

ESTIMATIVA DA VULNERABILIDADE NATURAL DO AQUÍFERO LIVRE NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO/SP

ESTIMATION OF NATURAL VULNERABILITY OF
THE UNCONFINED AQUIFER IN RIO CLARO/SP

NATÁLIA ZANETTI

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente – IGCE, Av. 24-A, 1515, 13500-230, Rio Claro, SP, Brasil. Tel.: (19) 3524-9562; Fax: (19) 3526-9446 – E-mail: nataliaza@gmail.com.

ANTONIO CELSO DE OLIVEIRA BRAGA

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Departamento de Geologia Aplicada – IGCE, Av. 24-A, 1515, 13500-230, Rio Claro, SP, Brasil. Tel.: (19) 3526-2803; Fax: (19) 3534-0327 – E-mail: acobraga@rc.unesp.br.

FERNANDO ACÁCIO MONTEIRO DOS SANTOS

Universidade de Lisboa – UL, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia – FCUL, Edifício C8, Campo Grande, 1749-016, Lisboa, Portugal. Tel./Fax: (351) 21 750 08 11 – E-mail: fasantos@fc.ul.pt

RESUMO ABSTRACT

O presente trabalho mostra mapas de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas obtidos por meio da aplicação dos métodos GOD e DRASTIC voltados para o aquífero livre no município de Rio Claro/SP. A vulnerabilidade natural do aquífero foi determinada considerando informações como grau de confinamento, litologia e profundidade não saturadas, recarga e material do aquífero, topografia e condutividade hidráulica. Dados secundários resultantes de ensaios geofísicos que utilizaram a técnica da sondagem elétrica vertical (SEV) permitiram a caracterização da litologia da Formação Rio Claro, além da estimativa da condutividade hidráulica da região a partir da equação de Kozeny-Carman-Bear dada por Domenico e Schwartz (1990). A aplicação do método GOD demonstra que a área de estudo é altamente vulnerável, já o método DRASTIC apresenta áreas de baixa e moderada vulnerabilidade. Com a normalização das escalas, ambos os métodos apresentaram resultados similares, no entanto o método DRASTIC é mais indicado, visto que considera mais parâmetros e possui menor margem de erro.

Palavras-chave: água subterrânea, mapeamento, estimativa, GOD, DRASTIC.

This paper presents vulnerability maps for groundwater contamination obtained by applying the GOD and DRASTIC methods focused on unconfined aquifers in Rio Claro/SP. The natural aquifer vulnerability was measured based on information such as degree of confinement, lithology and depth above saturated zone, recharge and aquifer material, topography and hydraulic conductivity. Secondary data derived from geophysical survey using vertical electrical sounding (VES) technique allowed the characterization of the Rio Claro Formation lithology, and estimate hydraulic conductivity in the region from Kozeny-Carman-Bear equation from Domenico and Schwartz (1990). The results from GOD method show that the study area is highly vulnerable, while DRASTIC method has low and moderate vulnerability areas. With the normalization of scales, both methods showed similar results, however DRASTIC method is most suitable, since it considers more parameters and has low margin for error.

Keywords: groundwater, map, estimation, GOD, DRASTIC.

1 INTRODUÇÃO

A vulnerabilidade de um aquífero significa a maior ou menor suscetibilidade de ser atingido por uma carga poluidora.

A fim de subsidiar o planejamento adequado do uso e a ocupação do solo nas cidades, bem como da utilização dos recursos naturais, em especial dos recursos hídricos, é importante conhecer as condições regionais de sensibilidade ambiental. Assim, prever possíveis áreas mais sensíveis à contaminação é tarefa de grande valia, já que permite o direcionamento de recursos financeiros e tempo na priorização das investigações em áreas mais frágeis.

A qualidade das águas subterrâneas assim como das superficiais é reflexo não apenas dos processos naturais, como também das formas de apropriação e exploração do espaço. É comum encontrar centros urbanos e/ou industriais localizados em margens ou nas proximidades de rios que dizem respeito à fonte de abastecimento de água e de deposição de rejeitos.

Dentre os diversos métodos que visam a determinação da vulnerabilidade natural dos aquíferos, destaca-se o método GOD (FOSTER & HIRATA, 1988). Bastante utilizado no Brasil e de aplicação simples e sistemática, considera três parâmetros básicos em sua análise. Este método tem sido um dos mais utilizados na América Latina e Caribe, a partir dos anos 90, por causa de sua simplicidade de conceitos e aplicação e é tido como um primeiro passo na avaliação de áreas prioritárias de ação. As informações necessárias estão quase sempre disponíveis em estudos básicos de hidrogeologia regional.

No entanto, a avaliação proporcionada pelo método GOD deve ser considerada como aproximada, visto que não considera outros fatores determinantes da vulnerabilidade natural de aquíferos. A fim de incrementar essa análise, a presente pesquisa utilizou o método DRASTIC, bastante difundido na atualidade e desenvolvido por Aller et al. (1987).

O presente trabalho objetivou estabelecer instrumentos de gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, na forma de mapeamento da vulnerabilidade à contaminação do aquífero livre ocorrente no município de Rio Claro (SP) por meio dos métodos GOD e DRASTIC. Para tanto, procedeu-se a reunião de dados hidrogeológicos, geológicos e de uso e ocupação do solo no domínio da Formação Rio Claro visando ainda avaliar a aplicabilidade da geofísica na geração de dados pertinentes em estudos de vulnerabilidade.

1.1 Área de Estudo

O município de Rio Claro, figura 1, situado a 175 quilômetros da capital paulista, possui

aproximadamente 188.000 habitantes em uma área de 498 km² (SEADE, 2011). A densidade demográfica municipal equivale a 377,51 habitantes por quilômetro quadrado e o grau de urbanização (percentual da população residente em áreas urbanas) é de 97,57%.

