

| | |
|---|--|
| Recebido em: 02/12/2005 | <i>HOLOS Environment</i> , v.6 n.2, 2006 - P. 70 |
| Liberado para Publicação em: 30/06/2006 | ISSN:1519-8421 (CD-ROM) / ISSN:1519-8634 (ON-LINE) |

MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE NATURAL À POLUIÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS DE ARARAQUARA (SP)

MAPPING OF THE NATURAL VULNERABILITY TO POLLUTION OF GROUNDWATER IN ARARAQUARA (SP)

Meaulo, F. J.

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente da UNESP, Campus Rio Claro (SP) e Pesquisador da FORTGEO Geociências e Meio Ambiente Ltda ME. E-mail: meaulo@fortgeo.com.br, Rua 11, nº 2627, Sala 07– Rio Claro(SP), CEP 13500-240.

RESUMO

O crescimento desordenado dos centros urbanos tem resultado em sérios problemas ambientais. Os problemas ambientais podem ser minimizados e/ou evitados a partir de estudos específicos no meio físico. A área de estudo de 270 Km² abrange a zona urbana e parte da zona rural do município de Araraquara (SP) que está inserida no contexto geológico da Bacia Sedimentar do Paraná, representada pelas litologias das formações Botucatu, Serra Geral, Adamantina, Cobertura Recente (sedimentos inconsolidados) e unidades aquíferas correspondentes. Os procedimentos metodológicos adotados foram: revisão bibliográfica; trabalhos de campo; trabalho laboratorial; integração dos dados e análise dos resultados do Método GOD de mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos (FOSTER et al. 2002). Os índices de vulnerabilidade natural das unidades geológicas são: Alta, para as formações Botucatu e Serra Geral, Baixa a Moderada para a Formação Adamantina e Extrema, para os sedimentos recentes.

Palavras-chave: mapeamento, vulnerabilidade natural, aquíferos, água subterrânea, planejamento urbano.

ABSTRACT

The disorderly growth of the Brazilian urban centers has resulted in serious environmental problems which can be minimized and/or prevented by specific environmental studies. The study was developed in 270 Km² of Araraquara city (SP).

| | |
|---|--|
| Recebido em: 02/12/2005 | <i>HOLOS Environment</i> , v.6 n.2, 2006 - P. 71 |
| Liberado para Publicação em: 30/06/2006 | ISSN:1519-8421 (CD-ROM) / ISSN:1519-8634 (ON-LINE) |

The geologic units of the study area represent the lithologies of the NE of the Paraná Sedimentary Basin. The sequence of lithostratigraphic and aquifer systems is formed by: the Botucatu Formation; the Serra Geral Formation; the Adamantina Formation and Cenozoic sediments. The methodological approach included: bibliography revision; field and laboratorial work; integration of data and analysis of the results through the Method GOD of mapping of the natural vulnerability of aquifers (FOSTER et al. 2002). The units of natural vulnerability are: High in Serra Geral and Botucatu formations; Low to Moderate in Adamantina Formation and Extreme in the Cenozoic sediments.

Key words: mapping, natural vulnerability, aquifer; groundwater; urban planning.

1. INTRODUÇÃO

O Município de Araraquara (SP) apresenta bons indicadores de desenvolvimento econômico e índice de qualidade de vida da população local, entretanto existe escassez de trabalhos técnico-científicos voltados ao entendimento da dinâmica do meio físico, os quais deveriam subsidiar e/ou auxiliar o planejamento urbano e rural da região. A deficiência dessas pesquisas, em escalas adequadas, dificulta as tomadas de decisão do Poder Público Municipal, ante os problemas geoambientais.

A área pesquisada está localizada nas porções noroeste da folha Araraquara (SF-22-X-D-VI-4) e sudoeste da folha Rincão (SF-22-X-D-VI-2) com aproximadamente 270 quilômetros quadrados, abrangendo a zona urbana e parte da zona rural do município de Araraquara (SP). Os principais acessos à área, provenientes de São Paulo (270 Km) e Ribeirão Preto (85 Km), respectivamente, são feitos a partir das rodovias: SP-330 que liga São Paulo a Limeira e a SP-310 que liga Limeira a Araraquara. Outro acesso é alcançado a partir da rodovia SP-255 que liga Ribeirão Preto a Araraquara. A Figura 1 mostra a localização e as principais vias de acesso à área pesquisada.

A presente pesquisa refere-se aos dados oriundos da Dissertação de Mestrado do autor, intitulada de: “Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP)” (MEAULO, 2004). A referida pesquisa foi desenvolvida adotando-se a seguinte premissa: a partir da documentação cartográfica de um determinado volume de informações do meio físico, representado em escalas de trabalho adequadas ao planejamento municipal é possível otimizar recursos humanos e financeiros das entidades públicas gestoras. A partir da definição da premissa da pesquisa, foi formulada a seguinte hipótese: com base nos resultados do mapeamento geológico e hidrogeológico da área de Araraquara é possível elaborar um mapa de vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos. Fundamentado na hipótese de trabalho, foi estabelecido o seguinte objetivo: desenvolver o mapa de vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos da área de Araraquara (SP).

