VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU NA
ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE BAURU (SP)

Mirella ROSENBERGER

Claudia VARNIER

Mara Akie IRITANI

Luciana Martin Rodrigues FERREIRA

Geraldo Hideo ODA

Maurício VIOTTI

RESUMO

O presente trabalho aborda os principais aspectos relacionados ao estudo da vulnerabilidade natural à contaminação do Sistema Aquífero Bauru (SAB) na área urbana do Município de Bauru (SP). A vulnerabilidade do SAB foi avaliada pelos métodos DRASTIC e GOD, em combinação com um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os resultados obtidos pelo método GOD permitiram identificar três classes de vulnerabilidade: baixa-alta, moderada-baixa e moderada-alta. A classe moderada-baixa apresenta maior abrangência em área (79,3%), seguida da moderada-alta (20,0%) e baixa-alta (0,7%). No método DRASTIC, a vulnerabilidade foi definida por três classes: baixa, moderada ou alta. As áreas com vulnerabilidade moderada perfazem 67,0% da área estudada, enquanto as de baixa e alta correspondem a 30,0% e 3,0%, respectivamente. Os mapas gerados por ambos os métodos mostraram que as áreas mais vulneráveis à contaminação do SAB são aquelas próximas às margens dos rios Bauru e Batalha e seus afluentes, coincidentes com as áreas de descarga deste sistema aquífero. Tal fato é corroborado pela correlação das concentrações de nitrato, provenientes de atividade antrópica, com os mapas de vulnerabilidade. As maiores concentrações deste contaminante, muitas vezes excedendo o valor de alerta (5 mg/L N-NO₃⁻) e até o limite de potabilidade (10 mg/L N-NO₃⁻) situam-se, em geral, nas áreas de vulnerabilidade moderada a alta. Outro fator importante é que os bairros não contemplados pelas redes de água e esgoto compreendem, em sua totalidade, as áreas com vulnerabilidade moderada. Assim, visando a proteção do SAB, ressalta-se a necessidade de instalação de rede de esgoto nas áreas com vulnerabilidade moderada, bem como cuidados especiais quanto ao uso e ocupação do solo nestes locais e naqueles próximos à sua área de descarga.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Bauru, vulnerabilidade, contaminação, GOD, DRASTIC.

ABSTRACT

NATURAL CONTAMINATION VULNERABILITY OF THE BAURU AQUIFER SYSTEM IN THE URBAN AREA OF THE MUNICIPALITY OF BAURU, SÃO PAULO. This work assesses the natural vulnerability of the Bauru Aquifer System (BAS) to contamination in the urban area of the Municipality of Bauru (São Paulo State). The vulnerability of the BAS has been evaluated by applying the GOD and DRASTIC methods, in combination with Geographic Information System (GIS). The results obtained from the GOD method allowed the identification of three vulnerability classes: low-high, moderate-low and moderate-high. The moderate-low class has the greater coverage in the area (79.3%), followed by moderate-high (20.0%) and low-high (0.7%). In the DRASTIC method, the vulnerability was defined as low, moderate or high. Areas of moderate vulnerability constitute 67.0% of the study area, whereas areas of low and

high vulnerability correspond to 30.0% and 3.0%, respectively. The maps created by both methods show that the areas of the BAS most vulnerable to contamination are those located close to the Bauru and Batalha rivers and their tributaries, coincident with the discharge areas of this aquifer system. This is confirmed when nitrate concentrations, resulting from anthropic activity, are correlated with the vulnerability maps. Generally, the highest contents of this contaminant, often exceeding the alert value (5 mg/L N-NO₃⁻) or even the drinking water standard (10 mg/L N-NO₃⁻), are located in moderate to high vulnerability areas. Another important factor is that districts not covered by water and sewage networks comprise the areas with moderate vulnerability. In order to protect the Bauru Aquifer System in the study area, it is important to point out the necessity of implanting a sanitary sewer system in the areas of moderate vulnerability and the special care that must be taken with the land use and occupation in places close to the discharge areas of the SAB.

Keywords: Bauru Aquifer System, vulnerability, contamination, GOD, DRASTIC.

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Bauru (SAB) constitui uma das principais fontes de abastecimento de água da área urbana do Município de Bauru. Este aquífero, por comportar-se como livre, é o que apresenta maior suscetibilidade à contaminação de origem antrópica no Estado de São Paulo (IG/CETESB/DAEE 1997, CETESB 2010). Altas concentrações deste contaminante, muitas vezes acima do padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria 2.914/2011 (BRASIL 2011) do Ministério da Saúde (10 mg/L N-NO₃⁻), foram detectados em diversos poços tubulares e cacimbas que exploram o Sistema Aquífero Bauru, especialmente aqueles situados na área urbana do município homônimo (HIRATA 2000, GIAFFERIS & OLIVEIRA 2006, SILVA 2009, CAVALIN 2011, STRADIOTTO *et al.* 2011, VARNIER *et al.* 2012). Os resultados obtidos por VARNIER *et al.* (2012) mostraram que a água subterrânea apresenta concentrações de nitrato de até 15,0 mg/L N-NO₃⁻. Tais valores foram observados em poços situados, sobretudo, nos bairros mais antigos e de maior adensamento urbano (zona central). Isto, segundo os autores, indica um vínculo entre o processo de urbanização e a carga de nitrato presente no SAB, relacionado aos sistemas de saneamento *in situ* (antigas fossas sépticas e negras) utilizados antes da implantação do sistema de esgotamento sanitário, bem como às fugas da atual rede coletora.

