

Delimitação de nascente soterrada utilizando método da eletrorresistividade na cidade de Cuiabá, MT

Buried spring delimitation using the electrical resistivity method in the city of Cuiabá, MT

Antonio Carlos de Siqueira Neto¹ , Flávia Regina Pereira Santos de Siqueira² 

¹Instituto de Engenharia e Geociências, Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA, Rua Vera Paz, s/n – Salé, CEP 68035-110, Santarém, PA, BR (antonio.siqueira@ufopa.edu.br)

²Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, Campus de Várzea Grande, Cuiabá, MT, BR (frpsantos@hotmail.com)

Recebido em 29 de abril de 2021; aceito em 24 de junho de 2022

Resumo

O município de Cuiabá é recortado por redes de drenagem superficiais e várias nascentes preservadas e soterradas. A cobertura pedológica é majoritariamente composta por neossolos litólicos e afloramentos de rochas metapelíticas de baixo grau metamórfico do Grupo Cuiabá. Nesse contexto, executou-se estudo hidrogeológico aplicando-se método geofísico para o estudo de surgência hídrica observada durante a execução das obras de um condomínio residencial horizontal. Reconheceram-se as formações pedológicas e geológicas presentes na área, estimou-se o contato solo/rocha ao longo de perfis geofísicos, avaliou-se a extensão das zonas de aquíferos e identificaram-se as possíveis nascentes. Aplicou-se o método da eletrorresistividade, usando-se as técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico. Coletaram-se também dados diretos, como amostras do solo, e realizou-se o teste de permeabilidade e mapeamento estrutural da área. O padrão de fraturas e foliações obtido é responsável pelo fluxo da água subterrânea, tendo como direção preferencial a área das surgências, indicando que fluxo segue essas estruturas, das mais altas para as mais baixas. Concluiu-se que há uma possível nascente aterrada, cuja ocorrência foi constatada pela abertura de trincheiras e surgência de água, evidenciando-se a existência de zonas aquíferas dentro da área do condomínio.

Palavras-chave: Aquífero fraturado; Nascente soterrada; Métodos geoeletricos; Geofísica aplicada.

Abstract

The municipality of Cuiabá is cut across by superficial drainage networks and several springs that are preserved and buried. The pedological cover is mostly composed of Litholic Neosols and outcrops of pelitic rocks of low metamorphic grade of the Cuiabá group. In this context, a hydrogeological study was conducted using a geophysical method for the analysis of water surges during the construction of a horizontal residential condominium. The objectives were the recognition of the pedological and geological formations present in the study area, the estimation of soil/rock contact along the geophysical alignments, the identification and estimation of the extension of the aquifer zones and the recognition of possible springs. The method of electrical resistivity tomography was used, applying the vertical electrical sounding and electrical profiling techniques. Direct data were also collected, such as soil sampling, and permeability tests in conjunction with the structural mapping of rocks in the study area were carried out. The pattern of fractures and foliations found is responsible for the flow of groundwater, having the area of emergencies as the preferential direction, indicating a flow of the rock structures to an area with a lower topographic elevation. It was concluded that there is a possible grounded spring, whose occurrence was verified by the opening of trenches and water surge, which make evident the existence of aquifer zones within the condominium area.

Keywords: Fractured aquifer; Buried source; Geoelectrical methods; Applied geophysics.

INTRODUÇÃO

As civilizações, desde os primórdios da história humana, tendem a se instalar às margens de recursos hídricos. Apesar de sua importância, a degradação ambiental ocorre em diferentes níveis e afeta diretamente a disponibilidade e a qualidade da água. Com o passar dos séculos, o crescimento populacional vem fomentando a ocupação de áreas de maneira exponencial. Um dos grandes desafios da gestão de recursos hídricos é a sustentabilidade hídrica e ambiental urbana (Curtarelli et al., 2018).

Construções em áreas de recarga de aquíferos, ou mesmo outros tipos de danos causados pela ocupação desordenada do espaço, podem acarretar a perda de nascentes de recursos hídricos, gerando impactos na rede de drenagem. A urbanização de áreas com nascentes leva à ocupação, ao aterramento e à drenagem, alterando a dinâmica fluvial (Belizário, 2015). A impermeabilização do solo causada pela urbanização modifica o sistema de drenagem e altera o balanço hidrológico local (Marciano et al., 2016).

Os processos decorrentes da urbanização em sistemas hídricos ocasionam impactos negativos que podem causar alterações irreversíveis ou até mesmo a destruição dos mananciais (Cunha, 2015; Jesus e Santos, 2015; Fonseca et al., 2018). Alguns trabalhos descrevem ocorrência de nascentes soterradas por construções (Biella e Costa, 2006; Vieira e Granemann, 2009; Vivian et al., 2019), mas faltam análises aprofundadas sobre as nascentes soterradas e as práticas criminais de aterramento de nascentes.

Nesse contexto, observam-se inúmeras surgências hídricas (nascentes), o Rio Cuiabá e seus afluentes, que banham a cidade de Cuiabá e o seu entorno. O projeto “Água para o futuro”, do Ministério Público do Estado de Mato Grosso (MPE-MT), em conjunto com pesquisadores da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) e do Instituto Ação Verde, tem realizado o mapeamento dessas nascentes na área urbana de Cuiabá e buscado a aplicação de medidas mitigatórias para sua recuperação e preservação (Duarte et al., 2017; Arruda et al., 2018). Segundo esse projeto, 82% das nascentes mapeadas se encontram em estágio avançado de degradação. A retirada da mata ciliar, as destinações inadequadas de efluentes e a ausência de proteção física contribuem para a indisponibilidade e a inutilização do recurso. A meta do projeto é salvar ao menos um terço dos mananciais.

Uma empresa de construção civil, contratada, foi responsável pela execução de estudos hidrogeológico, geológico e geofísico para avaliar a ocorrência de surgências hídricas durante a realização das obras de um condomínio residencial horizontal. Em função disso, realizaram-se o reconhecimento da geologia local, a estimativa do contato solo/rocha ao longo dos alinhamentos geofísicos, a identificação e estimativa da extensão das zonas aquíferas e o reconhecimento de possíveis nascentes. Utilizaram-se as

seguintes metodologias: mapeamento geológico de fraturas e juntas, descontinuidades e foliações; teste de permeabilidade do solo e da rocha inalterada; análise granulométrica do solo e levantamentos geofísicos em uma e duas dimensões. Para isso, escolheu-se o método da eletrorresistividade e utilizaram-se as técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV), para determinar a espessura da camada pedológica, e de Caminhamento Elétrico (CE), para determinar a profundidade do nível freático e a extensão lateral, bem como mapear as juntas, as fraturas e as descontinuidades saturadas com água.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

Os levantamentos geofísico, geológico e hidrogeológico foram realizados em um condomínio (Figura 1). Na Figura 1 estão demarcados os levantamentos geofísicos (C1 a C6 e SEV1 a SEV5), os locais verificados em campo de surgências hídricas, os locais onde foram realizados os testes de permeabilidade (Ponto 1 e 2) e o local de coleta de solo para análise granulométrica (Ponto 1). Há relatos, de moradores e de funcionários da construtora, de que a área de estudo já foi aterrada no passado e de que, no período chuvoso, a área demarcada pelas surgências hídricas ficava saturada com ascensão do nível freático.

Contexto geológico

A área estudada situa-se na Província Tocantins, que reúne três faixas móveis: Faixa Paraguai, Faixa Brasília e Faixa Araguaia, as quais resultaram da colisão dos crátons Amazônico, São Francisco-Congo e Parapanema (Mantovani e Brito Neves, 2005) (Figura 2). Os artigos consultados identificam na região a Faixa de Dobramentos Paraguai, porção ocidental da Província Tocantins, de idade Neoproterozoica, edificada a sudeste do Cráton Amazônico, marcando seu limite nessa região. A referida faixa é resultante da orogenia do ciclo Brasileiro-Pan-Africano, de idade entre 870 e 540 Ma (Kröner e Stern, 2005). A referida faixa de dobramentos se estende desde os estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul até o estado de Goiás, sendo representada por rochas do Grupo Cuiabá, zona interna da Faixa Paraguai (Almeida, 1964).

