do Aquífero Batalha está distribuída no Noroeste de Minas Gerais, nos municípios de Paracatu e Guarda-Mor, próximo à divisa com o estado de Goiás (Figura 1).

## 2 Metodologia

Inicialmente foi elaborado um levantamento dos poços tubulares presentes na área de estudo e cadastrados junto ao órgão ambiental licenciador (SUPRAM Noroeste de Minas), além de campanhas de campo, nas quais foram realizados levantamentos de dados geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos, descrições de perfis de solos e levantamentos geofísicos. A compilação dos dados permitiu a elaboração de um modelo conceitual do aquífero e a delimitação de seus limites.

## 2.1 Caracterização da Área de Estudo

De acordo com Santos & Ribeiro (2004) a região em estudo enquadra-se no grupo C (climas mesotérmicos) da classificação macroclimática de Köppen, com variedade Aw, o que implica em invernos secos e temperatura do ar do mês mais quente superior a 22°C. Caracteristicamente, esta classe climática é marcada por duas estações bem definidas, sendo uma chuvosa (outubro a abril) e outra seca (maio - setembro).

A geologia da área é representada principalmente por quartzitos sobrepostos por filitos sericíticos ou cloríticos, comumente alterados, com coloração rosada a avermelhada, atribuídos à Formação Serra da Batalha do Grupo Canastra (Dardenne, 2000).

O Aquífero Batalha está posicionado sobre a unidade geomorfológica Chapadas de Paracatu, a qual se encontra sustentada pelas rochas quartzíticas, onde o padrão de relevo varia de plano a suave ondulado com declividades menores que 8%, entre as cotas 930 e 1022 metros.

Os latossolos predominam no domínio da chapada, em relevo plano a suave ondulado, variando entre latossolo amarelo e latossolo vermelho-amarelo. Nas cabeceiras das diversas veredas ocorrem gleissolos háplicos. Já nas bordas da chapada, onde o relevo é declivoso, são encontradas associações entre cambissolos háplicos e plintossolos pétricos concrecionários.

A análise de amostras de calha obtidas durante perfurações de poços tubulares indica que o Aquífero Batalha corresponde predominantemente em seus primeiros metros a latossolos de textura argilosa a muito argilosa, derivado do intemperismo *in situ* de fengita-clorita-quartzito filitos, compondo a zona não saturada do aquífero. Já a zona saturada é formada predominantemente por areia clara com grãos arredondados correspondente ao saprolito do quartzito. Ambos os tipos petrográficos (filitos e quartzitos) são atribuídos à Formação Serra da Batalha do Grupo Canastra (Figura 2).

## 2.2 Determinação dos Parâmetros Hidrodinâmicos

Para a zona não saturada foram realizados os cálculos de acordo com a metodologia dos ensaios de infiltração do tipo *open end hole* e anéis concêntricos, os quais forneceram os valores de condutividade hidráulica vertical ( $K_v$ ). De acordo com Fiori (2010) o método dos anéis concêntricos é um instrumento utilizado para determinação da condutividade hidráulica vertical ( $K_v$ ) na superfície e é composto por dois cilindros dispostos de forma concêntrica, que são cravados a alguns centímetros do solo para impedir a dispersão lateral da água inserida no cilindro interno. Essa propriedade  $K_v$  corresponde ao potencial de fluxo de água, além da capacidade de infiltração e migração

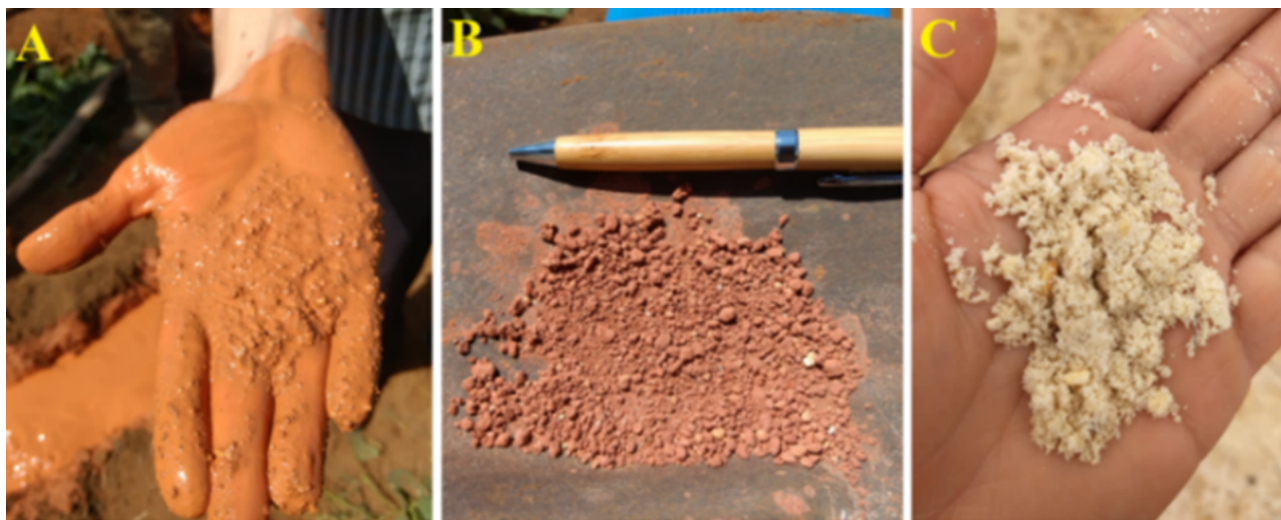
vertical de plumas de umidade durante os processos de recarga do aquífero.

