

AMOSTRAGEM EM ESTUDOS HIDROQUÍMICOS E ISOTÓPICOS EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: A IMPORTÂNCIA DO CONHECIMENTO DOS PERFIS DOS POÇOS PARA A INTERPRETAÇÃO DE DADOS

Drielly Souza RODRIGUES

José Eloi Guimarães CAMPOS

RESUMO

Esse trabalho discorre sobre a importância do conhecimento dos perfis descritivos e construtivos de poços para a amostragem de água subterrânea em estudos hidroquímicos e isotópicos. Dentre os aspectos mais importantes dos perfis pedo-geológicos se destacam: descrição detalhada do perfil completo dos solos (incluindo o *pedon* e o saprolito) e das rochas (incluindo tipos de rochas e minerais, fraturas, contatos, mudanças petrográficas, zonas alteradas, entradas d'água etc.). No âmbito dos perfis construtivos as seguintes informações são fundamentais: nível estático, profundidade de revestimento, posicionamento das seções de filtro, porção da rocha não revestida, isolamento sanitário e granulometria e composição do pré-filtro, dentre outras. O não conhecimento adequado ou mínimo dos perfis dos poços pode gerar ambiguidades nos resultados, interpretações errôneas ou, até mesmo, inviabilizar a avaliação dos dados analíticos. Embora, aparentemente, seja um aspecto óbvio nos estudos de águas subterrâneas, inúmeros trabalhos técnicos e científicos sequer fazem referência às descrições dos poços utilizados para obtenção de amostras. Além do conhecimento dos perfis, cuidados devem ser dispensados às boas práticas durante a amostragem, com especial atenção à purga dos poços previamente à obtenção das amostras. Este trabalho ainda discute situações em que a amostragem compromete as interpretações e outras em que, mesmo com dados reduzidos, foi possível alcançar resultados satisfatórios (em função dos cuidados na escolha dos pontos de amostragem e da aplicação de técnicas adequadas).

Palavras-chave: Amostragem; Água subterrânea; Perfis de poços.

ABSTRACT

SAMPLING IN GROUNDWATER HYDROCHEMICAL AND ISOTOPIC STUDIES: THE IMPORTANCE OF WELL LOGS KNOWLEDGE FOR DATA INTERPRETATION. This work discusses about the importance of knowledge of the well logs for groundwater sampling to hydrochemical and isotopic studies. Among the most important aspects of soil and geological logs, the following stand out: detailed description of the soil, saprolite and rock profile, including fractures, contacts, lithology changes, etc. Within the scope of the construction logs, the following information are essential: static level, casing depth, screen sections positioning, not-cased portion in rock, sanitary protection insulation, grain size and composition of gravel pack among others. The lack of adequate or minimal knowledge of well profiles can generate ambiguity in the results, erroneous interpretations or even make the evaluation of analytical data unfeasible. Although, apparently, it is an obvious aspect in groundwater studies, numerous technical and scientific papers and reports do not even refer to the descriptions of the wells used to obtain samples. In addition to the knowledge of the logs, care should be given to good practices during sampling, with special attention to the purging of the wells prior to obtaining the samples. This work also brings situations in which sampling compromises interpretations and

others in which, even with reduced data, it was possible to achieve satisfactory results (due to the care in the sampling points and the use of appropriate techniques).

Keywords: Sampling; Groundwater; Well logs.

RESUMEN

MUESTREO EN ESTUDIOS HIDROQUÍMICOS E ISOTÓPICOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS: LA IMPORTANCIA DEL CONOCIMIENTO DE LOS REGISTROS DE LOS POZOS PARA LA INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS. En este artículo se analiza la importancia de conocer los perfiles descriptivos y constructivos de los pozos para el muestreo de aguas subterráneas en estudios hidroquímicos e isotópicos. Entre los aspectos más importantes de los perfiles edafogeológicos se encuentran: la descripción detallada del perfil completo de los suelos (incluyendo el pedum y el saprolito) y las rocas (incluyendo los tipos de roca y minerales, las fracturas, los contactos, los cambios petrográficos, las zonas alteradas, las tomas de agua, etc.). Como parte de los perfiles constructivos, son esenciales la siguiente información: nivel estático, profundidad del revestimiento, posicionamiento de las secciones del filtro, porción de roca no revestida, aislamiento sanitario y granulometría y composición del prefiltro, entre otras. Un conocimiento insuficiente o mínimo de los perfiles de los pozos puede dar lugar a ambigüedades en los resultados, interpretaciones erróneas o incluso imposibilitar la evaluación de los datos analíticos. Aunque, en un principio, pueda parecer un aspecto obvio en los estudios de aguas subterráneas, muchos trabajos técnicos y científicos ni siquiera hacen referencia a las descripciones de los pozos utilizados para obtener las muestras. Además de conocer los perfiles, hay que cuidar las buenas prácticas durante el muestreo, prestando especial atención a la purga de los pozos antes de tomar las muestras. En este trabajo también se abordan situaciones en las que el muestreo compromete las interpretaciones y otras en las que, incluso con datos reducidos, fue posible alcanzar resultados satisfactorios (debido al cuidado en la elección de los puntos de muestreo y a la aplicación de técnicas adecuadas).

Palabras clave: Muestreo; Aguas subterráneas; Perfiles de pozos.

1 INTRODUÇÃO

A amostragem é uma questão crítica para qualquer tipo de pesquisa científica ou trabalho técnico em Hidrogeologia. Quando a coleta do material de interesse é realizada de maneira inapropriada, pode haver comprometimento da interpretação dos dados analíticos gerados e, conseqüentemente, dos produtos finais.

Atualmente, a localização precisa por georreferenciamento, a definição dos equipamentos utilizados e as técnicas aplicadas são fundamentais para qualquer tipo de amostragem, seja de solo, rocha, matéria orgânica, gases etc. Entretanto, para as águas subterráneas, além destes aspectos, é essencial determinar a unidade hidroestratigráfica em que a água é amostrada, a fim de se evitar misturas de águas de diferentes

aquíferos (FITTS 2015, FETTER & KRAEMER 2021, SCHWARTZ & ZHANG 2024).

O conhecimento dos perfis dos poços também representa um aspecto fundamental da pesquisa em águas subterráneas. Contudo, não é raro observar na literatura trabalhos técnicos e artigos científicos, cujas descrições das unidades, estruturas geológicas interceptadas e, principalmente, as técnicas de construção dos poços, não são sequer, citadas.

Para estudos hidrogeológicos, principalmente isotópicos e hidroquímicos, é fundamental o conhecimento dos perfis pedo-geológicos e constructivos dos poços dos quais as amostras foram obtidas. Como a composição hidroquímica no aquífero é modificada por processos meteóricos (principalmente precipitação e evaporação) e pelo contato com a rocha, as águas podem conter uma assinatura isotópica característica para

cada unidade hidroestratigráfica com as quais fazem contato (KAZEMI *et al.* 2006, BETHKE & JHONSON 2008; VILLEGAS *et al.* 2018, REN *et al.* 2020, GASTMANS *et al.* 2021).

Quando as amostras de águas são coletadas em poços inadequados ou desconhecidos, pode haver comprometimento das interpretações dos dados, resultando em falsos negativos ou positivos em aquíferos contaminados, classificação incorreta das águas, definição imprecisa dos fluxos hidrogeológicos ou determinação de usos incompatíveis (PACHECO 2012, JUNQUEIRA 2020, MASOUD & EL-MAGD 2022).

A amostragem em poços deve ser feita após testes de bombeamento prolongados, e quando este procedimento não for possível, a obtenção das amostras deve ser realizada após a purga dos poços (RITCHEY 2002, LOUSADA & CAMPOS, 2005, STERRETT 2008, JASECHKO & PERRONEM 2021).