O Grupo Cuiabá foi individualizado em 8 subunidades litoestratigráficas (Luz et al., 1980), nas quais 1 e 2 são compostas de filitos intercalados com filitos grafitosos, mármore e metagrauvacas; 3 e 5, por metaconglomerados, metarenitos e filitos gradacionais, metarcóseos e quartzitos; 4, por metaconglomerados e metarritmitos arenopelíticos com “dropstones”; e 6, 7 e 8, por filitos, metaconglomerados, quartzitos e mármore.

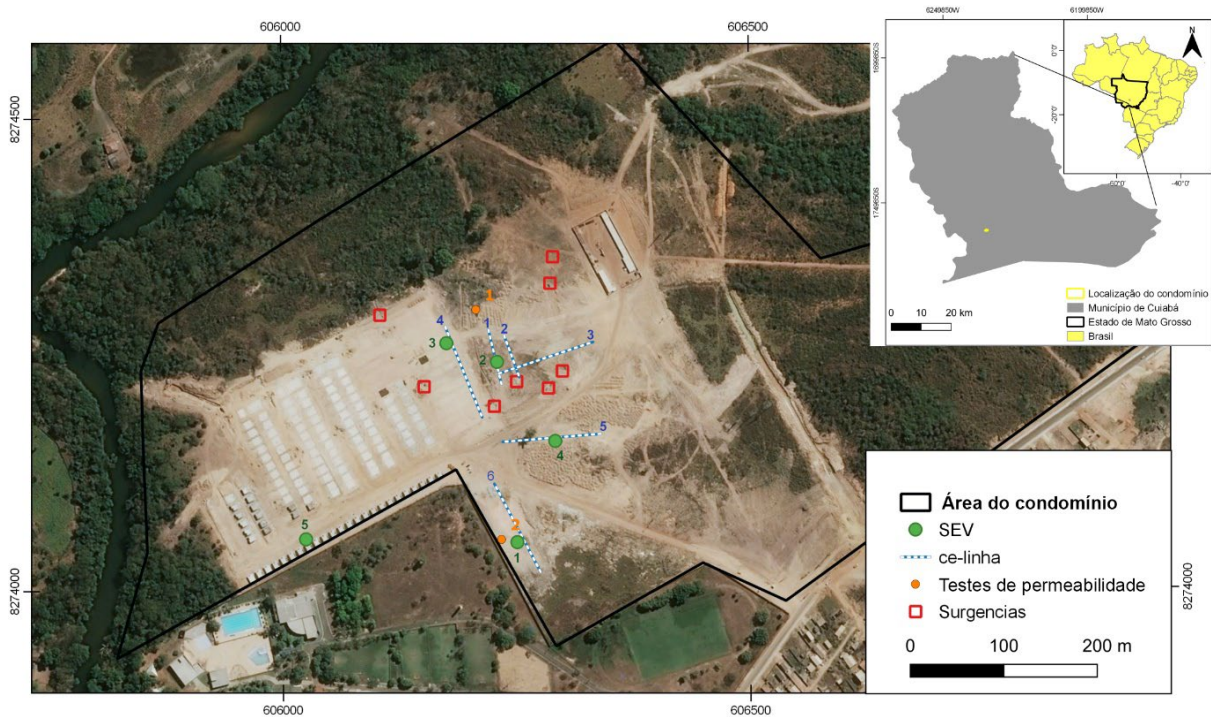
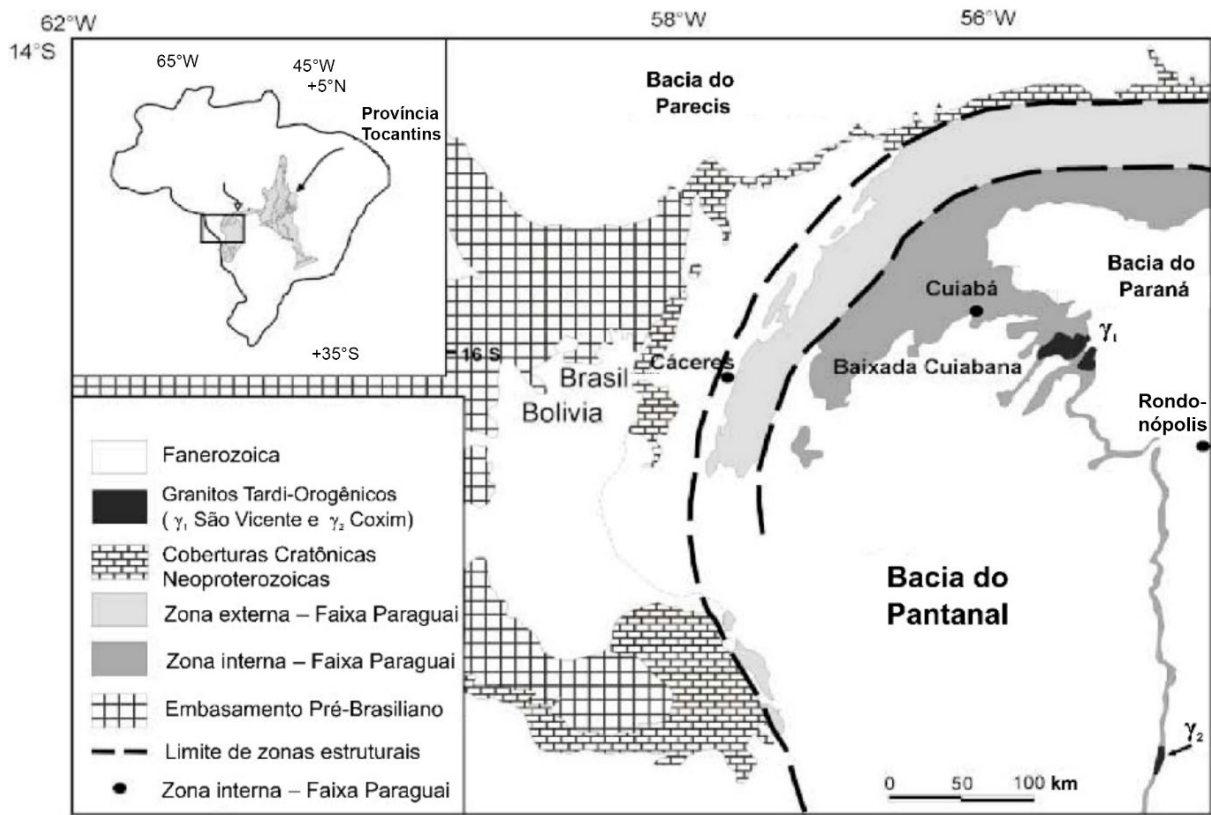


Figura 1. Localização da área de estudo no município de Cuiabá, região centro-oeste do Brasil, e indicação das áreas de surgência e das investigações geofísicas realizadas.



Fonte: Lacerda Filho et al. (2004).

Figura 2. Contexto geológico regional da Baixada Cuiabana.

As subunidades do Grupo Cuiabá foram divididas em três unidades litoestratigráficas (Tokashiki e Saes, 2008): Formação Campina, Formação Acorizal e Formação Coxipó. As subunidades 1 e 2 compõem a Formação Campina de Pedras e representam uma fase *rift*; as subunidades 3, 4 e 5 — e, por vezes, a 6 — compõem a Formação Acorizal e tiveram seus sedimentos depositados em uma margem passiva; e as subunidades 6, 7 e 8 compõem a Formação Coxipó, cuja deposição ocorreu também em condições de margem passiva.

A Faixa Paraguai tem estruturas tectônicas e registro de metamorfismo. Costa et al. (2015) definiram três fases de deformação, sendo que a principal está relacionada à primeira fase de deformação, responsável pelo desenvolvimento de clivagem ardosiária, associada a uma família de veios de quartzo. A segunda fase de deformação formou clivagem espaçada plano-axial de dobras normais. Uma terceira fase de deformação foi responsável pela formação de um conjunto de fraturas. As rochas do Grupo Cuiabá foram metamorfizadas na fácies xisto verde, zona da biotita (Batalha et al., 2019).

Contexto hidrogeológico

Apoitia et al. (2004) estudaram as águas subterrâneas na zona urbana do município de Cuiabá e identificaram que os aquíferos da região apresentam características de aquífero de meio poroso e fraturado. O aquífero de sistema poroso está associado ao manto de alteração das rochas (saprólitos) e aos depósitos detríticos-lateríticos de cobertura terciário-quadernária. Já os aquíferos de meio fraturado ocorrem sob condições de armazenamento e circulação de água extremamente heterogêneas. A sua potencialidade de armazenamento de água está intimamente ligada à extensão, à continuidade e à interligação das fraturas bem como à presença de veios de quartzo.