Bernardo (1986) afirma que o método dos anéis concêntricos é apropriado para a determinação do  $K_v$  da superfície do terreno, o qual apresenta variações diretamente proporcionais entre o tipo de ocupação do solo e a taxa de infiltração.

Os ensaios do tipo *open end hole* são utilizados para avaliações de  $K_v$  em profundidade, neste trabalho

foram realizados ensaios nas profundidades de 50, 100, 150 e 200 cm. Foram introduzidos quatro tubos de PVC de 50 cm de diâmetro e comprimento compatível com a profundidade a ser analisada.

Segundo ABGE (1996) os ensaios de infiltração consistem em ensaios de rebaixamento da coluna d'água nos diferentes arranjos, realizados com carga constante e com injeção de água, na zona saturada ou não saturada do aquífero.



**Figura 2** Composição do material retirado durante a perfuração de poços; Em **A.** e **B.** observa-se o material removido durante os primeiros metros de perfuração composto por solo residual argiloso; Em **C.** observa-se a areia clara correspondente ao saprolito do quartzito da Formação Serra da Batalha.

Já os parâmetros hidrodinâmicos da zona saturada foram obtidos pela análise dos dados de 220 poços outorgados pela SUPRAM Noroeste de Minas, nos quais se obteve as informações de vazão média ( $Q$ ) e profundidade média dos níveis estático (NE) e dinâmico (ND), além de perfis construtivos e testes de bombeamento. Os demais parâmetros foram adquiridos mediante processamento de 20 testes de bombeamento de poços representativos e especializados ao longo do Aquífero Batalha. Os dados dos testes de bombeamento foram tratados no software *Aquifer Test Pro*, da *Waterloo Hydrogeologic Inc.*, utilizando o método de Neuman (1975), através do qual se obtiveram os parâmetros hidrodinâmicos e dimensionais do aquífero como a transmissividade ( $T$ ), coeficiente de armazenamento ( $S$ ) e a condutividade hidráulica da zona saturada ( $K$ ).

O software *Aquifer Test* permite a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero por meio de dados de rebaixamento do nível da água, medidos em poços de observação durante testes de bombeamento. Como os testes de bombeamento utilizados para determinar os parâmetros hidrodinâmicos consistem em testes com

leitura de rebaixamento no próprio poço bombeado, foram propostos poços virtuais, com uma distância de 1 metro entre os poços de bombeados e de observação. As medidas de rebaixamento foram realizadas com auxílio de medidor com sensor sonoro no próprio poço de bombeamento. Para efeitos de cálculos de parâmetros hidráulicos foi considerada uma distância de 1 metro entre o poço de bombeamento e o poço de observação.

### 2.3 Levantamento Geofísico

Neste trabalho foram realizados 15 perfis geofísicos a partir do método de eletrorresistividade, com o objetivo de se obter informações geológicas e da espessura do aquífero. Os primeiros perfis geofísicos foram locados inicialmente próximos a poços com perfis litológicos e construtivos conhecidos, de modo a serem aplicados como referência aos valores de resistividade obtidos. Os demais perfis se encontram em locais distantes a poços tubulares e com poucas informações geológicas, sendo de grande utilidade como parâmetro para a delimitação do aquífero.

O princípio do método geofísico da eletrorresistividade está baseado na determinação dos valores de resistividade elétrica dos materiais, uma das variáveis responsáveis por expressar as propriedades eletromagnéticas dos solos e rochas (Braga, 2016).

A técnica utilizada neste trabalho consistiu no chamado caminhamento elétrico (CA), com arranjo dipolo-dipolo que segundo Telford *et al.* (1990) possibilita o mapeamento lateral das variações de resistividade elétrica. O produto do levantamento de eletrorresistividade é um conjunto de dados de resistividade elétrica obtido em  $n$  profundidades que formam uma pseudosseção, que reflete as variações do subsolo em resposta à passagem de correntes elétricas (Elis, 1998).

Foi utilizado o equipamento Eletrorresistivímetro SYSCAL Pro 72 (fabricado pela *Iris Instruments*) com arranjo de 360 metros de extensão, com eletrodos espaçados de 10 em 10 metros, que permitiram investigação de até 70 metros de profundidade.

### 3 Resultados e Discussões

#### 3.1 Cadastro de Poços

A partir dos dados cadastrais dos poços tubulares na região do aquífero foi possível determinar que a vazão média é de 45,5 m<sup>3</sup>/h, atingindo vazão máxima de 90 m<sup>3</sup>/h. As vazões consideradas baixas (< 10 m<sup>3</sup>/h) estão relacionadas ao tipo de bomba utilizada, de baixa potência. A soma das vazões outorgadas corresponde a aproximadamente 10 milhões de litros de água por hora que é potencialmente explorada a partir dos poços tubulares cadastrados, os quais são autorizados a bombear durante 20 horas por dia ao longo de todo o ano com a finalidade de irrigação de lavouras.