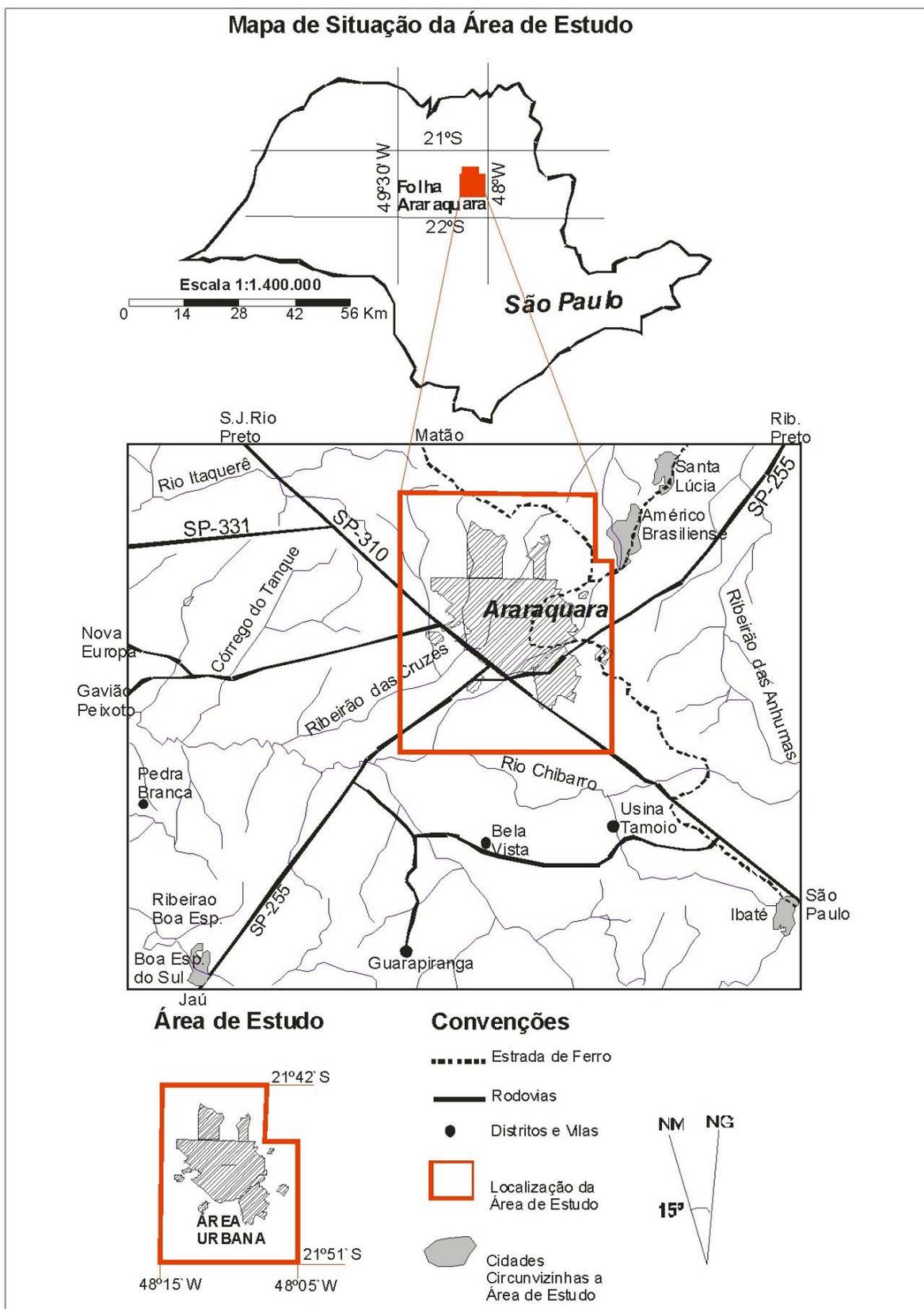


Figura 1 - Localização da área de estudo no Estado de São Paulo e as principais vias de acesso.

Fonte: Meaulo (2004).

| | |
|---|--|
| Recebido em: 02/12/2005 | <i>HOLOS Environment</i> , v.6 n.2, 2006 - P. 73 |
| Liberado para Publicação em: 30/06/2006 | ISSN:1519-8421 (CD-ROM) / ISSN:1519-8634 (ON-LINE) |

2. MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE NATURAL DE AQUÍFEROS

O método de mapeamento da vulnerabilidade natural à poluição de aquíferos consiste na hierarquização de índices relativos à maior ou menor sensibilidade à poluição da zona não saturada (zona vadosa ou de aeração) do perfil pedológico (FOSTER et al. 2002).

Normalmente esse tipo de mapeamento é o primeiro passo na avaliação do risco à poluição dos recursos hídricos subterrâneos. Os mapas de vulnerabilidade natural à poluição combinam diferentes categorias de informações, que por sua vez, consideram as propriedades e/ou capacidade de proteção que cada tipo de material geológico apresenta ante os diversos tipos de poluentes. Por exemplo, pode-se considerar como capacidade protetora de um solo sobre um aquífero - sorção, filtrabilidade, decomposição, condutividade hidráulica - e relacioná-las a um poluente específico. Em outras palavras, as classes de vulnerabilidade são unidades que mensuram, de forma comparativa e relativa, a capacidade atenuadora da zona não saturada.

O mapeamento da vulnerabilidade pode ser desenvolvido em diversas escalas de interesse (estadual e/ou municipal), de acordo com o tipo de aplicação que será dado para o documento cartográfico. Sugere-se que para os estudos de planejamento municipal sejam utilizadas escalas de trabalho a partir de 1:50.000 ou maiores. Definida a escala de trabalho o mapa de vulnerabilidade natural pode nortear e/ou contribuir para o planejamento urbano, auxiliando e disciplinando as diversas formas de intervenção antrópica no meio físico (instalação de indústrias de porte, aterros sanitários, sistemas de saneamento, entre outros).

2.1. Princípios do Método da Vulnerabilidade

O método de mapeamento da vulnerabilidade natural desenvolvido por Foster e Hirata (1988) e aprimorado por Foster et al. (2002), se fundamenta nos mecanismos de recarga da água subterrânea e na capacidade natural dos materiais que compõem os estratos da zona não saturada em atenuar fluidos, que varia em função das condições geológicas superficiais e das profundidades do nível d'água subterrânea.

Esses últimos autores sugerem que o mapeamento deve ser elaborado a partir das características intrínsecas dos materiais naturais. Tendo em vista a complexidade dos fatores que governam o transporte de poluentes nos aquíferos, em qualquer situação, tornam-se necessárias algumas considerações: as condições hidrogeológicas são muito complexas para serem limitadas por mapas (sistema de avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos); seria mais lógico focar cada atividade poluente individualmente e avaliá-la independentemente do risco à poluição gerado.

O método de mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos não deve ser entendido como um manual de consulta que estabelece todas as variáveis existentes

| | |
|---|--|
| Recebido em: 02/12/2005 | HOLOS Environment, v.6 n.2, 2006 - P. 74 |
| Liberado para Publicação em: 30/06/2006 | ISSN:1519-8421 (CD-ROM) / ISSN:1519-8634 (ON-LINE) |

para manejar as atividades potencialmente poluidoras e as diversas e complexas condições hidrogeológicas.

Por outro lado, os mapas de vulnerabilidade são instrumentos para adoção de ações preventivas e são orientativos para subsidiar o planejamento do uso e ocupação do solo, na medida em que neles são definidas áreas de maior e/ou menor susceptibilidade à poluição antrópica.

2.2. Desenvolvimento do Conceito da Vulnerabilidade

Nos países europeus os mapas de vulnerabilidade natural são produzidos desde as décadas de 70 e 80. Dentro do panorama brasileiro, a aplicação desses mapas ganhou força no início da década de 90, para atender as necessidades que surgiam por esse tipo de instrumento e a crescente preocupação quanto às questões relacionadas ao meio ambiente (ANDERSEN e GOSK, 1989).

Em hidrogeologia o termo vulnerabilidade começou a ser utilizado intuitivamente nos anos 70 na França (ALBINET e MARGAT, 1970) e mais amplamente nos anos 80 por Haertte, 1983; Aller et al. 1987; Foster e Hirata, 1988 (apud FOSTER et al. 2002), entretanto a aplicação do termo era relacionada à suscetibilidade à poluição antrópica de aquíferos.

A análise das características intrínsecas dos estratos que separam o limite superior da zona saturada do aquífero da zona não saturada (zona vadosa ou de aeração), determinando-se a sensibilidade desta zona frente aos efeitos adversos da carga poluente aplicada na superfície (FOSTER et al. 1987).