A partir dos resultados apontados por VARNIER *et al.* (2012) e considerando que existe uma crescente utilização das águas do Sistema Aquífero Bauru para os diferentes usos, foi realizada no presente trabalho uma avaliação

da vulnerabilidade natural do SAB de forma a identificar as áreas mais suscetíveis à contaminação na área urbana do município.

Os mapeamentos (ou cartografia) de vulnerabilidade à contaminação constituem-se na técnica mais amplamente utilizada para a proteção das águas subterrâneas, visando compatibilizar as atividades antrópicas e a capacidade do terreno em suportá-las ambientalmente. Definindo-se o grau de vulnerabilidade do aquífero e avaliando a potencial carga contaminante presente nas atividades ou empreendimentos existentes, é possível definir o risco de contaminação das águas subterrâneas, subsidiando planejamento do uso do solo e a gestão dos recursos hídricos.

Neste trabalho, a avaliação da vulnerabilidade foi realizada mediante a aplicação dos métodos DRASTIC e GOD, de modo a comparar seus resultados e melhor delimitar as áreas com diferentes graus de suscetibilidade à contaminação. O estabelecimento destas áreas auxiliará na proposição de restrições de uso da água e construção de novos poços, promovendo junto ao poder público uma discussão para a implantação de áreas de restrição e controle quanto ao uso da água subterrânea na região.

2 VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS

A vulnerabilidade natural das águas subterrâneas à contaminação pode ser definida em função do conjunto de características físicas, químicas e biológicas da zona não-saturada e/ou do aquítarde que, juntas, controlam a chegada do contaminante ao aquífero (HIRATA & FERNANDES 2008).

O conceito de vulnerabilidade começou a ser utilizado, inicialmente, nos trabalhos de LE GRAND (1964), nos EUA, ALBINET & MARGAT (1970), na França, e TALTASSE (1972), no Brasil. A partir da década de 1980, este termo e as metodologias para sua determinação começaram a se consolidar (HAERTLE 1983, ALLER *et al.* 1987, FOSTER & HIRATA 1988). Embora se referisse à suscetibilidade relativa dos aquíferos à contaminação antrópica, o termo era inicialmente usado informalmente. Ainda nesta época, foram publicadas duas metodologias: o DRASTIC (ALLER *et al.* 1987), pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e o GOD (FOSTER & HIRATA 1988), pela Organização Mundial da Saúde (OMS) e Organização Panamericana de Saúde (OPAS).

Posteriormente, dois importantes grupos de trabalho profissionais revisaram e opinaram sobre a aplicabilidade do conceito de vulnerabilidade, decidindo fortemente em favor de seu uso: o Conselho de Pesquisa Nacional dos Estados Unidos (NRC 1993) e a Associação Internacional de Hidrogeólogos (IAH) (VRBA & ZAPOROZEC 1994). Já neste período essas instituições adotaram o mapeamento de vulnerabilidade como uma ferramenta para caracterização hidrogeológica dos sistemas aquíferos (FOSTER *et al.* 2013).

Dentre os vários métodos de avaliação de vulnerabilidade natural de aquíferos destacam-se: Poluição dos Lençóis Aquíferos (TALTASSE 1972), Mapa de Vulnerabilidade (DUARTE 1980), DRASTIC (ALLER *et al.* 1987), GOD (FOSTER & HIRATA 1988), SINTACS (CIVITA *et al.* 1990), EPIK (DOERFLIGER & ZWAHLEN 1997), SI (RIBEIRO 2000). Neste trabalho foram utilizados os métodos GOD e DRASTIC para avaliar a vulnerabilidade do SAB frente à contaminação antrópica.

O DRASTIC (ALLER *et al.* 1987) consiste no método mais popular de cartografia de vulnerabilidade na Europa e nos Estados Unidos. Este método gera um índice relativo de vulnerabilidade, obtido a partir da soma ponderada de sete parâmetros: profundidade do nível d'água (*Depth to the water table*), recarga (*net Recharge*), material do aquífero (*Aquífer media*), solo (*Soil media*), declividade ou topografia (*Topography*), material da zona não-saturada (*Impact of the unsaturated zone*) e condutividade hidráulica (*hydraulic Conductivity*). Cada parâmetro é ponderado com índices de 1 a 10, conforme seu impacto no potencial de poluição. O índice DRASTIC final é obtido a partir da soma ponderada dos sete parâmetros acima descritos, conforme apresentado na Equação 1:

$$\text{Índice DRASTIC} = (D_i \times D_p) + (R_i \times R_p) + (A_i \times A_p) + (S_i \times S_p) + (T_i \times T_p) + (I_i \times I_p) + (C_i \times C_p) \text{ (Equação 1)}$$

Onde i é o valor atribuído ao parâmetro e p, seu peso.

O método GOD (FOSTER & HIRATA 1988), por sua vez, tem sido uma das técnicas mais utilizadas na América Latina e Caribe durante as últimas décadas, dada a sua simplicidade de conceitos e aplicação. Sua denominação é um acrônimo de três fatores, em inglês: confinamento do aquífero (*Groundwater hydraulic confinement*), classificado em confinado não drenante, confinado drenante ou livre; natureza composicional da zona não-saturada e/ou aquitarde e seu grau de fraturamento (*Overlying strata*) e profundidade do nível d'água ou da base da camada confinante do aquífero (*Depth to groundwater table*). Cada um dos fatores é ponderado com valores entre 0 e 1 e o índice final de vulnerabilidade é obtido multiplicando-se os três índices destes parâmetros (Equação 2):

$$\text{Índice GOD} = G \times O \times D \text{ (Equação 2)}$$

De acordo com o índice calculado, a classe de vulnerabilidade é subdividida em diferentes categorias: extrema, alta, média, baixa, insignificante.

