

NITRATO NO AQUIFERO ADAMANTINA: O CASO DO MUNICÍPIO DE MONTE AZUL PAULISTA, SP

Filipe MONTANHEIRO

CHANG Hung Kiang

RESUMO

O município de Monte Azul Paulista é abastecido exclusivamente por água subterrânea captada principalmente do Aquífero Adamantina, por meio de uma centena de poços. Nos últimos anos elevadas concentrações de nitrato impossibilitaram a utilização de alguns deles para abastecimento público. No núcleo urbano central construiu-se, estrategicamente, um poço tubular profundo para suprir o déficit de água, o que permitiu testar um modelo hidrogeológico conceitual a partir da interpretação e integração dos resultados hidroquímicos, geofísicos e hidrogeológicos. Esse modelo indicou duas potenciometrias distintas: uma no aquífero raso (da superfície até 40 m) e outra no profundo (80 até 152 m), separadas por uma camada de sedimentos argilosos com 40 m de espessura. As águas subterrâneas estão classificadas em dois tipos predominantes: 62% bicarbonatadas cálcicas (Ca-Na-CO₃, Ca-HCO₃) e, secundariamente, 38% em cloretadas cálcicas (Cl-Ca-HCO₃). A classe do tipo hidroquímico dominante, bicarbonatada cálcica, é compatível com estudos regionais realizados por outros pesquisadores há mais de duas décadas. Por outro lado, as águas classificadas como cloretadas cálcicas relacionam-se àquelas que sofreram intervenção antrópica com presença do contaminante nitrato. Embora o nitrato seja proveniente da superfície, foi possível registrar que ele já se distribui pelo aquífero profundo. Isso também foi comprovado pelo modelamento hidroquímico, que demonstrou a ocorrência de misturas de água poluída e natural em diferentes proporções, com características cloretadas cálcicas. A presença de camadas argilosas interdigitadas diminui a possibilidade de que a contaminação com nitrato esteja fluindo verticalmente para as porções mais profundas. Por outro lado, o excesso de poços e sua má construção podem constituir uma fonte contaminadora potencial.

Palavras-chave: Aquífero Adamantina; Águas subterrâneas; Nitrato; Contaminação; Monte Azul Paulista.

ABSTRACT

NITRATE IN THE ADAMANTINA AQUIFER: THE CASE OF THE MONTE AZUL PAULISTA MUNICIPALITY, SP. The municipality of Monte Azul Paulista is supplied exclusively by groundwater, mainly from the Adamantina Aquifer, captured by more than one hundred wells. In recent years high nitrate concentrations have prohibited the use of some of these wells for public water supply. In the central urban core a strategically deep tubular well drilled to supply the water deficit has allowed a conceptual hydrogeologic model based on the interpretation and integration of hydrochemical, geophysical and hydrogeological results to be tested. This model indicated two distinct potentiometric levels: one in a shallow aquifer from the surface to 40 m and the other in a deep aquifer between 80 and 152 m, separated by a clayey layer 40 m thick. Groundwater may be classified in two types: 62% is bicarbonate calcic (Ca-Na-CO₃, Ca-HCO₃) water, and 38% is chlorinated calcic (Cl-Ca-HCO₃) water, as per the Piper diagram. The class of the dominant calcium bicarbonate hydrochemical type is compatible with and strengthens regional findings by other researchers over more than two decades. On the other hand, the chlorinated calcic waters are related

to waters that have experienced human intervention with the presence of the dopant nitrate. Although nitrate comes from surface sources, it is already distributed in the deep aquifer. This observation is also supported by hydrochemical modelling showing the occurrence of mixed polluted and natural waters in different proportions with chlorinated calcic characteristics. The presence of interdigitated clay layers decreases the possibility of contamination with nitrate by vertical flow into the deeper portions. On the other hand, an excess of wells and their poor construction comprise a potential source of contamination.

Keywords: Adamantina Aquifer; Groundwater; Nitrate; Contamination; Monte Azul Paulista.

1 INTRODUÇÃO

O nitrato é um dos contaminantes mais onipresentes nos sistemas aquíferos (FREEZE & CHERRY 1979, DWIVEDI & MOHANTY 2015). Como resultado do aumento da concentração de nitrato ao longo das últimas três ou quatro décadas, tem sido observado em muitas regiões do mundo um gradual declínio na qualidade da água disponível para abastecimento público (WHO 2004). E, como alternativa, a água subterrânea creditada como um recurso natural protegido e desprovido de qualquer tipo de contaminação tem se constituído uma importante fonte para suprir as necessidades de várias comunidades. Nos países altamente desenvolvidos a principal fonte de poluição antropogênica é o nitrato proveniente do excesso de fertilizantes na agricultura, atividades industriais localizadas e/ou descarte inadequado ou impróprio de águas residuais e resíduos sólidos (KEENEY 1986, HALLBERG 1989, WEISKEL & HOWES 1992, JUST 1994, LOWE *et al.* 2000, DRAKE & BAUDER 2005, REYNOLDS-VARGAS *et al.* 2006, XU *et al.* 2007, ANAYAH & ALMASRI 2009). Por outro lado, nas populações e comunidades em desenvolvimento ou, ainda, com súbita expansão territorial, onde há carência ou manutenção inadequada das redes de esgoto e de unidades sanitárias básicas de tratamento de esgotos, o nitrato originado em fossas sépticas, negras, sumidouros ou vazamentos contamina a água subterrânea. Assim, dada a importância crescente que esse poluente adquiriu em todo o mundo, devido seus malefícios à saúde humana, o nitrato também se tornou uma preocupação de órgãos de vigilância sanitária e alvo de pesquisadores no estado de São Paulo e, em especial, no Sistema Aquífero Bauri - SAB (BARCHA 1980, 1992; CASTRO *et al.* 1992; HIRATA 2000; CAGNON 2003; CAGNON & HIRATA 2004; GODOY *et al.* 2004;

VARNIER 2007; CETESB 2007; VARNIER *et al.* 2010; DAEE/SERVMAR/IG 2011). Nesse contexto insere-se o município de Monte Azul Paulista, um dentre os 71% dos núcleos urbanos paulistas abastecidos com água subterrânea (BORSOI *et al.* 1998, DAEE/UNESP-IGCE-LEBAC 2013), neste caso, do Aquífero Adamantina, onde se tem o registro de poços de abastecimento público com anomalias de nitrato.

O presente estudo teve por objetivo elaborar um modelo hidrogeológico conceitual para o aquífero na região de Monte Azul Paulista (SP), partindo-se da integração e interpretação de dados hidroquímicos, hidrogeológicos e geofísicos. Ainda, diante desse modelo conceitual, buscou-se ampliar o conhecimento sobre o comportamento do nitrato em subsuperfície e sua relação com as características hidrogeológicas do aquífero.

1.2 Generalidades sobre a área de estudo

O município de Monte Azul Paulista localiza-se na região centro-norte do estado de São Paulo, porção mediana de um eixo que liga as macrorregiões de São José do Rio Preto - Ribeirão Preto, grandes polos industriais, culturais e de serviços do interior paulista (Figura 1). A sua área territorial abrange 263,4 km², ocupada por uma população de 18,9 mil habitantes e densidade demográfica de 71,9 hab km⁻², que é considerada baixa (IBGE 2011).

A cidade é totalmente abastecida por água subterrânea explorada dos sistemas aquíferos Bauri e Serra Geral. A captação de água totaliza em média 210.000 m³ mês⁻¹, ou 11,1 m³ hab⁻¹ mês⁻¹, um valor acima do suficiente (3,0 m³ habitante⁻¹ mês⁻¹) para “atender às necessidades de consumo e higiene” (BARTRAM & HOWARD 2003). O saneamento básico municipal é realizado pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto e Meio Ambiente do

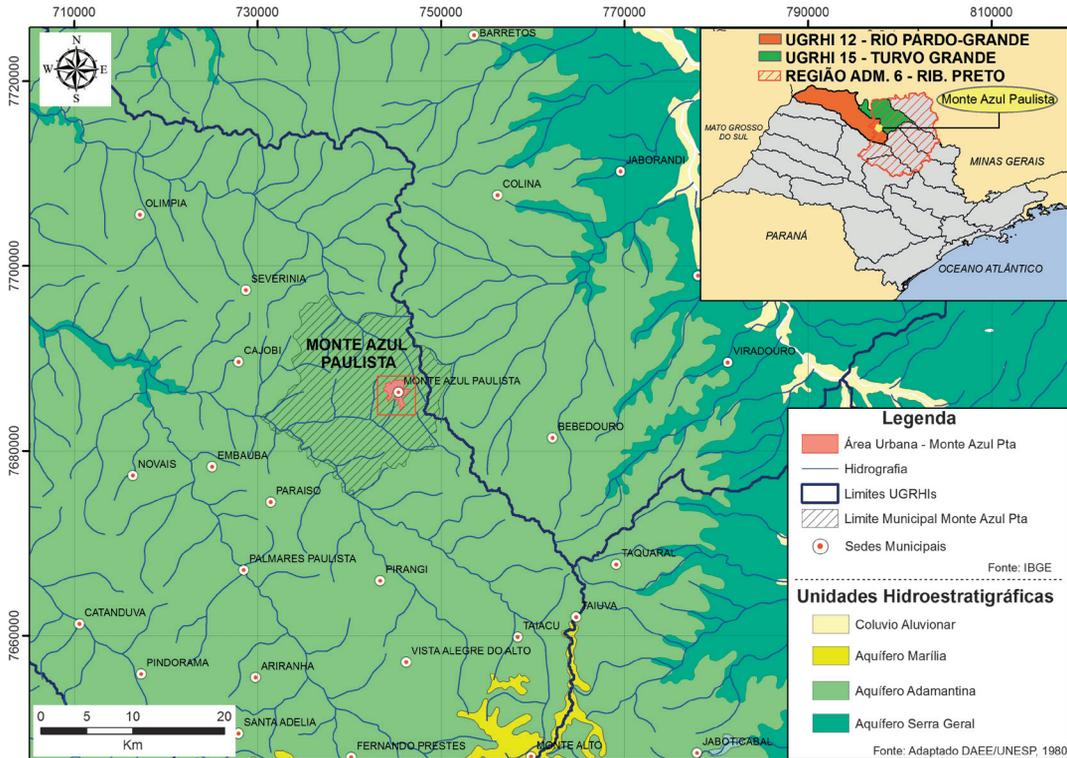


FIGURA 1 – Mapa geológico do estado de São Paulo com a localização da área de estudo (Adaptado de DAEE/UNESP 1980).