Aplicação do método de eletrorresistividade

Para dimensionar o levantamento geofísico, realizou-se primeiramente o mapeamento geológico, por meio do qual foi possível dimensionar a extensão, a direção e a locação das linhas geofísicas.

Os levantamentos geofísicos foram realizados por meio do equipamento resistivímetro RD-1000A, fabricado pela GEOTEST, com potência de saída de 2000 W. O conjunto do equipamento é composto por uma unidade transmissora Geotest RD 1000 TX, ligada a duas baterias de 60 A em série, totalizando 24 v. E outra unidade receptora Geotest RD 1000 RX, alimentada por 8 baterias de hidreto de níquel (NI-MH), tamanho AA, de 1,2 v. Em campo utilizaram-se eletrodos de aço inoxidável e quatro bobinas com 500 m cada uma de cabo de 16 AWG.

O levantamento consistiu em 6 caminhamentos elétricos e 5 sondagens elétricas verticais. A distribuição espacial dos

perfis 1D e 2D geoeletricos investigados e todas as referências são apresentadas na Figura 1.

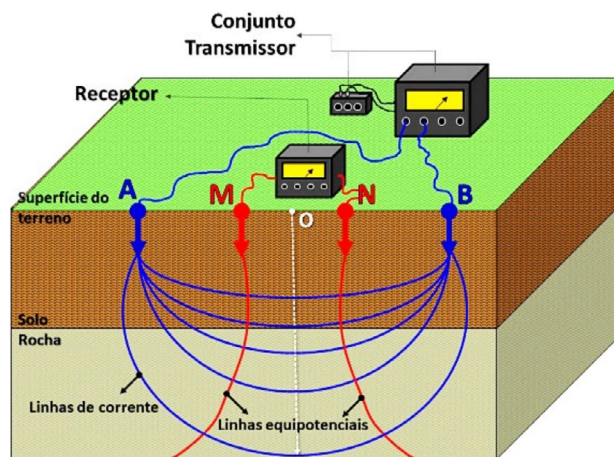
Todos os dados do levantamento de CE foram processados pelo *software* RES2DINV (Loke e Barker, 1996a, 1996b). Os dados das SEVs foram processados no *software* IPI2WIN (Bobachev, 2002).

Método da eletrorresistividade

Os diferentes materiais que compõem a superfície e a subsuperfície da Terra (solos e rochas) apresentam características físicas distintas, já bastante estudadas e conhecidas no meio científico. Dentre elas, ressalta-se a capacidade que os materiais apresentam de conduzir corrente elétrica, conhecida como condutividade elétrica, ou seu inverso, a resistividade elétrica. Diferentes solos e rochas apresentam valores contrastantes nos valores das resistividades e, apesar da grande variabilidade desse parâmetro, os diferentes materiais podem ser identificados por essa propriedade que fundamenta o método eletrorresistivo.

O principal mecanismo de condução elétrica pelos materiais da subsuperfície é a condução iônica ou eletrolítica. Nesse mecanismo, o fluxo da corrente ocorre por meio de íons presentes nos fluidos intersticiais nos poros dos solos e rochas. Em alguns casos, a condução eletrônica também ocorre em materiais que apresentam elétrons livres, como é o caso de materiais metálicos, sulfetos metálicos e grafita.

O método da resistividade elétrica de corrente contínua e alternada costuma trabalhar com dois eletrodos de corrente (A e B) e dois de potencial (M e N), em contato galvânico com a superfície na superfície do solo. Uma corrente elétrica é aplicada por meio dos eletrodos A e B e, como resultado, uma diferença de potencial aparece entre os eletrodos M e N (Figura 3). O valor atual é medido e registrado.



Fonte: adaptada de Braga (2016).

Figura 3. Modelo de meio heterogêneo e esquema de quatro eletrodos para medidas de eletrorresistividade.

Os eletrodos M e N são usados para medir a diferença de potencial, que é estabelecida no solo e associada à uma corrente de passagem. Conhecendo-se a corrente que percorre o subsolo, a geometria do arranjo dos eletrodos e o potencial medido entre os eletrodos M e N, calcula-se o valor de resistividade elétrica aparente, assim denominada porque é medida em um meio heterogêneo e anisotrópico (Orellana, 1972; Telford et al., 1990).

São dois os empregos mais usuais de medidas das resistividades elétricas aparentes para investigarmos a subsuperfície: informação unidimensional, com valores tomados na vertical (SEV), e informação bidimensional (CE), com medidas obtidas na vertical e na horizontal.

Técnica da sondagem elétrica vertical: arranjo Schlumberger

A técnica de SEV permite medir as variações da resistividade em profundidade no meio, pontualmente. Consiste basicamente em injetar uma corrente elétrica no solo por meio de dois eletrodos (A e B) e medir a diferença de potencial em dois receptores (M e N), também cravados diretamente ao solo. Por meio dessa corrente, da variação de potencial, da distância entre os pontos de injeção de corrente e de medidas de potencial, calcula-se a resistividade aparente do meio, usando-se a Equação 1 (Bhattacharya e Patra, 1968).

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Em que:

ρ_a = resistividade aparente (Ohm.m);

k = fator geométrico para o arranjo utilizado (m);

$\Delta V/I$ = resistência elétrica (Ohm).

O fator geométrico (Bhattacharya e Patra, 1968) é dado pela Equação 2:

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \quad (2)$$

Com o aumento da distância entre os eletrodos de corrente AB, o volume total da subsuperfície investigada também aumenta, permitindo atingir camadas cada vez mais profundas. Os resultados sucessivos estarão, exclusivamente, ligados às variações da resistividade em relação à profundidade.

A corrente flui no meio de modo radial: quanto maior a distância entre os pontos de injeção de corrente, maior será a profundidade investigada.

No arranjo Schlumberger os eletrodos de corrente são movimentados sobre a linha de investigação com uma distância crescente (L), enquanto os de potencial são fixados ao solo a uma distância (a) obedecendo à relação de $MN \leq AB/5$ (Figura 4A). Para este trabalho, o AB/2 máximo foi de 50 m.

Técnica do caminhamento elétrico: arranjo dipolo-dipolo

Adotou-se o arranjo dipolo-dipolo para aquisição dos dados de CE, que é caracterizado por apresentar espaçamentos entre os centros dos dipolos (AB e MN), variável ao longo da linha levantada, sendo que para cada nível de investigação (profundidade teórica) adota-se um determinado espaçamento dipolar. Outra particularidade do arranjo dipolo-dipolo é a distância entre os eletrodos de corrente A e B ser igual à dos eletrodos de potenciais M e N (Figura 4B).

Normalmente, as medidas são efetuadas em várias profundidades de investigação, isto é, $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , atribuídas na intersecção das linhas que partem do centro de AB e MN com ângulos de 45° . A cada ponto de medida os dipolos são deslocados de uma distância igual a X. Os dados obtidos são plotados nas posições $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , e interpolados, gerando uma pseudosseção de resistividade aparente. A Equação 3 é usada para calcular a resistividade elétrica aparente, enquanto as Equações 4 e 5 são usadas para determinar o fator geométrico e a relação dos múltiplos das distâncias dos dipolos, respectivamente (adaptado de Telford et al., 1990; Elis, 1999).

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

$$K = 2\pi \cdot G \cdot X \quad (4)$$

$$G = 1 / [(1/n) - (2/n + 1) + (1/n + 2)] \quad (5)$$

Em que:

ρ_a = resistividade aparente (Ohm.m);

K = fator geométrico para o arranjo utilizado (m);

$\Delta V/I$ = Resistência elétrica (Ohm);

G = múltiplo das distâncias dos dipolos (geralmente $n = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6);

X = distância deslocada pelos dipolos (m);

$\pi = 3,1415$;

ΔV = diferença elétrica de potencial (mV);

I = corrente elétrica (mA).

O levantamento de campo foi realizado utilizando-se espaçamento entre eletrodos de 2 m na Seção Geométrica Modelada 1 e de 3 m nas demais. Executaram-se de 3 a 5 níveis de investigação em todas as linhas.