O conceito e aplicação do Método GOD (FOSTER et al. 2002) podem ser expressos por dois fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade natural: a) inacessibilidade hidráulica da zona não saturada; b) capacidade de atenuação da zona não saturada. O Quadro 1 resume esses fatores.

O método de mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos, utilizado no presente trabalho, possui a denominação na língua inglesa de GOD, onde: Groundwater hydraulic confinement= **G**; Overlaying strata= **O**; Depth to groundwater table= **D**.

Na língua portuguesa pode-se entender que a sigla corresponde: **G**= grau de confinamento hidráulico da água subterrânea; **O**= ocorrência de estratos geológicos e grau de consolidação da zona não saturada ou camadas confinadas; **D**= profundidade do nível d'água subterrânea.

A Figura 2 ilustra a espacialização dos atributos mencionados que compõem o Método GOD.

As classes de vulnerabilidade natural de aquíferos variam de desprezível à extrema, sendo que a nomenclatura de cada classe possui caráter restritivo, refletindo a sensibilidade natural das características dos estratos geológicos e pedológicos na zona não saturada e das condições hidrogeológicas do aquífero (ocorrência e profundidade do nível d'água subterrânea), conforme apresentado no Quadro 2.

| Atributos Condicionantes da Vulnerabilidade | Dados hidrogeológicos | | |
|--|--|--|--|
| | Informações ideais requeridas | Informações normalmente disponíveis | Informações disponíveis na presente pesquisa |
| Inacessibilidade hidráulica da zona não saturada, para a penetração de poluentes. | Grau de confinamento do aquífero | Tipo de confinamento da água | Delimitação da superfície do aquífero livre, através de poços escavados e sondagens de simples reconhecimento. |
| | Profundidade do N. A. ou superfície freática | Profundidade do nível d'água ou topo do aquífero confinado | Profundidade do N. A. e elaboração do mapa da superfície de tendência do N.A. |
| | Umidade da zona não-saturada e condutividade hidráulica vertical do estrato na zona não-saturada ou camadas confinadas | | |
| Capacidade de atenuação da zona não saturada, resultando na retenção e/ou reação físico-química dos poluentes. | Granulometria e distribuição das fissuras no estrato da zona não saturada ou camadas confinadas | Grau de consolidação/ fissuras no estrato | Mapeamento geológico: caracterização mineralógica da zona não saturada e elaboração de critérios de campo para diferenciar os tipos de coberturas. Análises difratométricas de Raios-X para obter relação do tipo de argilo-mineral e capacidade de troca catiônica. |
| | Mineralogia do estrato da zona não-saturada ou camadas confinantes | Características litológicas deste estrato | |

Quadro 1 - Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade à poluição do aquífero. Fonte: modificado de Foster et al. (2002).

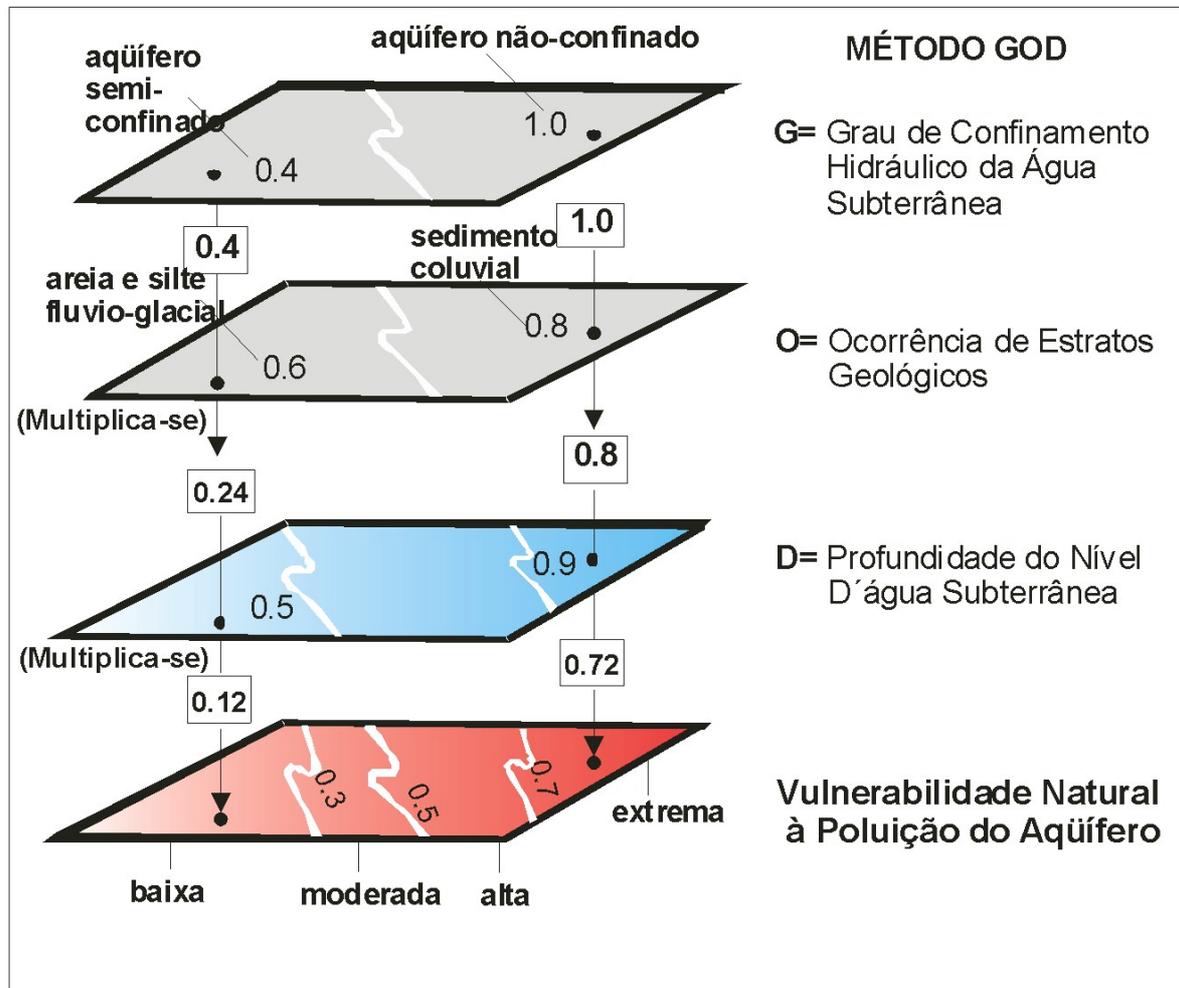


Figura 2- Cálculo hipotético para a confecção do mapa de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero usando o Método GOD.