Município de Monte Azul Paulista (SAEMAP), por meio de um sistema em rede para o recolhimento e tratamento de esgoto, o qual cobre apenas 25% do produzido pela cidade, basicamente, a sua parte central. Muito embora seja um dos serviços básicos essenciais à população, ainda persistem os sistemas individuais de tratamento de esgoto (como as fossas sépticas) que, na maioria dos casos, são construídas em desacordo com as normas técnicas e critérios estabelecidos em legislações específicas (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT por meio das NBR 7.229/1993, NBR 13.969/1997, NBR 8.160/1997, CPRH 2004). O descumprimento permite a contaminação do solo e das águas, seja por efluentes vazados por falta de impermeabilização e infiltrações de todos os tipos, ou por vazamentos de tubulações e tanques subterrâneos com microorganismos patogênicos e compostos a base de nitrogênio, causadores de uma série de doenças (NUVOLARI 2003, IRITANI & EZAKI 2009).

2 NITRATO NA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Sob condições aeróbicas a concentração natural de nitrato na água subterrânea é de poucos

miligramas por litro e depende muito do ambiente geológico e tipo de solo (WHO 2011). No entanto, mesmo que inexistam sistemas radiculares para canalizar algum contaminante, as águas subterrâneas ficam susceptíveis ao nitrato por lixiviação dos íons através do solo, junto com a infiltração da água, como consequência de sua alta solubilidade e mobilidade (HUDAK 2000). Além disso, o nitrato-N pode persistir nas águas subterrâneas por um longo tempo (anos a décadas) e pode, ainda, chegar a altas taxas de concentração, quanto maior a quantidade de nitrogênio utilizada na superfície da terra em consequência das atividades antropogênicas (DWIVEDI & MOHANTY 2015). Vários estudos (WHO 1984; KEENEY 1986, 1989, entre outros) observaram que a alta concentração de nitrato-N ($> 10 \text{ mg L}^{-1}$ de N-NO_3) na água potável é uma ameaça para a saúde humana, particularmente para bebês e gestantes. Podem causar metahemoglobinemia em crianças e câncer de estômago em adultos (ADDISCOTT *et al.* 1992, HALL *et al.* 2001, LEE *et al.* 1992, WOLFE & PATZ 2002). Para FEITOSA & MANOEL FILHO (2000) as concentrações acima de 5 mg L^{-1} de N-NO_3 já são indicativas de contaminação, enquanto aquelas

maiores que 10 mg L^{-1} ($44 \text{ mg L}^{-1} \text{ NO}_3$) já podem ser malélicas. Dessa forma, o valor de $10 \text{ mg L}^{-1} \text{ N-NO}_3$ passou a ser o limite de nitrato em água potável proposto ou estabelecido por várias organizações ou agências de proteção ambiental de todo o mundo. No Brasil, o Ministério da Saúde, por meio da Portaria nº 2914/11, adota os mesmos parâmetros. Por outro lado, a COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB (2004) estabeleceu que o parâmetro de $5 \text{ mg L}^{-1}(\text{N-NO}_3)$ deve ser considerado um valor de alerta à contaminação para as águas subterrâneas do estado de São Paulo. As principais fontes da contaminação de nitrato por ações antrópicas estão associadas à aplicação de fertilizantes orgânicos e sintéticos nitrogenados, vazamentos das redes coletoras de esgoto, além do uso indiscriminado e falta de manutenção de fossas sépticas e negras.

Estudo realizado por CETESB/UNESP-IGCE-LEBAC (2013) avaliou as concentrações de nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru em áreas rurais das cidades de Bauru e São José do Rio Preto. Em mais de 80% das propriedades avaliadas, as águas subterrâneas apresentaram concentrações de nitrato abaixo do valor de alerta ($5 \text{ mg L}^{-1} \text{ N-NO}_3$), indicando baixo comprometimento da qualidade desse recurso hídrico.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

O município de Monte Azul Paulista estende-se sobre unidades estratigráficas cretáceas da Bacia Sedimentar do Paraná, ou, mais especificamente, da Formação Adamantina (Grupo Bauru, SOARES *et al.* 1980). É representada por um conjunto de fácies compostas por bancos de arenitos de granulometria fina a muito fina (cores róseo a castanho), alternados com bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos, maciços ou com acamamento plano-paralelo, que formam um pacote de até 187 m de espessura – mensurada em poço na cidade de Mirassol/SP (SOARES *et al.* 1980, PAULA E SILVA 2003). Na porção leste da Formação Adamantina, esses depósitos assentam-se discordantemente sobre basaltos da Formação Serra Geral, com conglomerado basal.

A cidade desenvolveu-se ao longo do topo de um espigão, onde nascem os cursos d'água que compõem as bacias hidrográficas dos rios Pardo-Grande (UGRHI 12) e Turvo-Grande (UGRHI 15).

As unidades hidrogeológicas da região compreendem os sistemas de aquíferos Bauru, Serra

Geral e Guarani. O primeiro é representado pelas rochas sedimentares do Grupo Bauru, mais especificamente da Formação Adamantina, o segundo, pelas rochas ígneas básicas da Formação Serra Geral, e o terceiro, pelos arenitos das formações Pirambóia/Botucatu. Os dois últimos não são aflorantes, mas foram detectados em poços tubulares profundos. Aquíferos locais, como os aluvionares e associados a coberturas inconsolidadas, não foram abordados neste estudo.

O Aquífero Adamantina constitui a principal fonte de abastecimento de água subterrânea na região. É caracterizado como um aquífero de extensão regional, livre a semiconfinado e contínuo (DAEE 1976). O semiconfinamento é decorrente, principalmente, das variações de permeabilidade dos sedimentos em razão da maior ou menor quantidade de argila na matriz, ou de camadas pelíticas que se intercalam aos corpos arenosos. A frequência das camadas lamíticas e as variações de argilosidade dos arenitos desta unidade hidroestratigráfica determinam seu comportamento hidráulico bastante heterogêneo e anisotrópico, mesmo em localidades relativamente próximas (PAULA E SILVA 2003). Se, por um lado, o comportamento livre deste aquífero significa recarga de água por toda sua extensão, por outro, aumenta o risco de poluição pelas inúmeras atividades desenvolvidas sobre esta unidade hidrogeológica (IRITANI & EZAKI 2009).

As propriedades hidrodinâmicas irregulares determinadas pelo DAEE (1976) para o Aquífero Bauru na Região Administrativa 6 (Ribeirão Preto) estão relacionadas com as variações litológicas verticais e laterais já citadas. A transmissividade varia de 5 até $50 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$. O coeficiente K das unidades mais permeáveis foi calculado em $0,5 \text{ m d}^{-1}$. A porosidade efetiva, de modo similar, varia de 5% e 15%, muito embora os valores baixos do coeficiente de armazenamento – determinados em testes – indiquem, muitas vezes, condições de confinamento parcial ou total. A capacidade específica média é menor que $1,4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-1}$.

As características geoquímicas e físicas das águas do Aquífero Bauru (DAEE 1976) para a mesma Região Administrativa apresentam: concentrações de sólidos totais dissolvidos (STD) de 18 a 200 mg L^{-1} ; valor médio de sílica de 24 mg L^{-1} ; teor de sódio com concentração ao redor de 5 mg L^{-1} ; média do pH determinado em campo (representativo da parte freática do aquífero) de 5,2; temperatura das águas do aquífero varia de 22 a $26 \text{ }^\circ\text{C}$.

4 MATERIAIS E MÉTODOS DE TRABALHO

Os trabalhos desenvolvidos foram idealizados para abranger todo o território do município de Monte Azul Paulista, em particular sua zona urbana. A execução foi precedida por um amplo levantamento de trabalhos básicos e aplicados desenvolvidos por órgãos públicos ou por instituições de pesquisa ao longo dos últimos anos.

4.1 Levantamento e aquisição da base de dados de poços profundos

A base cartográfica e mapas temáticos (curvas de nível, drenagens, poços, seções geológicas e outros) foram gerados a partir da carta topográfica de Monte Azul Paulista, escala 1:50.000 (SF-22-X-B-V-4, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE 1972), e do Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1: 250.000 (DAEE/UNESP 1980, versão eletrônica LEBAC/IGCE/UNESP 2009), utilizando-se o *software* ArcGis, versão 10.0.

Procedeu-se então à consulta e análise das informações cadastradas nas bases de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS (CPRM 2013), bem como do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIDAS (DAEE 2013) e do Serviço Autônomo de Água e Esgoto e Meio Ambiente do Município de Monte Azul Paulista.

As informações foram organizadas em um banco de dados com as principais características dos poços: posição global (coordenadas UTM e *datum*), altitude do cavalete do poço, data de construção, profundidade do poço, níveis estático e dinâmico, vazão, capacidade específica, descrições litológicas e litoestratigráficas e qualidade da água (resultados de análises hidroquímicas).

4.2 Perfuração de poço profundo

Um poço tubular profundo centrado nas coordenadas 744.776 m E / 7.686.531 m S (sistema de projeção UTM, *datum* WGS-84, zona 22 K), foi perfurado junto à Escola Municipal Cel. Aureliano Junqueira Franco (região central de Monte Azul Paulista/SP) – por orientação da equipe do LEBAC – e atingiu a profundidade de 244 m. A escolha desse poço deu-se pelo interesse municipal em repor as vazões daqueles já sabidamente contaminados por nitrato em seu entorno, que seriam lacrados, bem como pela oportunidade de descrever os testemunhos em calha e correlacionar sua litologia

com as unidades estratigráficas subsuperficiais do local, pressupondo-se uma infiltração contaminante apenas pelas paredes não revestidas. Assim, a construção do poço seguiu as normas técnicas prescritas nas normas ABNT/NBR 12.212 (1992a) e ABNT/NBR 12.244 (1992b), que estabelecem os requisitos e procedimentos técnicos de projeto e construção de poços tubulares de captação de água subterrânea.

Após a perfuração do poço na Escola Aureliano (12/04/2012), executou-se os testes de bombeamento e medição do nível d'água com a finalidade de determinar parâmetros hidrodinâmicos do meio poroso como, por exemplo, condutividade hidráulica (K), transmissividade (T), coeficiente de armazenamento (S) e porosidade efetiva (\emptyset). Esses parâmetros foram obtidos com um teste de aquífero 24 h, com vazão constante, regulada com auxílio de tubo Pitot e registro de medidas de nível com fita graduada. Além do teste de bombeamento, realizou-se, no dia 20/08/2012, um teste de produção do tipo escalonado, com a finalidade de determinar as perdas de carga total que ocorrem num poço em bombeamento e sua vazão máxima admissível de exploração. Inicialmente, com a bomba desligada, foi medido o nível estático do aquífero com fita graduada. Posteriormente, foi inserido dentro do poço um transdutor calibrado com o nível estático medido inicialmente. A função desse equipamento foi medir o rebaixamento do nível dinâmico, registrando medidas a cada minuto. O teste foi realizado em três etapas, com duração de 2 horas cada e sob vazões constantes em cada uma delas. A vazão inicial foi de 10,5 m³ h⁻¹, seguido de 13,8 m³ h⁻¹ na segunda fase e finalizado com 19,5 m³ h⁻¹ na terceira e última etapa. Os valores de rebaixamento do NA ficaram registrados no *data logger*.