O software RES2DINV, utilizado no processamento dos CEs, tem algoritmo que submete os dados de campo qualitativos a uma equação matemática dos mínimos quadrados, gerando modelo quantitativo que, ajustado ao modelo campo, gera uma seção de resistividade modelada, ou seja, permite construir um modelo geoeletrico subsuperficial, cuja resposta reproduz, da melhor forma possível, as medidas obtidas. Esse modelo geoeletrico é posteriormente interpretado

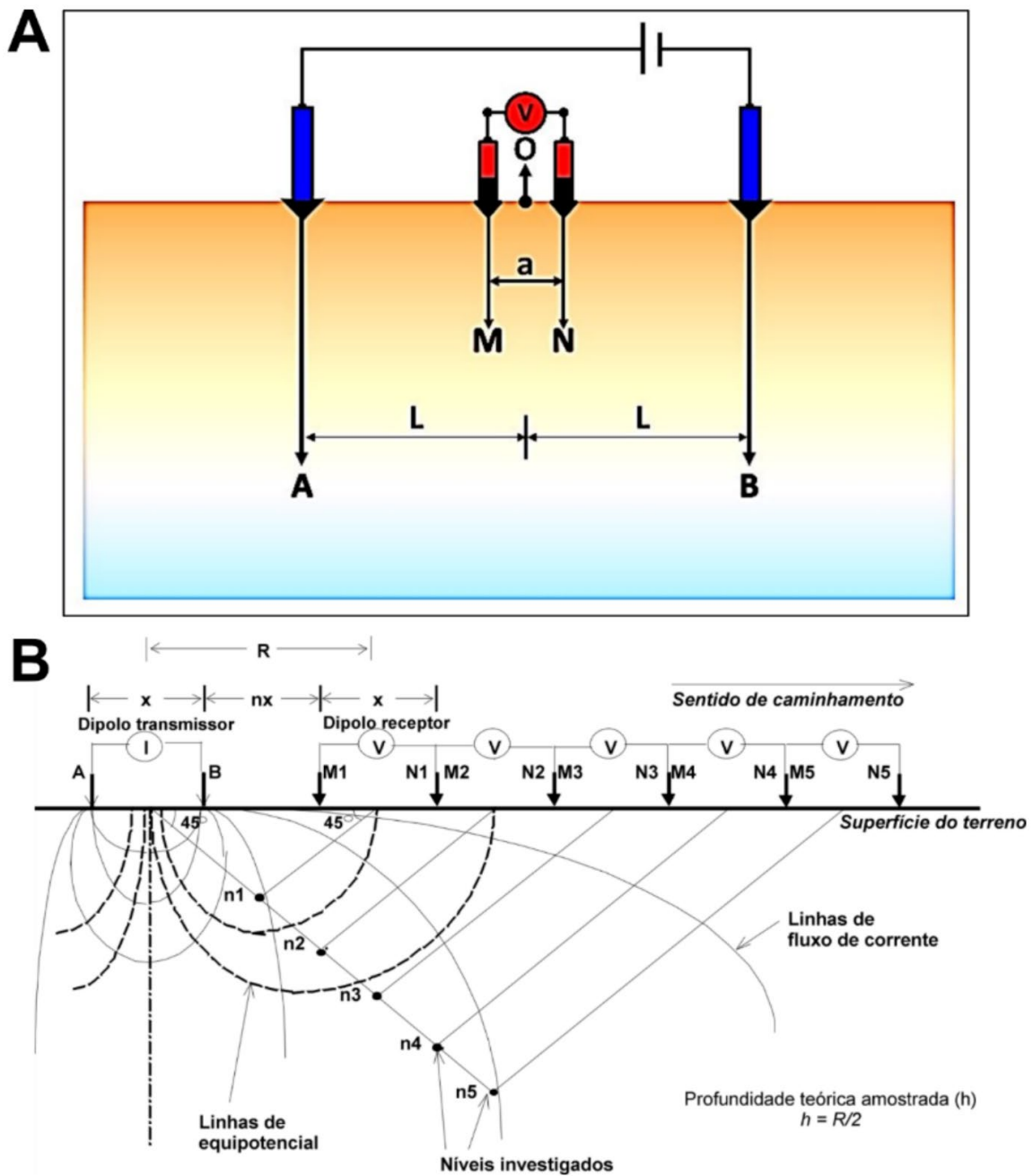


Figura 4. (A) Arranjo de campo Schlumberger da Técnica da SEV (Siqueira Neto et al., 2019). (B) Esquema de arranjo dipolo-dipolo utilizado em caminhamentos elétricos (Siqueira Neto e Elis, 2016).

em termos do modelo geológico/hidrogeológico/pedológico que melhor reflete a realidade geológica da área estudada (Siqueira Neto e Elis, 2016).

Análise de solo e teste de permeabilidade

A quarta etapa foi o teste de permeabilidade. Fez-se também a coleta de solo, para análise granulométrica.

Coletaram-se amostras de solo localizadas no ponto 1 (Figura 1), em duas profundidades diferentes, uma a 0,4 m e outra a 1,10 m, com o objetivo de caracterizar a sua granulometria e classificá-lo da forma mais adequada.

Os testes de permeabilidade foram utilizados para verificar a taxa de infiltração da água em solo e rocha, e foram realizados em dois locais distintos: um no ponto 1, representando a taxa de infiltração no solo/aterro; e outro no ponto 2,

diretamente no filito. Realizaram-se testes de infiltração com carga variável (Figura 1), em que a avaliação da infiltração da água em um furo de dimensões conhecidas é feita ao longo do tempo; o método utilizado no ensaio utiliza um furo a trado manual, utilizando o método proposto pela ABGE (2013).

Após a perfuração, o solo foi saturado com água antes do início do teste, por cerca de 10 minutos. Para isso, o nível d'água no furo foi mantido à superfície do terreno, visando a saturação do solo, para adequada execução do ensaio. Após a saturação, inicia-se a contagem do tempo das medições de rebaixamento do nível d'água no furo, que neste levantamento foi de 22 minutos para cada ponto de medida. O cálculo da permeabilidade do solo foi feito utilizando-se a Equação 6 (ABGE, 2013):

$$k = \frac{\Delta h}{\Delta t} \frac{1}{i \left(\frac{2h}{r} + 1 \right)} \quad (6)$$

Em que:

k = coeficiente de permeabilidade (cm/s);

$\frac{\Delta h}{\Delta t}$ = variação de altura medida em função do tempo (cm/s);

i = constante geométrica do cilindro (igual a 5) (adimensional);

r = raio do furo (cm);

h = altura do furo (cm).

RESULTADOS

Geologia local

No levantamento geológico observou-se a presença da rocha metamórfica filito, que apresenta granulação fina e estruturas que são indicadoras de maior permeabilidade do material. As estruturas encontradas são uma família de fraturas com direção N50°W/80°NE e duas foliações na rocha (S_n e S_{n+1} , Figura 4), com a foliação principal apresentando atitude de N80°W/80°SW. Com base nessas informações, delimitaram-se os alinhamentos geofísicos perpendiculares à direção das estruturas geológicas, com o objetivo de recuperar o máximo possível de informação geológica (Figura 5).



Figura 5. (A) Surgência de água subterrânea nos planos de foliação da rocha; (B) Interface do solo com a rocha (filito); (C) Estruturas na rocha (foliações e fraturas), direção e ângulo de mergulho das estruturas no filito.

Sondagem elétrica vertical

O processamento dos dados adquiridos em campo por meio da técnica da SEV originou as curvas de campo em profundidade (Figura 6 e Tabela 1). As SEVs evidenciaram a presença de 3 a 4 camadas geoeletricas distintas, sendo a primeira e a segunda associadas ao mesmo material. O primeiro e o segundo estratos (SEVs 3, 4 e 5) geoeletricos na porção mais rasa com valores médios a altos de resistividade entre

97,8 e 5.474 Ohm.m. As espessuras variam de menos de 1 m a valores da ordem de 2 m. Esse estrato foi associado aos solos/aterro caracterizados como areno-argilo-siltosos.

O terceiro estrato apresenta baixos a médios valores de resistividade, variando de 23,9 a 97,5 ohm.m. Estando presente em todas as SEVs, as espessuras variam de menos de 2 a 18 m, sendo associadas à zona aquífera do filito. O quarto estrato ocorre em todas as SEVs, apresentando valores de resistividade elevados, na ordem de 351 a 1.903 ohm.m.