Fonte: modificado de Foster et al.(2002).

| Classes de Vulnerabilidade | Definição Correspondente |
|-----------------------------------|--|
| Extrema | Imprescindível à realização de estudos qualitativos e quantitativos de detalhe (ensaio laboratoriais e geofísicos) para as intervenções antrópicas. |
| Alta | Necessário realizar estudos qualitativos e quantitativos (geofísicos) que identifiquem as condições hidrogeológicas locais. |
| Moderada | Apresenta capacidade atenuadora mais eficaz que as classes alta e extrema. Necessário realizar estudos de detalhe qualitativos e específicos para cada tipo de empreendimento. |
| Baixa | Necessários estudos de detalhe qualitativos para cada tipo de empreendimento. |
| Desprezível | Presente em camadas confinadas com insignificante fluxo subterrâneo vertical. |

Quadro 2 - Classes de vulnerabilidade natural de aquíferos e definições correspondentes.

Fonte: modificado de Foster et al. 2002.

O sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade natural do aquífero está subdividido em três fases interligadas e sucessivas: 1ª Fase: identificação do tipo e grau de confinamento hidráulico da água subterrânea, apresentados num intervalo de 0-1; 2ª Fase: consiste na ocorrência e caracterização geológica da zona não saturada, representada numa escala de 0,4-1; 3ª Fase: determinação da profundidade do nível d'água, exibido numa escala 0,6-1; Produto das Fases: o produto dos três parâmetros é o índice de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero, expresso numa escala de 0,1 – 1,0, em termos relativos. A Figura 3 ilustra o Método GOD (FOSTER et al. 2002).

2.3. Limitações do Método de Mapeamento da Vulnerabilidade

Andersen e Gosk (1989) citam que as principais limitações associadas aos tipos de mapeamento aplicado à vulnerabilidade estão relacionadas às escalas dos mapas, universo dos poluentes e o cenário no qual poluente está inserido.

Ocorrem também outras considerações sobre as condições hidrogeológicas limitadora na aplicação do sistema de avaliação da vulnerabilidade natural à poluição do aquífero, quais sejam: presença de cursos d'água superficiais indefinidos (permanentes ou intermitentes); incertezas na avaliação das suas condições hidrológicas; qualidade da água e da capacidade de atenuação dos estratos da zona

não saturada (principalmente na indicação das seções potenciais influentes dos cursos que cruzam os aquíferos livres); excessiva exploração do aquífero com propósito de abastecimento e conseqüente variação da profundidade do nível d'água subterrânea e, que também, pode variar o grau de confinamento do aquífero, fraturamento de sedimentos argilosos compactados que geralmente significam incertezas sobre a magnitude de qualquer componente de fluxo preferencial e aplicação em aquíferos fissurados (fraturados) (FOSTER et al. 2002). Vale ressaltar que existem mudanças significativas entre o Método GOD proposto por Foster e Hirata (1988) em comparação ao desenvolvido por Foster et al. (2002), referente a adoção de índices de vulnerabilidade para rochas ígneas, vulcânicas e metamórficas. Neste sentido, Meaulo et al. (2005a) apresentam a análise das principais alterações entre os sistemas de avaliação mencionados.

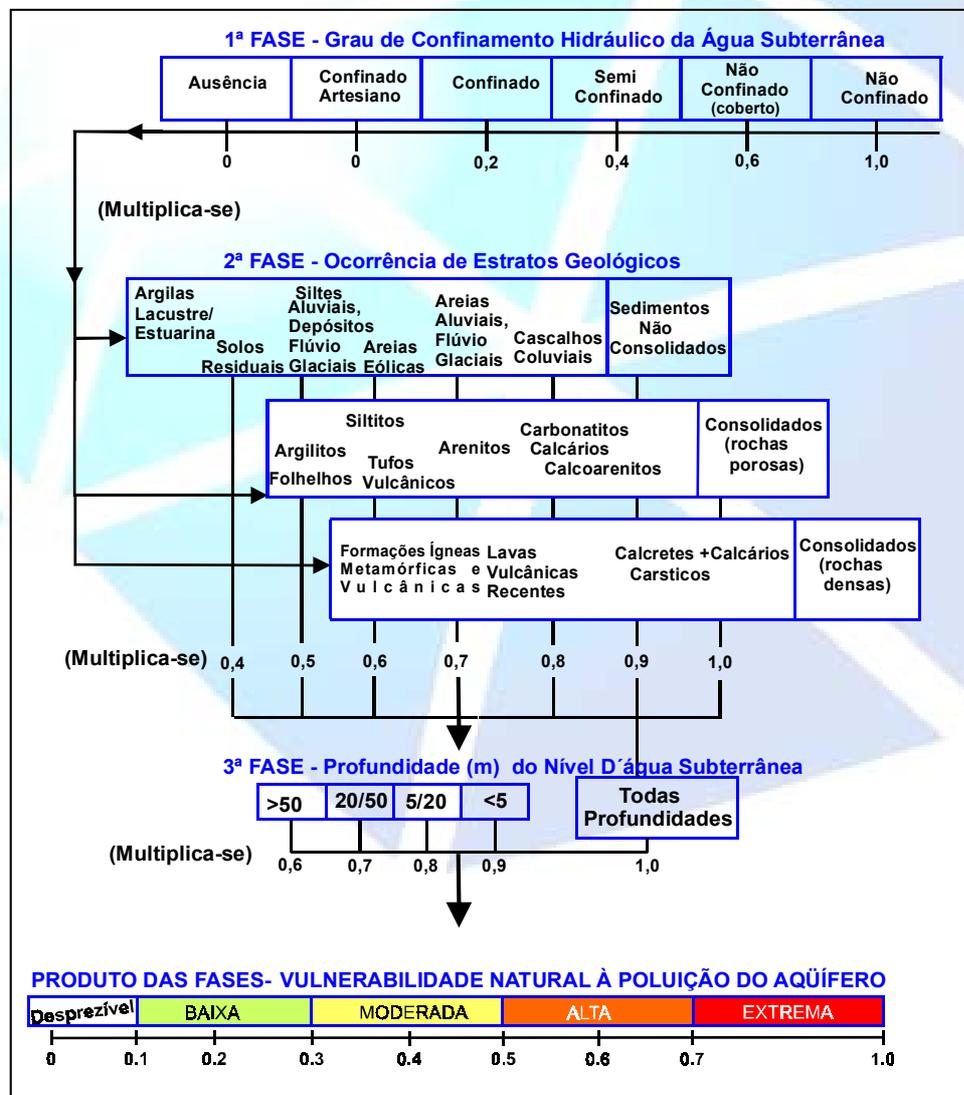


Figura 3. Sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero, Método GOD.