4.3 Levantamento de perfis geofísicos

A ausência de informações sobre perfilagem geofísica em todos os descritivos (“logs”) dos poços cadastrados do município fomentou a execução de uma série de perfis geofísicos no interior do poço tubular profundo da Escola Aureliano. No trecho sedimentar, ou seja, até 152 m de profundidade, foram “corridos” os perfis de raios gama padrão API, potencial espontâneo (SP), resistividade normal curta (SN), resistividade induzida (IL) e sísmico compensado (BCS).

O registro das propriedades elétrica, eletromagnética, radioativa e acústica das rochas permitiu inferir algumas características petrofísicas como

a porosidade, permeabilidade, salinidade das águas intersticiais e também a proporção argila/areia.

As propriedades petrofísicas foram registradas por sensores específicos inseridos e deslocados no seu interior por um cabo conectado a um guincho. Estes sensores transmitem as informações de controle e registro para instrumentos computadorizados montados em uma unidade de laboratório móvel próxima. Os resultados foram representados em perfis no formato gráfico, escala 1:500.

4.4 Amostragem e análises da água

Numa visita técnica ao Serviço de Água e Esgoto do Município de Monte Azul Paulista foram obtidos os dados cadastrais dos poços tubulares profundos do município, bem como os resultados analíticos de nitrato das amostras de água coletadas pelos agentes fiscalizadores da Prefeitura nessa rede de poços. Os registros mostram que as coletas foram efetuadas em dois períodos distintos, chuvoso (Janeiro/2012) e de estiagem (Outubro/2011 a Setembro/2012), e as amostras foram analisadas apenas para nitrato no Laboratório do Instituto Adolfo Lutz de Ribeirão Preto/SP.

A amostragem das águas dos poços do município (45 amostras) foi realizada em duas etapas: a primeira foi direcionada para os poços gerenciados pela Prefeitura Municipal (30 poços) e a outra, para os poços particulares (10 poços, 2 cacimbas, 2 poços de monitoramento e uma nascente). A amostra de nascente de um afluente do Ribeirão Avanhandava (coordenadas UTM 745.259 m E / 7.686.245 m S) foi coletada como “amostra estratégica” para auxiliar na interpretação do arcabouço hidroestratigráfico do município.

As coletas foram executadas diretamente no cavalete dos poços ou na entrada dos reservatórios, para se evitar as possíveis alterações das propriedades físico-químicas das águas subterrâneas representativas do aquífero. Duas amostras de cada poço foram acondicionadas em frascos de polietileno de 300 mL e mantidas refrigeradas à temperatura de 4 °C. Ainda em campo mediu-se alguns parâmetros físico-químicos como o potencial hidrogeniônico (pH), a condutividade elétrica e a temperatura das amostras. A concentração de íons de hidrogênio e a temperatura foram medidas com um aparelho da marca DIGIMED, modelo DM-2P, enquanto para a condutividade, utilizou-se o condutivímetro modelo DM-3P da mesma fabricante.

No Laboratório de Hidrogeologia e Hidroquímica do Departamento de Geologia Aplicada

do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista (IGCE/UNESP) de Rio Claro – SP as amostras foram previamente filtradas, antes de se iniciar os procedimentos de análise para a determinação das concentrações dos principais cátions e ânions.

Na quantificação dos cátions metálicos Na⁺, K⁺, Li⁺, NH⁴⁺ utilizou-se a Espectrometria de Absorção Atômica e para os demais (Ca²⁺, Fe²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Sr²⁺, Ba²⁺, Zn²⁺, Pb²⁺, I⁺, Al³⁺, Ni²⁺, Cr²⁺, P³⁺ e Cd²⁺), o método da Espectrometria de Emissão Atômica com Fonte de Plasma e Argônio Induzido (ICP-AES). Por outro lado, os ânions (F⁻, CH₃COO⁻, BrO₃⁻, ClO₂⁻, Cl⁻, NO₂⁻, Br⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻ e C₂O₄) foram determinados pela metodologia da cromatografia de íons.

A análise da alcalinidade (carbonatos, bicarbonatos e hidroxila) foi realizada por titulação potenciométrica, utilizando-se eletrodo indicador de pH.

A validação dos resultados analíticos desse estudo foi definida a partir do cálculo de erro do balanço iônico (CUSTÓDIO & LLAMAS 1983) com o objetivo de aferir a qualidade dos resultados.

4.5 Tratamento dos resultados analíticos hidroquímicos

Os resultados das análises permitiram a classificação das águas do município com auxílio dos diagramas de Piper (PIPER 1944), gerados pelo *software* RockWorks (1999). Diagramas de Stiff (STIFF 1951) também foram utilizados para representar a variação espacial da composição.

A qualidade das águas para consumo humano foi avaliada comparando-se os resultados analíticos das amostras com os padrões de potabilidade da Portaria Nº 2.914 do Ministério da Saúde (BRASIL 2011) e do Decreto Estadual Nº 12.486 (SÃO PAULO 1978).

Para auxiliar na compreensão e visualização do modelo hidrogeoquímico conceitual, foi realizada uma simulação por modelagem matemática no *software* geoquímico PHREEQC (Versão 3) de misturas de amostras de águas representativas dos diferentes contextos hidroquímicos de Monte Azul Paulista: uma amostra proveniente do aquífero profundo, com nenhuma ou pouca concentração de nitrato, e outra de água rasa com elevada concentração de nitrato. Os resultados da simulação para as diferentes taxas de mistura de 20%, 40%, 60% e 80% foram inseridos no Diagrama de Piper. Dessa forma foi possível avaliar quantitativamente a proporção de mistura entre água limpa e água contaminada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo do município de Monte Azul Paulista foram identificados, no cadastro dos órgãos oficiais, 121 poços de captação de água subterrânea sendo 27 deles no cadastro do SAEMAP, 4 no do DAEE e 90 no da CPRM. Do total, 65 poços, ou seja, 53,7% estão na zona urbana.

Dentre os poços cadastrados, verificou-se que a maior parte deles (100 poços) explora água apenas do Aquífero Adamantina, ao passo que o restante (21 poços) extrai água de um sistema misto, ou seja, parte provém do Aquífero Adamantina e parte das rochas cristalinas do Aquífero Serra Geral.

As principais características dos poços, sintetizadas na tabela 1, mostram diferenças significativas para a média dos parâmetros profundidade, vazão e nível estático dos aquíferos Adamantina e Misto.

As respostas das perfilagens dos ensaios geofísicos são compatíveis com a descrição da calha dos testemunhos do poço tubular profundo perfurado na Escola Aureliano, confirmando as variações faciológicas da sequência sedimentar da Formação Adamantina. Os intervalos mais permeáveis serviram para orientar o posicionamento das seções filtrantes no poço tubular.

Duas litofácies distintas foram reconhecidas pela perfilagem geofísica: a primeira, constituída por sedimentos argilo-arenosos nas profundidades entre 40 até 80 m, e a segunda, composta por sedimentos predominantemente areno-argilosos (na forma de intercalações de camadas arenosas e argilosas) entre 80 e 150 m de profundidade. O contato entre os sedimentos da Formação Adamantina e as rochas basálticas da Formação Serra Geral está a 152 m de profundidade (Figura 2). O pacote rochoso perfurado entre zero até 40 m – oculto por um tubo liso sanitário

– corresponde a sedimentos predominantemente arenosos da Formação Adamantina, conforme descrição feita durante a testemunhagem em calha.

Apoiado pelas descrições geológicas apresentadas nos “logs” dos poços cadastrados e na interpretação da perfilagem geofísica do poço da Escola Aureliano, elaborou-se a seção geológica representada na figura 3, a qual permite esboçar um arcabouço geológico para o município de Monte Azul Paulista. Os sedimentos da Formação Adamantina estão assentados sobre rochas basálticas da Formação Serra Geral. A unidade sedimentar possui espessura média de 140 m, mas atinge 152 m na região central da zona urbana e espessuras menores (80 m) nas porções baixas da cidade, próximo às drenagens.

A análise integrada dos dados de perfilagem geofísica, profundidades do nível d’água medidas nos poços profundos e rasos, bem como da nascente d’água natural identificada em um ponto estratégico da área urbana, permitiram comprovar a existência de dois níveis potenciométricos distintos, isolados por uma camada argilosa de 40 m de espessura, que representa um aquífero de importância local.

Este fato ficou claramente evidenciado pela diferença de cargas hidráulicas entre dois poços (P-4 e P-17), distantes 190 m entre si. Enquanto no poço de monitoramento P-4 registrou-se uma carga hidráulica de 591,7 m, o valor no poço profundo P-17 foi de 524,3 m (diferença de 67,4 m). Essa elevada diferença comprova a existência de dois aquíferos distintos: o “raso” ou superficial (a partir da superfície até 40 m de profundidade) e o profundo (entre 80 e 150 m de profundidade). Assim, uma vez que esses dois aquíferos estão isolados, isso implica na existência de duas potencimetrias distintas. Portanto, eles possuem diferentes sentidos e abrangências de fluxo subterrâneo, ou seja, o superficial é mais local e, o profundo, mais regional.

TABELA 1 – Características dos poços que captam água dos Aquíferos Adamantina e Serra Geral.

Parâmetros		Poços cadastrados	Adamantina	Adamantina e Serra Geral
Quantidade de Poços		67	53	14
Profundidade (m)	Mínimo	43,0	43,0	172,0
	Máximo	232,0	160,0	232,0
	Média	139,9	125,0	196,0
Vazão (m ³ h ⁻¹)	Mínimo	5,0	5,0	16,0
	Máximo	56,0	45,4	56,0
	Média	23,2	19,5	38,9
Nível Estático (m)	Mínimo	10,1	10,1	44,0
	Máximo	85,9	85,9	85,9
	Média	51,6	52,6	67,7