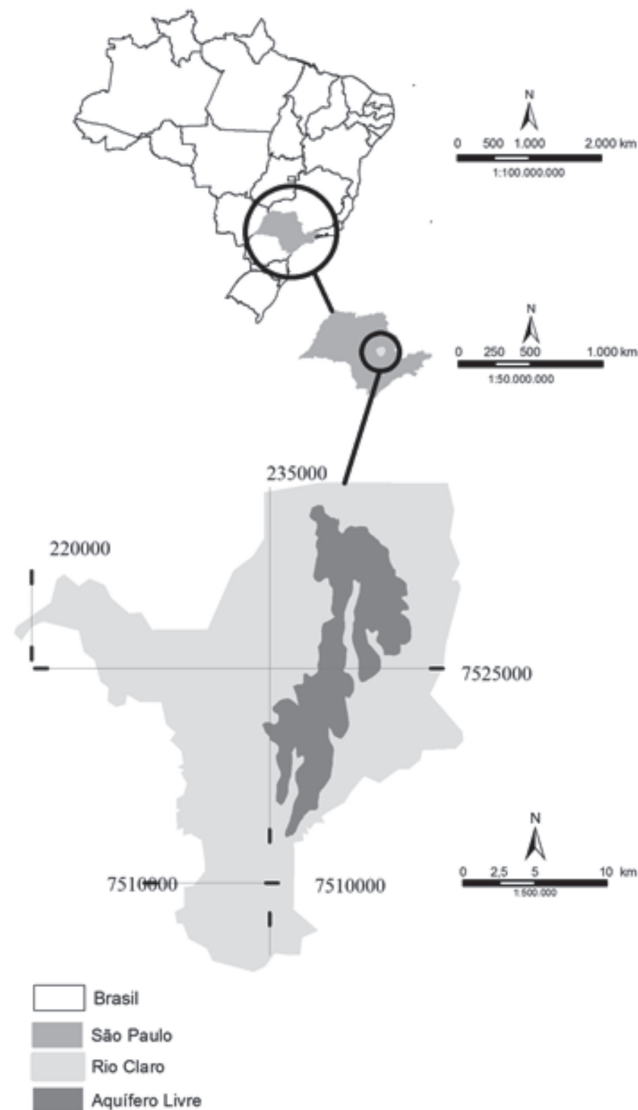


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo

Rio Claro está localizado na Bacia do Rio Corumbataí, que faz parte da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI 05), composta pelas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá, denominada Bacias PCJ.

A bacia hidrográfica do rio Corumbataí está situada na porção nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, na Depressão Periférica Paulista, centro-leste do Estado de São Paulo, em área de afloramento de rochas paleozóicas (Grupo Itararé, Formação Tatuí e Grupo Passa Dois - Formações

Irati e Corumbataí), mesozóicas (Formação Pirambóia, Grupo São Bento – Formações Botucatu e Serra Geral, rochas magmáticas intrusivas – diques e soleiras e Formação Itaqueri) e cenozóicas (Formação Rio Claro) (PERINOTTO & LINO, 2012).

A Formação Rio Claro apresenta como características marcantes: fraca litificação e profunda alteração pedogenética, espesso solo arenoso e domínio de litotipos arenosos, esbranquiçados amarelados e avermelhados, variando de areia fina a grossa, com intercalação de camadas de conglomerados e de sedimentos argilosos. A espessura máxima é da ordem de 40 m, predominando valores entre 25 e 30 m (ZAINE, 1994).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O método de trabalho adotado compreendeu a definição de parâmetros necessários e aplicação de procedimentos para determinar a vulnerabilidade de aquíferos.

2.1 Estimativa de Parâmetros Hidrológicos por meio do Método Geofísico da Eletrorresistividade

É essencial estimar as propriedades hidráulicas de um sistema aquífero de interesse a fim de se obter informações quantitativas a respeito do fluxo de água subterrânea e modelar o transporte de contaminantes (SOUPIOS et al., 2007). A maneira mais usual de obtenção dessas informações, tais como condutividade hidráulica e coeficiente de transmissividade, é por intermédio de testes de bombeamento e experimentos em laboratório, quando se dispõe de amostras.

Essa maneira de avaliar os parâmetros hidráulicos pode não ser a mais viável em alguns casos por motivos como o fator financeiro e a dificuldade de local ou perfurar os poços. O arranjo espacial pode significar problemas na elaboração do modelo hidrogeológico, pois em muitos casos é necessário perfurar mais poços do que inicialmente havia sido previsto, o que eleva os custos e pode atrasar os trabalhos. Assim, a aplicação de métodos geofísicos combinados com os testes de bombeamento oferece uma alternativa eficiente para estimar parâmetros físicos de aquíferos.

A fim de auxiliar os estudos ambientais em uma etapa preliminar, é possível aplicar a uma determinada área, o método da eletrorresistividade utilizando a técnica da sondagem elétrica vertical (arranjo Schlumberger), que apresenta como produtos principais (BRAGA, 2008):

- *Resistividade elétrica* dos materiais geológicos, que permite identificar as diferentes litologias e até obter uma correlação com a condutividade hidráulica (SHEVNIN et al., 2006; MAZAC et al., 1989);
- *O Parâmetro de Dar Zarrouk* denominado condutância longitudinal, o qual permite estimar a proteção dos aquíferos frente a contaminantes (BRAGA, 2006); e
- *Profundidade do nível d'água*, com a confecção de mapas de fluxo subterrâneo, importantes para determinar o caminho preferencial das águas subterrâneas e de prováveis contaminantes (OLIVEIRA et al., 2003).

Pertencente ao grupo dos métodos geoeletricos, a eletrorresistividade – ER, é um método geofísico cujo princípio está baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais que, juntamente com a constante dielétrica e a permeabilidade magnética, expressam fundamentalmente as propriedades eletromagnéticas dos solos e rochas (BRAGA, 2006).

Os mecanismos que controlam o fluxo dos fluidos e as correntes elétricas são geralmente regidos pelos mesmos parâmetros físicos e atributos litológicos, portanto pode-se dizer ainda que as condutividades hidráulica e elétrica são dependentes uma da outra (SOUPIOS et al., 2007).

Dessa maneira, dados resultantes da aplicação do método geofísico da eletrorresistividade podem ser utilizados de maneira a estimar outros parâmetros físicos do meio como a condutividade hidráulica por meio da equação de Kozeny–Carman–Bear.