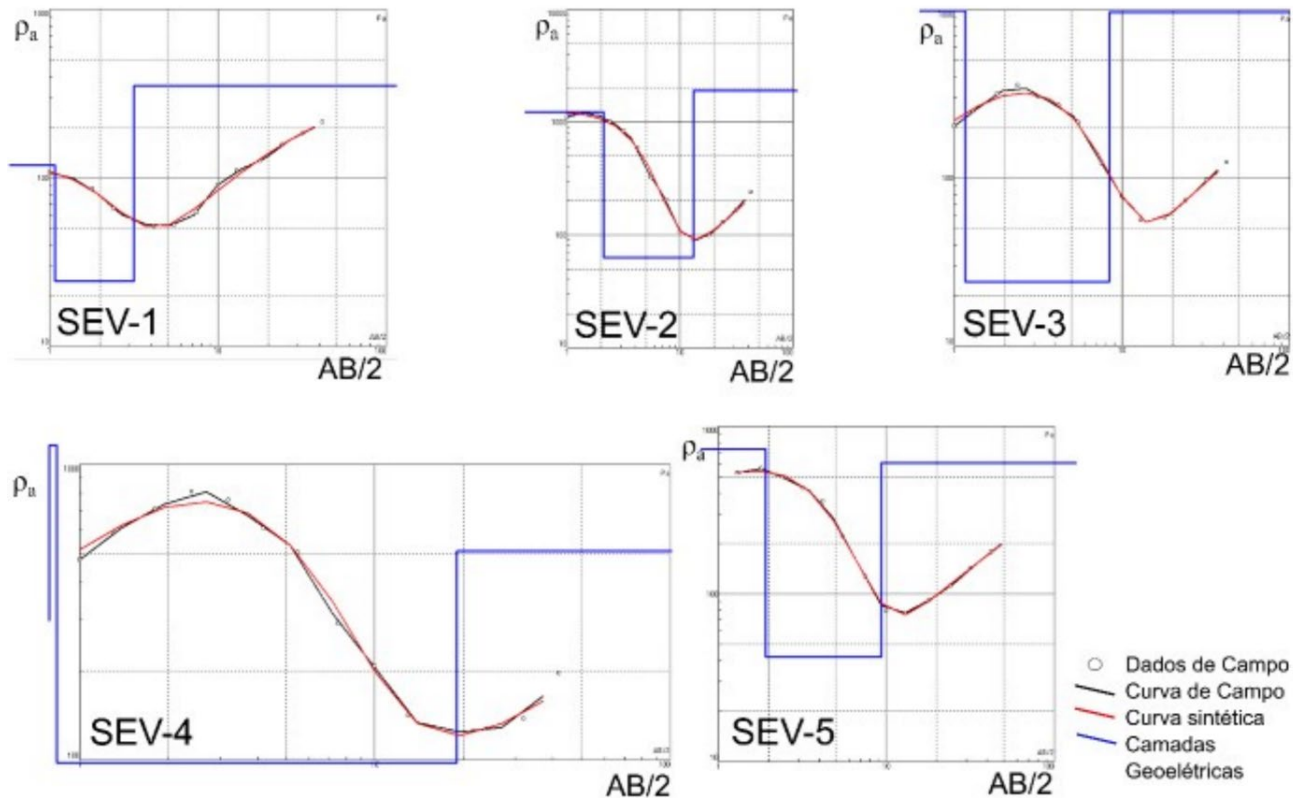


Figura 6. Curvas de resistividade modelada executadas na área de estudo.

Tabela 1. Profundidade, resistividade e espessura das camadas geoeletricas interpretadas a partir das curvas de resistividade modeladas realizadas neste estudo.

Camadas Geoeletricas	SEV 1			SEV 2			SEV 3			SEV 4			SEV 5			Interpretação geológica
	ρ	h(m)	d(m)	ρ	h(m)	d(m)	ρ	h(m)	d(m)	ρ	h(m)	d(m)	ρ	h(m)	d(m)	
1ª	-	-	-	-	-	-	97,8	0,3	0,3	296	0,4	0,4	394,1	0,4	0,4	Neossolo areno argilo siltoso/ Aterro
2ª	119	1,1	1,1	1225	2,1	2,1	1107	0,8	1,2	5474	0,4	0,4	734,1	1,5	1,9	Neossolo areno argilo siltoso/ Aterro
3ª	24,4	2,1	3,2	62,5	11,0	13,1	23,9	7,2	8,4	97,5	18,1	19	42,25	7,4	9,3	Zona Aquífera Limite Superior
4ª	351	-	-	1903	-	-	973	-	-	509	-	-	603,2	-	-	Zona Aquífera Limite Inferior

Essa camada é interpretada como sendo o filito sem presença de fraturas e fissuras preenchidas com água.

Caminhamento elétrico

As seções modeladas, obtidas dos CEs (1 a 6) realizados na área de estudo, são apresentadas na Figura 7. Utilizou-se a função de refinamento de modelo, o qual utiliza modelos de células com largura de metade da unidade de espaçamento, devido à grande variação de resistividade próxima à superfície. Como o levantamento dos CEs tinha o objetivo de prospectar dados com alta resolução e baixa profundidade, os levantamentos estão limitados a até 5,18 m de profundidade. De forma geral, podem ser observadas as ocorrências de dois estratos geoeletricos:

Um estrato geoeletrico na porção mais rasa, com médios e altos valores de resistividade, entre 130 e 1.000 ohm.m (tons de marrom ao vermelho). As espessuras variaram de menos de 1 m a valores da ordem de 5,18 m. Conforme revelado nas SEVs, esse estrato foi associado aos solos/aterros (areno-argiloso e siltoso, provavelmente secos devido aos altos valores mapeados). Não se pode descartar a ocorrência de pequenos blocos de rocha e veios de quartzo nessas porções mais rasas, principalmente em condições subaflorentes a aflorantes, como observado em algumas posições do terreno.

Outro estrato foi identificado, variando de menos de 1 m até 5,18 m investigados com valores de resistividade baixos a médios, variando de 7 Ohm.m a valores de até 650 Ohm.m (tons de azul ao amarelo), sendo associado ao filito com presença de zonas aquíferas.

Os resultados apresentados pelos CEs evidenciaram o contato solo/aterro com o filito com presença de zonas aquíferas, os quais corroboram os dados obtidos pelas sondagens e expandem o conhecimento sobre a extensão lateral no terreno. Os CEs 1, 2, 3 e 4 foram realizados dentro dos limites evidenciados em campo para as surgências hídras e os resultados mostram o comportamento das zonas aquíferas em subsuperfície, evidenciando-se a ocorrência de uma nascente na área.

No CE 5 é possível identificar a continuidade da zona aquífera abaixo de 4 m e no CE 6, onde o filito aflora os valores mostram que possivelmente ainda há quantidade de água nas foliações e nas fraturas da rocha. Segundo o levantamento hidrogeológico realizado, existe um padrão que interliga essas fraturas e foliações, e elas tendem a escoar para a menor cota topográfica do filito, que é exatamente na área hachurada.

Outro dado observado nos levantamentos das SEVs e dos CEs é que a resistividade no filito tende a aumentar em profundidade, indicando que as estruturas no filito tendem a ser menos expressivas e, com isso, armazenar menor quantidade de água.

Análise de solo e teste de permeabilidade

O solo foi classificado como areno-argilo-siltoso (75,6% de areia, 19,1% de argila e 5,3% de silte) a 0,4 m de profundidade. A segunda amostra de solo (1,10 m) apresenta-se também areno-argilo-siltosa (72,3% de areia, 22,1% de argila e 5,6% de silte), sugerindo mudança composicional a partir da rocha sã do ponto 1, onde foi feito o teste de permeabilidade do solo. A análise granulométrica do material confere com os resultados dos testes de permeabilidade. O ensaio de permeabilidade do solo foi realizado na área do condomínio em dois pontos que representam a diferença de cobertura de solo da área. O ponto 1, localizado mais próximo ao rio Coxipó, e o ponto 2, localizado mais próximo à portaria do empreendimento (Figura 1). O cálculo para determinação do coeficiente de permeabilidade foi realizado de acordo com a Equação 6.

Como resultado, o cálculo de permeabilidade no ponto 1 foi de $K = 3,56 \times 10^{-4}$ cm/s e no ponto 2, de $K = 9,96 \times 10^{-5}$ cm/s. Cada resultado obtido foi comparado com o quadro da Figura 8, proposto por Mello e Teixeira (1967), no qual a permeabilidade é estimada com ordem de grandeza, relacionada com a granulometria do material.

Os resultados obtidos com os testes de permeabilidade apresentaram valores relativamente muito próximos entre si. Os dados mostram um material composto por areias finas siltosas e argilosas e silte argilosos. O estudo serviu para compreender melhor a origem da água subterrânea e ainda serve de base para o dimensionamento de drenos para a área de estudo.