Com relação aos aspectos pedo-geológicos são importantes as descrições dos tipos de solo, rochas e minerais componentes de cada unidade hidroestratigráfica, textura dos solos, grau de alteração, tamanho dos fragmentos obtidos das amostras de calha, profundidades dos contatos, presença de veios e posição das fraturas interceptadas.

Dessa maneira, este estudo tem como objetivo destacar a importância do conhecimento dos perfis de poços para amostragem de águas subterrâneas e os impactos causados pela coleta imprecisa de amostras para estudos hidroquímicos e isotópicos. Como objetivo adicional tem-se a proposição da adequabilidade das técnicas de amostragens, desde a escolha dos poços / nascentes, entendimento da origem da água, execução de purga, medidas *in situ*, até a coleta e preservação da amostra.

2 CONDIÇÕES DE COLETA DE AMOSTRAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

O acesso à zona saturada do aquífero é alcançado a partir de poços (de monitoramento ou de produção) ou de nascentes (no ponto em que a água chega à superfície) (FETTER & KRAEMER 2021). Assim, com o intuito de evitar inconsistências no resultado da pesquisa, é fundamental que informações sobre os perfis pedo-geológicos e construtivos sejam disponibilizadas, para o caso de coleta em poços.

Para o caso de amostragem em nascentes, o conhecimento técnico sobre a classificação genética da nascente (contato, fratura, *sinkhole*, depressão ou mista) (FETTER & KRAEMER 2021) e o isolamento do ponto de exudação da água no momento da coleta são fundamentais.

A amostragem da água subterrânea e sua posterior análise contribui para a elaboração do modelo conceitual do aquífero, no que se refere ao padrão de circulação, hidroquímica e demais aspectos que compõem o conhecimento da unidade hidroestratigráfica. Porém, se a coleta é realizada de maneira inadequada pode gerar discrepâncias na interpretação dos dados obtidos.

2.1 Poços

Um poço tubular profundo ou de monitoramento pode atingir centenas de metros e interconecta camadas hidroestratigráficas de diferentes profundidades que, via de regra, apresentam águas com condições físico-químicas distintas (DRISCOLL 1986, STERRETT 2008, JASECHKO & PERRONE 2021). A importância dos perfis pedo-litológico e construtivo é indispensável quando se refere à amostragem de água subterrânea.

O perfil pedo-litológico deve conter os tipos de material (solo, saprolito, diferentes tipos de rochas) que foram retirados das amostras de calha e descritos durante a perfuração (Figura 1).

A partir dessas informações é possível, então, determinar com qual material a água está em contato. Dessa maneira, essas informações servem como base para a melhor escolha dos critérios para escolha da posição dos materiais de construção dos poços, como profundidade e posicionamento do pré-filtro, filtro e revestimentos, compondo o perfil construtivo do poço (Figura 2).

O perfil construtivo é derivado do pedo-geológico. Dentre os aspectos de complementação dos poços que devem ser conhecidos para uma amostragem adequada estão incluídas: a profundidade do revestimento, posição das seções filtrantes, porção de isolamento, abertura dos filtros, granulometria e composição do pré-filtro e parte perfurada em rocha que não foi revestida.

A falta de conhecimento sobre essas informações pode gerar contaminação cruzada (com misturas de águas de unidades hidroestratigráficas sobrepostas, resultando na obtenção de amostra com sinal isotópico ou característica química mista), ou contaminação ambiental (pelo contato da água com a atmosfera e mudança de parâmetros

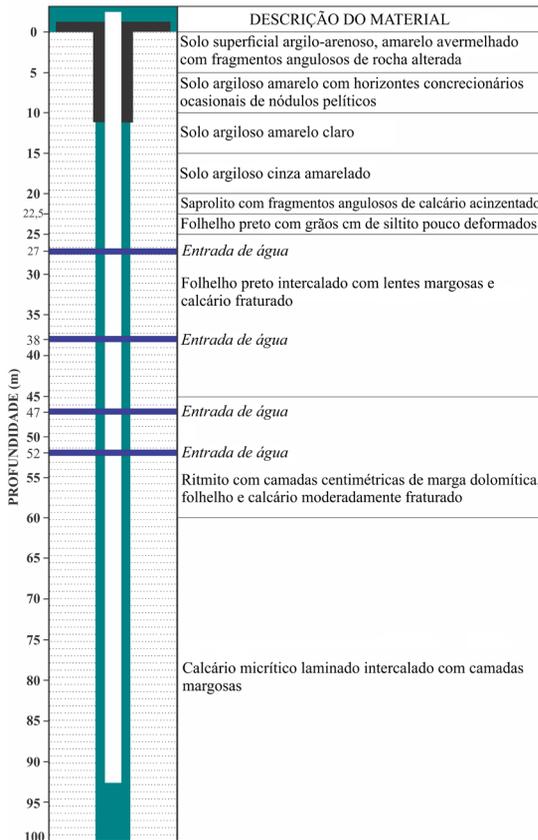


FIGURA 1 – Exemplo de perfil geológico. As informações descritas servem como base para a determinação do respectivo de perfil construtivo.

FIGURE 1 – Example of a geological log. The information described is the basis for determining the respective construction log.

como temperatura, pH, potencial de oxidação, levando a precipitação de fases iônicas) (CHAFOUQ *et al.* 2018, KATTAN 2018, BELLETTINI *et al.* 2019).

A partir de dados de teste de vazão – realizado logo após a construção do poço – fornecidos no relatório do poço, são obtidos parâmetros hidráulicos como condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento, fundamentais para a caracterização de um aquífero, calculados por equações ou softwares específicos, para cada modelo conceitual de aquífero. O *Aquifer Test Pro* é um exemplo de programa comercial que possibilita a obtenção de parâmetros hidráulicos a partir da seleção de métodos específicos para o modelo conceitual (Tabela 1). A classificação equivocada do reservatório pode gerar dados não condizentes com a realidade e cul-

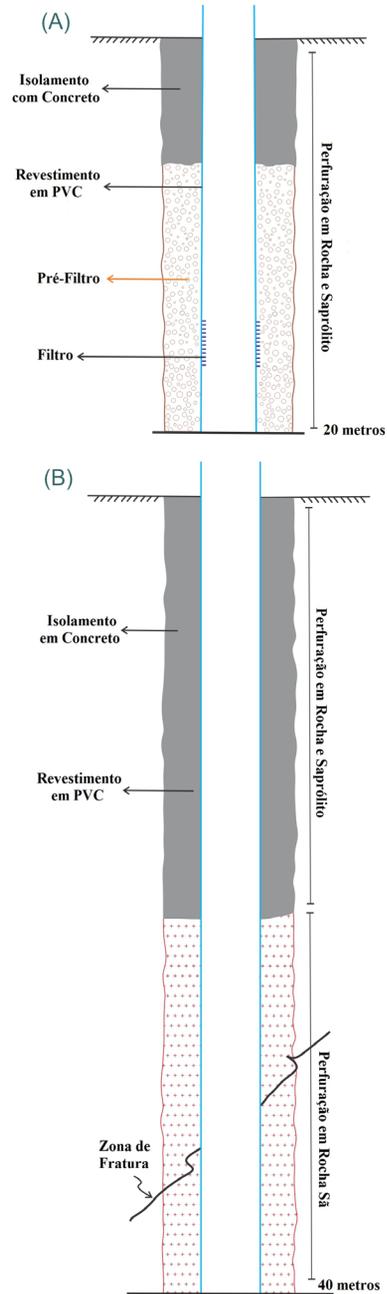


FIGURA 2 – Exemplos de perfis construtivos de poços de monitoramento. As informações discriminadas a seguir são consideradas mínimas para permitir uma amostragem segura: profundidade, diâmetro, porção revestida, seções com instalação de filtros, seção com posicionamento de pré-filtro, seção perfurada diretamente em rocha (sem revestimento) e profundidades das entradas d'água.