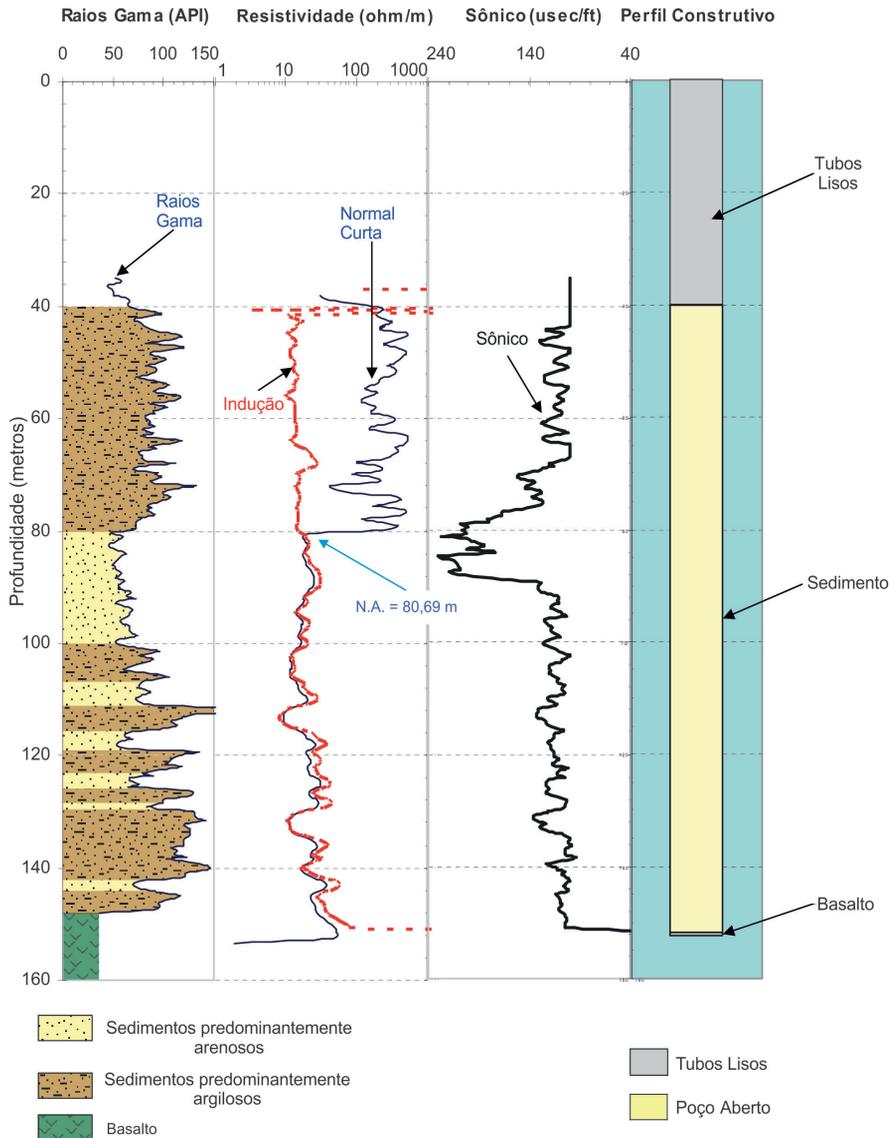


FIGURA 2 – Resultados e interpretação da perfilagem geofísica no poço da Escola Aureliano Chaves, Monte Azul Paulista/SP.

A potenciometria superficial foi gerada pelo método da interpolação dos níveis estáticos dos poços rasos. Em princípio foram geradas duas superfícies: a superfície do terreno construída a partir das curvas de nível e a superfície freática a partir da interpolação das cotas de drenagens e profundidade do nível d'água dos poços rasos. Posteriormente foi feita a subtração entre a superfície do terreno e a superfície da profundidade freática, que resultou nos valores de carga potencial hidráulica.

Na porção superficial o aquífero considerado “raso” apresenta fluxo radial, uma vez que a zona

urbana de Monte Azul Paulista está posicionada em um alto topográfico, ou seja, em um divisor de águas. O sentido desse fluxo é divergente, da zona central para as extremidades, conforme ilustrado na figura 4.

Por outro lado, a potenciometria do aquífero profundo, construída a partir das profundidades do nível estático (NE) medidas nos poços (Figura 5), bem como o cálculo das respectivas cargas hidráulicas, mostram uma tendência de fluxo na direção SW, no sentido do interior da Bacia do Paraná, em conformidade com o contexto hidrogeológico regional (DAEE 1976, 1979).

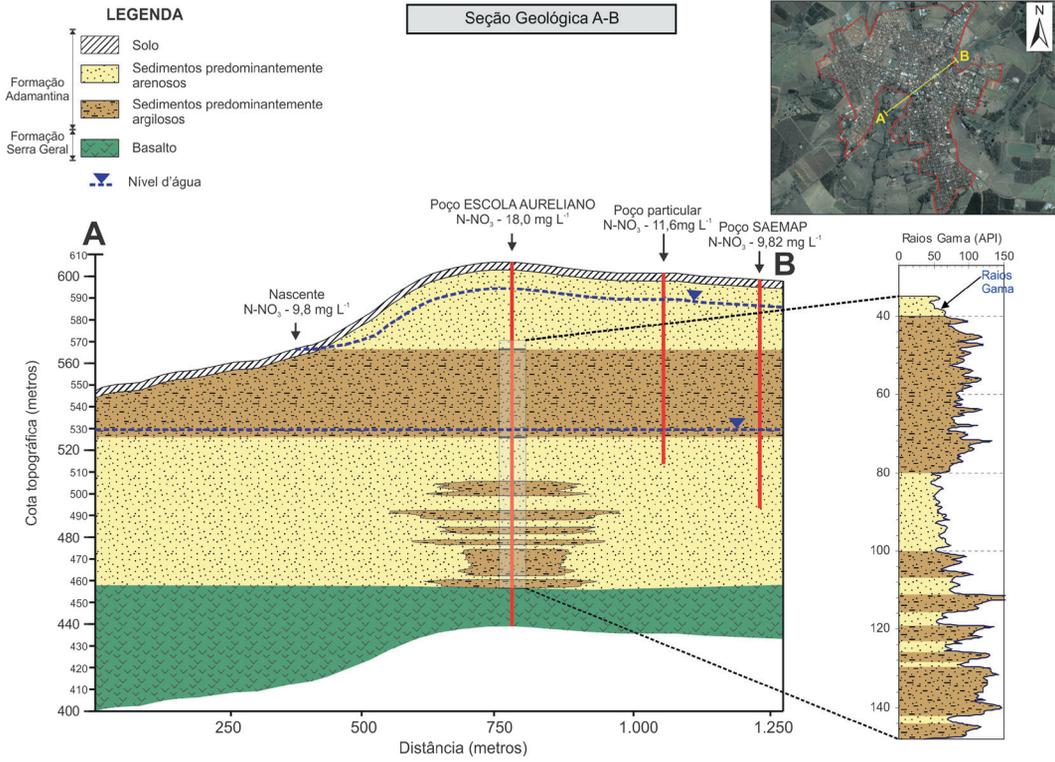


FIGURA 3 – Seção geológica do município de Monte Azul Paulista/SP.

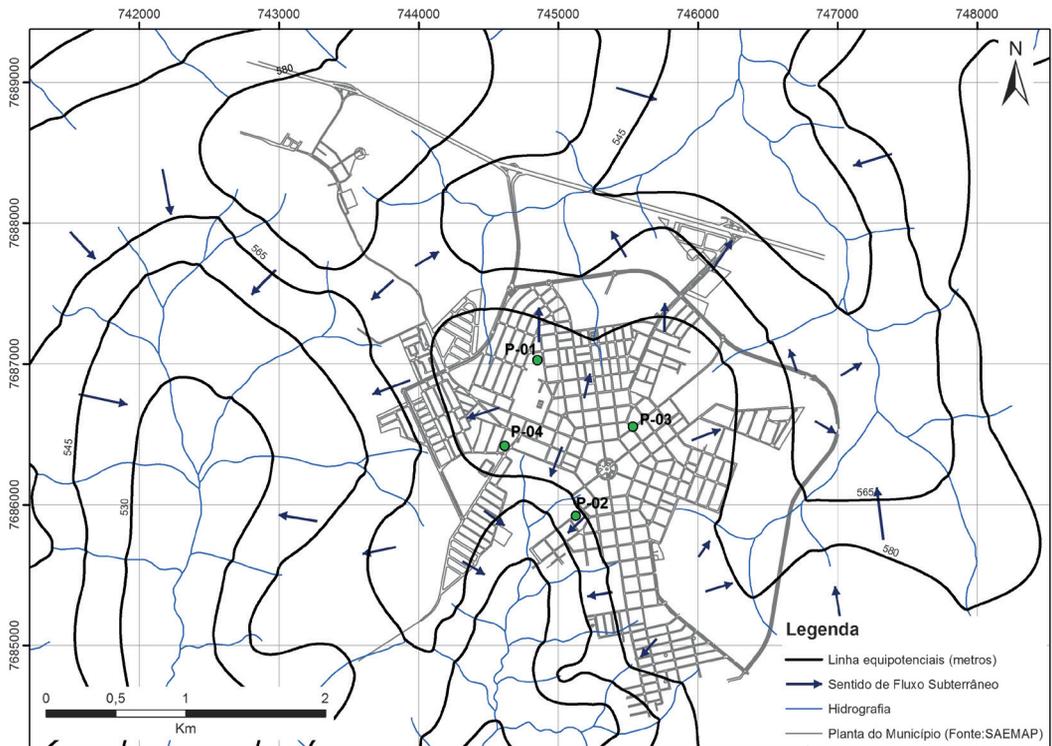


FIGURA 4 – Mapa potenciométrico do aquífero superficial em Monte Azul Paulista/SP.

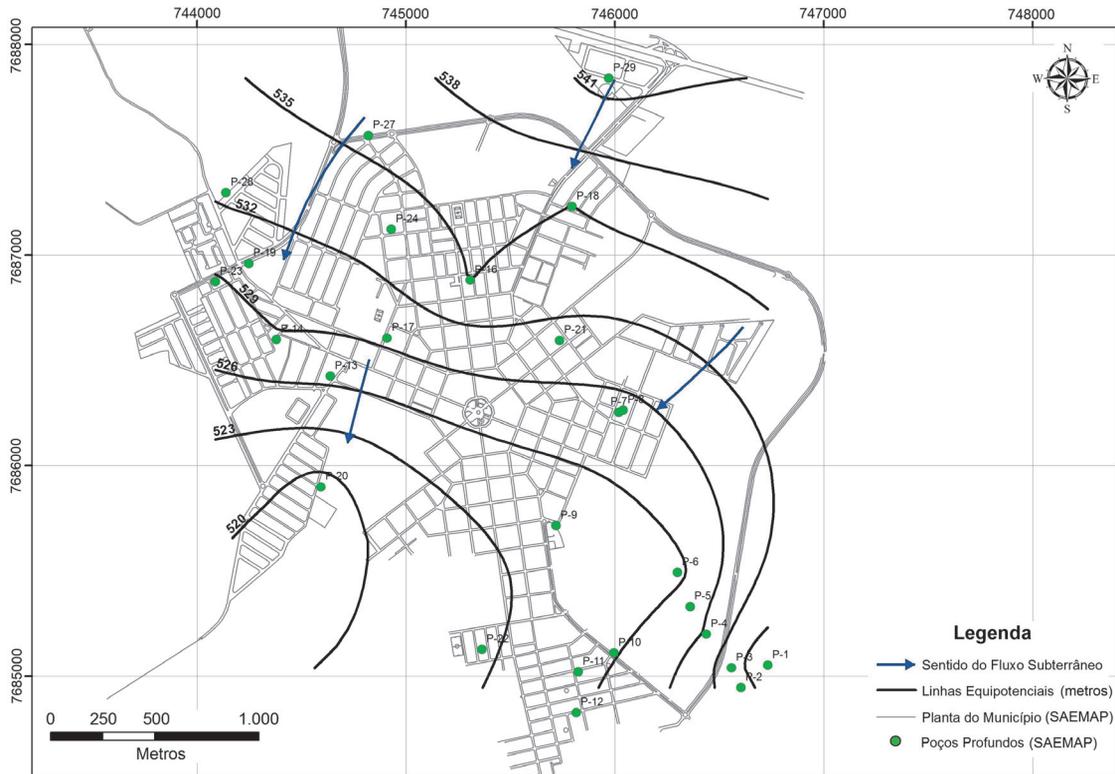


FIGURA 5 – Mapa potenciométrico do aquífero profundo em Monte Azul Paulista/SP.