Ao analisar dados obtidos com amostras parcialmente saturadas de água, Archie (1972) deduziu uma razão entre a resistividade da amostra parcialmente saturada (ρ_t) e a da amostra 100% saturada de água (ρ_0), como índice de resistividade (I_R). Os resultados experimentais mostram que I_R satisfaz uma relação da forma (equação 1):

$$I_R = \frac{1}{S_w^n} \rightarrow \frac{\rho_t}{\rho_0} = \frac{1}{S_w^n} \rightarrow S_w = \left(\frac{\rho_0}{\rho_t}\right)^{1/n} \quad (1)$$

onde I_R é o índice de resistividade, S_w a saturação em água, n o expoente de saturação, ρ_0 a resistividade elétrica da amostra 100% saturada e ρ_t a resistividade elétrica da amostra parcialmente saturada.

A expressão geral para a lei de Archie é dada pela equação (2):

$$\rho_t = \rho_w \cdot \phi^{-m} \cdot S_w^{-n} \rightarrow \phi = \left(\frac{\rho_w}{\rho_t S_w^n}\right)^{1/m} \quad (2)$$

onde ρ_t é a resistividade elétrica da amostra parcialmente saturada, ρ_w a resistividade elétrica da água, ϕ a porosidade, m o coeficiente de cimentação, S_w a saturação em água e n o expoente de saturação.

Dessa maneira, a partir de dados da porosidade obtida por meio da equação (2), pode-se estimar a condutividade hidráulica a partir da equação (3) de Kozeny-Carman-Bear, dada por Domenico e Schwartz (1990):

$$K = \left(\frac{\delta_w g}{\mu}\right) \cdot \left(\frac{d^2}{180}\right) \cdot \left[\frac{\phi^3}{(1-\phi^2)}\right] \quad (3)$$

onde K é a condutividade hidráulica estimada, em m/s, δ_w a densidade do fluido (água), em kg/m³, g a aceleração da gravidade, em m/s, μ a viscosidade - 0,0014 kg/m.s (FETTER, 1994), d o diâmetro médio dos grãos, em metros e ϕ a porosidade média, em %;

Foram selecionadas para a estimativa 20 Sondagens Elétricas Verticais (SEVs) realizadas por Oliva (2006) na Formação Rio Claro, que apresentaram resistividade elétrica da zona saturada inferior a 300 ohm.m, pois é o que se observa para sedimentos arenosos, caso do aquífero livre em Rio Claro. Foram considerados, ainda, dados referentes a outras 10 SEVs realizadas por Braga (1997) no município, totalizando 30 sondagens para a área de estudo.

Os valores de resistividade elétrica das zonas saturada e não saturada foram inseridos em uma planilha Excel (MICROSOFT CORPORATION, 2007) com suas respectivas coordenadas

geográficas. Além dessas, foi inserida uma variável denominada diâmetro médio dos grãos, cujos valores foram obtidos por meio das análises granulométricas realizadas por Oliva (2002). Com isto, foi possível levantar o diâmetro médio dos grãos correspondentes a 16 pontos com dados de resistividade. Como existem 14 outros pontos de análise e as medidas granulométricas dos grãos tiveram pequena variação, foi adotado o diâmetro médio de 0,00033 m ou 0,33 mm, correspondente a materiais com granulometria de areia fina a média (ABNT, 1995).

Assim, foi possível aplicar aos dados obtidos a equação de Kozeny-Carman-Bear, de acordo com Domenico e Schwartz (1990).

As equações foram inseridas em uma planilha Excel (MICROSOFT CORPORATION, 2007), onde foi calculada a condutividade hidráulica de todos os pontos selecionados com valores de resistividade elétrica.

2.2 Método GOD

O método GOD (Groundwater hydraulic confinement; Overlaying strata; Depth to groundwater table) proposto por Foster & Hirata (1988) considera a avaliação de três parâmetros referentes à capacidade de atenuação e inacessibilidade hidráulica dos poluentes para a avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero.

Para produzir o mapa de vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas no aquífero livre em Rio Claro a partir desse método, foram gerados mapas específicos para cada um dos três parâmetros a serem avaliados. Assim, com o produto dos resultados parciais, é obtido o mapa com a variação de níveis de vulnerabilidade para a área de estudo.

Foram adotados os seguintes procedimentos metodológicos para obtenção dos valores para os parâmetros de interesse:

■ G - Grau de confinamento do aquífero

A área de estudo contempla nos seus limites apenas o aquífero livre, pois a mesma corresponde ao município de Rio Claro. Dessa maneira, o índice GOD correspondente para aquíferos não confinados é igual a 1.

- O – Características da zona não saturada (litologia e grau de consolidação)

O contexto hidrogeológico do município de Rio Claro é representado por dois sistemas principais de águas subterrâneas, sendo um deles o aquífero livre, pouco profundo, constituído pelos materiais pouco consolidados da Formação Rio Claro (COTTAS, 1983). E ainda, essa Formação apresenta como característica marcante a existência de espesso solo arenoso e domínio de litotipos arenosos.

O índice adotado para o parâmetro O foi 0,7. Para a geração do mapa correspondente, houve conversão do polígono de delimitação do aquífero livre no ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006) em raster a partir da ferramenta *feature to raster* do módulo *Conversion tools*.

- D – Profundidade do nível d'água subterrânea.

Na área existem pontos com profundidades relacionadas a 3 índices do método GOD (OLIVA, 2002): menor que 5 metros (índice 1,0), de 5 a 20 metros (índice 0,8) e de 20 a 50 metros (índice 0,6).

A partir das informações disponíveis para cada poço, foi utilizado um método interpolativo do SIG ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006) para determinar as áreas de influência dos poços, determinada *Interpolate to Raster* do módulo *Spatial Analyst*, onde a opção *Inverse Distance Weighted (IDW)* foi selecionada. O método IDW corresponde à interpolação

$$\text{DRASTIC} = D_p \times D_i + R_p \times R_i + A_p \times A_i + S_p \times S_i + T_p \times T_i + I_p \times I_i + C_p \times C_i \quad (4)$$

onde D, R, A, S, T, I e C são os parâmetros considerados, p é o peso atribuído a cada parâmetro e i o índice atribuído ao elemento.

A fim de gerar o mapa de vulnerabilidade do aquífero livre de Rio Claro a partir do método DRASTIC, mapas específicos para cada um dos sete parâmetros considerados foram produzidos. Os procedimentos metodológicos adotados para a conclusão desta etapa foram os seguintes:

- D – Profundidade da zona não saturada

Esse parâmetro é o mesmo considerado no método GOD, onde também é denominado "D",

entre cada ponto como uma influência local, diminuindo à medida que a distância entre os pontos aumenta.