Os poços apresentam profundidade média de 42 m, podendo ser considerados como poços tubulares rasos, com profundidades variando entre 25,5 m até a máxima profundidade observada, de 62 m. O nível estático (NE) se encontra em 9,1 m de profundidade média, sendo que em alguns locais, o nível estático se aproxima da superfície (Tabela 1). Os valores de rebaixamento (sw) apresentam grande variação, entre 1,6 m e 41,85 m, com média de rebaixamento de 14,43 m. A capacidade específica (Cs) média do aquífero corresponde a 3,91 m<sup>3</sup>/h/m e a espessura saturada (b), apresenta média de 33,33 m de espessura, atingindo, pontualmente, mais de 50 m (Tabela 1).

#### 3.2 Caracterização da Zona Não Saturada

Para a obtenção dos valores de condutividade hidráulica vertical ( $K_v$ ) na zona não saturada foram realizados 22 ensaios de infiltração *in situ* pelos métodos dos “anéis concêntricos” e 14 através do método *open end hole*. Os ensaios de infiltração foram distribuídos ao longo da área de recarga do Aquífero Batalha e de acordo com as variações de uso e classes de solo. Os locais analisados incluíram solos em áreas de agricultura, solo exposto e de cerrado nativo.

A zona não saturada do Aquífero Batalha é composta predominantemente por latossolo vermelho-amarelo de textura argilosa, o qual atinge profundidades de até 25 m, sendo responsáveis pelo controle da infiltração e recarga do aquífero. Foram obtidos valores de  $K_v$  na ordem de grandeza variando de 10<sup>-3</sup> a 10<sup>-9</sup> m/s. De acordo com a proposição de Freeze & Chery (1996) e Fetter (1994) valores de  $K_v$  superiores a 10<sup>-5</sup> são classificados como alta condutividade hidráulica.

**Tabela 1** Informações dimensionais e hidrodinâmicas do Aquífero Batalha. Dados do cadastro de 220 poços foram utilizados para a caracterização e delimitação do aquífero.

Parâmetro	NE (m)	ND (m)	sw (m)	Cp (m <sup>3</sup> /h/m)	Prof. (m)	Q (m <sup>3</sup> /h)
Média	9,12	23,55	14,43	3,91	42,45	45,48
Máximo	18,00	47,00	41,85	39,23	62,00	90,00
Mínimo	1,00	6,00	1,60	0,56	25,50	3,50
Variância (s <sup>2</sup> )	11,34	25,50	34,01	11,30	101,32	299,84
Desvio Padrão (s)	3,37	5,06	5,84	3,37	10,08	17,34
Q1	6,50	20,69	9,59	2,13	34,00	32,40
Mediana	9,45	24,40	15,31	3,14	40,00	44,00
Q3	11,45	27,00	18,75	4,63	50,00	55,60
Q3-Q1	4,95	6,31	9,16	2,51	16,00	23,20
Moda	1,00	28,00	17,50	1,85	40,00	45,00

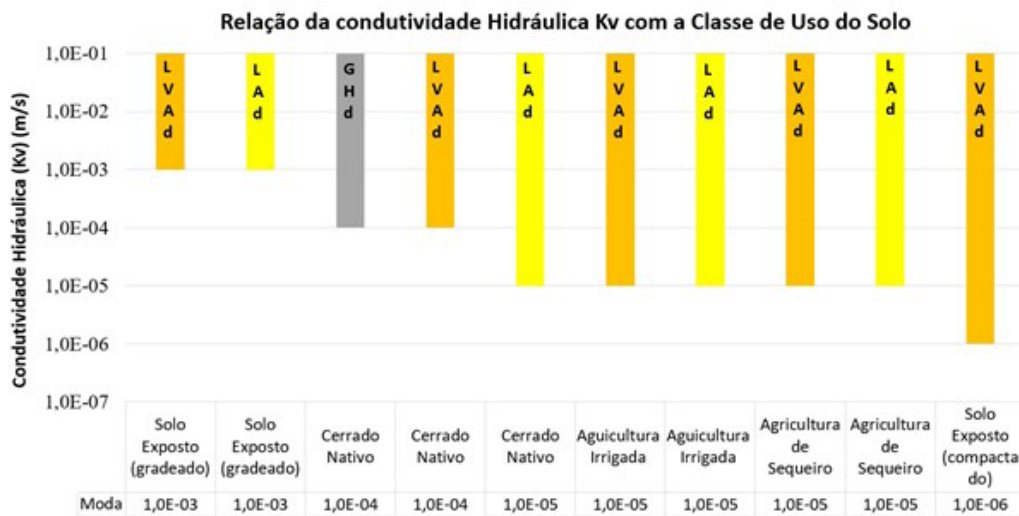
Fonte: SUPRAM Noroeste de Minas.