Alguns estudos sobre vulnerabilidade dos aquíferos frente à contaminação utilizando os métodos DRASTIC e GOD foram desenvolvidos nos cenários nacional e internacional com o intuito de comparar a eficiência de cada um deles (PONTES *et al.* 2009, BOUFEKANE & SAIGHI 2013, REGINATO & AHLERT 2013). Na maioria dos casos, os autores apontam que os dois métodos são satisfatórios na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos, embora não definam qual o mais adequado.

PONTES *et al.* (2009) utilizaram os dois métodos para determinar a vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) no *Campus* da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS). Os resultados indicam que o SASG, de maneira geral, possui vulnerabilidade média à contaminação pelos métodos GOD e o DRASTIC. Em relação à aplicabilidade dos métodos, os autores concluíram que o GOD cumpriu com o objetivo de se produzir um mapa de vulnerabilidade para o *Campus*, uma vez que além de apresentar concordância com o método DRASTIC, demanda um número menor de parâmetros a serem levantados. Isto se traduz em maior rapidez para obtenção de resultados e menor custo aplicado.

Por outro lado, REGINATO & AHLERT (2013), ao efetuarem o mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos fraturados associados ao Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, observaram diferenças nos mapas determinados mediante a aplicação dos métodos DRASTIC e GOD. O mapa obtido com o primeiro método indicou a ocorrência de três classes de vulnerabilidade: baixa (45,6%), moderada (54,1%) e alta (0,4%). O mapa elaborado pelo método GOD indicou a ocorrência de duas classes: baixa (79,1%) e média (20,9%). Segundo os autores, tais diferenças estariam relacionadas com a quantidade de parâmetros utilizados em cada método. No DRASTIC, o uso de maior quantidade de parâmetros resultou num mapa com maior variabilidade espacial para as classes de vulnerabilidade.

Situação semelhante foi apontada por BOUFEKANE & SAIGHI (2013) em estudo sobre a vulnerabilidade de um aquífero livre frente à contaminação por nitrato na região nordeste da Argélia. O resultado da distribuição espacial das concentra-

ções de nitrato mostrou que o método DRASTIC foi o mais apropriado para a representação das áreas mais vulneráveis à contaminação, quando comparado ao SI e GOD. Neste caso, a porcentagem obtida para o DRASTIC foi de 71% contra 63% e 54% para os métodos SI e GOD, respectivamente.

Salienta-se que a representatividade de um método de mapeamento da vulnerabilidade em relação ao outro deve ser vista com cautela, avaliando-se caso a caso. Como apontado por FOSTER *et al.* (2013), o mapa de vulnerabilidade é uma ferramenta de planejamento que busca sintetizar as informações disponíveis e, por esse motivo, incorpora significantes e variáveis níveis de incertezas.

3 ÁREA DE ESTUDO

O local de estudo compreende a área urbana do Município de Bauru, situado na porção centro-oeste do Estado de São Paulo (Figura 1). Esta área possui uma superfície total de 102 km² (SEADE 2012) e dista aproximadamente 330 km da capital paulista.

FIGURA 1 – Localização da área de estudo.

A população do município é de 349.000 habitantes e sua taxa de urbanização de 98% (SEADE 2012). O abastecimento público de água e a coleta de esgoto são efetuados pelo Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE-Bauru). Aproximadamente 40% da água fornecida à área urbana de Bauru provém do Rio Batalha e 60% é proveniente de 27 poços tubulares profundos que exploram o Sistema Aquífero Guarani. Adicionalmente, destacam-se inúmeros poços tubulares particulares que captam água do Sistema Aquífero Bauru.

A cidade é atendida em 89,5% pela rede coletora de esgotos. Conforme dados apontados por DAE-BAURU (2011), o município descarta todo o esgoto *in natura* (cerca de 1.000 L/s) no Rio Bauru e seus 10 afluentes. Deste total, 85% provém das residências e 15% das indústrias. Nas áreas onde a rede coletora ainda não está presente são utilizadas fossas sépticas e negras.

3.1 Geologia

Na área de estudo afloram as rochas sedimentares das formações Marília (superior) e Adamantina (inferior) do Grupo Bauru (Figura 2).

Estas rochas, de origem cretácea, são constituídas principalmente por sedimentos siliciclásticos continentais.

A Formação Marília corresponde à parte superior do Grupo Bauru, representada por arenitos grossos a conglomeráticos, teor de matriz variável, abundância de cimento carbonático e raras camadas descontínuas de lamitos vermelhos e calcários (SOARES *et al.* 1980 *apud* PAULA E SILVA 2003). Sobrepõe-se às rochas sedimentares da Formação Adamantina por contato interdigitado a abrupto. Seu limite superior é marcado pela superfície topográfica atual.

SOARES *et al.* (1980 *apud* PAULA E SILVA 2003) descrevem a Formação Adamantina como sendo composta por bancos de arenitos de granulação fina a muito fina, róseos a castanhos, com estratificação cruzada, intercalados com bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos.

Na região de Bauru os sedimentos do Grupo Bauru (formações Adamantina e Marília) repousam sobre as rochas do Grupo São Bento e da Formação Teresina (Grupo Passa Dois) através de contatos erosivos e angulares (PAULA E SILVA &

FIGURA 2 – Mapa geológico do Município de Bauru (SALOMÃO 1994).