DISCUSSÃO

A partir da compilação dos dados, constatou-se a presença de uma nascente aterrada, a qual foi comprovada pela abertura de trincheiras e surgência de água em zonas aquíferas rasas no interior da área do condomínio (Figura 5A). Contudo, não é possível afirmar que a surgência seja pontual ou difusa, pois para isso seria necessário cobrir toda a área do empreendimento. Nas áreas onde foram traçados os alinhamentos não foram encontradas fraturas expressivas que pudessem alimentar essas surgências.

Por outro lado, encontrou-se um padrão de fraturas e foliações que é responsável pelo fluxo da água subterrânea (Figuras 5B e 5C). Tais estruturas têm a mesma direção preferencial das surgências, sendo encontradas em profundidades maiores no filito (de 2 a 5 m da superfície), como constatado pelas SEVs 2, 3 e 4 e pelos CEs 1, 2, 3 e 4. Na porção sul, o filito aflora na superfície, como observado pela SEV 1 e pelo CE 6, indicando um fluxo por meio das estruturas da rocha de áreas de cotas mais elevadas do filito para áreas de cotas mais baixas (Figura 9).

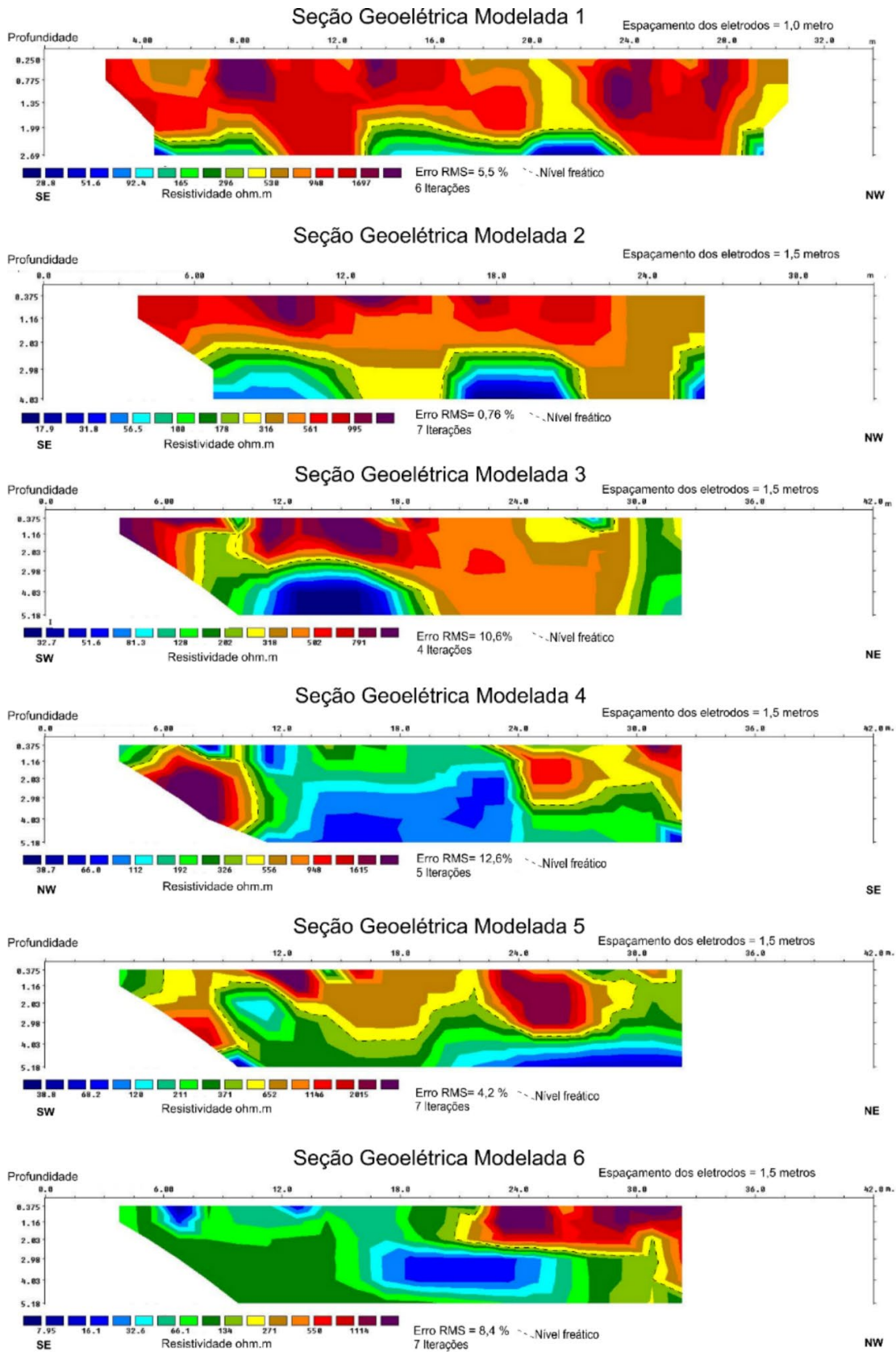


Figura 7. Seções geolétricas modeladas com indicação do nível freático.

K (cm/s)	10^2	1	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}
SOLO	pedregulhos	areias	areias finas siltsas e argilosas, siltes argilosos		argilas	

Fonte: Mello e Teixeira (1967).

Figura 8. Classificação granulométrica segundo o coeficiente de permeabilidade.

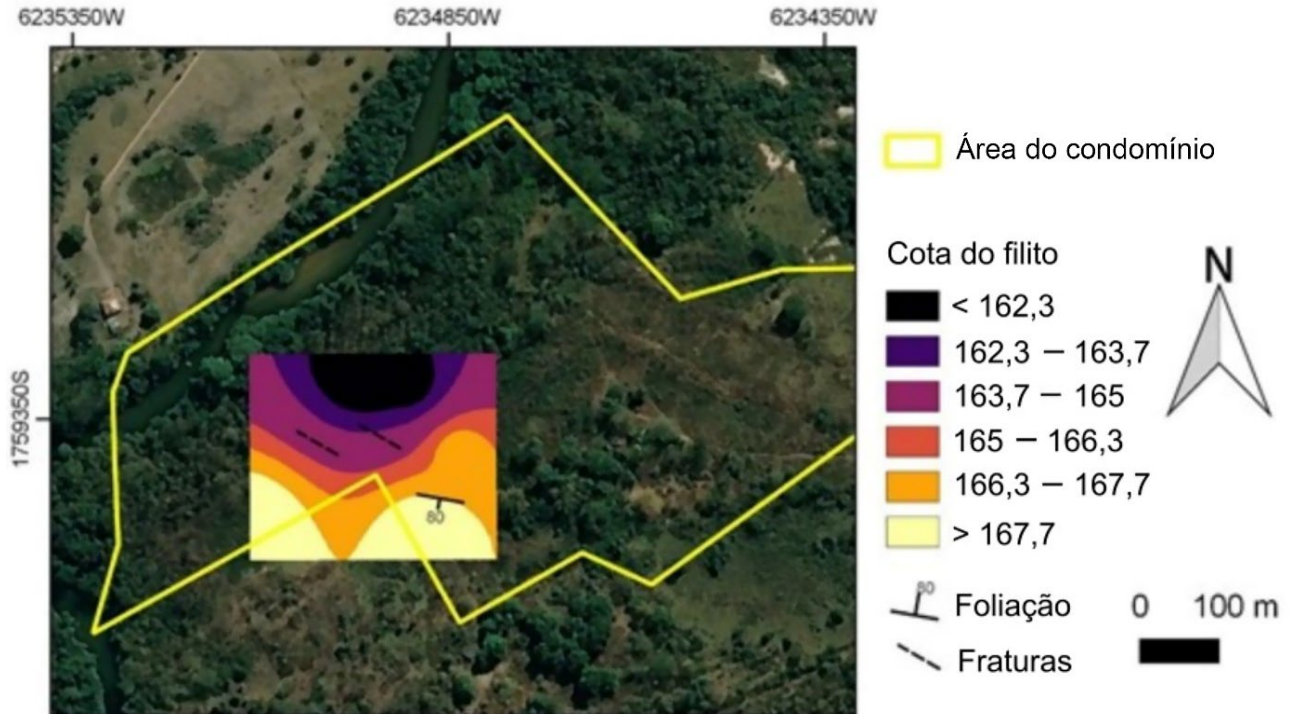


Figura 9. Cota topográfica e altitude (direção e mergulho) do filito e das fraturas.