Nos ensaios de infiltração pelo método *open end hole* foram obtidos valores de  $K_v$  na ordem de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  m/s para os locais com pouca ou nenhuma intervenção antrópica. Já os valores de  $K_v$  para os locais de agricultura, apresentam valores na ordem de  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  m/s, evidenciando a diminuição do potencial de infiltração em locais com constante fluxo de máquinas e ausência de vegetação nativa.

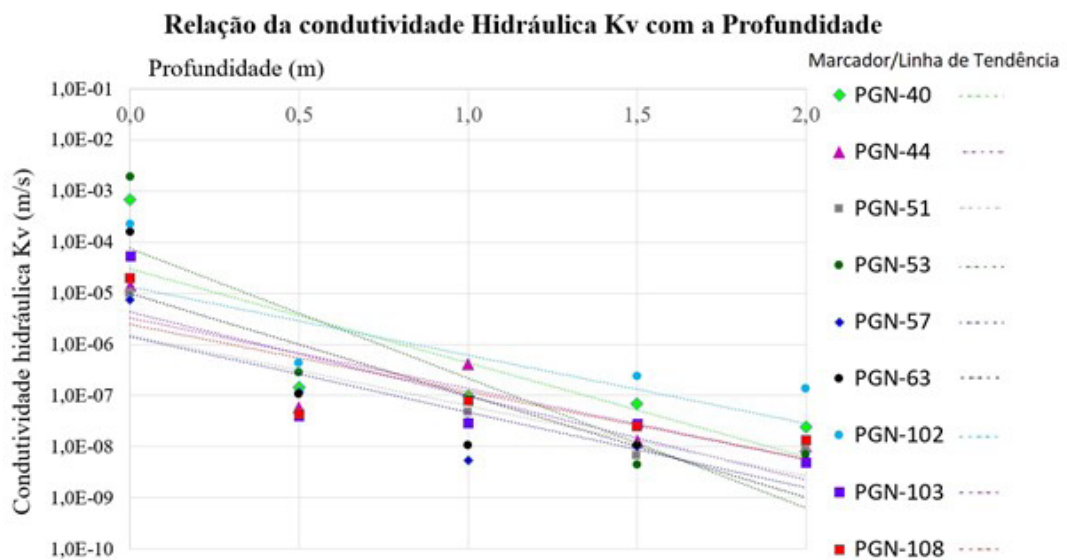
Observa-se que quanto mais antiga a atividade agrícola no local, menos estruturado se encontra o solo e

menores os valores de  $K_v$ , devido à quebra das estruturas durante o preparo do solo, onde os valores de  $K_v$  chegam a ordem de  $10^{-6}$  m/s (Figura 3).

Na análise da moda dos valores de  $K_v$  em profundidade (método *open end hole*), se observa um comportamento homogêneo entre as classes de solo latossolo vermelho-amarelo distrófico e latossolo amarelo distrófico, devido à sua similaridade. No entanto, também se observa uma tendência na diminuição dos valores de  $K_v$  com o aumento da profundidade de investigação (Figura 4).



**Figura 3** Gráfico da correlação dos valores de condutividade hidráulica ( $K_v$ ) com as classes e tipos de uso do solo, obtidos pelo método dos anéis concêntricos. Fica evidente a diminuição dos valores de  $K_v$  com a ação antrópica. LVAd = Latossolo Vermelho Amarelo distrófico; LAd = Latossolo Amarelo distrófico; GHd = Gleissolo Háptico distrófico.



**Figura 4** Gráfico de dispersão dos valores de  $K_v$  nas diferentes profundidades investigadas, nos pontos PGN-12, PGN-40, PGN-44, PGN-51, PGN-53, PGN-57, PGN-63, PGN-102, PGN-103 e PGN-108.

### 3.3 Caracterização da Zona Saturada

Os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos fornecem subsídios para o entendimento das características de armazenamento e fluxo hídrico subterrâneo. Para a obtenção desses parâmetros foram analisados 22 testes de bombeamento realizados nos poços cadastrados pela SUPRAM Noroeste de Minas. Por se tratar de um aquífero livre, o método adotado para obtenção dos parâmetros foi o método de Neuman (1975) (Tabela 2 e Figura 5).

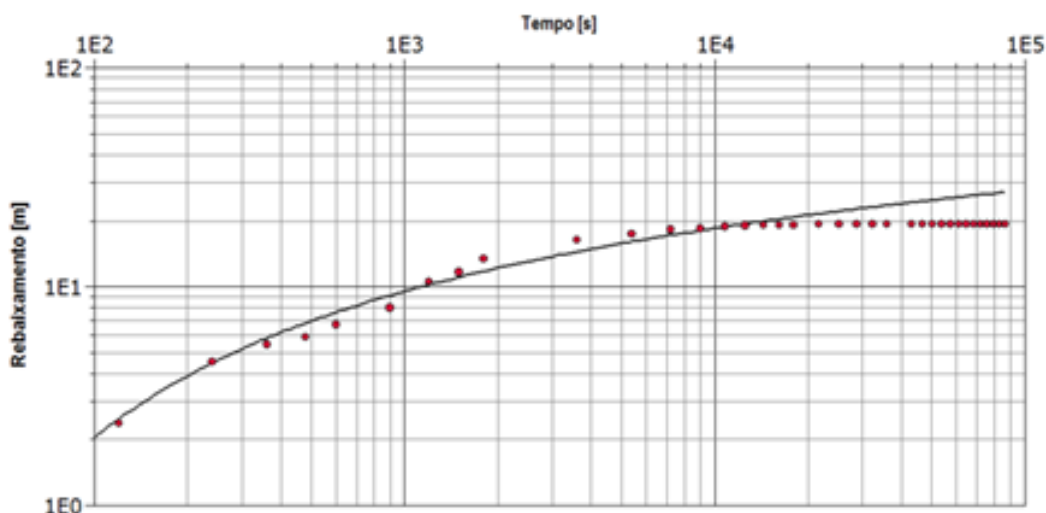
Os dados hidrodinâmicos dos 22 testes de bombeamento resultam nas seguintes características para o Aquífero Batalha:

- Condutividade hidráulica muito alta a moderada, sendo que a maior parte dos dados alcançam valores da ordem de  $10^{-5}$  m/s. Tais valores são coerentes com o material arenoso, limpo e inconsolidado que compõe a zona saturada do aquífero;

- Transmissividade variando entre  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s o que é coerente com as espessuras da ordem de poucas dezenas de metros de espessura da zona saturada do aquífero;
- A vazão específica é inferior a 27% para a maior parte dos poços estudados, sendo que os casos de valores anômalos são considerados como decorrentes de efeitos hidráulicos e falta de condições de contorno adequadas durante a realização dos testes de bombeamento. Os valores da ordem de 0,2 são os considerados os mais coerentes com o aquífero;
- A vazão média de 36,35 m<sup>3</sup>/h (para os 22 poços bombeados) é considerada anômala, tendo em vista que se trata de poços pouco profundos que explotam o aquífero com uma zona saturada média de 33 metros;
- A capacidade específica média de 3,9 m<sup>3</sup>/h/m é também anômala, sendo maior do que a média encontrada em aquíferos sedimentares hospedados em rochas arenosas litificadas.

**Tabela 2** Valores dos parâmetros hidrodinâmicos da zona saturada obtidos após processamento dos dados no software *Aquifer Test* 9.0 da *Waterloo Hydrogeologic Inc.* Fonte: Processos de outorga dos poços cadastrados na SUPRAM Noroeste de Minas. Q = vazão, b = espessura saturada, K = condutividade hidráulica, T = transmissividade e Sy = vazão específica.

Parâmetro	Q (m <sup>3</sup> /h)	b (m)	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)	Sy
Média	36,35	27,01	$3,61 \times 10^{-5}$	$9,51 \times 10^{-4}$	0,20
Máxima	69,00	34,50	$1,50 \times 10^{-4}$	$1,80 \times 10^{-3}$	0,47
Mínima	8,64	16,55	$1,29 \times 10^{-6}$	$5,04 \times 10^{-4}$	0,01



**Figura 5** Exemplo de gráfico de interpretação da curva rebaixamento *versus* tempo de ensaio de bombeamento pelo método de Neuman (1975) em poço tubular instalado no Aquífero Batalha. Dados processados no software *Aquifer Test* 9.0.

### 3.4 Estudo Geofísico - Eletrorresistividade (CA)

A partir das 15 seções levantadas foi proposto um modelo de camadas baseado na resposta dos valores de resistividades obtidas próximo a poços com perfis litológicos conhecidos e de acordo com o modelo de Lima (2010) (Tabela 3). A Figura 6 apresenta os valores de resistividade obtidos ao longo desse perfil, bem como ilustra as camadas interpretadas, conforme os perfis litológicos de poços tubulares interceptados pelas seções geofísicas.

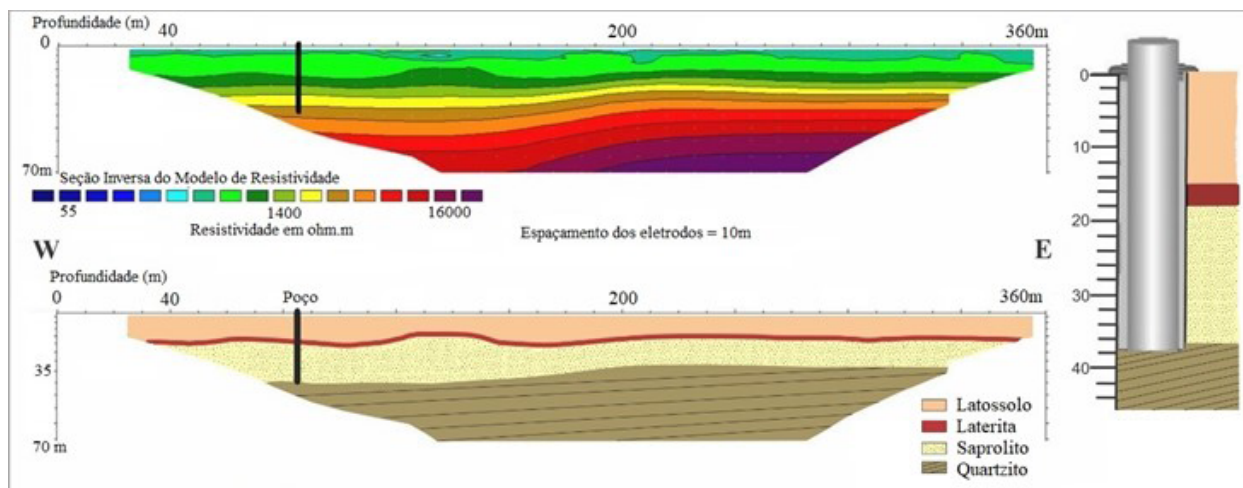
A primeira camada do perfil litológico do poço é composta por latossolo vermelho amarelo de textura argilosa, o qual possui 15 metros de espessura no local e valores de resistividade elétrica variando entre 500 e 1200 Ohm.m. A camada sotoposta é caracterizada por concreções de plintita (laterita) formando uma camada de cerca de três metros de espessura, entre as profundidades de 15 e 18 metros e valores de resistividade elétrica entre 1201 e 1350 Ohm.m. A camada imediatamente abaixo é composta por areia de coloração clara e granulometria variando entre fina a média, correspondente ao saprolito dos quartzitos da Formação Serra da Batalha, que no local apresenta 19 m de espessura se iniciando a 18 m de profundidade e com valores de resistividade entre 1301 a 4500 Ohm.m.