CAVAGUTI 1994). Essa discordância é resultado do soerguimento tectônico que originou o Alto de Piratininga a sudoeste do Município de Bauru. Este evento foi responsável tanto pelas variações notáveis de espessura (diminuição) do pacote Botucatu/Pirambóia, como pela exclusão quase total das rochas basálticas da cidade de Bauru (PAULA E SILVA & CAVAGUTI 1994).

A Formação Teresina é caracterizada por uma sucessão predominantemente pelítica, constituída por camadas de argilitos e siltitos argilosos com intercalações frequentes de camadas de calcários, às vezes

oolíticos, e de arenitos muito finos, depositados em ambiente litorâneo de águas rasas, sob a influência de maré. A Formação Teresina aflora na região de Piratininga, cerca de 12 km a sudoeste da cidade de Bauru (PAULA E SILVA & CAVAGUTI 1994).

Na porção nordeste da cidade, sotopostos às rochas do Grupo Bauru, ocorrem, de forma restrita, os basaltos da Formação Serra Geral.

A figura 3 mostra uma seção geológica esquemática da área, elaborada a partir das descrições litológicas e perfis geofísicos de poços tubulares profundos.

FIGURA 3 – Seção geológica esquemática da área urbana de Bauru.

3.2 Hidrogeologia

Na área urbana de Bauru ocorrem três unidades hidroestratigráficas: os sistemas aquíferos Bauru (SAB), Serra Geral (SASG) e Guarani (SAG). O SAB, unidade hidrogeológica superior mais intensamente utilizada pelo usuário privado, é do tipo livre, com porosidade primária, representado na região pelos aquíferos Marília (superior) e Adamantina (inferior).

A espessura média deste sistema aquífero é da ordem de 82,6 m, podendo atingir até 202 m na porção sudeste do município. A recarga ocorre pela infiltração natural das águas pluviais, ao passo que a descarga se dá ao longo dos córregos da Gramma, Castelo e Água da Ressaca, afluentes do Rio Bauru.

As linhas equipotenciais, de forma geral, são paralelas às drenagens maiores. As maiores cargas potenciométricas estão em torno de 580 m, enquanto as menores, junto às margens do Rio Bauru, no centro da cidade, aproximadamente a 490 m em relação ao nível do mar (Figura 4).

O gradiente hidráulico varia de 0,031 a 0,044 (3,1 a 4,4%) e a velocidade de fluxo das águas subterrâneas, de 2,2 a 3,1 m/dia, considerando a porosidade específica de 5% (MANCUSO & CAMPOS 2005).

Os valores de condutividade hidráulica calculados no âmbito deste trabalho, obtidos a partir da interpretação dos testes de bombeamento em poços tubulares cadastrados na área urbana de Bauru, estão entre $6,1 \times 10^{-1}$ e $3,6 \times 10^{-2}$ m/d.

FIGURA 4 – Mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Bauru na área urbana de Bauru.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Cadastro de poços

O cadastro de poços foi realizado a partir de consultas aos bancos de dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) e do Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE-Bauru). Todas as informações foram organizadas em um banco de dados do programa Microsoft Access (versão 2007) para compor o cadastro de poços tubulares do Instituto Geológico (IG/SMA).

Adotou-se uma análise criteriosa para a interpretação e reavaliação das informações levantadas, dando especial atenção aos poços que continham os seguintes dados: coordenadas geográficas de localização (latitude e longitude), cota altimétrica, dados construtivos, parâmetros hidráulicos, perfil

geológico, análises das concentrações de nitrato e aquífero explorado.

No total foram levantados 231 poços na área urbana de Bauru, dos quais 27 extraem água do Sistema Aquífero Guarani (SAG) e 204, do Sistema Aquífero Bauru (SAB). Deste total, apenas 135 poços dispunham do conjunto de informações supracitadas (Figura 5).

4.2 Levantamento cartográfico

O levantamento cartográfico consistiu na compilação de mapas topográficos e hidrográficos na escala 1:50.000, cedidos pela Prefeitura Municipal de Bauru e DAE-Bauru.

As informações foram digitalizadas e posteriormente georreferenciadas no sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), South American datum 1969 - 22S, utilizando-se o programa ArcGIS versão 10.

FIGURA 5 – Localização dos poços cadastrados na área urbana de Bauru.

4.3 Aplicação dos métodos de vulnerabilidade

4.3.1 Método DRASTIC

O método DRASTIC foi aplicado a partir da integração dos sete parâmetros que caracterizam o aquífero, conforme proposto por ALLER *et al.* (1987). A tabela 1 mostra os índices e pesos atribuídos para cada parâmetro, considerando as características da área estudada.

O parâmetro D (profundidade do nível d'água) foi determinado a partir dos dados de 134 poços distribuídos na área urbana. Este parâmetro foi discriminado em quatro classes que receberam índices entre 1 e 8.

Para a recarga do Sistema Aquífero Bauru, parâmetro R, atribuiu-se o índice 9, adotado para toda a área de estudo. Este índice foi calculado a partir do valor de recarga de 258 mm/ano, apresentado por MALDANER (2010).

O parâmetro A foi determinado a partir do mapa geológico (SALOMÃO 1994). Os índices adotados para este parâmetro foram 8 (Formação Adamantina) e 7 (Formação Marília) e se enquadram no intervalo que compreende o arenito maciço, condizente com a descrição litológica dos poços cadastrados.