Fonte: modificado de Foster et al. 2002.

| | |
|---|--|
| Recebido em: 02/12/2005 | <i>HOLOS Environment</i> , v.6 n.2, 2006 - P. 79 |
| Liberado para Publicação em: 30/06/2006 | ISSN:1519-8421 (CD-ROM) / ISSN:1519-8634 (ON-LINE) |

3. SÍNTESE DO CONHECIMENTO DO MEIO FÍSICO

Hidrograficamente a área é drenada por ribeirões e córregos que cortam o município de Araraquara, preferencialmente nas direções NW para SE e NE para SW. O sistema de drenagem da área de estudo é composto pelos seguintes ribeirões e córregos (de oeste para leste): Córrego do Laranjal, Ribeirão do Lajeado, Ribeirão Águas dos Paióis, Córrego do Cupim, Córrego do Boi, Ribeirão das Cruzes, Rio Chibarro, Córrego Capaúva, Córrego do Tanquinho, Córrego da Serralha, Córrego Caixa d'água e Córrego Água Azul (Figura 1).

A cobertura vegetal original que recobria a região de Araraquara, denominada por Azevedo (1959, apud PEJON, 1987) de Floresta Latifoliada Tropical foi praticamente devastada, transformando-a em áreas de cultivo de cana de açúcar, café, laranja e pastagem.

Segundo a divisão geomorfológica do Estado de São Paulo a área de estudo está inserida na província geomorfológica Planalto Ocidental (IPT, 1981). O relevo caracteriza-se por vales relativamente pouco profundos com encostas de inclinações suaves, proporcionando um relevo ondulado sob a forma de colinas amplas e baixas com topos aplainados (ROSS e MOROZ, 1997). A altimetria da área de estudo varia entre 500 e 762m. Predomina neste sistema, valores de declividade no intervalo de 2,5% a 20% (PEJON, 1987).

Segundo Oliveira (1999) os solos que ocorrem na região de Araraquara – SP são predominantemente latossolos vermelhos, subordinados por latossolos vermelho amarelo e localmente neossolos quartzarênicos.

3.1. Geologia e Hidrogeologia Regional

A Bacia Sedimentar do Paraná é caracterizada como do tipo intracratônica, desenvolvida sobre crosta continental e preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas. Corresponde ao produto de processos tectono-sedimentares, apresentando condições para que ocorra a deposição, o empilhamento sedimentar, os hiatos de deposição e os eventos erosivos. A implantação desta Bacia ocorreu no Neo-Ordoviciano (MILANI, 1997).

Segundo Milani et al. (1998) a Bacia do Paraná é subdivida em seis superseqüências: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). As condições de Bacia intracratônica iniciam-se durante a deposição da Superseqüência Gondwana I que culminou a partir do desenvolvimento de campos de dunas eólicas, as quais marcam o final do Jurássico. Durante o Eocretáceo, ocorrem rupturas do paleocontinente que são marcadas por derrames de lavas basálticas. A parte final história da Bacia é marcada pela interrupção dos derrames basálticos e implantação da cobertura sedimentar da Superseqüência Bauru. O Quadro 3 apresenta a síntese da estratigrafia da área de estudo.

| Período Geológico | Formações ou Grupo | Litologia Predominante | Ambiente Depositional e Tectônica | Demais Contribuições (apud Milani, 1992) |
|----------------------------|--------------------|---|--|--|
| Eojurássico ao Neocretáceo | Grupo Bauru | Seqüência essencialmente arenosa com a presença de porções calcárias e conglomerática | Bacia sedimentar de interior cratônico individualizada | Almeida (1981); Soares et al.(1980); Petri e Fulfaro (1983); |
| | Fm. Serra Geral | Basalto toleítico | Intensa atividade vulcânica | |
| | Fm. Botucatu | Arenito com conglomerado na base | Ambiente desértico | |

Quadro 3 - Síntese do conhecimento geológico regional.

Fonte: modificado de Milani, 1992.

Do ponto de vista hidrogeológico regional utiliza-se às informações referentes aos aquíferos que compõem a Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê/Jacaré. Segundo IPT (2000) os aquíferos são: Guarani (Botucatu), Serra Geral, Bauru e Cobertura Cenozóica.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Segundo Meaulo (2004) o arcabouço geológico da área de estudo é representado pelas unidades: Formação Botucatu; Formação Serra Geral; Formação Adamantina; Coberturas Recentes (sedimentos arenosos inconsolidados) e sedimentos associados aos fundos de vales. Segue as características principais de cada unidade geológica:

a) Formação Botucatu: Representa a base da coluna estratigráfica da área de estudo. Constitui-se de arenito de coloração alaranjada, amarelada a rosado, avermelhada, creme e raramente branca, consolidação friável, composto por quartzo hialino e alaranjado, raras magnetitas, granulometria predominante fina, subordinada por grãos médios, subarredondados a arredondados, subesféricos, bem selecionados e raramente apresenta matriz argilosa. Geralmente apresenta laminação plano-paralela e estratificação cruzada de pequeno a grande porte.

b) Formação Serra Geral: Correspondem a rochas intrusivas básicas, as quais ocorrem na forma de derrames, *sills* e diques. Caracterizam-se por apresentarem fraturas verticais e subverticais. A rocha exhibe coloração cinza esverdeada, rosada a ocre, granulação fina, localmente média (diabásio), estrutura maciça (compacta), textura afanítica e nas porções superficiais e alteradas apresentam disjunções esferoidais (padrão de acebolamento). Estratigraficamente a unidade está sobreposta

| | |
|---|--|
| Recebido em: 02/12/2005 | HOLOS Environment, v.6 n.2, 2006 - P. 81 |
| Liberado para Publicação em: 30/06/2006 | ISSN:1519-8421 (CD-ROM) / ISSN:1519-8634 (ON-LINE) |

a Formação Botucatu e sotoposta a Formação Adamantina. Ocorre na porção sudoeste da área de estudo a presença de intertrapes areníticos, os quais apresentam geometria lenticular e espessuras variadas.