Após a elaboração desse mapa, foi realizada a conversão dos intervalos de profundidade em índices específicos determinados pela metodologia para o parâmetro D, por meio da ferramenta *Reclassify* do módulo *Spatial Analyst* do software já citado.

Concluídos os mapas específicos para cada parâmetro, o produto dos índices encontrados: $G \times O \times D$ foi efetuado a partir da ferramenta *Raster Calculation* do módulo *Spatial Analyst* no SIG ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006), e obtido o mapa de vulnerabilidade a partir do método GOD.

2.3 Método DRASTIC

No método DRASTIC, proposto por Aller et al. (1987) o índice de vulnerabilidade corresponde ao somatório ponderado de sete parâmetros ou indicadores hidrogeológicos, que procuram sistematizar a determinação do potencial do poluente em alcançar a zona saturada.

Cada parâmetro recebe um índice correspondente às características do meio estudado, e esse é multiplicado por seu peso equivalente, como demonstra a equação (4). Finalmente, com a soma dos valores obtidos para cada parâmetro, é obtido o valor do índice de vulnerabilidade pontual.

mas com diferentes índices atribuídos. Primeiro porque o método GOD atribui a este parâmetro pesos que variam de 0,4 a 1 e o método DRASTIC de 1 a 10. E segundo, os intervalos de profundidade onde variam os índices também são diferentes.

As profundidades encontradas na área de estudo estão enquadradas em 5 diferentes índices: de 1,5m a 4,6m (índice 9), de 4,6m a 9,1m (índice 7), de 9,1m a 15,2m (índice 5), de 15,2m a 22,9m (índice 3) e de 22,9m a 30,5m (índice 2).

Para tanto, foi utilizada a ferramenta *Interpolate to Raster* do módulo *Spatial Analyst* (opção *Inverse Distance Weighted - IDW*). Após a elaboração

desse mapa, os intervalos de profundidade foram convertidos em índices específicos, determinados pela metodologia para o parâmetro D com a ferramenta *Reclassify* do módulo *Spatial Analyst* do software ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006).

■ R - Recarga do aquífero

Seguindo o conceito fundamental de que a água subterrânea é uma componente indissociável do ciclo hidrológico, sua disponibilidade no aquífero está relacionada diretamente com o escoamento básico da bacia de drenagem instalada na sua área de ocorrência. Sendo assim, a água subterrânea constitui uma parcela desse escoamento que, por sua vez, corresponde à recarga transitória do aquífero.

No caso dos aquíferos livres, a recarga média multianual ou ainda o potencial renovável de água subterrânea de uma bacia, corresponde ao volume de água que é drenado pelos rios na forma de seu escoamento básico (CRH, 1999).

Estudos realizados pelo DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) a fim de determinar a reserva explotável passível de outorga vêm relacionando o escoamento básico dos rios, escoamento subterrâneo, ao escoamento de aquíferos livres. A curva de permanência relaciona as vazões em uma bacia com a porcentagem de tempo em que elas serão igualadas ou superadas. Esta relação foi obtida por intermédio do método de regionalização do SIGRH (DAEE), que tem como base séries históricas de vazões com caráter probabilístico. A partir desta curva é possível obter a vazão com 95% de permanência, mais conhecida como Q95%.

Como Q95% equivale a 7,773m³/s, segundo a curva de permanência, transformando-se esta vazão segundo os índices DRASTIC de recarga, é obtido para a área do aquífero livre de Rio Claro, pertencente à bacia do Rio Corumbataí (1679,19km²), que a recarga é de 145,98 mm/ano. Este valor corresponde ao índice 6, que foi adotado para toda a área de estudo.

■ A - Material do aquífero

Fúlfaro e Suguio (1968) identificaram na Formação Rio Claro duas sequencias principais: a basal, com 20 m de espessura máxima que apresenta sucessão de estratos arenosos com intercalações

subordinadas de leitos argilosos; e a superior, constituída predominantemente por sedimentos argilosos, com brechas intraformacionais e lentes arenosas subordinadas.

O método adotado indica para arenitos, calcários e argilitos estratificados índices entre 5 e 9 e aponta o índice típico 6, no entanto ressalta que ambientes arenosos com quantidade considerável de sedimentos finos podem ter índice 7 atribuído ao parâmetro A.

O mapa de delimitação da Formação Rio Claro foi convertido para o formato raster através da ferramenta *Polygon to Raster* do módulo *Conversion Tools*, que então recebeu a atribuição de peso 7, conforme o índice adotado.

■ S - Tipo de solo

O mapeamento pedológico realizado por Prado et al. (1981), mostra que no município de Rio Claro ocorrem basicamente três tipos de solos: podzólico vermelho-amarelo, latossolo vermelho-amarelo e latossolo roxo. No entanto, para a área do aquífero livre, foco desta avaliação, ocorre especialmente o latossolo vermelho-amarelo, que atinge profundidades máximas de 10 a 12 m e corresponde ao solo de alteração da Formação Rio Claro.

De acordo com Ferreira (2005), para os perfis de solo da Formação Rio Claro analisados em seu trabalho, a parte mais superficial do terreno é constituída de material arenoso, o que determinou a adoção do índice DRASTIC no valor de 9 para este parâmetro.

■ T - Topografia

Este parâmetro tem o objetivo de avaliar a interferência dos declives do terreno na área de estudo. A base do mapa é uma imagem SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) gerado pela Agência Espacial Norte Americana (NASA) em 2000, que possui informações de um modelo digital de elevação do terreno. A base de dados é disponibilizada no Brasil pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Para transformar a base digital de elevação no mapa de declives, utilizou-se a ferramenta *Surface Analysis* do módulo *Spatial Analyst*, com a opção *Slope*. Com isto, o mapa de declividade do terreno foi reorganizado em intervalos correspondentes aos índices de T determinados pelo método.

■ I - Impacto da zona não saturada

Como descreveu Zaine (1994), a Formação Rio Claro apresenta como características marcantes: fraca litificação e profunda alteração pedogenética, espesso solo arenoso e domínio de litotipos arenosos, esbranquiçados amarelados e avermelhados, variando de areia fina a grossa, com intercalação de camadas de conglomerados e de sedimentos argilosos. Dessa forma, foi adotado o índice típico 6 para este parâmetro.