A profundidade no interior da zona aquífera é apresentada na Figura 9. A cota do filito é calculada seguindo a Equação 7:

$$C_f = C_t - P_f \quad (7)$$

Em que:

C_f = cota do filito;

C_t = cota topográfica do terreno;

P_f = profundidade do filito.

As P_f no interior da zona aquífera varia de 3 a 5 m. Já fora dos limites da zona aquífera varia de aproximadamente 0 a 3 m. Não é possível afirmar a profundidade do filito de forma exata nos locais de surgência hídrica, a não ser que fossem feitas sondagens ou abertura de trincheiras.

A análise granulométrica do solo e o teste de permeabilidade serviram para compreender a hidrodinâmica da cobertura pedológica e geológica na área de estudo. O solo é composto essencialmente de areia fina a argilosa e tem baixíssima permeabilidade ($K = 3,56 \times 10^{-4}$ cm/s), promovendo sua saturação na época chuvosa, enquanto o filito, por ter permeabilidade baixa ($K = 9,96 \times 10^{-5}$ cm/s), impede a infiltração da água de chuva por percolação, gerando, assim, a ascensão do nível freático livre acima da superfície. Sendo assim, na área hachurada ocorrem dois tipos de aquíferos: um perene fraturado, limitado pelo fluxo subterrâneo nas fraturas e foliações do filito, fluindo de pontos de maior potencial hidráulico para de menor potencial hidráulico; e outro livre e intermitente, limitado pela quantidade de chuva e pela profundidade do contato com o filito (Figura 10). Por fim, observa-se a ocorrência de água nos

pontos de surgência hídrica demarcados no mapa de localização da área de estudos, bem como no mapa de ocorrência de zona aquífera determinado pela associação dos dados diretos e indiretos do levantamento efetuado no decorrer da execução do projeto.

Para complementar o registro das informações, confeccionou-se um mapa de localização da zona aquífera,

que foi sobreposto à planta de localização do empreendimento (Figura 11). Dessa forma, é possível identificar a distribuição das surgências hídricas, bem como verificar a extensão da área do projeto afetada pela ocorrência hídrica. Ressalta-se que não foi possível determinar com exatidão o raio de influência de cada surgência e que seus limites foram delimitados com base nos levantamentos geofísico e geológico, ambos

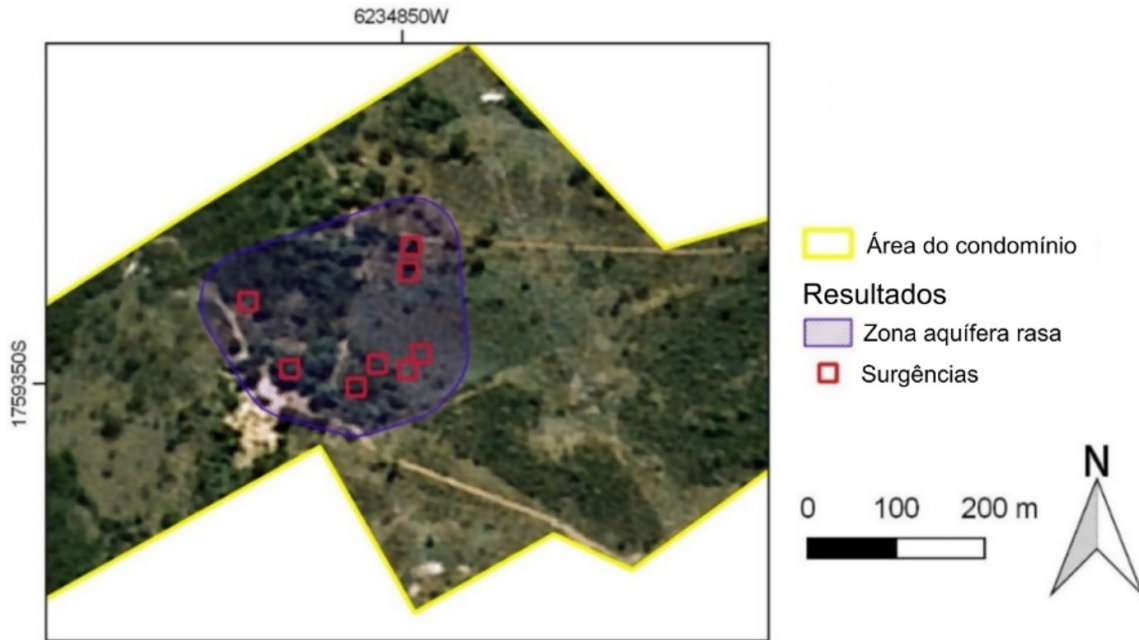


Figura 10. Mapa de localização de zona aquífera na área de estudo.

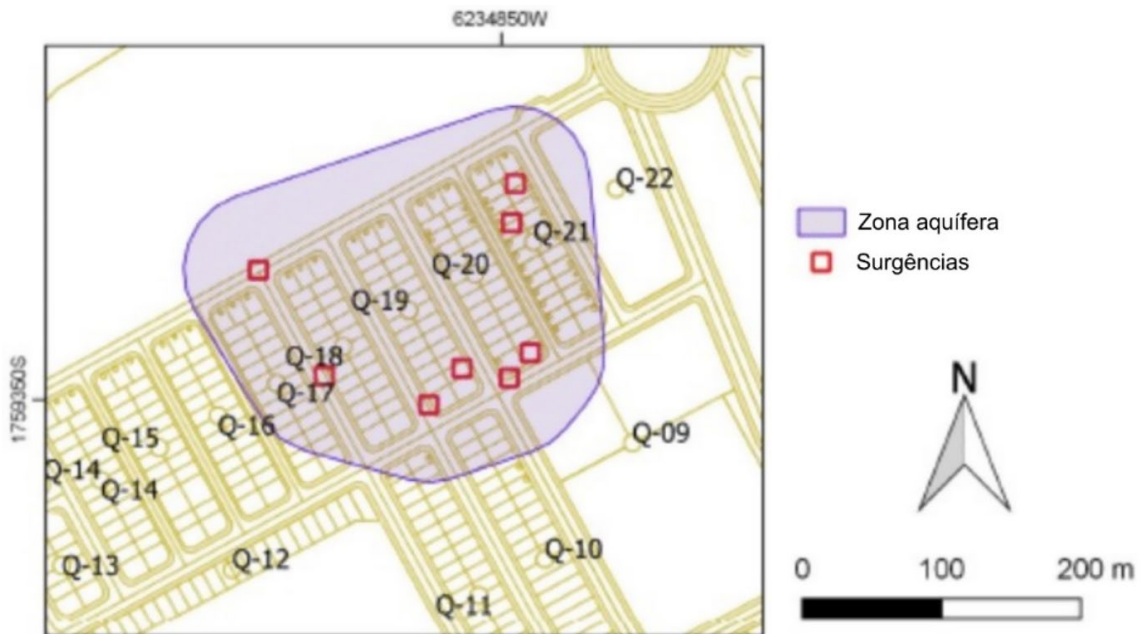


Figura 11. Mapa de Localização de zona aquífera na planta de localização do condomínio residencial.

já considerados com margem de segurança na delimitação. Verifica-se também na área a ocorrência dois regimes de acúmulo de água: um referente às estruturas presentes no filito e outro devido à presença do perfil do solo, que apresenta baixa permeabilidade, saturando-se no período chuvoso e promovendo a ascensão do nível freático até a superfície.

CONCLUSÕES

Apesar de a legislação determinar que as nascentes sejam preservadas (preferencialmente com vegetação nativa) e que não sejam ocupadas, em muitos locais a preservação das nascentes não tem se concretizado. Conclui-se que na área de estudo está presente uma nascente soterrada, sendo aferida pela abertura de trincheiras e pela surgência hídrica a partir de zonas aquíferas fraturadas. Investigações adicionais são necessárias para saber se ela é pontual ou difusa, pois, neste caso, seria necessário fazer o levantamento de toda a área do empreendimento. No entanto, pode-se afirmar que nas áreas onde foram feitos os levantamentos não foram detectadas famílias de fraturas expressivas que pudessem alimentar essas surgências.