O parâmetro S foi obtido com base no mapa morfopedológico (SALOMÃO 1994), em escala 1:100.000. Definiu-se uma classe para toda área de estudo, sendo atribuída a esta, o índice 9 (material muito arenoso).

O cálculo do parâmetro T baseou-se no mapa de declividade, gerado a partir do modelo digital do terreno, sendo definidas cinco classes, que receberam índices 1, 3, 5, 9 e 10.

Para o parâmetro I, obtido a partir da interpretação dos mapas pedológico e geológico da área, foram definidas duas classes que receberam os seguintes índices: 5 (Formação Marília) e 6 (Formação Adamantina).

Por fim, o parâmetro C foi calculado considerando-se a interpretação dos resultados dos testes de bombeamento (etapas de bombeamento e recuperação) de dois poços representativos da área urbana do município que, comparados com os dados de MANCUSO & CAMPOS (2005), mostraram-se bastante condizentes. Sendo assim, atribuiu-se o índice 1, uma vez que os resultados obtidos foram inferiores a 4,1 m/d.

Para cada parâmetro foi atribuído um peso, estabelecido no método DRASTIC (Tabela 1), e, com o emprego do programa ArcGIS (versão 10),

TABELA 1 – Índices e pesos atribuídos aos parâmetros utilizados na elaboração do mapa de vulnerabilidade pelo método DRASTIC.

<i>Parâmetro D – Profundidade do nível d'água (m)</i>	<i>Índice</i>	<i>Peso</i>	<i>Calculado</i>
5-10	8	5	40
10-20	4	5	20
20-30	2	5	10
> 30	1	5	5
<i>Parâmetro R – Recarga (mm)</i>	<i>Índice</i>	<i>Peso</i>	<i>Calculado</i>
258	9	4	36
<i>Parâmetro A – Material do aquífero</i>	<i>Índice</i>	<i>Peso</i>	<i>Calculado</i>
Formação Adamantina	8	3	24
Formação Marília	7	3	21
<i>Parâmetro S – Pedologia</i>	<i>Índice</i>	<i>Peso</i>	<i>Calculado</i>
Material muito arenoso	9	2	18
<i>Parâmetro T – Declividade (%)</i>	<i>Índice</i>	<i>Peso</i>	<i>Calculado</i>
< 2	10	1	10
2-6	9	1	9
6-12	5	1	5
12-18	3	1	3
> 18	1	1	1
<i>Parâmetro I – Influência da zona não-saturada</i>	<i>Índice</i>	<i>Peso</i>	<i>Calculado</i>
Formação Adamantina	6	5	30
Formação Marília	5	5	25
<i>Parâmetro C – Condutividade Hidráulica (m/d)</i>	<i>Índice</i>	<i>Peso</i>	<i>Calculado</i>
< 4,1	1	3	3

foi efetuada a integração desses sete atributos para a confecção do mapa de vulnerabilidade do SAB.

4.3.2 Método GOD

Neste método também foram atribuídos valores a cada classe de intervalo dos três parâmetros analisados (Tabela 2). Diferentemente do método DRASTIC, no GOD os parâmetros tem o mesmo peso na avaliação do índice de vulnerabilidade.

O grau de confinamento (G) foi definido conforme estudos regionais elaborados por IG/CE-TESB/DAEE (1997). A este parâmetro foi atribuído o índice mais elevado (1,0, em uma escala que varia de 0 a 1,0), associado ao tipo de aquífero, livre, mais vulnerável à contaminação.

O parâmetro ocorrência dos estratos de cobertura (O) foi determinado a partir do mapa geológico elaborado por SALOMÃO (1994), em escala 1:100.000. Levando-se em consideração as características litológicas das unidades geológicas que

TABELA 2 – Valores atribuídos às classes de intervalo dos parâmetros utilizados na elaboração do mapa de vulnerabilidade pelo método GOD.

<i>Parâmetro G – grau de confinamento</i>	<i>Valor</i>
Aquífero livre	1,0
<i>Parâmetro O – ocorrência dos estratos de cobertura</i>	<i>Valor</i>
Formação Adamantina	0,52
Formação Marília	0,48
<i>Parâmetro D – distância até o nível d'água (m)</i>	<i>Valor</i>
<5	0,9
5-10	0,8
10-20	0,8
20-30	0,7
30-50	0,7
>50	0,6

compõem o SAB, adotou-se o valor de 0,48 para as rochas sedimentares correspondentes à Formação Marília e 0,52, às da Formação Adamantina (IG/CETESB/DAEE 1997).

As profundidades do nível d'água (D) foram agrupadas em seis classes que receberam valores entre 0,6 e 0,9 (Tabela 2), conforme proposto por FOSTER *et al.* (2002).

A integração dos mapas foi realizada no programa ArcGIS (versão 10), que resultou no mapa de vulnerabilidade do SAB. O índice final foi calculado a partir da ferramenta *field calculator* deste programa, cruzando-se os mapas e as informações relacionadas a cada índice.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Método DRASTIC

Os índices finais de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Bauru, calculados mediante a aplicação do método DRASTIC, permitiram identificar três classes de vulnerabilidade (alta, moderada e baixa). De acordo com a figura 6, observa-se que a vulnerabilidade moderada é a que apresenta maior abrangência na área (67%), seguida da baixa (30%) e da alta (3%).