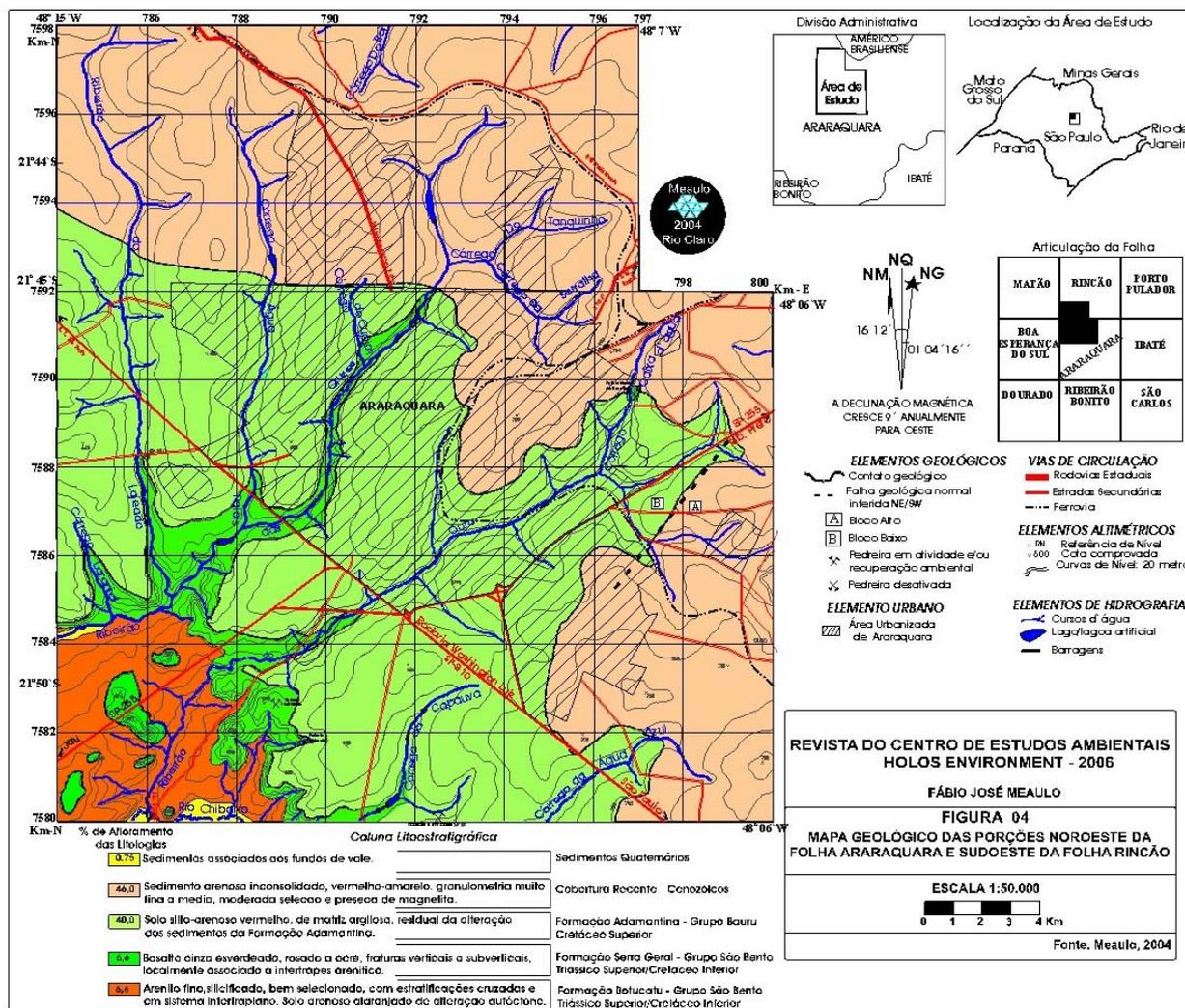
c) Formação Adamantina: Na área de estudo ocorre somente o solo de alteração dos sedimentos silto-arenosos deste conjunto litológico. A partir da análise macroscópica do concentrado de solo são observadas as seguintes características: coloração vermelha a vermelha alaranjada, bem estruturada, com fraturas que configuram formas de blocos e prismas, textura silto-arenosa, composto de quartzo e subordinado por magnetita. Os grãos são avermelhados, subordinados por hialinos, granulometria fina a média, angulares a subangulares, subesféricos, moderadamente selecionado, matriz argilosa.

d) Cobertura recente (sedimentos arenosos inconsolidados): Esse conjunto litológico foi individualizado por apresentar características sedimentológicas similares aos sedimentos da Formação Botucatu, entretanto, nota-se contribuições de materiais de outras unidades geológicas. Esse fato pode ser corroborado a partir da análise macroscópica do concentrado de solo, onde se observam as seguintes características: coloração amarelada a alaranjada, localmente creme e avermelhado, com fraturas que configuram formas de blocos e prismas, textura arenosa, pouca matriz e facilmente lavável. É composto predominantemente por quartzo e subordinado por magnetita. Os grãos são: alaranjado e hialino (subordinado), granulometria muita fina a média, com predominância da fração fina, arredondada a bem arredondada, esférica, moderada seleção. A magnetita é arredondada e demonstra claramente ter sido retrabalhada.

e) Sedimentos associados aos fundos de vales: São sedimentos que resultam de processos de retrabalhamento das rochas que compõem os conjuntos litológicos locais. Estes sedimentos ocorrem associados às áreas de inundação das drenagens, tais como Ribeirão do Ouro, Ribeirão das Cruzes, Ribeirão do Lajeado e Rio Chibarro.

A Figura 4 ilustra a distribuição espacial das formações geológicas descritas.

A Hidrogeologia local é composta por quatro unidades aquíferas. Os aquíferos são: Guarani (Botucatu); Serra Geral; Bauru e Cobertura Cenozóica (MEAULO, 2004). O aquífero Guarani caracteriza-se pela extensão regional, granular, livre a não confinado (coberto), homogêneo e contínuo. Constitui-se por arenitos eólicos avermelhados de granulometria fina à média e apresenta boa seleção. Vale ressaltar que a recarga ocorre principalmente a partir das áreas de afloramento da Formação Botucatu.



| | |
|---|--|
| Recebido em: 02/12/2005 | <i>HOLOS Environment</i> , v.6 n.2, 2006 - P. 83 |
| Liberado para Publicação em: 30/06/2006 | ISSN:1519-8421 (CD-ROM) / ISSN:1519-8634 (ON-LINE) |

O aquífero Serra Geral apresenta fissuramento de caráter eventual, heterogêneo, descontínuo, livre a semiconfinado. Segundo o IPT (2000) ocorrem determinadas condições que a hidráulica do aquífero pode variar significativamente em função de descontinuidades e/ou presença de intertrapes areníticos.

As características hidrogeológicas do aquífero Bauru são: extensão regional, tipo granular, livre a semiconfinado, descontínuo, heterogêneo. É constituído por sedimentos silto-arenosos de coloração avermelhada, matriz argilosa, representada localmente pela alteração dos sedimentos que compõem a Formação Adamantina. Considera-se também que: a recarga do aquífero ocorre naturalmente a partir da infiltração das águas das chuvas, o nível d'água subterrânea, em geral, acompanha o relevo e os sentidos de fluxo principais são direcionados às drenagens (IPT, 2000).

A unidade aquífera Cobertura Cenozóica corresponde aos depósitos de idade homônima, sendo caracterizada pela extensão limitada, eventual, granular livre, descontínuo, heterogêneo e anisotrópico. O uso do recurso hídrico desta unidade é utilizado para atender demandas domésticas, em função das relativas baixas vazões.

Com base nas informações apresentadas, elaborou-se uma síntese sobre o contexto geológico e hidrogeológico da área estudada (Quadro 4).