Por fim, caracterizando o substrato do aquífero se encontra a rocha sã, formando uma barreira hidráulica e caracterizada por quartzito da Formação Serra da Batalha, a qual se encontra no local com profundidades maiores que 37 m e valores de resistividade elevados, superiores a 4500 Ohm.m. Dados obtidos em outras áreas na Faixa Brasília mostram que esse substrato rochoso é pouco permeável e responsável pelo direcionamento do fluxo da água no aquífero, estando neste caso com o fluxo na direção oeste, mesmo sentido de mergulho das camadas de quartzito.

A partir da integração dos dados de georreferenciamento dos poços tubulares e das seções geofísicas (que foram posicionadas em locais com ausência ou baixa densidade de poços) foi possível delimitar a área de ocorrência do Aquífero Batalha. Esta integração resultou em uma poligonal de 745 km<sup>2</sup>, que é delimitada a leste pela Serra da Tiririca e a oeste pela área de ocorrência de quartzito do Grupo Canastra. O recorte dos dados potenciométricos com o mapa de relevo também foi aplicado para a determinação dos limites do aquífero, sendo que a área corresponde ao divisor das bacias dos rios Paranaíba (que flui para oeste) e Paracatu (que flui para leste).

**Tabela 3** Características das camadas obtidas durante o acompanhamento da perfuração do poço (perfil litológico) e seus respectivos intervalos de profundidade e resistividade.

Descrição do Perfil Litológico	Profundidade (m)	Resistividade (ohm.m)
Latossolo Vermelho-Amarelo	0 - 15	500 - 1.200
Laterita Concrecionária	15 - 18	1.201 - 1.350
Saprolito arenoso	18 - 37	1.351 - 4.500
Rocha (Quartzito)	> 37	> 4500 até 16.000
Rocha (filito)	Variáveis	~ 3000 até < 7.000



**Figura 6** Modelo geológico elaborado a partir dos dados de resistividade obtidos e de perfil litológico de poço-construído.



### 3.5 Caracterização das Áreas de Recarga

A área total do Aquífero Batalha foi subdividida, de acordo com as condições de circulação, em área de recarga regional, área de recarga local e área de descarga (Figura 7). A área de recarga regional é caracterizada pela ausência de exutórios (cursos d'água/veredas), apresenta relevo plano e é responsável pelos maiores volumes de recarga e, conseqüentemente, pelo maior volume armazenado. Já a área de recarga local ocorre em regiões com maiores declividades, condicionadas aos vales das veredas, onde o escoamento superficial é maior, dificultando a infiltração, de modo que a recarga é menor em relação aos volumes infiltrados no topo das chapadas.

### 3.6 Modelo de Circulação

Na Figura 8 apresenta-se um modelo conceitual de fluxo para a área de estudo. Para efeito do modelo proposto,

um balanço hídrico preliminar considerou que: 1400 mm/ano correspondem à precipitação média histórica para toda a área que alimenta o sistema (dado subestimado, obtido a partir das estações do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) de Patrocínio e Coromandel); 770 mm/ano são devolvidos à atmosfera por evapotranspiração (dado obtido do balanço hídrico climatológico da normal climatológica das estações Patrocínio e Coromandel); 630 mm/ano se infiltram através da zona vadosa (estimativa decorrente do fato que nas zonas de recarga regional não há escoamento superficial); 450 mm/ano são considerados recarga efetiva do Aquífero Batalha (dado obtido pela estimativa de reserva renovável do sistema).

Para o cálculo da reserva renovável foi aplicado método da flutuação do nível freático em locais com dados confiáveis da variação anual do nível freático ( $\Delta h$ ) e aplicado dado de porosidade efetiva média ( $\eta_e$ ) de acordo com o material observado durante a perfuração dos poços.