A figura 7 apresenta os mapas temáticos dos sete parâmetros considerados no método DRASTIC, de modo a auxiliar na visualização do grau de importância ou impacto de cada parâmetro sobre o cálculo da vulnerabilidade. Observa-se que os parâmetros profundidade do nível estático (D), material da zona não-saturada (I) e material do aquífero (A) apresentaram as maiores variações, influenciando fortemente na definição das classes de vulnerabilidade.

O parâmetro topografia (T) também apresentou grande variabilidade de classes, mas exerceu menor influência, pois o peso atribuído pelo método é 1 (o mais baixo de todos). O solo (S) e a condutividade hidráulica (C) tiveram pouca influência na definição dos graus de vulnerabilidade, uma vez que esses parâmetros possuíam menor distribuição de classes.

As áreas de vulnerabilidade baixa distribuem-se nas regiões com maiores altitudes (> 560 m), onde geralmente ocorrem níveis d'água mais profundos (> 20 m) e declividades entre 2 a 12%. Por sua vez, as áreas de vulnerabilidade alta concentram-se próximo às margens dos rios Bauru, Batalha e seus afluentes, coincidentes com as áreas de descarga do Sistema Aquífero Bauru. Nestas regiões, as declividades são variáveis (até 18%), os níveis d'água são mais rasos

FIGURA 6 – Mapa de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Bauru, segundo o método DRASTIC.

FIGURA 7 – Mapas temáticos utilizados para o cálculo do índice final de vulnerabilidade pelo método DRASTIC.

(<10 m) e, por conseguinte, menor é a espessura da zona não-saturada, com predomínio da Formação Adamantina, mais arenosa. Adicionalmente, nestes locais situam-se as áreas mais antigas do município e com maior adensamento urbano.

5.2 Método GOD

A vulnerabilidade à contaminação mediante a aplicação do método GOD variou de baixa a moderada, com predomínio desta última classe. Com o intuito de permitir uma avaliação mais detalhada, esta classe foi subdividida em duas subclasses: moderada baixa e moderada alta. Observa-se que 79,3% da região estudada configuram-se como áreas de vulnerabilidade moderada-baixa, sucedida pela moderada-alta (20,0%).

O parâmetro profundidade do nível de água (D) é o que apresentou maior influência na determinação da vulnerabilidade.

As áreas de vulnerabilidade moderada-alta ocorrem às margens dos rios Bauru, Batalha e seus

afluentes, e coincidem com as áreas de descarga do sistema aquífero. Estes locais caracterizam-se pela ocorrência de sedimentos da Formação Adamantina, altitudes inferiores a 520 m e profundidades do nível d'água menores que 20 m.

As áreas de vulnerabilidade moderada-baixa ocorrem em regiões com declividades variadas sobre sedimentos da Formação Marília e níveis d'água mais profundos, entre 20 a 50 m (Figura 8).

Por fim, a área com vulnerabilidade baixa foi classificada como baixa-alta (0,7%) e restringe-se a uma pequena porção situada no sudoeste da área urbana, caracterizada por níveis d'água mais profundos, superiores a 50 m.

5.3 Comparação entre os métodos de vulnerabilidade

Os mapas de vulnerabilidade gerados por ambos os métodos indicaram que na região predomina a classe moderada. De modo geral, boa parte das áreas classificadas como de vulnerabilidade moderada-alta pelo método GOD foram consideradas como de

FIGURA 8 – Mapa de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Bauru segundo o método GOD.

vulnerabilidade moderada pelo método DRASTIC. Contudo, várias áreas que no método GOD aparecem com vulnerabilidade moderada-baixa, foram classificadas como vulnerabilidade baixa no método DRASTIC, conforme apresentado nas figuras 6 e 8. Isto se deve ao fato de que no método DRASTIC são avaliados mais parâmetros que no GOD. Os parâmetros D, I e A possuem maior variação, exercendo grande influência na determinação das classes de vulnerabilidade baixa e moderada.

A comparação entre os dois métodos na área urbana do Município de Bauru permitiu concluir que ambos são eficazes. Como o SAB é um aquífero livre e bastante vulnerável à contaminação, a espessura da zona não-saturada, a profundidade do nível d'água e o tipo de solo desempenham um papel importante na proteção do aquífero frente aos processos de contaminação.

Os parâmetros A, S, I e C, pontuados separadamente no DRASTIC, são, de alguma forma, considerados na análise qualitativa dos parâmetros O e G do método GOD.

No entanto, a aplicação do método DRASTIC esbarra na dificuldade de se obter informações completas e bem distribuídas dos sete parâmetros para toda a área, bem como necessita de estudos mais detalhados de campo para a determinação de alguns parâmetros, tais como recarga, condutividade hidráulica, geologia e tipo de solo.

5.4 Validação dos mapas de vulnerabilidade do SAB frente ao sistema de saneamento

Ao correlacionar os mapas de vulnerabilidade com as concentrações de nitrato, expressas em mg/L N-NO_3^- , nota-se que nas áreas de vulnerabilidades alta e moderada (DRASTIC) ou moderada-alta (GOD) os poços possuem concentrações deste contaminante superiores ao padrão de potabilidade (10 mg/L N-NO_3^-) ou ao valor de alerta estabelecido pela CETESB, igual a 5 mg/L N-NO_3^- (Figura 9).

Poços situados em áreas de vulnerabilidade baixa (DRASTIC) apresentam, em sua totalidade, concentrações inferiores a 3 mg/L N-NO_3^- , indicando as condições naturais do aquífero, sem a influência antrópica (Figura 9).