Vale mencionar que os tipos de mapeamento aplicados à vulnerabilidade natural possuem algumas limitações quanto à aplicação em aquíferos fissurados (FOSTER et al.2002). Entretanto, os estudos exploratórios e qualitativos realizados por Meaulo (2004) e Meaulo et al.(2005b) sobre a relação estratigráfica da formação e/ou unidade geológica (sistema intertrapiano), o comportamento e a influência das descontinuidades no maciço rochoso são observações que contribuem para o aprimoramento da determinação da vulnerabilidade natural.

Aqueles estudos fundamentam-se ainda no método de tratamento de maciços rochosos, proposto pela ABGE (1983) onde se caracteriza as feições das descontinuidades quanto à: inclinação; abertura; espaçamento, e preenchimento mineral. Entende-se que áreas geográficas que possuem descontinuidades caracterizadas, tais como: inclinação subvertical (limite $>45^\circ$); aberta; espaçamento muito próximo (6 a 60cm); ausência de preenchimento mineral – são, de forma relativa, condições significativamente vulneráveis ante as áreas que exibem características opostas, como por exemplo: inclinação subhorizontal (limite $< 45^\circ$), fechada; espaçamento afastado; presença de preenchimento mineral.

| Idade | Litoestratigrafia | Descrição da Unidade | Característica macroscópicas do solo de cobertura (*) | Mineralogia (difração raios - X) | Capacidade de atenuação relativa | Sistema aquífero | As classes de vulnerabilidade natural de aquíferos e definições correspondentes, segundo Foster <i>et al.</i> 2002. | | |
|------------------------|--|--|--|---|---|---------------------|---|------------------|--|
| | | | | | | | Granular livre | Extrema | |
| Cenozóico | Coberturas Recentes (Sedimentos arenosos inconsolidados) | Sedimentos arenosos médio a muito fino, amarelado a alaranjado. | Grãos arredondados a angulosos, esféricos a subesféricos, hialino a alaranjado, moderada a má seleção, quartzo e magnetita. | Quartzo, hematita (magnetita), caulinita, gibsita montmorilonita. | Menor capacidade de retenção e maior grau de cristalinidade. | Cobertura Cenozóica | Granular livre | Extrema | Extrema: Imprescindível a realização de estudos qualitativos e quantitativos de detalhe (ensaios laboratoriais e geofísicos) para todas as instalações de empreendimentos potenciais à poluição do solo e da água. |
| Mesozóico a Eocretáceo | Formação Adamantina (Grupo Bauru) | Solo silto-arenoso residual, vermelho a verm. alaranjado | Grãos angulares a subangulares, subesféricos, hialinos a avermelhados, moderada seleção, quartzo e magnetita polidas. | Quartzo; hematita (magnetita); caulinita e gibsita. | Menor grau de cristalinidade e maior capacidade de atenuação de fluídos. | Bauru | Granular livre | Moderada a baixa | Moderada: Necessário realizar estudos de detalhe qualitativos e específicos para cada tipo de empreendimento. Baixa: Necessários estudos de detalhe qualitativos para cada tipo de empreendimento. |
| | Formação Serra Geral (Grupo São Bento). | Basalto toleítico fraturado, cor cinza esverdeado. | Grãos finos a muito finos, angulares a subangulares, subesféricos a subalongados, hialinos e avermelhados, má seleção, magnetita (abundante) e raro quartzo. | - | | Serra Geral | Fissurado, livre a semiconfinado. | Alta | Alta: Necessário realizar estudos qualitativos e quantitativos (geofísicos) que identifiquem as condições hidrogeológicas locais. Moderada: Necessário realizar estudos de detalhe qualitativos e específicos para cada tipo de empreendimento. |
| | Formação Botucatu (Grupo São Bento). | Sedimentos arenosos finos a muito finos, alaranjados com estratificações cruzadas. | Grãos finos a muito finos, arredondados a subarredondados, esféricos a subesféricos, hialino e alaranjado, boa seleção, quartzo (magnetita). | Quartzo; caulinita; goethita; hematita (magnetita). | Grau de cristalinidade e capacidade de atenuação de fluídos intermediários. | Guarani | Livre a não-confinado | Moderada a Alta | |

Quadro 4. Síntese das principais informações sobre o conhecimento geológico e hidrogeológico da área de Araraquara (SP).

Fonte: modificado de Meaulo, 2004. (*) descrição das características referentes ao concentrado de solo lavado – análise pedológica expedita de campo.

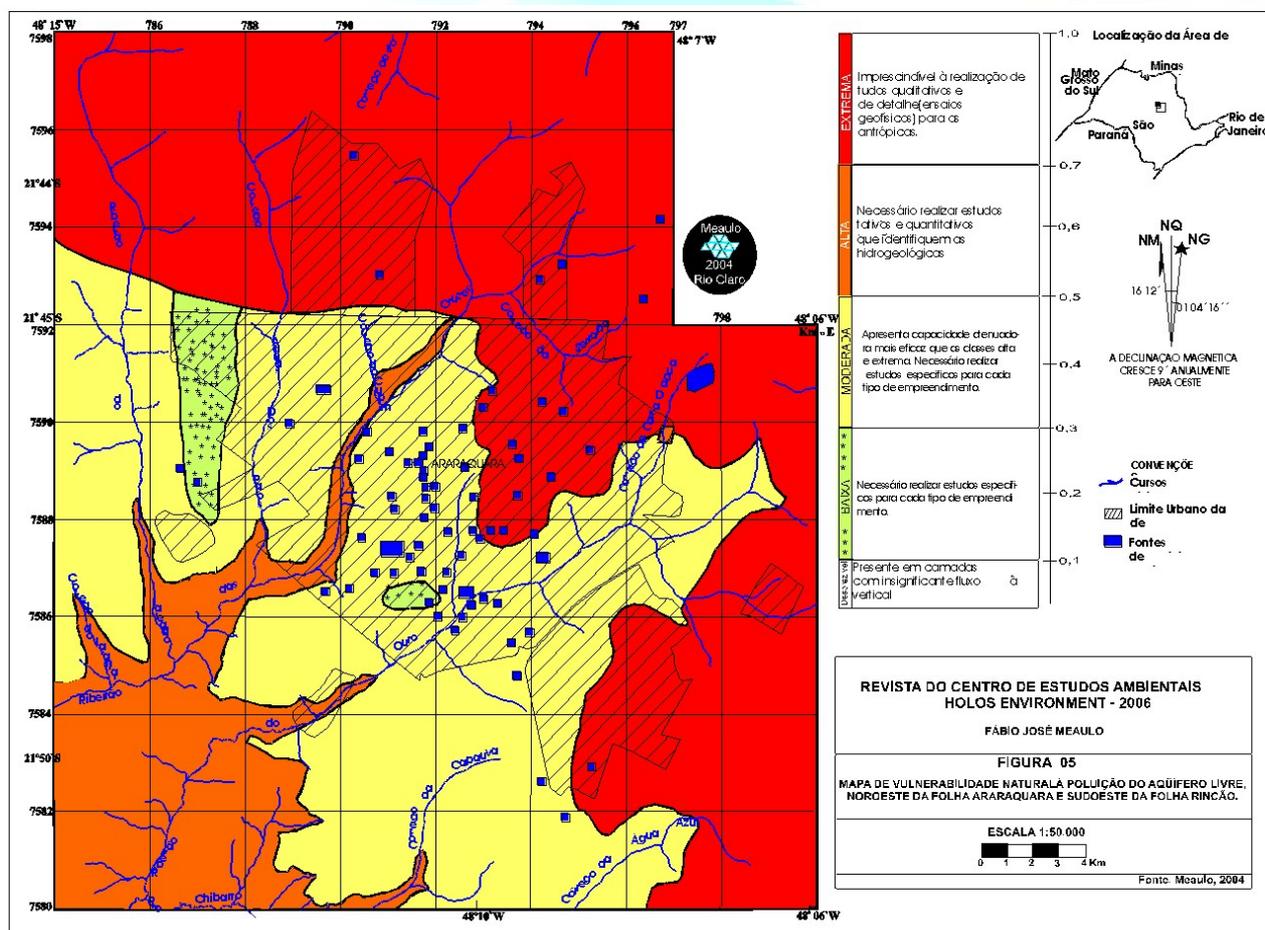
Em síntese o diagnóstico dos recursos hídricos realizado pelo IPT (2000) sugere que os estudos referentes à vulnerabilidade natural dos aquíferos sejam direcionados para os pontos de captação da água subterrânea e para o entendimento das condições geológicas locais.