Os resultados das análises físico-químicas de 45 amostras, sendo 40 amostras de poços profundos, 1 amostra de nascente e 4 amostras de poços rasos (2 cacimbas e 2 poços de monitoramento de águas subterrâneas) (Figura 6), indicam a ocorrência de água levemente ácida a alcalina. Os registros da temperatura das águas subterrâneas mostram valores de 18 até 25 °C (média de 20,8 °C).

As análises do potencial hidrogeniônico têm valores de pH variando entre 6,8 e 8,9 e valor médio de 7,7. O aumento destes valores com a profundidade denota a existência de ambientes hidroquímicos distintos.

A condutividade elétrica média das amostras é de 246,9 $\mu\text{S cm}^{-1}$; o alto desvio padrão é devido aos valores elevados de até 418 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Na validação dos resultados analíticos os erros analíticos foram inferiores a 5%, exceto nas amostras MAP-01 e MAP-02 (erros de 8,4% e 5,6 % respectivamente), as quais estão relacionadas às amostras com baixas salinidades. Os parâmetros estatísticos das principais variáveis hidroquímicas estão sumarizados na tabela 2, levando-se em consideração as 45 amostras coletadas no município.

As águas subterrâneas são classificadas em dois tipos predominantes: 62% bicarbonatadas cálcicas (Ca-Na-HCO_3 , Ca-HCO_3) e 38% cloretadas cálcicas (Cl-Ca-HCO_3), conforme diagrama de Piper (Figura 7).

A classe do tipo hidroquímico dominante, bicarbonatada cálcica, está de acordo com os estudos regionais realizados por DAEE (1976), CAMPOS (1987) e BARISON (2003). Por outro lado, as águas classificadas como cloretadas cálcicas relacionam-se àquelas que sofreram intervenção antrópica com presença do contaminante nitrato.

Os mesmos tipos hidroquímicos identificados com o diagrama de Piper também foram obtidos com o diagrama de Stiff, conforme mostra a figura 8. A porção central da cidade apresenta águas cloretadas cálcicas com tendência de baixa alcalinidade, enquanto nas regiões mais distantes as águas bicarbonatadas cálcicas apresentam valores de alcalinidade mais altos.

As altas concentrações de nitrato associadas às águas subterrâneas são, normalmente, indicativas de contaminação dos aquíferos por ação antrópica.

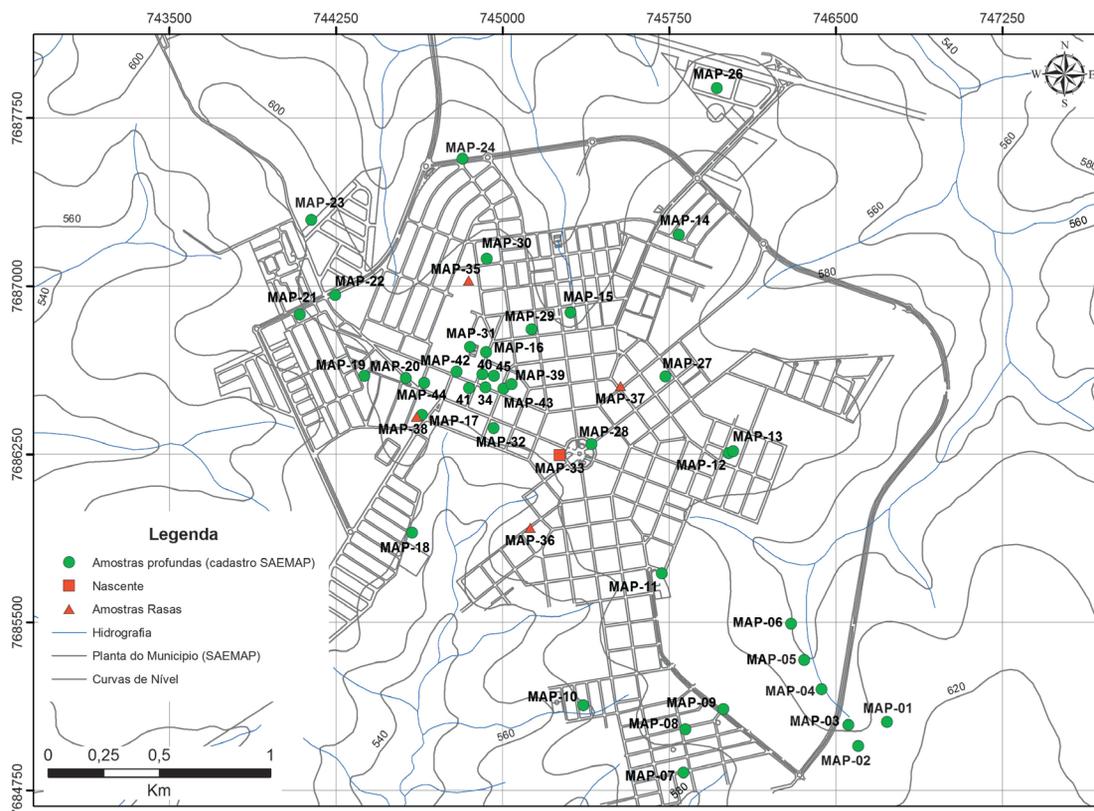


FIGURA 6 – Mapa de localização dos pontos de coleta das amostras de água.

TABELA 2 – Resultados estatísticos dos principais parâmetros físico-químicos analisados nas amostras de água de Monte Azul Paulista/SP.

<i>Parâmetro</i>	<i>Média</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>D. Padrão</i>
CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	246,90	95,90	418,00	85,20
pH	7,70	6,81	8,90	0,39
Na ⁺ (mg L^{-1})	9,60	3,42	35,90	6,27
K ⁺ (mg L^{-1})	3,70	1,32	10,70	1,970
Ca ²⁺ (mg L^{-1})	35,50	2,24	63,60	14,70
Mg ²⁺ (mg L^{-1})	9,10	1,11	19,20	3,80
Fe ²⁺ (mg L^{-1})	0,00	0,00	0,02	0,004
NO ₃ ⁻ (mg L^{-1})	30,80	1,20	80,00	23,90
[N]NO ₃ ⁻ (mg L^{-1})	6,96	0,27	18,07	5,40
HCO ₃ ⁻ (mg L^{-1})	129,60	11,20	249,00	41,70
CO ₃ ²⁻ (mg L^{-1})	0,40	0,00	18,90	2,80
Cl ⁻ (mg L^{-1})	14,10	0,30	75,10	13,60
NH ₄ ⁺ (mg L^{-1})	0,16	0,00	0,43	0,12
NO ₂ ⁻ (mg L^{-1})	0,18	0,00	0,45	0,13
F ⁻ (mg L^{-1})	0,09	0,04	0,19	0,02

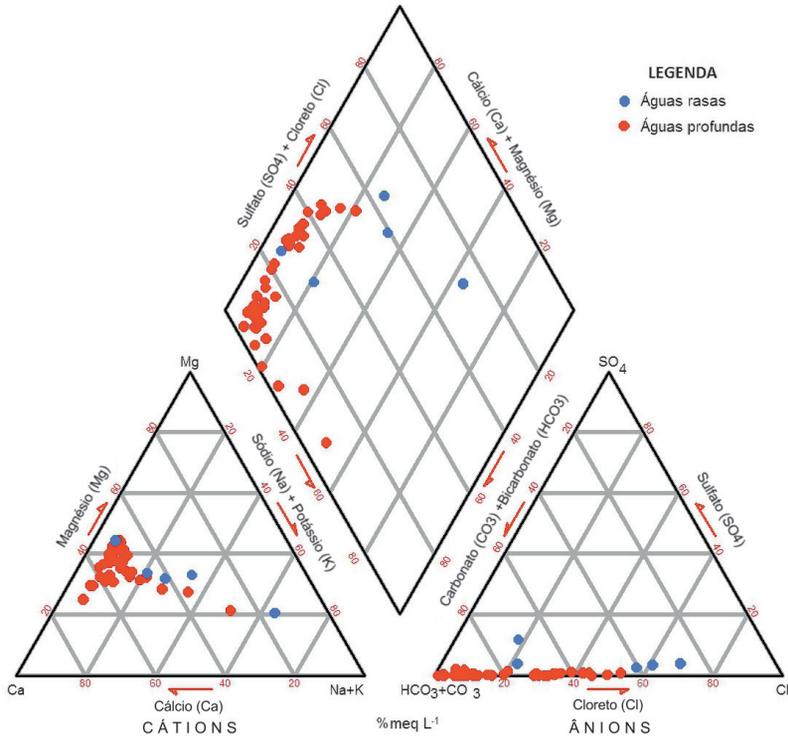


FIGURA 7 – Classificação das amostras de água subterrânea no município de Monte Azul Paulista/SP.

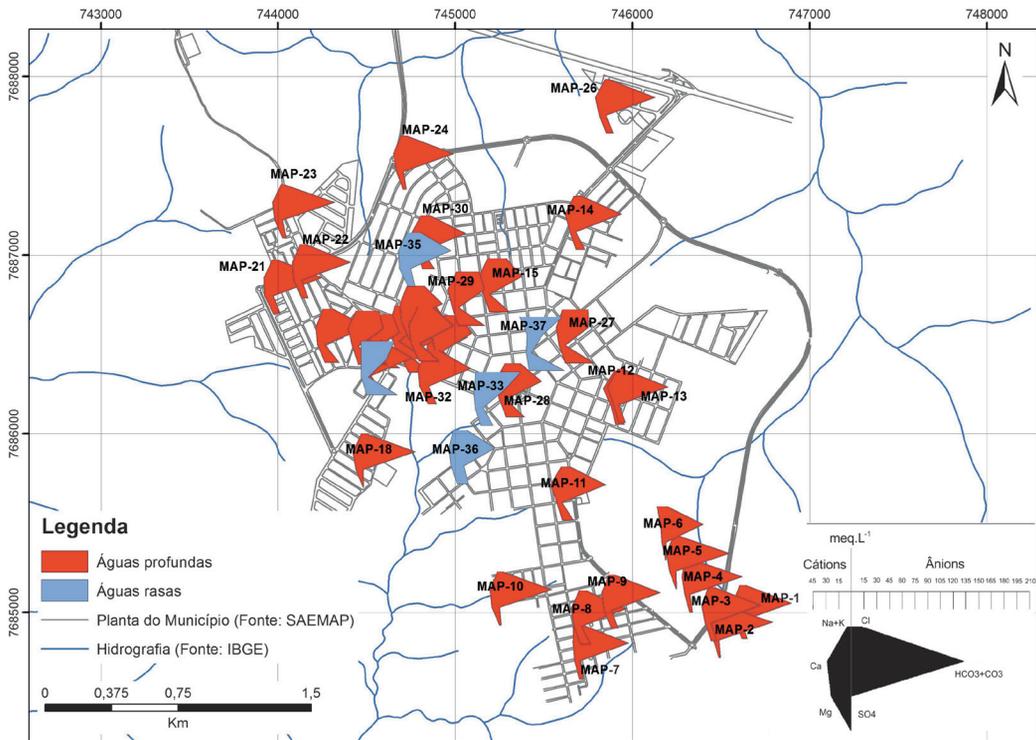


FIGURA 8 – Distribuição espacial dos tipos hidroquímicos subterrâneos em Monte Azul Paulista/SP por meio do Diagrama de Stiff.