FIGURE 2 – Examples of monitoring well construction logs. The following information is considered minimum for safe sampling: depth, diameter, cased portion, screen sections, gravel pack sections, sections drilled directly into rock (without casing), and depths of water intakes.

TABELA 1 – Principais métodos para cálculo de parâmetros hidráulicos para diferentes modelos conceituais de aquíferos.

TABLE 1 – Major methods for calculating hydraulic parameters for different conceptual aquifer models.

<i>Método Hidráulico de Cálculo</i>	<i>Modelo Conceitual</i>
Newman (1975)	Aquífero livre (não confinado)
Theis (195)	Aquífero totalmente confinado
Hantush (1960)	Aquífero confinado com drenança a partir do aquítarde.
Walton (1960)	Aquífero confinado com gotejamento a partir do aquítarde.
Moench (1984)	Aquífero fraturado ou de dupla porosidade
Warren & Root (1963)	Aquífero fraturado

minar em resultados inconsistentes (FETTER & KREAMER 2021; SCHWARTZ & ZHANG 2024). Importante lembrar que, para a maior parte dos cálculos, são requeridos dados do perfil construtivo dos poços incluindo diâmetro do revestimento, comprimento da seção de filtros e vazão, além dos dados de testes de bombeamento.

2.2 Nascentes

As nascentes são denominadas como um ponto no solo ou rocha na superfície do terreno em que ocorre a exposição natural da superfície potenciométrica do aquífero. Esta feição pode ocorrer em condição subaérea (em que a água flui diretamente na superfície do terreno) ou em um corpo hídrico (FREEZE & CHERRY 1979, SCHWARTZ & ZHANG 2024, FITTS 2015).

As nascentes são originadas a partir do contraste da condutividade hidráulica entre diferentes meios, por feição geomorfológica de rebaixamento local do relevo ou por estrutura geológica (FETTER

& KRAEMER 2021). A classificação genética das nascentes leva em consideração o principal controle de sua formação, contudo há nascentes classificadas como mistas, pois são formadas por mais de um dos controles anteriormente enumerados.

Muitas vezes representam locais ideais para amostragem de águas subterrâneas e seus constituintes, à medida que estão continuamente em fluxo. Contudo, deve-se ter cuidado para garantir que a amostragem seja feita o mais próximo possível do ponto de descarga, com total isolamento da nascente, a fim de evitar contaminação com a atmosfera e/ou com águas ambientais que não sejam do interesse de estudo.

A figura 3A representa um esquema inadequado de amostragem, onde haverá contaminação da água subterrânea que sai diretamente da nascente com a água superficial, uma vez que teve contato com a atmosfera e pode ter atividade biológica. A figura 3B ilustra a maneira adequada de coleta. A nascente deve ser bombeada por um tempo mí-

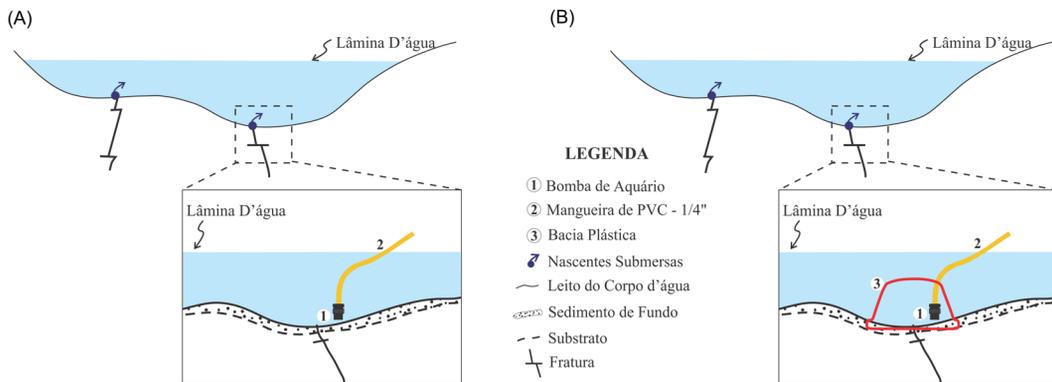


FIGURA 3 – (A) Esquema de amostragem inadequado em que a mangueira é colocada no interior do corpo hídrico gerado pela água que flui da nascente. (B) Esquema de amostragem adequado, em que uma bacia plástica é posicionada como cúpula sobre o ponto de exudação da água subterrânea.

FIGURE 3 – (A) Inadequate sampling scheme, wherein the PVC tube is positioned within the water body formed by the spring’s outflow. (B) Adequate sampling scheme in which a plastic basin in the form of a dome is positioned over the point where the groundwater exudes.

nimo para se esgotar todo o volume aprisionado, de forma que a amostra represente, exclusivamente, a água do aquífero.

3 COLETA E PRESERVAÇÃO DE AMOSTRAS

As investigações e interpretações hidrogeológicas dependem da qualidade da amostragem de campo. Os procedimentos tradicionais de coleta presumem que nem toda a água existente em um poço de monitoramento pode ser representativa da unidade hidroestratigráfica, seja aquela contida acima do topo da seção de filtro, ou mesmo a que flui pela seção filtrante (GIBB *et al.* 1981, ABNT 2010). Este fato ocorre devido às possíveis alterações químicas causadas pela interação da atmosfera com o material da seção de filtro/revestimento, da composição do pré-filtro (quando este está presente), processos biológicos, e/ou misturas da coluna de água.

Por este motivo, a amostragem em poços deve ser feita após testes de bombeamento prolongados, e quando este procedimento não for possível, a obtenção das amostras deve ser realizada após a purga dos poços (RITCHEY 2002, LOUSADA & CAMPOS 2005, STERRETT 2008, JASECHKO

& PERRONEM 2021), principalmente para investigações de qualidade de água subterrânea ou em estudos isotópicos. Neste processo remove-se a água existente na coluna do poço com o intuito de se obter uma amostra representativa.

O desenvolvimento inicial de diretrizes para amostragem de águas subterrâneas surgiu de programas de abastecimento de água potável que enfatizavam o uso de poços de produção. GIBB *et al.* (1981) conduziram algumas das pesquisas iniciais para esse fim, e estipularam a purga tradicional de três a cinco volumes da água existente no interior do poço.

O objetivo dessa técnica é não causar grande rebaixamento do nível da água, a fim de evitar o efeito cascata que pode ocorrer na seção filtrante do poço. Assim, os autores pioneiros nesse estudo recomendam que este procedimento seja feito de maneira uniforme e em vazões compatíveis com a capacidade do poço de repor água.

Ao contrário da técnica tradicional, a purga de baixa vazão (*low flow*) leva em consideração as características físico-químicas e químicas da água produzida para definir a finalização da purga (Figura 4). Nessa variação, a purga é realizada por meio de taxas de bombeamento reduzidas (entre 0,05 L/min e 1,0 L/min), compatíveis com a capacidade de pro-

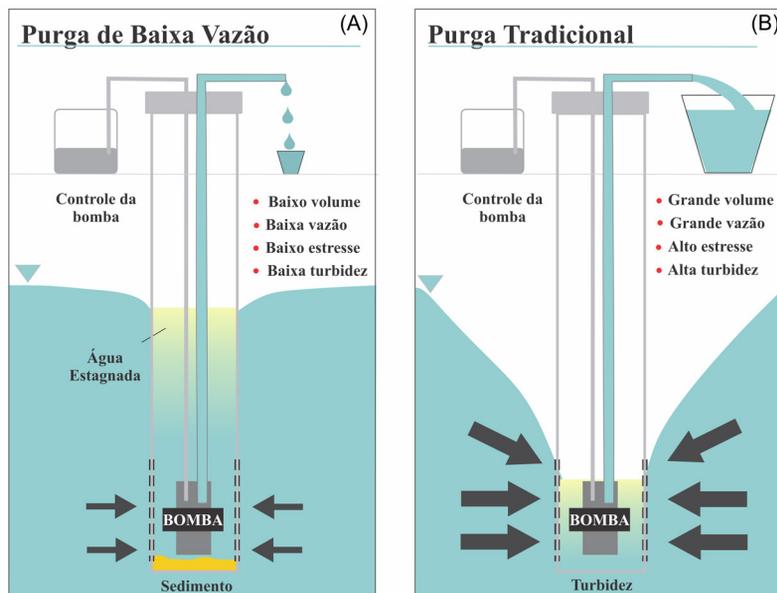


FIGURA 4 – Comparação dos tipos de purga de poços que deve anteceder a coleta da amostra de água subterrânea. A) O método de baixa vazão garante menor perturbação do sistema hídrico subterrâneo em equilíbrio de fluxo. B) O método de alta vazão pode gerar maior impacto no sistema e causar aumento de turbidez na amostra. Adaptado de RITCHEY (2002).