■ C - Condutividade hidráulica

Esse índice corresponde à quantidade de água que passa através dos poros do aquífero livre e foi obtido de duas maneiras: a primeira, por meio de dados experimentais disponíveis em Oliva (2002) e a segunda por intermédio da estimativa de parâmetros hidrológicos utilizando-se métodos geofísicos.

Seguindo a mesma lógica do índice D, foi elaborado para a condutividade hidráulica, um mapa com as áreas de influência dos pontos considerados usando a ferramenta *Interpolate to Raster* do módulo *Spatial Analyst*, onde a opção *Inverse Distance Weighted (IDW)* é selecionada. Posteriormente, os intervalos de condutividade foram reordenados para terem relação com os índices propostos pela metodologia, por meio da ferramenta *Reclassify* do módulo *Spatial Analyst* do software ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006).

Com os mapas individuais contendo os valores dos índices determinados pelo método, a etapa seguinte consistiu na multiplicação dos mesmos por seus respectivos pesos. Para realizar esse cálculo, foi utilizado o software ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006), aplicando-se a ferramenta *Weighted Sum* do módulo *Spatial Analyst (Overlay)* e assim obtido o mapa de vulnerabilidade a partir do método DRASTIC. Essa ferramenta permite, também, a atribuição de pesos e importância relativa aos mapas e a combinação de múltiplos fatores, possibilitando uma análise integrada.

3 RESULTADOS

3.1 Parâmetros Hidrológicos

Os parâmetros hidrológicos calculados a partir dos dados de resistividade dos ensaios de sondagens elétricas verticais forneceram valores coerentes aos observáveis em ambientes arenosos, como é o caso da Formação Rio Claro.

O número de ensaios geofísicos realizados por Oliva (2006) e selecionados para esse cálculo é maior que o número de pontos com informações de condutividade hidráulica (K) obtidas em campo por Oliva (2002) (Figura 2).

Na parte central da área não há divergência de resultados, embora haja deficiência de dados de campo a nordeste, algo que inviabiliza a comparação. No entanto, é notável que na parte sudeste da área de ocorrência do aquífero livre, os índices de condutividade hidráulica calculados são mais elevados, apesar de haver também no primeiro mapa uma tendência de elevação dos valores desse parâmetro nessa região. As maiores diferenças são observadas a sudoeste e no norte da área de ocorrência da Formação Rio Claro.

É preciso ressaltar que os dois métodos de obtenção da condutividade hidráulica avaliam esse parâmetro hidrológico a diferentes profundidades. De acordo com Oliva (2006), os resultados obtidos pelo método Guelph forneceram valores que prevaleceram entre $1,96 \times 10^{-3}$ cm/s e $3,9 \times 10^{-3}$ cm/s, e textura variando de arenosa a silto-arenosa, mostrando pequena variação faciológica na zona não saturada a aproximadamente 0,50 m de profundidade, na escala de município.

No caso dos valores de K obtidos através dos cálculos efetuados em função das resistividades obtidas pelas SEVs, foi considerada toda a espessura da zona não saturada. Essa análise forneceu valores na faixa de $1,53 \cdot 10^{-3}$ cm/s e $8,04 \cdot 10^{-2}$ cm/s. É necessário realçar que em termos de avaliação da vulnerabilidade do aquífero livre, o ideal é considerar toda a camada sobreposta à zona saturada.