A boa correlação encontrada entre o nitrato e o cloreto (Figura 9), vem reforçar a hipótese da contaminação do aquífero por atividade antrópica, uma vez que isso demonstra que ambas as espécies possuem a mesma origem.

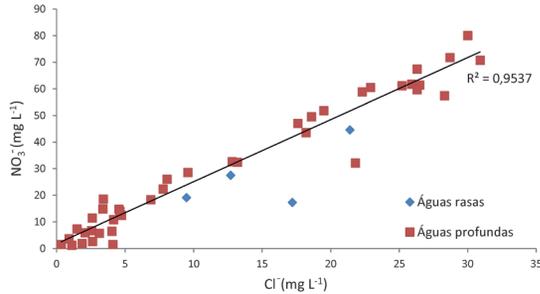


FIGURA 9 – Correlação entre Cloreto (Cl⁻) e Nitrato (NO₃⁻).

O nitrogênio e seus compostos não são encontrados nas rochas da crosta terrestre, exceto em ocorrências de sais evaporíticos. Por outro lado, o cloreto é gerado em grande quantidade a partir do sal (NaCl) expelido com os excrementos humano ou animal, considerando que apenas uma pessoa expele cerca de 4 g de cloreto por dia na urina (WHO 2003).

As características químicas das amostras de águas iniciais (amostras MAP 23 = solução 0% e MAP 33 = solução 100%) e das diferentes concentrações de mistura nas proporções 20%, 40%, 60% e 80% simuladas no *software* geoquímico PHREEQC são apresentadas na tabela 3.

Os resultados químicos das diferentes soluções de mistura foram plotados no Diagrama de Piper (Figura 10), onde foi possível classificá-las como cloretadas cálcicas, passíveis de serem correlacionadas às águas profundas com concentrações elevadas de nitrato, permitindo avaliar quantitativamente, ainda que estimada, a proporção de mistura entre água limpa e água contaminada.

Além das amostras mencionadas anteriormente para avaliação apenas do nitrato, foram adicionadas três campanhas de amostragens realizadas pela Prefeitura de Monte Azul Paulista.

De todos os 85 poços amostrados entre Outubro/2011 e Novembro/2013, incluindo aqueles utilizados pela prefeitura para abastecimento público, 67% do total apresentaram concentrações anômalas de N-NO₃ (acima de 5 mg L⁻¹). Dentre esses, 42 poços apresentaram valores acima do estipulado pela Portaria MS-2914/11 como aceitável para consumo humano, que é de 10 mg L⁻¹ de N-NO₃.

TABELA 3 – Composição físico-química das misturas simuladas no *software* geoquímico PHREEQC (Versão 3).

Parâmetros	Solução 0%	Solução 20%	Solução 40%	Solução 60%	Solução 80%	Solução 100%
Prof.	150	x	x	x	x	Nascente
TDS	244,7	248,9	273,0	296,7	320,3	379,2
Isat	0,3	-0,01	-0,25	-0,43	-0,6	-0,74
pH	8,0	7,7	7,4	7,2	7,1	7,0
HCO ₃ ⁻	157,0	142,0	134,0	124,0	115,0	130,0
CO ₃ ²⁻	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Na ⁺	6,0	12,0	17,9	23,9	29,9	35,9
K ⁺	2,5	4,0	5,4	6,8	8,2	9,7
Cl ⁻	1,4	16,1	30,9	45,5	60,3	75,1
NO ₃ ⁻	7,3	14,4	21,5	28,7	35,8	43,0
[N] NO ₃ ⁻	1,6	3,2	4,8	6,4	8,1	9,7
SO ₄ ²⁻	0,0	1,4	2,7	4,1	5,5	8,0
Ca ²⁺	33,5	35,8	38,3	40,7	43,2	45,7
Fe ²⁺	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mg ²⁺	9,9	10,5	11,2	11,8	12,4	13,1
Si ⁴⁺	26,4	11,5	10,7	9,9	9,1	17,8

Observação: Solução 0% = amostra MAP 23; Solução 100% = amostra MAP 33

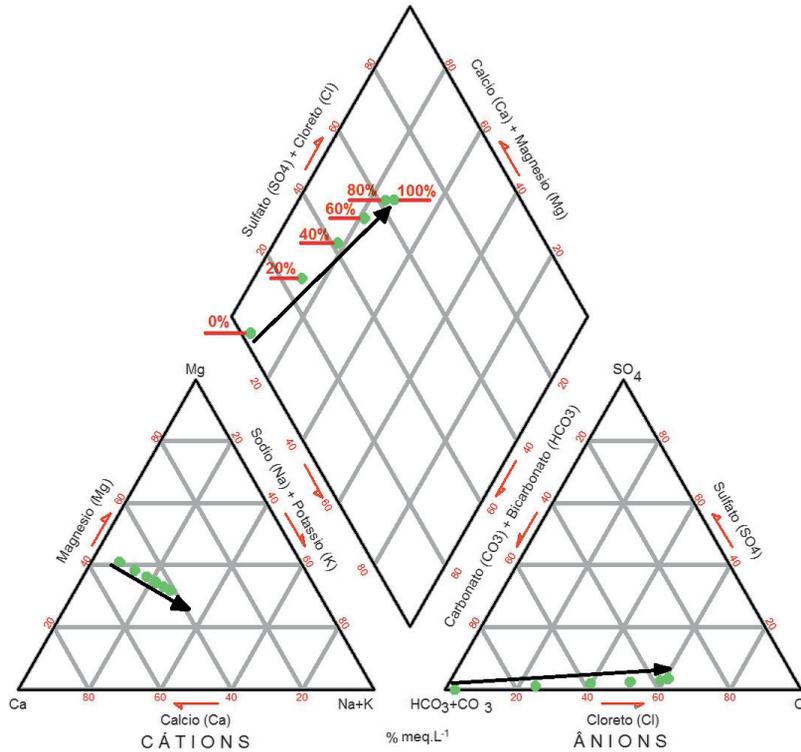


FIGURA 10 – Classificação hidroquímica das águas dos aquíferos pelo Diagrama de Piper. Amostras geradas pelas simulações de misturas.

A análise temporal desses resultados permitiu concluir que as variações dos períodos de chuva e de estiagem não interferem ou intervêm muito pouco nas concentrações de nitrato das águas subterrâneas. Tal

fato pode ser comprovado pela baixa média (0,58) dos desvios padrões das amostras coletadas em diferentes épocas, valor este considerado muito baixo para causar anomalias significativas (Figura 11).

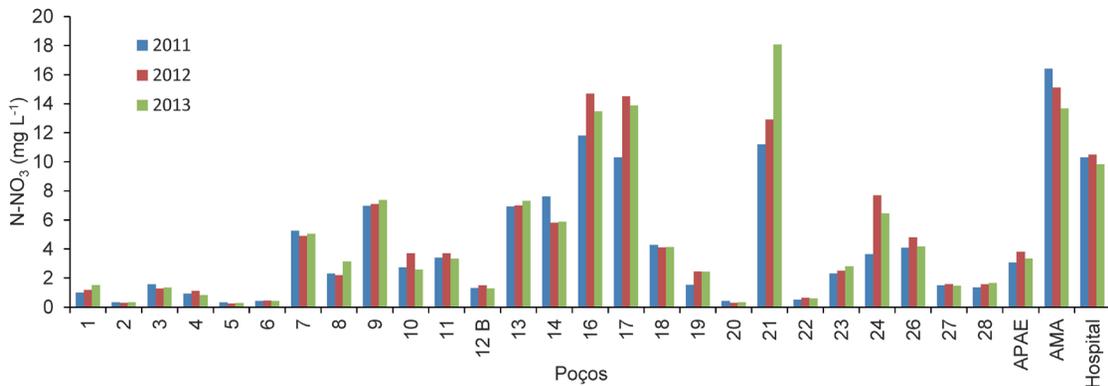


FIGURA 11 – Gráfico de análise temporal das concentrações de nitrato.

Elevadas concentrações de nitrato na água subterrânea estão relacionadas à infiltração de efluentes domésticos oriundos de vazamentos de tubulações da rede de esgotos e/ou de fossas sépticas. Embora seja de conhecimento que esse contaminante se origina em superfície, este estudo possibilitou registrar a distribuição do nitrato em profundidade, e não somente nas camadas superficiais (Figura 12).

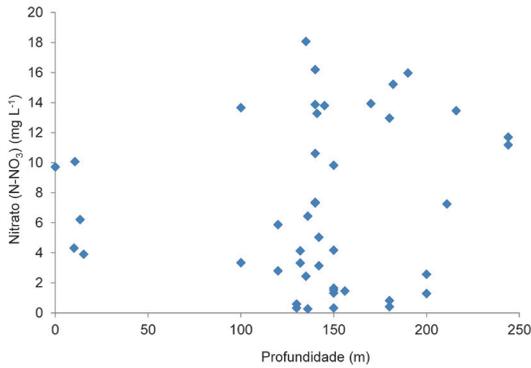


FIGURA 12 – Correlação entre profundidade dos poços e as concentrações de N-NO₃.

Os altos teores de nitrato, que em alguns locais atingem valores de 19,3 mg L⁻¹ de N-NO₃, estão restritos à zona central da área urbana (considerada a parte mais antiga da cidade), onde se construam as fossas sépticas. Além destas fossas, outra provável fonte de contaminação por nitrato são os vazamentos nas atuais tubulações de esgoto.

A partir da distribuição espacial das concentrações de nitrato, tanto das águas rasas quanto profundas de todas as épocas amostradas, foi elaborado um mapa de isovalores de nitrato por meio do método de interpolação da *krigagem*, que possibilitou verificar a distribuição aproximada das concentrações em cada região do município (Figura 13).