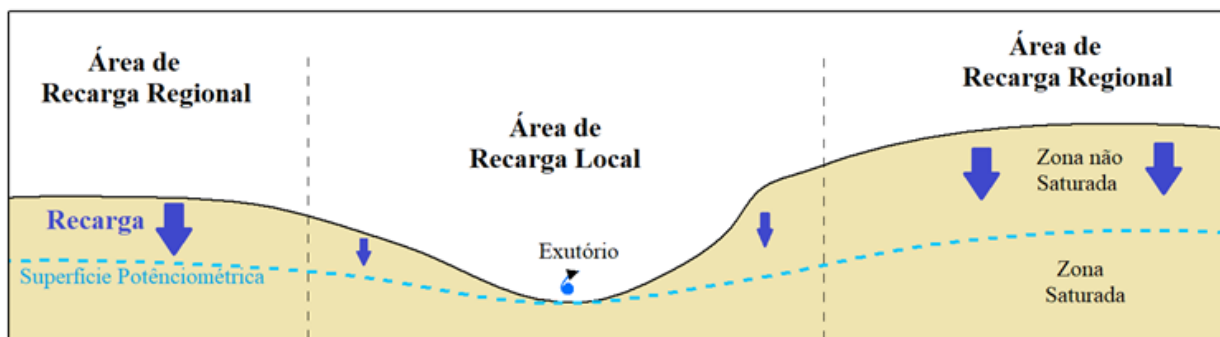


Figura 7 Perfil esquemático da dinâmica das áreas de recarga regional e local.

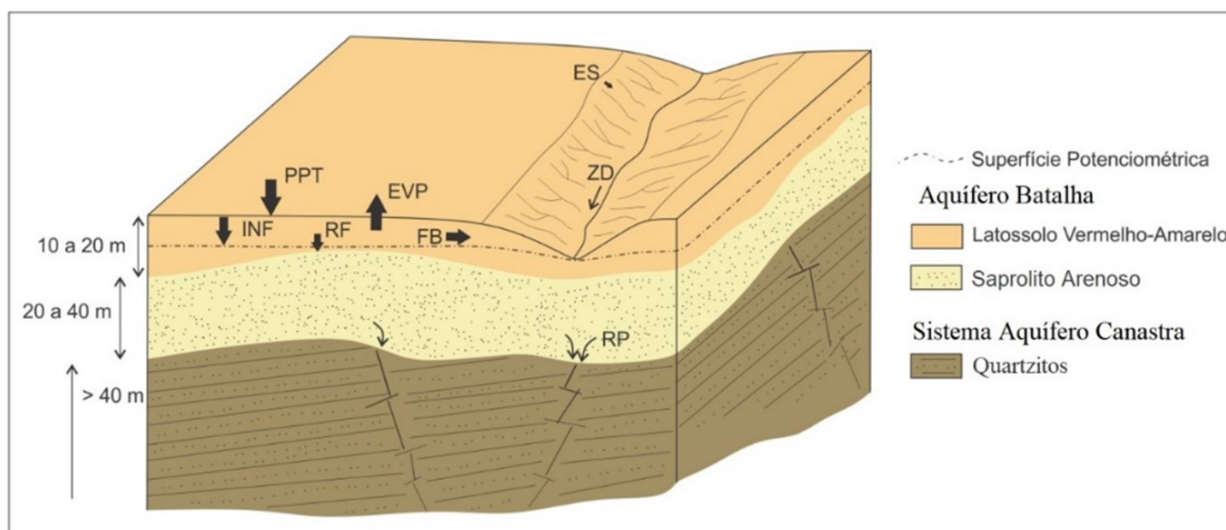


Figura 8 Modelo conceitual de fluxo para a região de estudo, indicando os principais processos envolvidos no sistema. PPT = Precipitação; INF = Infiltração; EVP = Evapotranspiração; ES = Escoamento Superficial; FB = Fluxo de Base; RP = Recarga Profunda; RF = Recarga Freática; ZD = Zona de Descarga.

Os parâmetros aplicados na estimativa foram:  $\Delta h = 2,5$  m/ano e  $\eta_e = 20\%$ .

Do total infiltrado, parte flui como fluxo subterrâneo até alcançar uma zona de descarga, compondo seu fluxo de base, e outra parte é responsável pela recarga efetiva do aquífero, isto é, representa parte da água subterrânea disponível para irrigação a partir de poços tubulares.

Além disso, o Aquífero Batalha é responsável por alimentar o aquífero fraturado sotoposto, composto pelas rochas do Grupo Canastra, sendo que a recarga desse aquífero se dá por meio de anisotropias e que aqui é denominada de recarga profunda.

O escoamento superficial foi considerado desprezível devido ao relevo plano e pela alta capacidade de infiltração observada nos solos da área de estudo. Este tipo de escoamento é apenas observado em vias de acesso e, mesmo nestes casos, práticas mitigadoras, com instalação de baciões, terraços e trincheiras resultam em ampla redução.

Para que ocorra a manutenção das nascentes e cursos d'água e para que sempre ocorra superávit hídrico disponível para o aquífero, é de suma importância que o sistema hidrológico como um todo esteja em equilíbrio, ou seja, que o fluxo de entrada (precipitação) seja sempre maior ou igual à soma do fluxo de saída, o qual envolve também as vazões extraídas pelos poços tubulares para a irrigação, através dos quais, parte da água armazenada nos aquíferos é transferida para um reservatório e posteriormente lançada sobre as lavouras, sofrendo perdas por evapotranspiração.