FIGURE 4 – Comparison of the types of well purging that must be conducted prior to groundwater sampling. A) The low-flow method is designed to minimize disturbance to the groundwater system in flow equilibrium. B) The high-flow method has the potential to exert a more pronounced influence on the system, which may result in increased turbidity levels in the sample. Adapted from RITCHEY (2002).

dução do poço de monitoramento, que não causam o rebaixamento excessivo do nível da água para evitar a coleta da água não representativa (BARCELONA & HELFRICH 1986, HIRATA & KIMMELLMAN 1986, RITCHEY 2002, ABNT 2010).

Durante o bombeamento, dados físico-químicos, incluindo o total de sólidos dissolvidos – TDS, temperatura, oxigênio dissolvido, pH e Eh, devem ser monitorados até que seja obtida a estabilização das suas leituras, indicativo de que água representativa da formação está sendo coletada e que a purga está completa.

O equipamento de amostragem deve ser posicionado de forma lenta no interior do poço de monitoramento, e para que se tenha um fator de segurança, deve ser preferencialmente disposto no meio do tubo de filtro. A finalização da purga será definida por meio da estabilização das medidas.

O monitoramento contínuo dos parâmetros indicativos da qualidade da água é fundamental para a determinação do momento em que a purga pode ser encerrada. Uma vez que o nível de rebaixamento da coluna d'água e os valores se estabilizam, presume-se que a água bombeada é proveniente da formação. Neste momento, as amostras devem ser coletadas (CETESB 2011).

Para os casos em que não existe a possibilidade de uso de bombas submersíveis ou do sistema “*low flow*”, pode-se realizar a purga com auxílio de um *bailer*. Trata-se de um sistema simples de amostrador acoplado a um fio de nylon, em que no interior de um tubo inoxidável (reutilizável) ou de PVC (descartável) de 1” de diâmetro existe uma esfera que se move com o empuxo da água, e que fica presa na ponta do tubo quando este é retirado do poço (Figura 5).



FIGURA 5 – *Bailer* inoxidável para amostragem em profundidade. Este tipo de amostrador permite penetração na coluna de água dos poços de monitoramento (AGSOLVE 2024).

FIGURE 5 – Stainless steel bailer for deep sampling. This type of sampler enables the penetration of the water column of monitoring wells (AGSOLVE 2024).

O *bailer* pode permitir amostragem multi-nível em poços com pelo menos 4” de diâmetro (CAMPOS 2020). Para este objetivo é necessário acoplar um peso ao *bailer* descartável, ou utilizar o de aço inoxidável, para que seja introduzido no poço e desça cortando a coluna de água da zona saturada. A profundidade amostrada será aproximadamente aquela alcançada pelo *bailer*, uma vez que, o conjunto atravessa a coluna de água até o ponto em que é retirado do poço.

Os laboratórios de análises hidrogeoquímicas têm exigências e restrições em relação às amostras. Assim, é importante contatar o laboratório antes do trabalho de campo para garantir que seu protocolo de amostragem e preservação atendam aos requisitos.

As amostras de água devem ser coletadas e armazenadas em frascos lacráveis. Garrafas de polietileno lineares de alta densidade (HDPE), polietileno linear (LPE) ou polipropileno (PP) são as mais recomendadas para a coleta (HIRATA & KIMMELLMAN 1986, ABNT 2010). Para análises específicas como determinados isótopos, gases, fases bacteriológicas ou hidrocarbonetos frascos especiais de vidro ou âmbar podem ser requeridos.

Os parâmetros físico-químicos indicativos da qualidade da água são difíceis de preservar durante o armazenamento e transporte e devem ser medidos *in situ*. Para isso, é necessária a utilização de uma célula de fluxo conectada em série com o sistema de coleta por bombeamento, o que permite que a água bombeada não entre em contato com o ambiente externo previamente à realização das leituras (MOTLAGH *et al.* 2020, SCHWARTZ & ZHANG 2024).

Em nascentes a purga representa a retirada de toda a água superficial que foi aprisionada pelo sistema de isolamento (geralmente uma bacia plástica acoplada por mangueira de restrito diâmetro e vedação com silicone). Neste caso, também deve-se monitorar os parâmetros físico-químicos até que se estabilizem, antes da tomada da amostra (TODD & MAYS 2004, FITTS 2015).

Ao contrário das amostras de sólidos como rocha, saprolito ou solo, as amostras de água, na maior parte dos casos, devem ser preservadas desde a coleta até o momento da análise. Este fator é necessário, uma vez que as amostras de água representam uma alíquota de uma matriz maior que está em equilíbrio com o seu meio (aquífero ou corpo hídrico superficial) (ABNT 2010). No momento em que a amostra é retirada de sua matriz, pode haver mudança do equilíbrio natural, em função

da mudança na temperatura, no pH, pelo contato com a atmosfera ou a partir de atividade biológica. As substâncias contidas na amostra de água podem sofrer precipitação, volatilização ou dissociação, de forma que os resultados analíticos possam ser mascarados pelos efeitos pós-coleta (HIRATA & KIMMELMAN 1986, ABNT 2010).

Para se minimizar este tipo de efeito deve-se preservar as amostras, de forma a se ampliar seu tempo de validade até a realização das análises. Dentre os tipos mais comuns de preservação destacam-se: refrigeração, adição química e congelamento (CETESB 2011).

A refrigeração é um tipo de preservação muito comum e utilizada para ampla gama de substâncias. Consiste em diminuir a temperatura do ambiente em que as amostras são transportadas com uso de gelo em caixas térmicas. Após depositadas no laboratório responsável, as amostras devem permanecer em geladeiras até a realização dos procedimentos analíticos e, mesmo após as análises, pois pode haver a necessidade de refazê-las, caso haja resultados inconsistentes.

A adição química garante estabilidade em tempo maior das amostras, o que amplia seu prazo de validade. Vários tipos de preservantes são utilizados na estabilização, inclusive para ânions, que de forma geral, apresentam intervalo de tempo menor entre a amostragem e a análise.

O congelamento é uma técnica de preservação pouco comum para amostras de água, sendo aplicada apenas para casos específicos. A dificuldade de congelamento em campo é um dos aspectos de sua restrição de aplicação. Também há o risco de o congelamento causar mudanças em fases coloidais ou em particulados presentes na amostra e afetar os resultados analíticos.

4 DISCUSSÕES

Em sistemas complexos, como é o caso de aquíferos fissuro-cársticos ou reservatórios sobrepostos, é imprescindível o conhecimento dos perfis pedo-geológico e construtivo dos poços, uma vez que, muito provavelmente, a coleta resultará em mistura de águas com características químicas diferentes.