Nota-se que a porção central da zona urbana se destaca por apresentar as maiores concentrações de nitrato. Essa região do município é a parte habitada por mais tempo, desde sua fundação em 1896, o que sugere que haja maior quantidade de fossas sépticas e tubulações de esgoto mais antigas e, conseqüentemente, maior volume de contaminante.

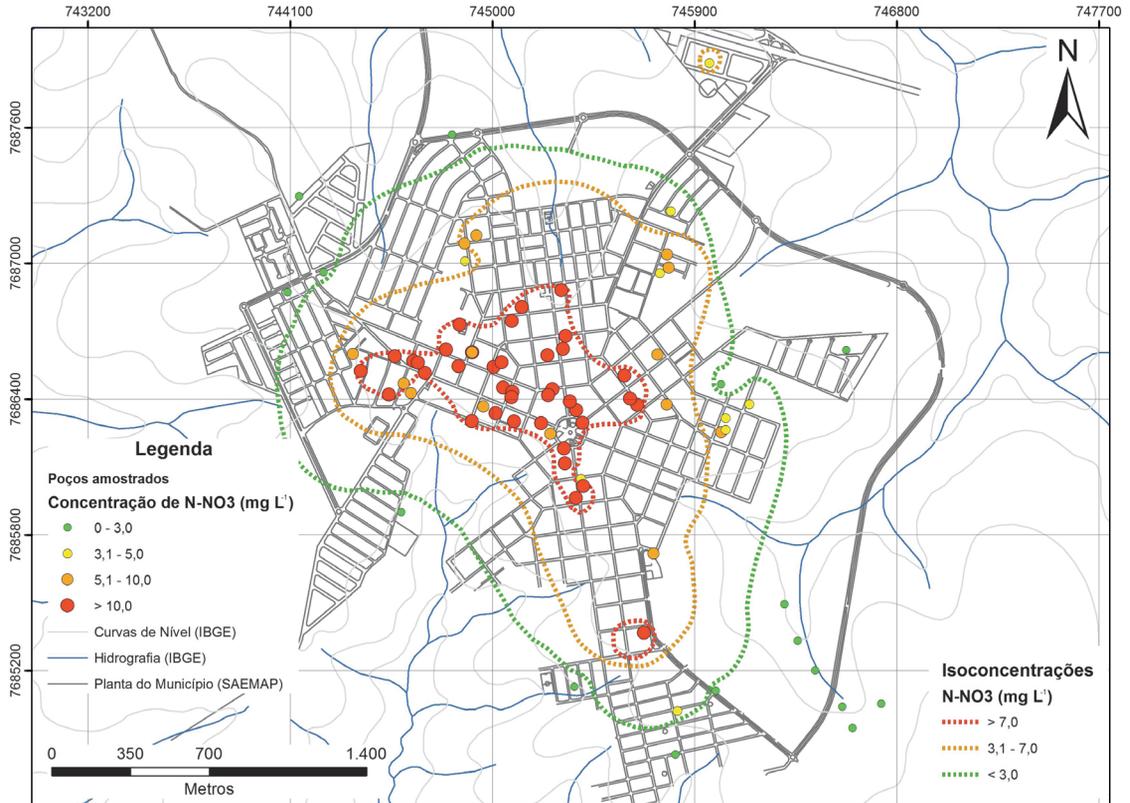


FIGURA 13 – Mapa de isovalores de nitrato na zona urbana de Monte Azul Paulista/SP.

Constatou-se também que o nitrato já atingiu grandes profundidades no poço recém-construído na Escola Aureliano Chaves, uma vez que um tubo liso reveste essa fonte até 40 m de profundidade e, portanto, não há captação d'água neste intervalo. O nível estático foi medido em 80 m de profundidade, de modo que a água captada por esse poço provém das porções mais profundas do aquífero. Ainda, de acordo com os resultados analíticos de amostras de água coletadas nesse local, as concentrações de nitrato nesta captação variam entre $10,6 \text{ mg L}^{-1}$ e $13,8 \text{ mg L}^{-1}$ de N-NO_3 .

Portanto, pode-se deduzir que o nitrato ao atingir o solo infiltra-se até o nível freático e se concentra no aquífero superficial. Porém, muitos poços perfurados sem critérios técnicos e, principalmente, sem as condições de proteção sanitária adequada – conforme prescrito em normas pelo DAEE – devem ter atravessado a camada argilosa e tornaram-se os caminhos preferenciais para a percolação do nitrato até as partes mais profundas do aquífero. Isso pode ser ilustrado na figura 14, que contextualiza a ocupação urbana do município de Monte Azul Paulista-SP e os principais poços perfurados numa seção hidrogeológica.

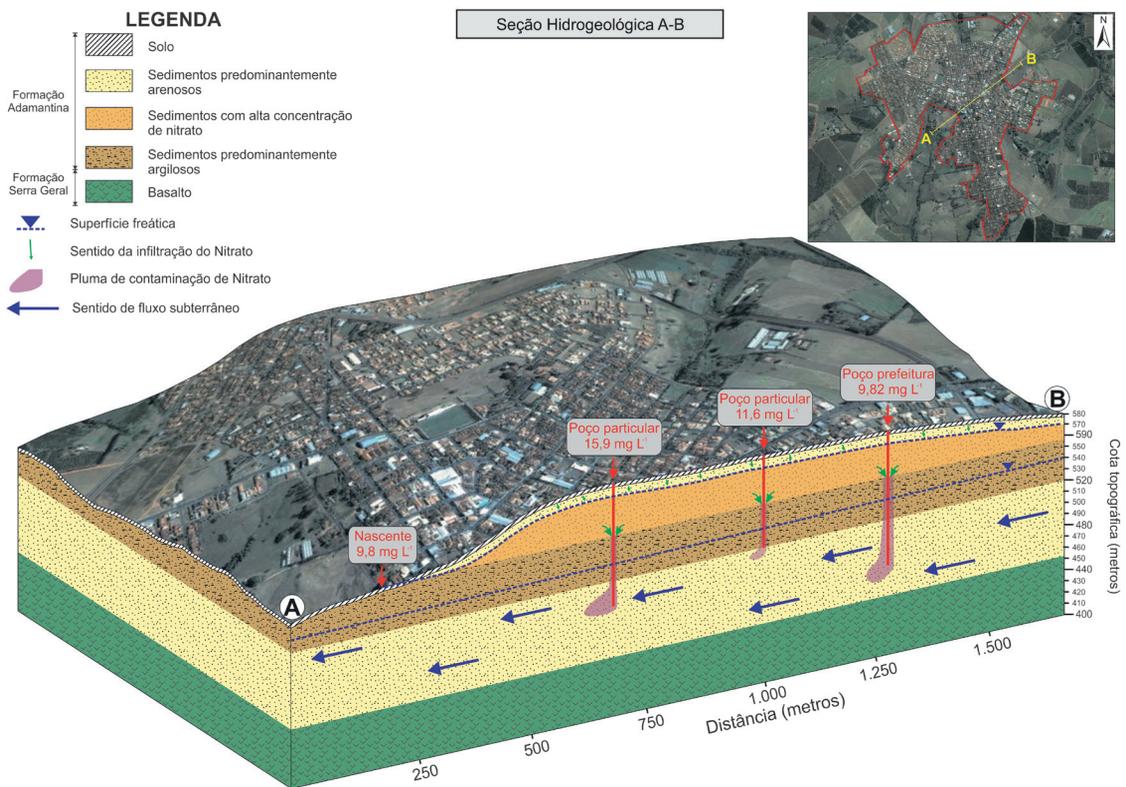


FIGURA 14 – Seção hidrogeológica A-B.

6 CONCLUSÕES

No decorrer deste estudo foram levantadas, interpretadas e integradas diversas informações de natureza histórica, hidrogeológica, geofísica e hidroquímica a respeito do Aquífero Adamantina, as quais se prestaram para fundamentar o modelo hidrogeológico conceitual no município de Monte Azul Paulista/SP.

O município está assentado sobre rochas da Formação Adamantina, a qual é constituída por uma alternância de camadas de arenito de granulação fina a muito fina com camadas de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos. Na região central do município a espessura dessa unidade litoestratigráfica atinge 152 m.

Uma camada de sedimentos argilo-arenosos de 40 m de espessura separa duas potenciométricas distintas para o Aquífero Adamantina na zona ur-

banas do município. A superior apresenta fluxo radial da porção central para as regiões periféricas da área urbana e a inferior (teoricamente confinada entre 80 e 150 m de profundidade), fluxo unidirecional na direção SW, seguindo o padrão hidrogeológico regional.

A interpretação dos resultados analíticos de 45 amostras de água, entre poços profundos, poços rasos e 1 nascente, permite agrupá-las em dois tipos hidroquímicos: um associado às águas originais do Aquífero Adamantina (bicarbonatadas cálcicas) e outro a uma mistura das águas rasas contaminadas com as águas profundas sem contaminação (cloradas cálcicas).

Os altos teores de nitrato, que em alguns locais atingem valores de 19,30 mg L⁻¹, estão restritos à zona central da área urbana, considerada a parte mais antiga da cidade, onde se construíam, no passado, fossas sépticas. Além destas fossas, outra provável fonte de contaminação por nitrato são os vazamentos nas tubulações de esgoto.

O nitrato, ao atingir o solo, se infiltra até o nível freático e se concentra no aquífero superficial. Entre o aquífero superficial e o profundo foi constatada a presença de camada argilosa que restringe a infiltração do contaminante. No entanto, alguns poços perfurados sem critérios técnicos e, principalmente, sem as condições de proteção sanitária adequada, devem ter atravessado esta camada argilosa, e aberto os caminhos preferenciais para a percolação do nitrato até as partes mais profundas do aquífero. Por outro lado, também não se exclui a possibilidade desse contaminante superficial escoar naturalmente através de possíveis heterogeneidades arenosas desta camada de argila e atingir o aquífero profundo.

A hidroquímica permitiu confirmar que está havendo uma mistura entre o aquífero superficial contaminado e o profundo. A simulação matemática com diferentes proporções de mistura entre a água do aquífero profundo (sem contaminação) e a água rasa (com altas concentrações de contaminante) resultou em soluções com as mesmas características das águas coletadas no município de Monte Azul Paulista.