Os métodos utilizados permitiram delimitar a nascente soterrada em área urbana, mesmo após a área estar completamente alterada, sem vegetação natural e com material sobreposto a ela. A cobertura pedológica da área é um neossolo litólico de composição areno-argilo-siltosa com baixa permeabilidade recoberto os filitos do Grupo Cuiabá, o qual apresenta descontinuidades, como famílias de fraturas e foliações. O contato solo-saprólito-rocha varia de 0,4 a 2,1 m de profundidade, onde ocorre zona aquífera proeminente, como observado na Figura 5A, cuja área hachurada representa essa delimitação. Essa área apresenta menor cota topográfica, o que gera o maior fluxo de água subterrânea através das descontinuidades no filito, ocorrendo as surgências hídricas, caracterizadas, neste estudo, como nascentes soterradas.

O planejamento das cidades deve levar em conta a ocorrência de zonas aquíferas rasas. A canalização de nascentes pode ser uma alternativa para evitar riscos geotécnicos a obras, minimizando os impactos ambientais ligados à perda de nascentes por soterramento. O levantamento das nascentes urbanas pode subsidiar a tomada de decisão de órgãos gestores bem como de profissionais envolvidos no planejamento dos municípios e na problemática ambiental, de forma a contribuir para consolidar estratégias de conservação ambiental e de gestão territorial.

REFERÊNCIAS

- ABGE. (2013). *Ensaio de Permeabilidade em Solos: orientações para a sua execução no campo*. 4. ed. São Paulo: ABGE.
- Almeida, F. F. M. (1964). Geologia do Centro-Oeste Matogrossense. *Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia*. Rio de Janeiro: IBGE, 137 p.
- Apoitia, L. F. M., Da Rosa Filho, E. F., Bittencourt, A. V. L., Hindy, E. (2004). Caracterização preliminar da qualidade das águas subterrâneas na cidade de Cuiabá-MT. *Boletim Paranaense de Geociências*, 54, 7-17. <https://doi.org/10.5380/geo.v54i0.4249>
- Arruda, T. I. M., Novaes, C. D., Duarte, R. S. S., Fachin, S. J. S. (2018). Caracterização de área de nascente aterrada no perímetro urbano de Cuiabá – MT: o uso da resistividade 2D. In: VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica. *Anais... Salinópolis*: SBGF.
- Batalha, R. S., Barboza, E. S., Silva C. H., Tokashiki, C. C., Pinho, F. E. C., Geraldês, M. C. (2019). Lithostratigraphic control of the cangas-poconé lineament auriferous deposits (paraguay belt): implications for regional exploration. *Journal of Sedimentary Environments*, 4(4), 501-517. <https://doi.org/10.12957/jse.2019.47328>
- Belizário, W. D. S. (2015). Avaliação da qualidade ambiental de nascentes em áreas urbanas: um estudo sobre bacias hidrográficas do município de Aparecida de Goiânia/GO. *Revista Mirante*, 8(1), 122-148.
- Bhattacharya, P. K., Patra, H. P. (1968). *Direct current geoelectric sounding*. Nova York: Elsevier Publishing Company.
- Biella, C. A., Costa, R. A. (2006). Análise da qualidade ambiental das nascentes urbanas de Caldas Novas/GO. *VI Simpósio Nacional de Geomorfologia*. Goiânia: SBG.
- Bobachev, C. (2002). *IPI2Win: a windows software for an automatic interpretation of resistivity sounding data*. PhD Thesis, Moscow State University, Russia.
- Braga, A. C. O. (2016). *Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Costa, B. S., Silva, C. H., Costa, A. C. D. (2015). Caracterização estrutural do domínio interno da Faixa Paraguai na região de cangas, porção centro-sul do Estado de Mato Grosso. *Brazilian Journal of Geology*, 45(1), 35-49. <https://doi.org/10.1590/23174889201500010003>
- Cunha, S. B. (2015). Canais fluviais e a questão ambiental. In: Cunha, S. B.; Guerra, A. J. T. (org.). *A questão ambiental: diferentes abordagens*. 9ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 7, p. 219-239.

- Curtarelli, M. P., Tucci, C., Ragghianti, V., Guimarães, V. (2018). Sustentabilidade hídrica urbana: O caso de Santa Catarina. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 15, e13. <https://doi.org/10.21168/rega.v15e14>
- Duarte, R. S. S., Figueiredo, D. M., Parede, L., Novaes, C. D., Fantin-Cruz, I. (2017). Projeto Água para o Futuro: um método inovador no estudo e conservação de nascentes urbanas. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. *Anais...* Florianópolis: ABRH.
- Elis, V. R. (1999). *Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. 264 p.
- Fonseca, T. L., Fonseca, A. R., Gontijo, R. A. N., Parreira, A. G., Costa, F. A., Sousa, F. F. (2018). Qualidade físico-química e microbiológica de nascentes do perímetro urbano de Divinópolis – MG. *Scientific Electronic Archives*, 11(1), 62-68. <https://doi.org/10.36560/1112018441>
- Jesuz, C. R., Santos, A. J. C. (2015). Problemática socioambiental urbana da nascente do córrego Vassoral em Cuiabá-MT. *Geographia Opportuno Tempore*, 2(1), 93-113.
- Kröner, A., Stern, R. J. (2005). Pan-African orogeny. *Encyclopedia of Geology*, 1-12. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369396-9/00431-7>
- Lacerda Filho, J. V., Abreu Filho, W., Valente, C. R., Oliveira, C. C., Albuquerque, M. C. (2004). *Geologia e Recursos minerais do Estado do Mato Grosso*: texto explicativo dos mapas geológicos e de recursos minerais do Estado de Mato Grosso. Mapas Escala: 1:1.000.000. Cuiabá: CPRM/SICME-MT.
- Loke, M. H., Barker, R. D. (1996a). Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44(3), 499-523. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00162.x>
- Loke, M. H., Barker, R. D. (1996b). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44(1), 131-152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>
- Luz, J. S., Oliveira, A. M., Souza, J. O., Motta, J. F. M., Tanno, L. C., Carmo, L. S. Do, Souza, N. B. (1980). *Projeto Coxipó*. Goiânia: DNPM/CPRM, 1, 136 p. Relatório Final.
- Mantovani, M. S. M., Brito Neves, B. B. (2005). The Paranapanema lithospheric block: Its importance of Proterozoic (Rodinia, Gondwana) supercontinent theories. *Gondwana Research*, 8(3), 303-315. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)71137-0](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71137-0)
- Marciano, A. G., Silva, L. F., Silva, A. P. M. (2016). Diagnóstico das nascentes da bacia hidrográfica do córrego do Vargedo. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 5(3), 330-342. <https://doi.org/10.5380/rber.v5i3.48128>
- Mello, V. F. B., Teixeira, A. H. (1967). *Mecânica dos Solos*. São Carlos: Escola de Engenharia.
- Orellana, E. S. (1972). *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Madri: Paraninfo.
- Siqueira Neto, A. C., Barros, A. C. S. P. C., Souza, L. G. (2019). Mapeamento hidrogeológico e estudo da vulnerabilidade do Aquífero Itapecuru utilizando sondagens elétricas verticais na fazenda Alta Floresta II, Tailândia-PA. *Contribuições à Geologia da Amazônia*, 11, 21-35. Disponível em: <http://arquivos.sbg-no.org.br/BASES/CGA%2011.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2021.
- Siqueira Neto, A. C., Elis V. R. (2016). Characterization of an experimental cell in a municipal solid waste landfill using 2-D electrical profiling technique. *Brazilian Journal of Geophysics*, 34(4), 559-570. <https://doi.org/10.22564/rbgf.v34i4.895>
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. 2ª ed. Nova York: Cambridge University Press.
- Tokashiki, C. C., Saes, G. S. (2008). Revisão estratigráfica e faciologia do Grupo Cuiabá no alinhamento Cangas-Poconé, baixada Cuiabana, Mato Grosso. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(4), 661-675. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2008384661675>
- Vieira, F. M., Granemann, G. L. M. (2009). Proposta de zoneamento ecológico econômico (ZEE) do Parque Olhos D'Água. *Universitas Humanas*, 6(1), 125-136. <https://doi.org/10.5102/univhum.v6i1.856>
- Vivian, L. A. N., Prestes, M. M. B., Richter, M., Costa, E. S., Lara, D. M. (2019). Análise ambiental de nascentes no perímetro urbano de Soledade (Rio Grande do Sul, Brasil). *Revista Eletrônica Científica da UERGS*, 5(3), 302-310. <https://doi.org/10.21674/2448-0479.53.302-310>