O trabalho de PACHECO (2012) mostra que, apesar de terem sido utilizados métodos analíticos considerados adequados, a interpretação dos resultados analíticos foi dificultada em função da ausência das informações sobre os perfis dos poços de coleta. A avaliação entre a cota altimétrica dos poços e

o sinal analítico do deutério resultou em correlação muito baixa (R^2 da ordem de 25%) e erros analíticos relativamente altos ($\sigma > 5\%$) (Figura 6). Este comportamento é interpretado como decorrente de misturas de águas freáticas e profundas que naturalmente apresentam padrões isotópicos distintos.

Resultados inconsistentes também podem ocorrer em coletas de amostras de água em nascentes. A falta de isolamento absoluto entre a água que migra da nascente com a água superficial, pode causar misturas de águas subterrâneas e superficiais, culminando em contaminação. O trabalho de JUNQUEIRA (2020) é um exemplo de caso que houve contaminação durante a coleta da água da nascente termal resultando em idade mais recente.

Em pesquisas cujo objetivo é a datação das águas subterrâneas coletadas em poços, o cuidado deve ser ainda maior, visto que a aplicação de métodos como o ^3H ou o ^{14}C são realizados em função da razão entre a concentração de carbono ou trítio na atmosfera e o conteúdo na água subterrânea (GASTMANS *et al.* 2021).

O trabalho de LOUSADA & CAMPOS (2005) é um exemplo que demonstra que, em muitos casos, o restrito número de amostras não é um limitante para estudos isotópicos, desde que as amostras de água tenham sido obtidas em poços com perfis pedo-litológico e construtivo conhecidos. Os autores estudaram diferentes meios aquíferos no Distrito Federal e demonstraram que o reservatório freático apresenta idade entre 15 e 18 anos e que as águas dos aquíferos fraturados sotopostos mais profundos, variam entre 45 e 60 anos. Esta pesquisa contou com apenas três pares de amostras, sendo obtidas em poços rasos e profundos situados a pequena distância entre si.

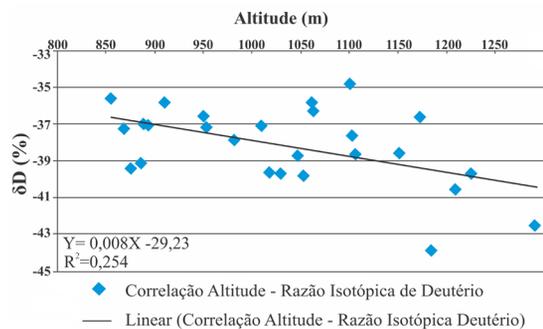


FIGURA 6 – Correlação entre altitude e razão isotópica de deutério (Adaptado de PACHECO 2012).

FIGURE 6 – Correlation between altitude and oxygen isotope ratio (Adapted from PACHECO 2012).

OLIVEIRA (2009) estudou o Sistema Aquífero Guarani no estado de Goiás e verificou que as águas da porção livre do aquífero apresentam valores de pH levemente ácidos a ácidos, enquanto os da porção confinada são alcalinos (OLIVEIRA & CAMPOS 2011). Apenas alguns poços (JL1 e PD3) apresentaram valores discrepantes, sendo os únicos que atravessaram o Aquífero Guarani e tiveram contribuição de águas do Aquífero Aquidauana sotoposto (Figura 7). Os arenitos da Formação Aquidauana na região apresentam cimento calcítico e a elevação do pH nestes casos é devida à solubilização do carbonato de cálcio (OLIVEIRA & CAMPOS 2011). A interpretação dos dados apenas foi possível com o conhecimento dos perfis de poços, caso contrário, as variações do pH em função do confinamento do aquífero não seriam passíveis de interpretação ou levariam a conclusões errôneas.

A análise dos perfis construtivos dos poços na pesquisa de SILVA (2015) fundamentou interpretações relativas à ocorrência de misturas de água, existência de zonas de estagnação e os sistemas de fluxo da água subterrânea. Este trabalho visou investigar fontes alternativas de abastecimento urbano no semiárido, onde há carência de reservatórios de superfície para armazenamento de águas de escoamento superficial. O conhecimento dos perfis de poços, com indicação das espessuras dos solos e a descrição dos tipos de rochas graníticas em maiores profundidades, permitiu mostrar a ampla diferença hidroquímica entre os aquíferos fraturados em

rochas cristalinas daqueles associados a metassedimentos do Supergrupo Espinhaço na mesma região.

O trabalho de ABDALA & MOUBARK (2018) utilizou informações sobre os materiais interceptados pelo poço e as profundidades dos níveis de água para investigar parâmetros hidrogeológicos e interpretar resultados das análises hidroquímicas do aquífero estudado. Os 48 poços utilizados no estudo apresentaram perfis geológicos, construtivos, além de perfilagem elétrica. A integração das descrições com os logs de perfis geofísicos possibilitou a confirmação de que o aquífero é composto por camadas arenosas com 90 a 108 m de espessura e argilosas na base. A utilização dos perfis pedo-geológicos e construtivos foi essencial para avaliar a performance dos poços e para corroborar a interpretação das análises geoquímicas na investigação dos processos predominantes que afetam a composição química da água subterrânea, considerando que a água mantém contato com material arenoso e maturo.

BELLETTINI *et al.* (2019) avaliaram os efeitos da mineração de carvão na qualidade da água subterrânea no Aquífero Rio Bonito, a partir de análises químicas e dados de poços de monitoramento, incluindo perfis pedo-geológicos e construtivos. Nessa pesquisa foram utilizados 9 poços, sendo que em 7 deles há a disponibilização de perfis completos. A avaliação da posição dos filtros permitiu demonstrar que as amostras de águas são oriundas exclusivamente da Formação Rio Bonito, pois os poços foram isolados nas seções perfuradas em outras unidades geológicas. Dessa forma,

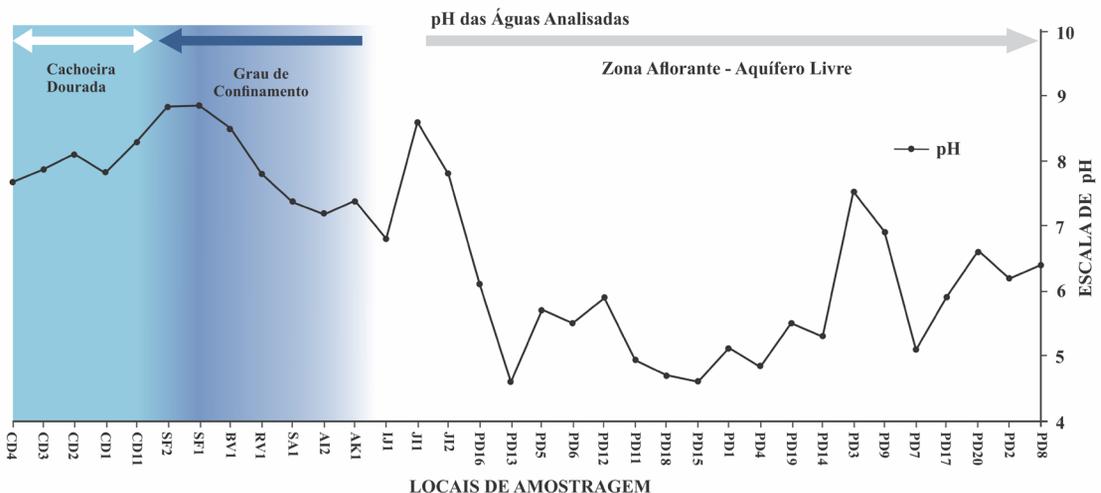


FIGURA 7 – Comparação de valores de pH entre as zonas aflorante e confinada (Adaptado de OLIVEIRA 2009).

FIGURE 7 – Comparison of pH values between the outcrop and confined zones (Adapted from OLIVEIRA 2009).

foi possível concluir que as características geoquímicas da água subterrânea da Formação Rio Bonito na região dependem do tempo de residência, da presença de fraturas e de modificações decorrentes da contaminação.