7 AGRADECIMENTOS

Ao Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Monte Azul Paulista (SAEMAP), pelo apoio integral no desenvolvimento deste trabalho e pela cessão das análises químicas históricas de nitrato realizadas no Instituto Adolf Lutz – IAL de Ribeirão Preto; à Fundação para o Desenvolvimento da

UNESP-FUNDUNESP (Processo CCP 1998/2012) pelo financiamento das bolsas dos participantes deste projeto; aos relatores da Revista do Instituto Geológico pelas correções e sugestões que melhoraram o artigo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT–ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1992a. NBR 12.212. Projeto de poço para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro, 5 p.
- ABNT–ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1992b. NBR 12.244. Construção de poço para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro, 6 p.
- ABNT–ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1993. NBR 7.229. Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro, 15 p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1997. NBR 13.969. Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 60 p.
- ABNT–ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1997. NBR 8.160. Sistemas prediais de esgoto sanitário – Projeto e execução. Rio de Janeiro, 74 p.
- ADDISCOTT, T.M.; WHITMORE, A.P.; POWLSON, D.S. 1992. Farming, fertilizers and the nitrate problems. C.A.B. International, Wallingford, 170 p.
- ANAYAH, F.M.; ALMASRI, M.N. 2009. Trends and occurrences of nitrate in the groundwater of the West Bank, Palestine. *Applied Geography*, 29: 588-601.
- BARCHA, S.F. 1980. Aspectos geológicos e províncias hidrogeológicas da Formação Bauru na região norte-ocidental do Estado de São Paulo. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, Tese de Livre Docência, 209 p.
- BARCHA, S.F. 1992. Nitratos em água subterrânea no meio urbano. In: SBG, CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37, São Paulo, *Anais*, 2: 200-201.

- BARISON, M.R. 2003. Estudo hidrogeoquímico da porção meridional do Sistema Aquífero Bauru no Estado de São Paulo. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Dissertação de Mestrado, 153 p.
- BARTRAM, J.; HOWARD, G. 2003. Domestic Water Quantity, Service Level and Health. World Health Organization – WHO, Geneva, 33 p.
- BORSOI, Z.M.F, LANARI, N.; GOMES, S.M. 1998. Águas Subterrâneas. Informe Infra-Estrutura, Área de projetos de infra-estrutura. Banco Nacional de Desenvolvimento, Rio de Janeiro, 6 p.
- BRASIL. 2011. Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Estabelece os limites máximos permitidos para dezenas de parâmetros que precisam ser respeitados em toda água para consumo humano distribuída no território nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF.
- CAGNON, F.A. 2003. Origem e hidroquímica do nitrato nas águas subterrâneas do aquífero Adamantina em Urânia, SP. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 148 p.
- CAGNON, F.A.; HIRATA, R. 2004. Source of nitrate in the groundwater of Adamantina Aquifer in Urania, SP – Brazil. In: IAH, INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROGEOLOGISTS CONGRESS, 32, Zacatecas, *Anais*, CD-ROM.
- CAMPOS, H.C.S. 1987. Contribuição ao estudo hidrogeoquímico do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 158 p.
- CASTRO, S.C.S.; ARID, F.M.; SANTOS, C.C.M.; SILVA, R.A.; CUNHA, I.P. 1992. Contaminação na água subterrânea em São José do Rio Preto (SP) – Contaminação por nitratos. In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 7, Belo Horizonte, *Anais*, p. 103-106.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2004. Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo 2001-2003. CETESB, São Paulo, 103 p. + anexos (Série Relatórios).
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2007. Relatório de Qualidade de Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo 2004-2006. CETESB, São Paulo, 119 p.
- CETESB/UNESP-IGCE-LEBAC – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO / UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS - LABORATÓRIO DE ESTUDOS DE BACIAS. 2013. Avaliação das concentrações de nitrato no Aquífero Bauru em áreas rurais. CETESB, São Paulo (Relatório Final do Contrato Fehidro 128/2011, 2010-CORHI-115).
- CPRH – COMPANHIA PERNAMBUCANA DE RECURSOS HÍDRICOS. 2004. Manual Técnico CPRH 001: Dimensionamento de tanques sépticos e unidades básicas complementares. CPRH, Recife, 2ª ed., 52 p.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 2013. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS. Disponível em <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout>. Acessado em jul. 2013.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. 1983. Hidrologia Subterrânea. Omega, Barcelona, 2ª ed., 2 vols.
- DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1976. Estudos de águas subterrâneas, Região Administrativa 6, Ribeirão Preto. *Revista DAE*, 107: 37-87.
- DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA 1979. Estudo de águas subterrâneas, regiões administrativas 10 e 11: Presidente Prudente e Marília. São Paulo, SP, v.1 e v.2.
- DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 2013. Cadastro de poços profundos. Disponível em <http://www.aplicacoes.daece.sp.gov.br/usuarios/DaecewebpocoexcelDpo.html>. Acessado em jul. 2013.
- DAEE/SERVMAR/IG – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA/SERVMAR/INSTITUTO GEOLÓGICO. 2011. Projeto São José do Rio Preto. Restrição e

- controle de uso de água subterrânea. SMA/SSRH, São Paulo, 126 p. (Cadernos do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos, 4).
- DAEE/UNESP – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA/UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. 1980. Mapa geológico do Estado de São Paulo. Escala 1: 250.000. Convênio DAEE/UNESP, Secretaria de Obras e do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, São Paulo 1980 (Compilação eletrônica LEBAC/ IGCE/ UNESP, 2009).
- DAEE/UNESP-IGCE-LEBAC – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA/UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS - LABORATÓRIO DE ESTUDOS DE BACIAS. 2013. Águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Diretrizes de utilização e proteção. DAEE, São Paulo, 48 p.
- DRAKE, V.M.; BAUDER, J.W. 2005. Ground water nitrate-nitrogen trends in relation to urban development, Helena Montana, 1971-2003. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 25(2): 118-130.
- DWIVEDI, D.; MOHANTY, B.P. 2015. Hot Spots and Persistence of Nitrate in Aquifers Across Scales. *Entropy*, 18(1): 25.
- FEITOSA, F.A.C; MANOEL FILHO, J. 2000. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. CPRM/LABID-UFPE, Fortaleza, 2ª ed., 391 p.
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. 1979. Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 604 p.
- GODOY, M.T.F; BOIN, M.; SANAIOTTI, D.; SILVA, J. 2004. Contaminação das águas subterrâneas por nitrato em Presidente Prudente – SP, Brasil. *Revista Instituto Adolfo Lutz*, 63(2): 208-214.
- HALL, M. D.; SHAFFER, M. J.; WASKOM, R.M.; DELGADO, J.A. 2001. Regional nitrate leaching variability: what makes a difference in north-eastern Colorado. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(1): 139-150.
- HALLBERG, G.R. 1989. Nitrate in Ground Water in the United States. In: R. Follett (ed.) Nitrogen Management and Ground Water Protection. Elsevier, Amsterdam, p. 35-74.
- HIRATA, R. 2000. Estudo da contaminação por nitrato no Distrito de Tibiricá, Bauru. DAE/IGC-USP, São Paulo, 2 v. (Relatório Técnico).
- HUDAK, P. 2000. Regional trends in nitrate content of Texas groundwater. *Journal of Hydrology*, 228: 37-47.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 1972. Carta do Brasil, Folha de Monte Azul Paulista, SF-22-X-B-V-4, 1ª edição, escala 1:50.000.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2011. Sinopse do censo demográfico 2010. IBGE, Rio de Janeiro, 261 p. (texto e CD-ROM).
- IRITANI, M.A.; EZAKI, S. 2009. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Cadernos de Educação Ambiental 1. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo, 2ª ed., 104 p.
- JUST, T. 1994. Settlements as source of pollution in the watershed of the Zelivka drinking water storage reservoir in the Czech Republic. In: European Water Pollution Control, Vol. 4/1, January 1994. Official Publication of the European Water Pollution Control Association, Elsevier Science B.V., p. 25-30.
- KEENEY, D.R. 1986. Sources of nitrate to ground water. *Critical Reviews in Environmental Control*, 16(3): 257-304.
- KEENEY, D.R. 1989. Sources of nitrate to ground water. In: R.F. Follet (ed.) Nitrogen Management and Ground Water Protection. New York, Elsevier, p. 23-33.
- LEE, Y.; DAHAB, M.; BOGARDI, I. 1992. Nitrate risk management under uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118(2): 151-165.
- LOWE, M.; WALLACE, J.; BISHOP, C.E. 2000. Analysis of septic tank density for three areas in Cedar Valley, Iron County, Utah – A case study for evaluations of proposed subdivisions in Cedar Valley. Salt Lake City: Utah Geological Survey, 66 p. (Water Resource Bulletin, 27).
- NUVOLARI, A. 2003. Esgoto Sanitário: Coleta, Transporte, tratamento e reuso agrícola. Edgard Blücher, São Paulo, 520 p.

- PAULA E SILVA, F. 2003. Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Doutorado, 166 p.
- PIPER, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union Transactions*, 25: 914-923.
- REYNOLDS-VARGAS, J.; FRAILE, J.; HIRATA, R. 2006. Trends in nitrate concentrations and determination of their origin using stable isotopes (^{18}O and ^{15}N) in groundwater of the western Central Valley, Costa Rica. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 35(5): 229-236.
- SÃO PAULO. 1978. Decreto n.º 12.486 de 20 de outubro de 1978. Aprova normas técnicas especiais relativas a alimentos e bebidas. Diário Oficial do Estado, São Paulo, 21 out. 1978, p. 32-33 (NTA-70).
- SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B.; FÚLFARO, V.J.; SOBREIRO NETO, A.F. 1980. Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. *Revista Brasileira de Geociências*, 10: 177-185.
- STIFF, H.A. 1951. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of Petroleum Technology*, 3(10): 15-17.
- VARNIER, C.L. 2007. Avaliação da contaminação de uma fossa negra desativada na zona não-saturada do aquífero Adamantina em Urânia (SP). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 144 p.
- VARNIER, C.; IRITANI, M.A.; VIOTTI, M.; ODA, G.H.; FERREIRA, L.M.R. 2010. Nitrato nas Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, Área Urbana do Município de Marília (SP). *Revista do Instituto Geológico*, 31(1-2): 1-21.
- WEISKEL, P.K.; HOWES, B.L. 1992. Differential Transport of Sewage-Derived Nitrogen and Phosphorus through a Coastal Watershed. *Environmental Science Technology*, 26(2): 352-360.
- WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. 1984. Guidelines for drinking-water quality: Vol. 1. Recommendations. Geneva, 2 p.
- WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2003. Chloride in Drinking-water. Background document for development - WHO Guidelines for Drinking-water Quality, 4 p.
- WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2004. Nitrates and nitrites in drinking-water. Rolling Revision of the WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Draft for review and comments, 133 p.
- WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2011. Nitrate and Nitrite in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, 23 p.
- WOLFE, A.H.; PATZ, J.A. 2002. Reactive nitrogen and human health: acute and long-term implications. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 31(2): 120-125.
- XU, Y.; BAKER, L.A.; JOHNSON, P.C. 2007. Trends in ground water nitrate contamination in the Phoenix, Arizona Region. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 27(2): 49-56.

Endereço dos autores:

Filipe Montanheiro e Chang Hung Kiang – Universidade Estadual Paulista, Laboratório de Estudos de Bacias – LEBAC, Avenida 24-A, 1515, Bela Vista, CEP 13.506-900, Rio Claro, SP, Brasil. E-mails: flpmontanheiro@gmail.com, chang@rc.unesp.br.

Artigo submetido em 27 de setembro de 2016, aceito em 8 de dezembro de 2016.