Para se garantir o equilíbrio das condições de circulação naturais com as retiradas para irrigação é fundamental que se mantenha um sistema de monitoramento continuado dos níveis freáticos. Idealmente, este processo deve considerar as medições dos níveis dos poços após sua recuperação total e estabilização.

A avaliação dos dados de produção ao longo dos últimos anos de bombeamento, e sua comparação com dados de períodos mais curtos (incluindo os últimos anos) mostra que o aquífero não está sob regime de sobreexploração. A comparação dos dados de níveis estáticos da época da construção dos poços com as medidas atuais indicam estabilidade dos níveis após pelo menos 24 hrs de repouso (sem bombeamento).

## 4 Conclusões

A compilação dos dados e resultados obtidos nesse trabalho permite concluir que o Aquífero Batalha representa um reservatório subterrâneo livre, intergranular, homogêneo e isotrópico, correspondente a um manancial de fundamental importância para a manutenção de vazões de afluentes dos rios Paranaíba e Paracatu. Este aquífero contribui ainda com o aumento da produtividade agrícola da região desde

os anos 1990, propiciando o desenvolvimento da irrigação na região.

A partir dos dados produzidos neste trabalho foi possível determinar que a área estimada de ocorrência do Aquífero Batalha é de 745 km<sup>2</sup>, a média das vazões dos 220 poços tubulares cadastrados na área do aquífero é de 45,5 m<sup>3</sup>/h em poços relativamente rasos com média de profundidade de 42,5 metros e espessura saturada média de 33,33 metros.

A zona não saturada do aquífero é composta em sua maioria por latossolos argilosos de condutividade hidráulica ( $K_v$ ) média da ordem de 10<sup>-5</sup> m/s em superfície com diminuição dos valores de  $K_v$  com o aumento da profundidade. Esses solos foram formados pelo intemperismo de filitos do topo da Formação Serra da Batalha, posicionados estratigraficamente acima de quartzitos desta mesma unidade, os quais são os precursores do saprolito arenoso responsável pelo elevado potencial de armazenamento hídrico.

Os parâmetros hidrodinâmicos principais da zona saturada do Aquífero Batalha são: Condutividade hidráulica média da ordem de 10<sup>-5</sup> m/s; Transmissividade média na ordem de 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s; Porosidade efetiva média correspondente a 20%; e Capacidade específica média de 3,9 m<sup>3</sup>/h/m.

Após a caracterização do Aquífero Batalha se levanta a possibilidade da existência de sistemas aquíferos similares em locais com as mesmas condições geomorfológicas e pedológicas associados a quartzitos de outras unidades geológicas da Faixa Brasília, como os grupos Paranoá e Araí presentes em chapadas elevadas sobre relevo plano a suave ondulado, que devem ser objeto de estudos semelhantes, visando confirmar essa hipótese.

## 5 Referências

- ABGE. 1996. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. Ensaio de permeabilidade em solos - orientações para execução no campo. 3<sup>a</sup> ed. Boletim, n. 4, 35p.
- Bernardo, S. 1986. Manual de irrigação. Viçosa, UFV, 596p.
- Dardenne, M.A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: CORDANI, U.G., MILANI, E.J., THOMAZ FILHO, A., CAMPOS, D.A. (Eds.), *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, 31st International Geological Congress, p. 231-263.
- Braga, A.C.O. 2016. *Geofísica aplicada: métodos geoelétricos em hidrogeologia*. Oficina de Textos, 160p.
- Elis, V.R. 1998. *Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, Tese de Doutorado, 264p.
- Fetter, C.W. 1994. *Applied Hydrogeology*. Person Education International. New Jersey, 691p.

- Fiori, J.P.O. 2010. *Avaliação de métodos de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados*. Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, 107p.
- Fitts, C.R. 2002. *Groundwater science*. Elsevier, 435p.
- Freeze, R.A. & Chery, J.A. 1979. *Groundwater: Englewood Cliffs*. New Jersey, 588p.
- Freeze, R.A. & Chery J.A. 1996. *Groundwater*. Prentice Hall, New York, 604 p.
- Lima, O.A.L. 2010. Estruturas geolétrica e hidroquímica do sistema aquífero cristalino da Bacia do Alto Rio Curaçá, semiárido da Bahia. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(3):445-461.
- Neuman, S.P. 1975. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resources Research*, 11(2): 329-342.
- Santos, E.D. & Ribeiro, A.G. 2004. Clima e agricultura no município de Coromandel (MG). *Caminhos de Geografia*, 8(13): 122-140.
- Telford, W.M.; Geldart, L.P.& Sheriff, R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 770p.

Recebido em: 23/07/2020

Aprovado em: 04/12/2020

### How to cite:

Oliveira, G.N.R.; Campos, J.E.G.; Walczuk, A.G.; & Moura, F.G. 2021. Caracterização Hidrodinâmica do Aquífero Batalha na Região Noroeste de Minas Gerais. *Anuário do Instituto de Geociências*, 44: 36700. DOI 1982-3908\_2021\_44\_36700