O trabalho de LEITE *et al.* (2023) avaliou fontes de contaminação no Sistema Aquífero Guarani aplicando diferentes traçadores ambientais, juntamente com outros dados geoquímicos. Nessa pesquisa foram utilizados 5 poços tubulares profundos da rede de abastecimento público de água. O posicionamento das seções de filtros e a distribuição do envelope de pré-filtro demonstram que as amostras de água são provenientes exclusivamente de arenitos da Formação Botucatu. A utilização dos dados de perfis dos poços foi fundamental para viabilizar a avaliação dos dados analíticos, obter informações sobre fluxo descendente a partir de basaltos da Formação Serra Geral e confirmar a natureza e origem do contaminante.

SILVA *et al.* (2021) caracterizaram as unidades aquíferas da área urbana e periurbana do município de São Carlos - SP com dados pré-existent no cadastro do SIAGAS. Apesar do potencial verificado com essa base de dados, o ensaio de aplicação foi realizado de forma limitada, pois do montante de 200 poços cadastrados, apenas 73 continham informações sobre a estimativa de vazão

específica e condição de ocorrência do aquífero. Consequentemente, os autores concluíram que para se atingir resultados mais robustos e consistentes para inferir a potabilidade e classificação geoquímica das águas destas unidades aquíferas seria necessário maior número de poços com informação disponível, com a finalidade de gerenciar a exploração de águas subterrâneas.

O trabalho de SIQUEIRA NETO *et al.* (2023) teve como objetivo verificar a oscilação do nível freático do aquífero livre da Formação Alter do Chão e a possível relação com os alagamentos permanentes nas proximidades da Universidade Federal do Oeste do Pará. Os autores concluíram que a Cobertura Laterítica Matura é a causa principal do alagamento da via, no entanto, não foi possível afirmar se a sua ocorrência na área de estudo é resultado de precipitação pluviométrica ou se relaciona, também, com períodos de inundação do Rio Tapajós, haja visto que esta camada não foi descrita nos perfis geológicos dos poços cadastrados no Relatório Integrado de Monitoramento das Águas Subterrâneas - RIMAS.

A figura 8 demonstra um exemplo comumente observado em locais em que um espesso manto de intemperismo, representado por solo e saprolito recobre rochas fraturadas, de forma a se compor um conjunto de dois aquíferos sobrepostos, sendo o superior intergranular freático e o inferior um reserva-

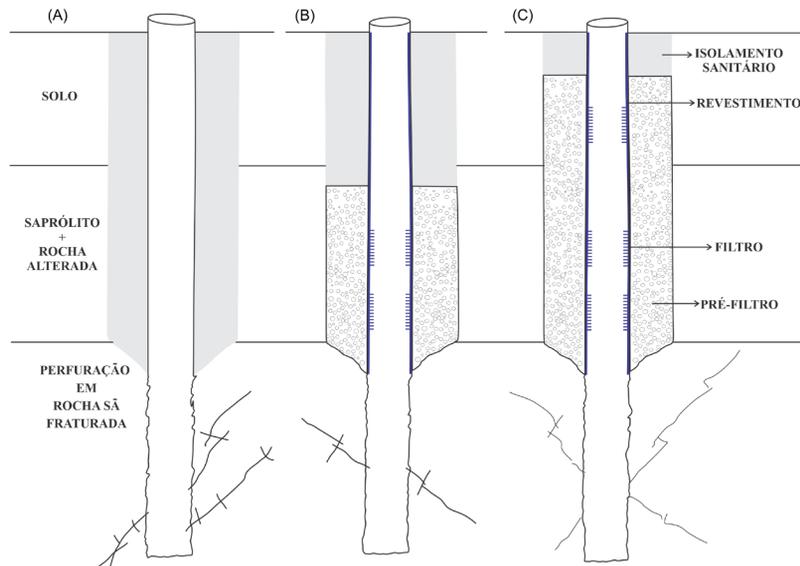


FIGURA 8 – Exemplos de diferentes perfis construtivos de poços em um mesmo conjunto de aquíferos sobrepostos. Em (A) o poço apenas capta água do aquífero profundo; em (B) o poço mistura águas captada a partir de fraturas em rocha não alterada e do saprolito e em (C) há entrada de águas do solo, além dos dois outros meios.

FIGURE 8 – Examples of different well construction logs in the same set of overlapping aquifers. In (A), the well only draws water from the deep aquifer; in (B), the well draws water from both fractures in unaltered rock and saprolite; and in (C), there is water entering the well from the ground, in addition to the two other media.

tório fraturado profundo. Neste caso, as amostras de águas coletadas em poços com distintos perfis construtivos deverão resultar em dados hidroquímicos e isotópicos muito contrastantes.

Águas obtidas, exclusivamente, do meio fraturado (Poço A) deverão demonstrar o equilíbrio da interação entre a água e a rocha, sendo menos ou mais mineralizada, em função da reatividade dos minerais que compõem o arcabouço do aquífero. Amostras coletadas do Poço B deverão conter maior mineralização, uma vez que o saprolito e as rochas alteradas tendem a ter maior reatividade e liberação de íons para a água. O resultado da amostragem do Poço C deverá apresentar a maior complexidade, pois apresentará uma mistura de águas freáticas, que são mais ácidas e menos mineralizadas, com águas mais ricas em íons das porções mais profundas, tanto da porção saprolítica, quanto do meio fraturado.

Importante destacar que, a conformação dos aquíferos ilustrados na figura 8 é muito comum no Brasil em locais em que espessos latossolos recobrem diferentes tipos de rochas de natureza diversa (granitos, gnaisses, xistos, quartzitos, etc.).

A figura 9 mostra um exemplo real de aquíferos sobrepostos na região de Entre Ribeiros (noroeste do estado de Minas Gerais), onde suas águas apresentam forte contraste de parâmetros físico-químicos (Tabela 2). Neste caso, a amostra do Poço 1 obtida do aquífero freático associado a latossolos apresenta água ácida, oxigenada e mais fria em função de se tratar da água de chuva em contato com material quimicamente inerte, o que resulta na preservação das características da composição da água de recarga. A água coletada do Poço 2 apresenta maior mineralização, pH alcalino, maior temperatura e condição redutora, o que corrobora o contato com o aquífero de natureza carbonática.

Em um caso hipotético em que um poço profundo fosse instalado sem isolamento da porção rasa e com captação dos diferentes aquíferos sobrepostos, as condições da água resultariam em uma mistura das duas composições individuais. A concentração final seria uma mistura em função das proporções de contribuição de cada aquífero. No caso de estudo isotópico, para caracterização do aquífero ou datação das águas, ainda seria mais crítico, pois o sinal isotópico apresenta maior sensibilidade a misturas de ambientes distintos.

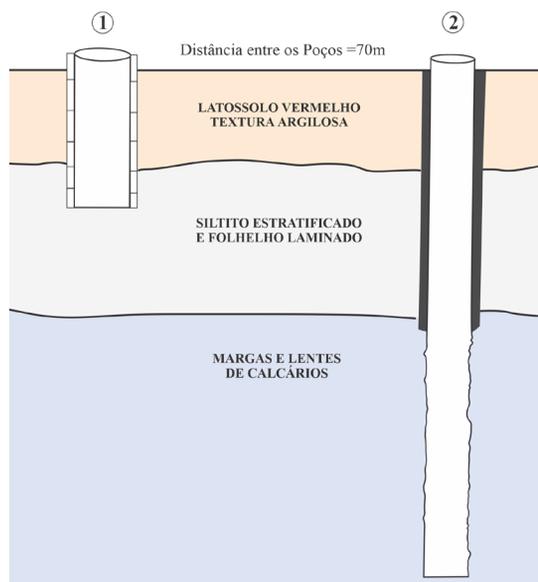


FIGURA 9 – Exemplo real de poços que captam águas de aquíferos sobrepostos e cujas águas apresentam características físico-químicas contrastantes no Aquífero Entre Ribeiros, Minas Gerais. (1) Poço escavado com 16 m de profundidade e 1 m de diâmetro que intercepta solo e saprolito e capta água do aquífero freático. (2) Poço tubular profundo com revestimento de 8 polegadas e isolamento da seção de solo e rocha pelítica, que capta água do aquífero fissuro-cárstico regional.