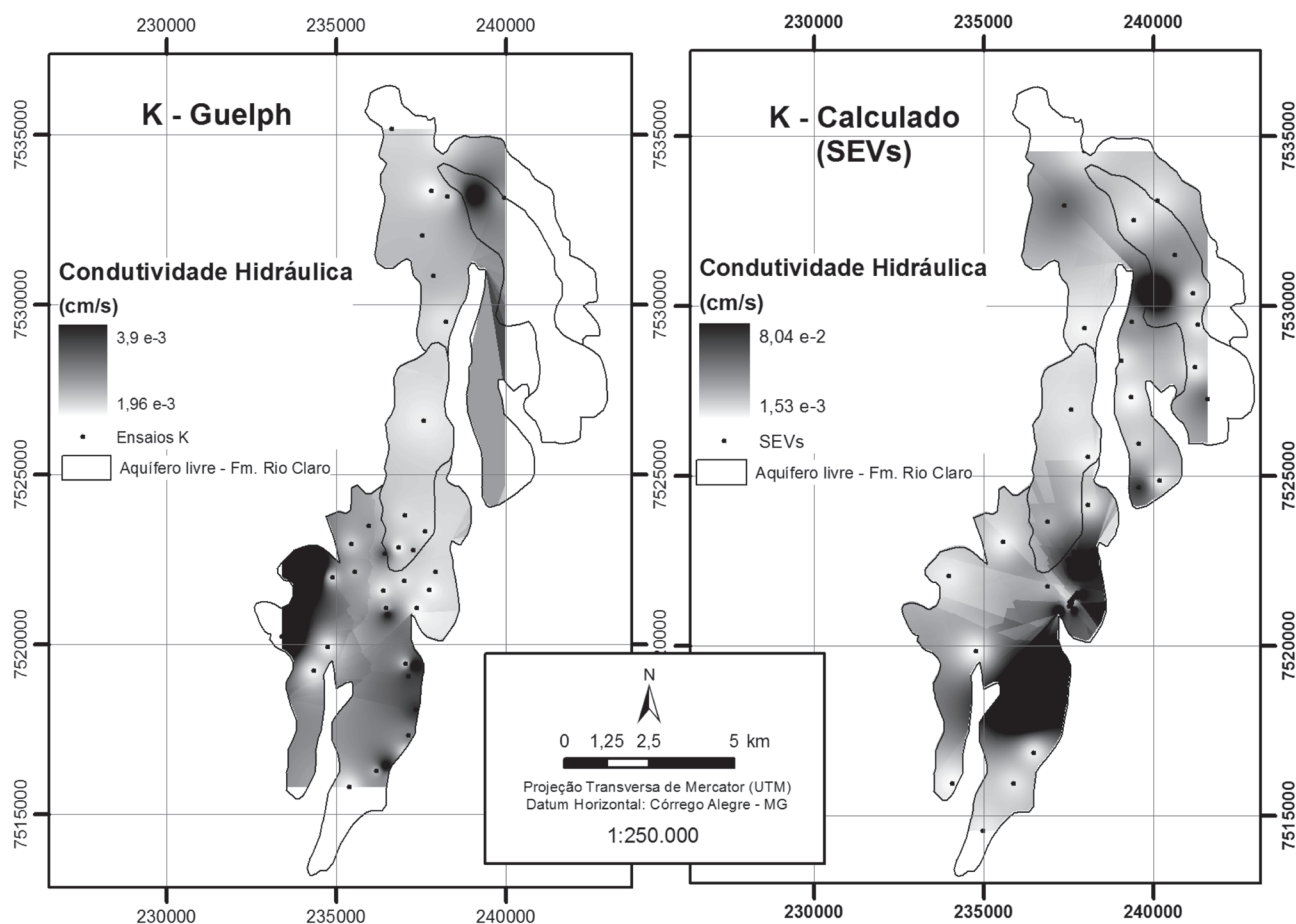


Figura 2 – Mapas de comparação entre a condutividade hidráulica medida (método Guelph) e calculada (equação Kozeny-Carman-Bear) para o aquífero livre na Formação Rio Claro

A condutividade hidráulica de um meio representa as condições de circulação de fluidos que ocorrem na área, o que está diretamente relacionado à vulnerabilidade aos processos de contaminação. Assim, solos que tendem a ser condutivos e permeáveis tendem a ser tecnicamente mais vulneráveis a esses processos.

3.2 Mapeamento da Vulnerabilidade - Método GOD

O mapa síntese dos três parâmetros avaliados pelo método GOD resultou em uma avaliação

muito homogênea para a área de estudo. Grande parte do aquífero livre recebeu classificação de alta vulnerabilidade, com pequenos trechos denominados médios e extremamente vulneráveis.

O resultado da multiplicação das variáveis é coerente, pois corresponde com a avaliação efetuada por IG/CETESB//DAEE (1997) e publicada pela Resolução SMA 014 de 05/03/2010, que caracteriza o aquífero livre no município de Rio Claro como altamente vulnerável (Figura 3).

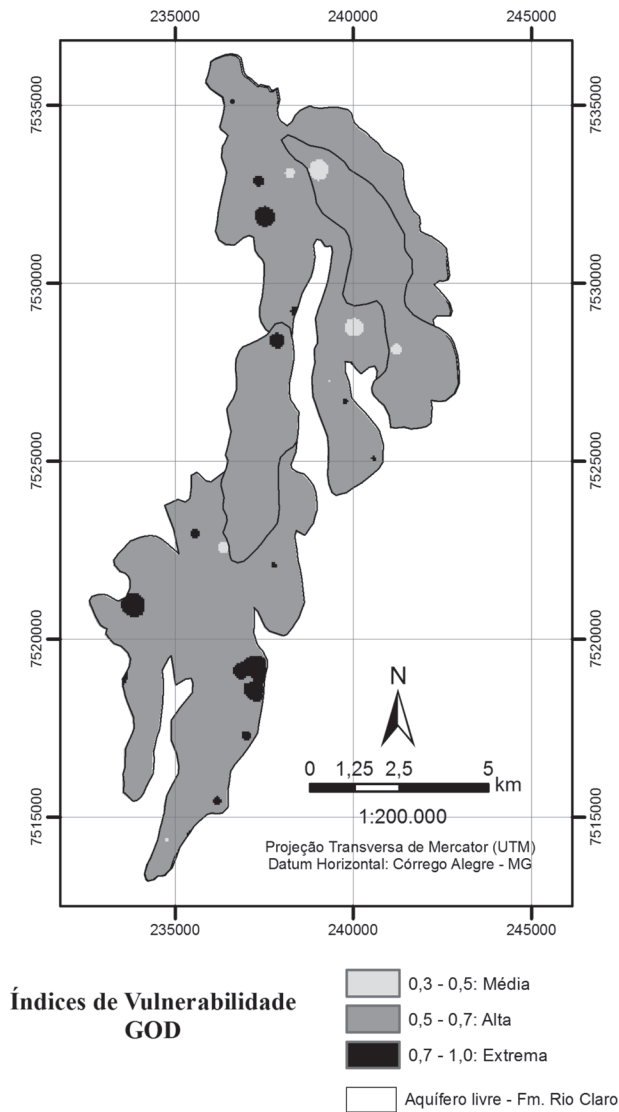


Figura 3 - Mapa de vulnerabilidade do aquífero livre na Formação Rio Claro resultante da utilização do método GOD

3.3 Mapeamento da Vulnerabilidade - Método DRASTIC

O mapa síntese dos sete parâmetros considerados no método DRASTIC é apresentado na figura 4. A maior parte da área do aquífero livre recebeu classificação de baixa e moderada vulnerabilidade, com algumas porções de muito baixa e alta.

A caracterização da vulnerabilidade obtida por este método é menos generalista que a obtida pelo método GOD, pois considera em sua avaliação parâmetros que permitem representar melhor a variabilidade das características naturais na extensão da área de estudo.