A sobreposição dos mapas de vulnerabilidade (DRASTIC e GOD) com as informações sobre saneamento indica que as áreas sem rede de esgoto geralmente correspondem àquelas com vulnerabilidades moderada e baixa (DRASTIC) ou moderada-baixa (GOD) (Figura 9).

Considerando as concentrações de nitrato, ressalta-se a necessidade de ações de controle, preven-

ção e monitoramento nas áreas de vulnerabilidade moderada (sem rede de esgoto), especialmente onde não há rede pública de água e a população faz uso intenso de poços rasos para seu abastecimento.

Além disso, recomenda-se o monitoramento sistemático da qualidade das águas dos poços que já indicam contaminação por nitrato.

6 CONCLUSÕES

O uso dos métodos DRASTIC e GOD para a avaliação da vulnerabilidade do Sistema Aquífero Bauru na área urbana do Município de Bauru forneceu bons resultados, comprovando que ambos são eficazes. O método DRASTIC, a princípio, apresenta resultados mais detalhados por utilizar um número maior de parâmetros; a profundidade da zona não-saturada e a sua influência (D e I) e o material do aquífero (A) são os parâmetros de maior importância na determinação da vulnerabilidade.

Os índices finais de vulnerabilidade deste sistema aquífero permitiram identificar três classes de vulnerabilidade. No mapa de vulnerabilidade gerado pelo método GOD foram identificadas as seguintes classes na área urbana de Bauru: baixa-alta (0,7%), moderada-baixa (79,3%) e moderada-alta (20,0%). Por sua vez, o mapa produzido pelo método DRASTIC apontou a ocorrência de áreas com vulnerabilidade baixa (30,0%), moderada (67,0%) e alta (3,0%).

As áreas mais vulneráveis à contaminação do SAB são aquelas próximas às margens dos rios Bauru, Batalha e seus afluentes, que coincidem com as áreas de descarga do sistema aquífero. Isto se confirma quando se comparam as concentrações de nitrato dos poços da área urbana com os mapas de vulnerabilidade. As maiores concentrações deste contaminante, muitas vezes excedendo o padrão de potabilidade ou o valor de alerta, estão concentradas nas áreas mais vulneráveis do SAB.

Os resultados aqui apresentados mostram que a aplicação dessas metodologias é útil para o planejamento e gerenciamento municipal, principalmente por haver uma grande incidência de poços particulares que captam água do Sistema Aquífero Bauru em áreas de vulnerabilidade moderada e alta. Neste sentido, recomenda-se: i) monitoramento sistemático da qualidade das águas nos poços que já indicaram alguma contaminação por nitrato, bem como avaliar sua evolução ao longo do tempo; ii) instalação da rede de esgoto nas áreas com vulnerabilidade moderada; iii) adoção de cuidados especiais quanto ao uso e ocupação do solo nestas áreas e naquelas próximas à área de descarga do SAB.

FIGURA 9 – Mapas de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Bauru na área urbana de Bauru, segundo os métodos DRASTIC (A) e GOD (B), com as concentrações de nitrato dos poços e informações de saneamento.

Por fim, o mapeamento da vulnerabilidade à contaminação do aquífero é uma ferramenta que auxilia o planejamento de uso do solo e deve ser utilizado para a priorização de estudos mais detalhados que subsidiem as ações de proteção e gestão dos recursos hídricos.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à FAPESP pelo financiamento do projeto (Processo nº 2009/05840-1); à FUNDAÇÃO pela concessão da bolsa de estágio; ao DAE-Bauru e à Prefeitura Municipal de Bauru pelo fornecimento de dados e suporte técnico; às estagiárias Diana Mayumi Takeuchi e Jacqueline Silles, do Instituto Geológico, pelo apoio técnico.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBINET, M.; MARGAT, J. 1970. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bulletin BRGM, 2nd Series*, 3(4): 13-22.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J. 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. Environmental Protection Agency, Washington DC, 641 p.
- BOUFEKANE, A.; SAIGHI, O. 2013. Assessment of groundwater pollution by nitrates using intrinsic vulnerability methods: A case study of the Nil valley groundwater (Jijel, North-East Algeria). *African Journal of Environmental Science and Technology*, 7(10): 949-960.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. 2011. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, 14 dez. 2011, Seção 1, p. 39.
- CAVALIN, M.V. 2011. Relação entre urbanização e contaminação por nitrato no sistema Aquífero Bauru, Município de Bauru, SP. Centro Universitário Senac, São Paulo, Trabalho de Conclusão de Curso, 87 p.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2010. Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo: 2007-2009. CETESB, São Paulo, 258 p.
- CIVITA, M.; FORTI, O.; MARINI, P.; MICHELI, L.; PICCINI, L.; PRANZINI, G. 1990. Carta de la vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi delle Alpi Apuane. Gruppo Nazionale per la Difesa Delle Catastrofi Idrogeologiche, Firenze, Monografia GNDCI – CNR, n. 399, 56 p.
- DAE-BAURU – DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO DE BAURU. 2011. Dados sobre esgotamento sanitário. Disponível em: <http://www.daebauru.com.br/site2006/empresa/historia.htm>. Acessado em 28 mar.2011.
- DOERFLIGER N.; ZWAHLEN, F. 1997. EPIK: new method for outlining of protection areas in karstic environments. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM AND FIELD SEMINAR ON KARST WATERS AND ENVIRONMENTAL IMPACTS, Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, 117-123.
- DUARTE, U. 1980. Geologia ambiental da área de São Pedro (SP): vetor águas subterrâneas. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 73 p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. 1988. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO/PAHO/HPEC-CEPIS, Lima, 81 p. (Relatório Técnico).
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. 2002. Groundwater quality protection. A guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. GW-Mate, World Bank, Washington, 103 p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; ANDREO, B. 2013. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? *Hydrogeology Journal*, 21(7): 1389-1392.
- GIAFFERIS, G.P.; OLIVEIRA, E.L. 2006. Investigação da qualidade das águas subterrâneas do município de Bauru. In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14, Curitiba, *Anais*, 10 p.