FIGURE 9 – Real-world example of wells that draw water from overlapping aquifers, exhibiting contrasting physical and chemical characteristics in the Entre Ribeiros Aquifer, Minas Gerais - Brazil. (1) An excavated well with a depth of 16 m and a diameter of 1 m that intersects soil and saprolite and draws water from the phreatic aquifer. (2) A deep tubular well with an 8-inch casing and isolation of the soil and pelitic rock section, which draws water from the regional fissure karst aquifer.

TABELA 2 – Dados reais obtidos em campo que demonstram a ampla distinção dos parâmetros de poços situados em pontos próximos entre si, mas que captam águas de aquíferos sobrepostos. NE – nível estático.

TABLE 2 – Actual data obtained in the field showing the large difference between the parameters of wells located close to each other but drawing water from overlapping aquifers. NE - static level.

Parâmetros	Poço 1	Poço 2
NE (m)	3,2	15,8
CE (S/cm)	25,7	109,4
T (°C)	24,9	27,2
pH	5,8	7,98
Eh (mV)	+ 66,4	- 57,3

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das discussões previamente apresentadas e exemplos de casos, as seguintes considerações finais sobre o tema podem ser enumeradas:

A amostragem é uma questão prática que passa todos os estudos hidroquímicos e isotópicos em águas subterrâneas. O acesso ao aquífero é realizado a partir de amostragens em poços de monitoramento, poços tubulares ou nascentes;

O conhecimento dos perfis dos poços e do modelo conceitual do aquífero são mais importantes do que o número de amostras coletadas. Um reduzido número de amostras em estudos isotópicos de águas, pode alcançar resultados consistentes, desde que a amostragem tenha sido realizada em locais corretos e sob as melhores práticas;

A interpretação dos resultados analíticos só é possível com o conhecimento do perfil dos poços amostrados. Dentre as informações fundamentais que devem ser consideradas na escolha do poço a ser amostrado, devem constar: o perfil descritivo dos solos, saprolitos e rochas interceptadas durante a perfuração, grau de alteração, profundidade de fraturas ou entradas d'água, bem como a posição do revestimento, filtros, seção mantida em rocha sem revestimento-filtro, isolamento dos aquíferos freáticos e profundos e ponto da amostragem na coluna d'água;

O não conhecimento dos perfis dos poços pode acarretar problemas e inconsistências em trabalhos técnicos e acadêmicos que podem dificultar ou, mesmo, inviabilizar a interpretação dos resultados analíticos, sendo fundamentos básicos para a coleta de amostras de águas subterrâneas. Entretanto, são muito comuns estudos acadêmicos e relatórios técnicos em que não há nenhuma referência às descrições dos poços ou que foram realizados em regiões onde tais dados não estão disponíveis.

Mesmo após a escolha adequada dos pontos de amostragem e aplicação das melhores práticas durante a coleta, alguns aspectos devem ser observados para verificação da qualidade dos resultados analíticos, incluindo:

Aplicação do balanço iônico e verificação dos erros máximos admissíveis, em função da condutividade elétrica ou total de sólidos dissolvidos da água;

Utilização de métodos isotópicos de objetivos complementares, por exemplo, uso de ^3H e ^{14}C para datação de águas antigas (com radiocarbono),

de forma a se verificar a possibilidade de existência de recarga moderna (a partir do trítio);

Prática de correções específicas para análises de ^{14}C , no caso de estudos em aquíferos cársticos e fissuro-cársticos, em função da possibilidade de entrada de carbono a partir da dissolução associada ao bicarbonato presente nas rochas reservatório;

Verificação da adequabilidade ao modelo hidrogeológico e de circulação com os resultados hidroquímicos e isotópicos. Por exemplo, na comparação da composição química de águas de sistemas de fluxo regional e local, as primeiras devem resultar em maior mineralização total, desde que o sistema aquífero apresente o mesmo arcabouço composicional.

Além do controle dos poços, o conhecimento do modelo conceitual ou de circulação da água também é fundamental. Águas oriundas de aquíferos livres ou confinados, de fluxo local ou regional, de sistemas sobrepostos, de aquíferos suspensos, dentre outros, apresentarão respostas distintas com relação à hidroquímica e ao sinal isotópico, tendo em vista as diferenças de interação água / rocha, possibilidades de trocas iônicas, processos de dissolução e demais equilíbrios no sistema aquífero.

Para casos específicos em que os aquíferos se comportam como reservatórios individuais homogêneos, a exemplo do que ocorre no cristalino do nordeste do Brasil, a preocupação com os perfis é minimizada, pois os poços apresentam projetos construtivos similares, com a instalação de tubos nos primeiros metros e perfuração direta em rocha granítica ou gnáissica na zona fraturada. Nestes casos, praticamente não há seção de saprolitos e os poços não têm revestimento, filtro ou pré-filtro.

O uso de estatística multivariada para tratamento de dados hidroquímicos, como Análise de Componentes Principais pode potencializar os resultados, desde que, os dados possam ser agrupados ou tenham origem conhecida. Neste contexto, o conhecimento do aquífero específico ou se há mistura de águas de duas unidades ou aquíferos sobrepostos é fundamental para dar suporte às técnicas estatísticas.

6 AGRADECIMENTOS

Aos relatores e editor da revista *Derbyana* pelas sugestões, comentários e revisões que enriqueceram o manuscrito original.

7 REFERÊNCIAS

- ABDALLA, F.; MOUBARK, K. 2018. Assessment of Well Performance Criteria and Aquifer Characteristics Using Step-Drawdown Tests and Hydrogeochemical data, West of Qena Area, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 138: 336-347. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.11.023>
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2010. *Amostragem de Água Subterrânea em Poços de Monitoramento – Método da Purga*. ABNT, NBR 15847: 2010. ABNT, Rio de Janeiro, 1ª ed., ICS: 13.060.45, 15 p.
- AGSOLVE. 2024. *AgSolve Monitoramento Ambiental, Produtos e Soluções*. Disponível em <https://www.agsolve.com.br>. Acessado em ago/2024.
- BARCELONA, M.J.; HELFRICH, J.A. 1986. Well Construction and Purging Effects on Groundwater Samples. *Environmental Science and Technology*, 20(11): 1179-1184. <https://doi.org/10.1021/es00153a015>.
- BELLETTINI, A.S.; VIERO, A.P.; NETO, A.C.B. 2019. Hydrochemical and Contamination Evolution of Rio Bonito Aquifer in the Carboniferous Region, Paraná Basin, Brazil. *Environmental Earth Science*, 78: 652. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8625-1>
- BETHKE, C.M.; JOHNSON, T.M. 2008. Groundwater Age and Groundwater Age Dating. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 36: 121-152. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.36.031207.124210>.
- CAMPOS, J.E.G. 2020. *Diagnóstico de Contaminação e Proposta de Remediação do Antigo Lixão da Estrutural. Contrato 101/2019*. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC), Produto 3 (Relatório Técnico).
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2011. *Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos*. Carlos Jesus Brandão et al. (org.), CETESB/ANA, São Paulo.
- CHAFOUQ, D.; ELMANDOUR, A.; ELGETTAFI, M.; HIMI, M.; CHOUKRI, A.; CASAS, A. 2018. Hydrochemical and Isotopic Characterization of Groundwater in the Ghis - Nekor Plain (Northern Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 139: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.11.007>.
- DRISCOLL, F.G. 1986. *Groundwater and Wells*. Johnson Screen, St. Paul, Minnesota, 2ª. ed., 1089 p.
- FETTER, C.W.; KRAEMER, D. 2021 *Applied Hydrogeology*. Waveland Press, Inc. Long Grove, Illinois, 5ª ed., 625 p.
- FITTS, C.R. 2015. *Águas Subterrâneas*. Elsevier – Campus, Rio de Janeiro, 2ª ed., 608 p.
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 604 p.
- GASTMANS, D.; SANTOS, V.; LIMA, C.; QUAGGIO, C.S.; SANTAROSA, L.V.; KIRCHHEIM, R.E. 2021. Contribuição dos Isótopos Estáveis da Água (H e O) no conhecimento dos Aquíferos Brasileiros: Estado da Arte e Perspectivas Futuras. *Derbyana*, 42: e734. <https://doi.org/10.14295/derb.v42.734>.
- GIBB, J.P.; SCHULLER, R.M.; GRIFFIN, R.A. 1981. *Procedures for the Collection of Representative Water Quality Data from Monitoring Wells*. Cooperative Ground Water Report 7. Illinois State Water Survey and Illinois State Geological Survey, Municipal Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, 61 p.
- HANTUSH, M.S. 1960. Modification of the theory of leaky aquifers. *Journal of Geophysics Research*, 65(11): 3713-3725.
- HIRATA, R.C.A.; KIMMELLMAN, A.A. 1986. *Manual de Coleta de Amostras em Geociências. Águas Subterrâneas*. São Paulo: Departamento de Águas e Energia/Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 10 p. (Boletim do Núcleo São Paulo/SBG, 2).
- JASECHKO, S.; PERRONE, D. 2021. Global Groundwater Wells at Risk of Running