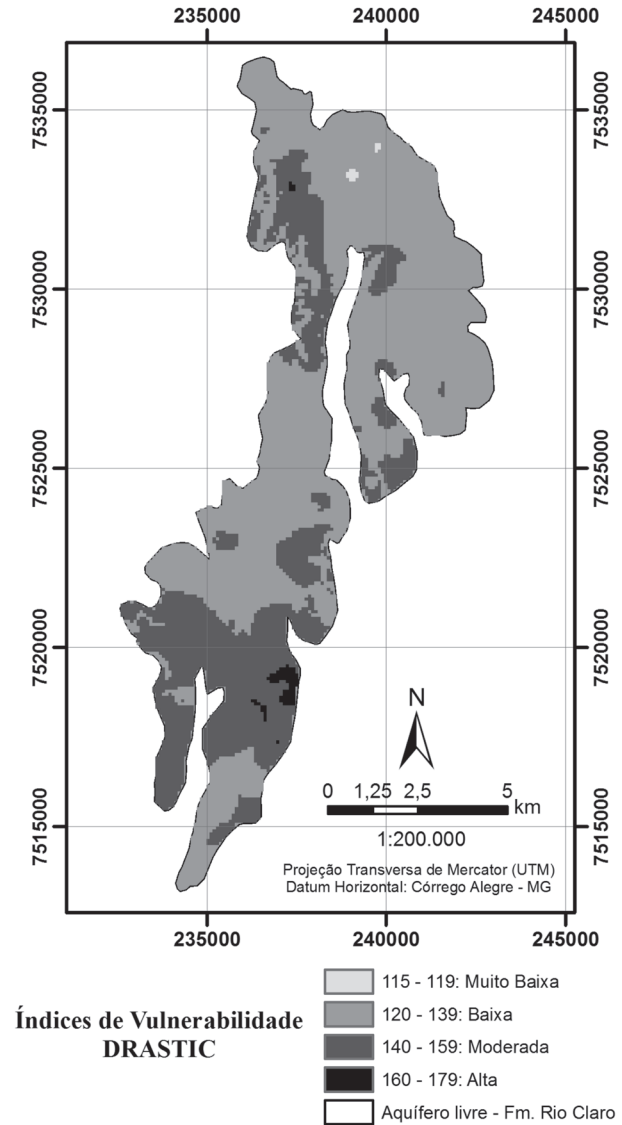


Figura 4 - Mapa de vulnerabilidade do aquífero livre na Formação Rio Claro resultante da utilização do método DRASTIC

Quanto maior o índice DRASTIC, maior o perigo potencial de poluição da água subterrânea em um cenário de ameaça. Este índice indica um valor numérico relativo, que pode ser facilmente comparado a um valor obtido para outra configuração quer na mesma região, ou em uma região diferente. Um valor numérico isolado não tem qualquer significado intrínseco, só tem valor quando comparado aos índices DRASTIC gerados para outras áreas.

3.4 Comparação dos Resultados – GOD x DRASTIC

A fim de comparar os resultados obtidos pelos métodos DRASTIC e GOD, a escala do primeiro,

que varia de 23 a 226, foi normalizada para correspondência com a do índice GOD, de 0 a 1. A normalização foi realizada pela divisão de cada índice DRASTIC pelo valor máximo dos elementos (Figura 5).

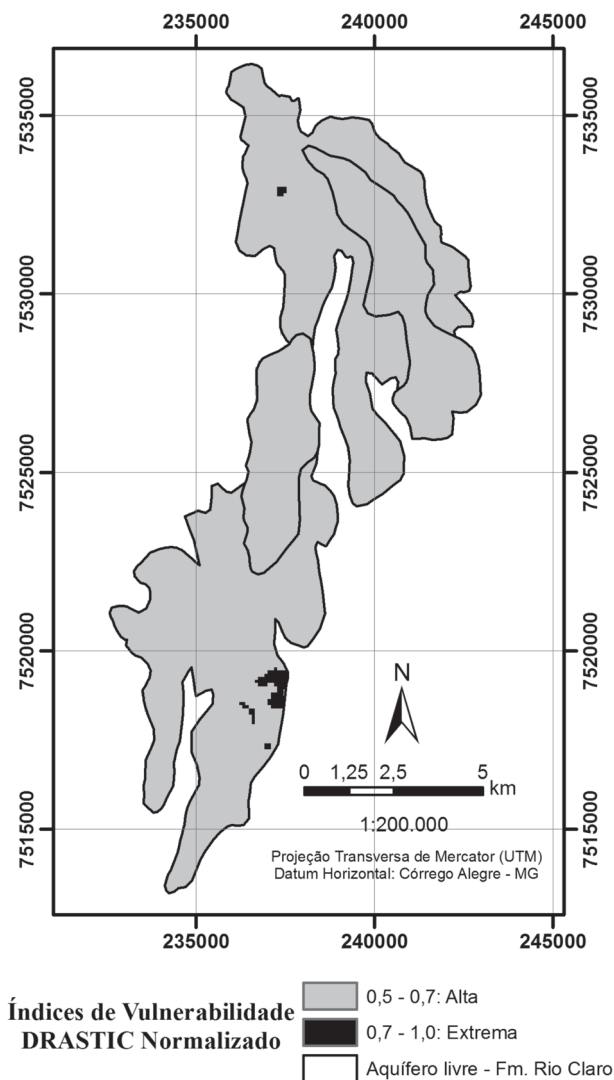


Figura 5 – Mapa de vulnerabilidade do aquífero livre na Formação Rio Claro resultante da utilização do método DRASTIC com escala normalizada

Os mapas finais GOD e DRASTIC normalizados apresentam forte semelhança. Ambos definem a maior parte do aquífero livre de Rio Claro como altamente vulnerável, o que de acordo com Foster & Hirata (1988) significa que essa área é vulnerável a muitos contaminantes sob várias condições de contaminação.

Entretanto, com a observação do mapa DRASTIC sem normalização de escala, a área de estudo é dividida especialmente entre zonas de baixa

e moderada vulnerabilidade, sendo a moderada concentrada em áreas onde a espessura da camada não saturada é menor. Esta característica aponta a diferença de precisão entre os dois métodos.

Para o método DRASTIC é possível verificar, no interior da área de ocorrência do aquífero livre, zonas com diferentes índices de vulnerabilidade bem distribuídos, enquanto que o resultado da aplicação do método GOD oferece um mapa menos detalhado, ou seja, por considerar menos parâmetros em sua avaliação, resulta em um mapa mais genérico, onde mais de 90% da área de estudo apresenta índice único.

4 CONCLUSÕES

Os métodos GOD e DRASTIC são eficientes na elaboração de mapas de vulnerabilidade dos aquíferos. São importantes ferramentas a serem utilizadas principalmente pela administração pública, a fim de auxiliar na decisão dos tipos de empreendimentos ou atividades a serem implantadas em cada zona de um município, ou ainda direcionar onde preferencialmente certas atividades podem ser desenvolvidas.

A aplicação do método GOD resultou num mapa muito homogêneo, com a maior parte da área com índice 0,56, que caracteriza a área de alta vulnerabilidade.

A aplicação do método DRASTIC resultou num mapa que define a área de estudo especialmente como de vulnerabilidade moderada e baixa, sendo que as zonas de maior vulnerabilidade estão localizadas onde ocorrem menores espessuras da zona não saturada.