- HAERTLE, T. 1983. Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps. In: UNESCO/IAH/IAHS, UNESCO INTERNATIONAL SYMPOSIUM: GROUNDWATER IN WATER RESOURCES PLANNING, Koblenz, Proceedings, 2: 1073-1085.
- HIRATA, R. 2000. Estudo da contaminação por nitrato no Distrito de Tibiriçá, Bauru. DAE/IGc-USP, São Paulo, 2 v. (Relatório técnico).
- HIRATA, R.; FERNANDES, A.J. 2008. Vulnerabilidade à poluição de aquíferos. In: A.C.F.A.C. Feitosa, J. Manoel Filho, E.C. Feitosa, J.G. Demétrio (coords.) Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Rio de Janeiro, CPRM/LABHID, p. 405-427. (3ª ed. revisada e ampliada).
- IG – INSTITUTO GEOLÓGICO/CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO /DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1997. Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. IG/CETESB/DAEE, São Paulo, 2 v.
- LE GRAND, H. 1964. System for evaluating contamination potential for some waste sites. *American Water Work Association Journal*, 56(8): 959-974.
- MALDANER, C.H. 2010. Recarga de aquífero em área urbana: estudo de caso de Urânia (SP). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 101 p.
- MANCUSO, M.A.; CAMPOS, J.E. 2005. Aquífero Bauru. In: G. Rocha (coord.) Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. São Paulo, DAEE/IG/IPT/CPRM, p. 30-38.
- NRC – NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1993. Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. Washington DC, National Academy Press, 204 p.
- PAULA E SILVA, F. 2003. Geologia de superfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Doutorado, 201 p.
- PAULA E SILVA, F.; CAVAGUTI, N. 1994. Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na cidade de Bauru – SP. *Revista Geociências*, 13(1): 83-99.
- PONTES, C.H.C.; LASTORIA, G.; PARANHOS FILHO, A.C.; GABA, S.G.; OLIVEIRA, P.T.S. 2009. Determinação da vulnerabilidade do aquífero basáltico no Campus da UFMS, em Campo Grande – MS. *Águas Subterrâneas*, 23(1): 105-120.
- REGINATO, P.A.R.; AHLERT, S. 2013. Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. *Águas Subterrâneas*, 27(2): 32-46.
- RIBEIRO, L. 2000. SI: a new index of aquifer susceptibility to agricultural pollution. ERSHA/ CVRM, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 12 p. (Relatório Técnico).
- SALOMÃO, X.T.F. 1994. Processos erosivos lineares em Bauru (SP): regionalização cartográfica aplicada ao controle preventivo urbano e rural. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 200 p.
- SEADE – FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. 2012. Perfil municipal de Bauru. Disponível em <http://www.seade.gov.br/produtos/perfil/perfilMunEstado.php>. Acessado em 07 dez. 2012.
- SILVA, R.S. 2009. Caracterização hidrogeoquímica dos sistemas aquíferos Bauru e Guarani no município de Bauru. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Dissertação de Mestrado, 115 p.
- STRADIOTO, M.R.; CHANG, H.; PAULA E SILVA, F.; SILVA, S.R. 2011. Nitrato nas águas subterrâneas dos sistemas aquíferos Bauru e Guarani, área urbana de Bauru – SP. In: ABAS, CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO, 2, São Paulo, *Anais*, 4 p.
- TALTASSE, P. 1972. Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município

de Campinas (SP). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Publicação Avulsa, n. 1, 4 mapas, 12 p.

VARNIER, C.; IRITANI, M.A.; VIOTTI, M.; ODA, G.H.; FERREIRA, L.M.R. 2012. Relación entre la urbanización y la contaminación por nitrato en el Sistema Acuífero Bauru

(Ciudad de Bauru, Brasil). In: ALHSUD, CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDROGEOLOGÍA, 11, Cartagena de Indias, *Anais*, 5 p.

VRBA, J.; ZAPOROZEC, A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Heinz Heise Verlag, Hannover, 131 p.

Endereço dos autores:

Mirella Rosenberger – Rua Verbo Divino, 1061, apto 51-B, Torre 7, Granja Julieta, CEP: 04719-002, São Paulo, SP, Brasil. *E-mail:* mirella.rosenberger@gmail.com

Claudia Varnier, Mara Akie Iritani, Luciana Martin Rodrigues Ferreira e Geraldo Hideo Oda – Instituto Geológico, Secretaria de Estado do Meio Ambiente/SP, Rua Joaquim Távora, 822, Vila Mariana, CEP: 04015-001, São Paulo, SP, Brasil. *E-mails:* clvarnier@hotmail.com, mara.iritani@igeologico.sp.gov.br, lucianamartinrferreira@gmail.com, ghoda1947@gmail.com

Maurício Viotti Cavalin – Arcadis Logos, Rua Líbero Badaró, 377, Centro, CEP: 01009-000, São Paulo, SP, Brasil. *E-mail:* mauricio.cavalin@arcadislogos.com.br

Artigo submetido em 24 de março de 2014, aceito em 17 de julho de 2014.