- Dry. *Science*; 372: 418-421. <https://doi.org/10.1126/science.abc275>
- JUNQUEIRA, T.P. 2020. *Modelo Conceitual das Águas Termais da Região da Chapada dos Veadeiros (GO): Estudos Estruturais, Hidroquímicos e Isotópicos*. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, Dissertação de Mestrado, 101 p.
- KATTAN, Z. 2018. Using hydrochemistry and Environmental Isotopes in the Assessment of Groundwater Quality in the Euphrates Alluvial Aquifer, Syria. *Environmental Earth Science*, 77: 45. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7197-1>
- KAZEMI, G.A.; LEHR, J.H.; PERROCHET, P. 2006. *Groundwater Age*. John Wiley & Sons, Nova Jersey, 347 p.
- LEITE, C.M.C.; COUTINHO, J.V.; MORITA, A.K.M.; PELISON, N.S.; SAITO, M., ENZWEILER, J.; WEDLAND, E. 2023. Isotopes of Nitrate and Gadolinium Fingerprints to Assay human Inputs in Guarani Aquifer System. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195:329. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10869-0>
- LOUSADA, E.O.; CAMPOS, J.E.G. 2005. Proposta de Modelos Hidrogeológicos Conceituais Aplicados aos Aquíferos da Região do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geociências*, 35(3): 407-414. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2005353407414>
- MASOUD, A.M.; EL-MAGD, S.A.A. 2022 Integration of Hydrochemical and Isotopic Characteristics for Identifying Groundwater Recharge Sources of the Eocene Carbonate Aquifer, Western Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 187: 104449. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104449>
- MOENCH, A.F. 1984. Double porosity models for fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resources Research*, 20(7): 831-846. <https://doi.org/10.1029/WR020i007p00831>
- MOTLAGH, A.M.; YANG, Z.; SABA, H. 2020. Groundwater Quality. *Water Environment Research*, 92(10): 1649-1658. <https://doi.org/10.1002/wer.1412>
- NEUMAN, S.P. 1975. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed yield. *Water Resources Research*, 11(2): 329-342. <https://doi.org/10.1029/WR011i002p00329>
- OLIVEIRA, L.A. 2009. *O Sistema Aquífero Guarani no Estado de Goiás: Distribuição, Caracterização Hidrodinâmica, Hidroquímica, Composição Isotópica e CFC's*. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, Tese de Doutorado. 192 p.
- OLIVEIRA, L.A.; CAMPOS, J.E.G. 2011. Análise da Distribuição dos Parâmetros Físico-Químicos das Águas do Sistema Aquífero Guarani no Estado de Goiás, Brasil. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, 12(37): 21-30. <https://doi.org/10.14393/RCG123716289>
- PACHECO, W.L. 2012. *Águas Subterrâneas do Distrito Federal – Efeito de Sazonalidade e Características Associadas aos Isótopos de Deutério, Oxigênio e Carbono*. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, Dissertação de Mestrado, 129 p.
- REN, X.; GAO, Z.; NA, Y.; LIU, J.; HE, M.; FENG, J. 2020. Hydrochemical and Isotopic Characteristics of Groundwater in the Jiuquan East Basin, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 545. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05573-7>
- RITCHEY, J. 2002. *Low-Flow Purging and Sampling Ground Water: Evolution of Technology and Standards*. ASTM Standardization News, 18-23. Disponível em <https://www.qedenv.com/media/qozdkenj/low-flow-purging-and-groundwater-sampling-evolution-of-technology-and-standards.pdf>
- SCHWARTZ, F.W.; ZHANG, H. 2024. *Fundamentals of Groundwater*. John Wiley & Sons, New Jersey, 2nd ed., 512 p.
- SILVA, G.C.; ZAINÉ, J.E.; MENEZES, D.B. 2021. Análise da Dinâmica Multi-temporal dos Cursos Hídricos das Sub-bacias Água Quente e Água Fria, São Carlos-SP, In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 20, São Paulo, *Anais*.

Disponível em <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/2940>

- SILVA, L.F. 2015. *Modelo Conceitual do Aquífero Fraturado da Área da Jazida de Urânio de Caetité, Bahia: Implicações para o Fluxo Subterrâneo*. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, Dissertação de Mestrado, 147 p.
- SIQUEIRA NETO, A.C.; SANTOS, F.R.P.; BARROS, A.C.S.P.C.; ARRAES, L.D. 2023. Método da Eletrorresistividade Aplicado à Variação Temporal do Nível Freático do Aquífero Alter do Chão, em Santarém, Pará. *Revista de Geociências do Nordeste*, 9(1): 88-104. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2023v9n1ID31205>
- STERRETT, R.J. 2008. *Groundwater and Wells*. Smyth Co Inc, 3rd ed., 812 p.
- THEIS, C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Transaction of the American Geophysical Union*, 16: 519-524. <https://doi.org/10.1029/TR016i002p00519>
- TODD, D.K.; MAYS, L.W. 2004. *Groundwater Hydrology*. Wiley, 3rd ed., 656 p.
- VILLEGAS, P.; PAREDES, V.; BETANCUR, T.; TAUPIN, J.D.; TORO, L.E. 2018. Groundwater Evolution and Means Water Age Interfered from Hydrochemical and Isotopic Tracers in a Tropical Confined Aquifer. *Stable Isotopes in Hydrological Studies*; 32: 2158-2175. <https://doi.org/10.1002/hyp.13160>
- WALTON, W.C. 1960. *Leaky artesian aquifer conditions in Illinois*. Urbana: Illinois State Water Survey (Report of Investigation, 39).
- WARREN, J.E.; ROOT, P.J. 1963. The behavior of naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 3: 245-255. <https://doi.org/10.2118/426-PA>

Endereço dos autores:

Drielly Souza Rodrigues* ( 0000-0001-7752-1400) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900 Brasília, DF, Brasil. *E-mail:* driellysrodrigues@gmail.com.

José Eloi Guimarães Campos ( 0000-0003-2007-2223) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900 Brasília, DF, Brasil. *E-mail:* eloi@unb.br

*Autor correspondente

Artigo submetido em 14 de abril de 2024, aceito em 7 de outubro de 2024.