A comparação dos produtos obtidos pelos métodos GOD e DRASTIC permite distinguir claramente o grau de detalhe resultante de cada uma deles. Enquanto o primeiro considera em sua avaliação somente três parâmetros, o método DRASTIC engloba sete, o que torna a análise mais detalhada, visto que quanto maior o conhecimento da área estudada, melhor a previsão do comportamento do subsolo frente a possíveis fontes contaminantes.

Apesar de ambas as metodologias apresentarem classificações distintas para a área, suas escalas de avaliação são diferentes, e após a normalização da escala DRASTIC para uma escala de 0 a 1, como

nos índices GOD, os dois mapas-síntese ofereceram a mesma resposta de avaliação: alta vulnerabilidade para a praticamente toda a área.

O método GOD representa uma análise mais simples e sistemática, que pode fornecer resultados satisfatórios quando na ausência de dados disponíveis, embora haja possíveis margens de erro por desconsiderar importantes parâmetros em sua avaliação. Contudo é indicada a aplicação do método DRASTIC na existência de dados suficientes.

A utilização de dados de resistividade elétrica resultantes de SEVs podem apresentar algumas vantagens como os custos relativamente baixos, possibilidade de avaliar grandes áreas de maneira rápida e com precisão satisfatória, além da flexibilidade de investigações rasas ou profundas sem alterar as condições dos materiais envolvidos. Essas qualidades, aliadas ao baixo custo e precisão dos modelos matemáticos utilizados, fornecem uma solução viável para a avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio fornecido pela Pró-Reitoria de Pós-Graduação e a oportunidade de participação do primeiro autor no Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente da Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, bem como o estágio realizado no Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia da Universidade de Lisboa.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1995. NBR ISO 6502/1995 - Rochas e Solos. Rio de Janeiro.

ALLER, L., Bennet T., Lehr J. H., Petty R. J. 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. EPA Report 600/2-85/018.

ARCHIE, G.E. 1942 (no texto cita 1972). The electrical resistivity as an AID in determining some reservoir characteristics. Petroleum Transactions of AIME. 54-62.

BRAGA, A.C.O. 1997. Métodos Geométricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica - Formações Rio Claro e Corumbataí, município de Rio Claro-SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, 169 p.

BRAGA, A.C.O. 2006. Métodos da Eletroresistividade e Polarização Induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. Tese de Livre-Docência, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, 121 p.

BRAGA, A.C.O. 2008. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal, São Paulo. *Rev. Bras. Geofísica*, 26: 61-69.

COTTAS, L.R. 1983. Estudos geológico-geotécnicos aplicados ao planejamento urbano de Rio Claro - SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 171 p.

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo. Disponível em: <http://sigrh.sp.gov.br>. Acesso em: fev. 2012.

CRH - Conselho Estadual de Recursos Hídricos. 1999. Relatório de situação dos recursos hídricos do Estado de São Paulo. Comitê Coordenador do Plano Estadual de Recursos Hídricos, 128 p.

DOMENICO, P.A., Schwartz, F.W. 1990. Physical and Chemical Hydrogeology. Wiley Press, 324 p.

ESRI, 2006. Environmental Systems Research Institute, ArcGIS Professional GIS for the desktop, version 9.2. Software.

FERREIRA, S. R. 2005. Análise pedoestratigráfica das Formações Rio Claro e Piraçununga no centro-leste do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. 157 p.

FETTER, C.W. 1994. Applied Hydrogeology. 3rd ed. Macmillan College Publishing, Inc., New York, 616 p.

- FOSTER, S.S.D., Hirata, R.C.A. 1988. Ground-water Pollution Risk: Assessment: a Methodology using Available data. Lima. In: World Health Organization. Pan American Health Organization. Centre for Sanitary Engineering and Environmental Sciences.
- FÚLFARO, V.J., Suguio, K. 1968. A Formação Rio Claro (Neocenoico) e seu ambiente de deposição. São Paulo. *Rev. do Instituto Geográfico e Geológico.*, 20: 45-60.
- IG, CETESB, DAEE. 1997. Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo. 157 p.
- MAZAC, O., Landa, L., Kelly, W.E. 1989. Surface geoelectrics for the study of ground water pollution: survey design. *Journal of Hydrology*, 111:163-176.
- MICROSOFT CORPORATION. Microsoft Office Excel. Estados Unidos. Software. 2007.
- OLIVA, A. 2002. Estudo hidrogeológico da Formação Rio Claro no município de Rio Claro – SP. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, 71 p.
- OLIVA, A. 2006. Estudo hidrofaciológico do aquífero Rio Claro no município de Rio Claro – SP. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, 196 p.
- OLIVEIRA, M.J., Souto F.A.F., Rosário, J.M.L., Sacasa R.J.V., Moura H.P. 2003. Vulnerabilidade natural e sazonal do aquífero livre no loteamento Marabaixo III – Macapá – AP. In: Simp. Hidrogeofísica.
- PERINOTTO, J.A., Lino, I.C. Geologia, recursos minerais e passivos ambientais. Citação de referencias e documentos eletrônicos. Disponível em: <http://ceapla.rc.unesp.br/atlas/atlas.html>> Acessado em 16 fev 2012.
- PRADO H., Oliveira J.B., Almeida, C.L. 1981. Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo - Quadrícula de São Carlos. Instituto Agrônomo de Campinas.
- SÃO PAULO. Resolução SMA nº 14 de 05 de março de 2010. Define as diretrizes técnicas para o licenciamento de empreendimentos em áreas potencialmente críticas para a utilização de água subterrânea. Secretaria de Meio Ambiente do estado de São Paulo.
- SEADE. Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. Perfil municipal de Rio Claro. Citação de referencias e documentos eletrônicos. Disponível em: <http://www.seade.gov.br/produtos/perfil/perfil.php>. Acessado em 21 maio 2011.
- SHEVNIN, V., Rodríguez, O.D., Mousatov, A., Ryjov, A. 2006. Estimation of hydraulic conductivity on Clay content in soil determined from resistivity data. *Geofísica Internacional*, 45(3): 195-207.
- SOUPIOS, P.M., Kouli, M., Vallianatos, F., Vafidia A., Stavroulakis G. 2007. Estimation of aquifer hydraulic parameters from surficial geophysical methods: A case study of Keritis Basin in Chania (Crete – Greece). *Journal of Hydrology*, 338: 122- 131.
- ZAINE J.E. 1994. Geologia da Formação Rio Claro na folha Rio Claro – SP. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, 90 p.