Os resultados obtidos permitiram determinar os índices de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero livre da área de Araraquara (SP), na escala 1:50.000, utilizando o Método GOD proposto por Foster et al. (2002). O Quadro 5 apresenta os principais atributos necessários da metodologia para caracterizar a área estudada. O produto final deste trabalho, o mapa de vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (Figura 5) é o documento cartográfico que reúne um conjunto de informações capazes de subsidiar intervenções antrópicas no meio físico, contribuindo para as tomadas de decisão governamentais, otimizando recursos financeiros e norteando a elaboração de programas de políticas públicas ambientais.

| Ocorrência da Água Subterrânea (tipo de aquífero) | Caracterização Geológica da Zona Não-Saturada (unidade geológica) | Profundidade da Água Subterrânea (N.A.). | Índice de Vulnerabilidade de (classe) | Informações Complementares |
|---|---|--|---------------------------------------|---|
| Cobertura Cenozóica, aquífero livre ou não confinado. | Cobertura Recente (sedimentos arenosos inconsolidados) | Todas as profundidades do nível d'água | Extrema | A característica do material geológico exerce maior influência na classe de vulnerabilidade |
| Bauru, aquífero livre ou não confinado. | Formação Adamantina | < 5-20m | Moderada | |
| | | > 20m | Baixa | |
| Serra Geral, fissurado, eventual livre a confinado. | Formação Serra Geral | Parâmetro não considerado | Alta | Para classificação dessa unidade utilizaram-se as informações: características geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas e relações estratigráficas (sistema intertrapiano). |
| Guarani, livre | Formação Botucatu | < 5-20m | Alta | O tipo de ocorrência da água subterrânea pode sofrer alterações mais ou menos restritivas. |
| Guarani, não confinado (coberto). | Formação Botucatu | < 5-20m | Moderada | |

Quadro 5 - Caracterização da vulnerabilidade natural à poluição dos aquíferos de Araraquara (SP).

Fonte: Meaulo, 2004.



| | |
|---|--|
| Recebido em: 02/12/2005 | <i>HOLOS Environment</i> , v.6 n.2, 2006 - P. 87 |
| Liberado para Publicação em: 30/06/2006 | ISSN:1519-8421 (CD-ROM) / ISSN:1519-8634 (ON-LINE) |

5. CONCLUSÕES

Fundamentado no objetivo fixado na etapa inicial da pesquisa, pode-se constatar que foi possível atingir com êxito a elaboração do documento cartográfico temático, ou seja, o mapa de vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP).

Conclui-se que o Método GOD, de mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos, mostrou-se adequado para a área estudada e pode ser aplicado em outras áreas que apresentam semelhanças geológicas e hidrogeológicas. Trata-se de uma ferramenta de análise qualitativa de baixo custo operacional, de caráter preventivo e orientativo e que pode subsidiar as tomadas de decisão no planejamento do uso e ocupação do solo. A unidade geológica denominada de Cobertura Recente (sedimentos arenosos inconsolidados; vulnerabilidade extrema) requerem a adoção de medidas e ações que assegurem a implantação de atividades potencialmente não poluidoras, referentes ao vetor de crescimento do município, no tocante ao planejamento do uso e ocupação do solo e da água, pois são áreas naturalmente sensíveis e estão associadas às principais fontes de abastecimento de água superficial (cabeceiras de drenagens) do município de Araraquara (SP).

6. AGRADECIMENTOS

FORTGEO Geociências e Meio Ambiente Ltda ME.

Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente da Unesp, Rio Claro (SP).

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP.

7. REFERÊNCIAS

ALBINET, M., MARGAT, J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. **Bulletin Bureau de Recherches Géologiques et Minières**, 2nd Series, Orléans, v. 3, n. 4, p. 13-22, 1970.

ALLER, L., BENNETT, T., LEHR, J. H., PETTY, R. J., HACKETT, G. **DRASTIC**: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. Washington: Environmental Protection Agency, 1987. (Report 600/2-87-035).

ALMEIDA, F. F. M. Síntese sobre a tectônica da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3., 1981, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBG, 1981. v.1, p. 1-20.

| | |
|---|--|
| Recebido em: 02/12/2005 | HOLOS Environment, v.6 n.2, 2006 - P. 88 |
| Liberado para Publicação em: 30/06/2006 | ISSN:1519-8421 (CD-ROM) / ISSN:1519-8634 (ON-LINE) |

ANDERSEN, L. J., GOSK, J. Applicability of vulnerability maps. In: TNO COMMITTEE FOR HYDROLOGICAL RESEARCH. **Proceeding and Information**. Netherlands, 1987. v. 38, p. 321-332.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. **Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos**. São Paulo: ABGE/CBMR, 1983. (Boletim Técnico, Tradução n. 12).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências e elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo, 1997**. São Paulo, 1998. 2v.

FOSTER, S., VENTURA, M., HIRATA, R. **Contaminacion de las aguas subterráneas**: un enfoque ejecutivo de la situación en América Latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable. Lima: OMS; OPS-HPE; CEPIS, 1987.

FOSTER, S. S. D., HIRATA, R. C. A. **Groundwater pollution risk assessment**: a methodology using available data. Lima: World Health Organization, Pan American Health Organization, Centre for Sanitary Engineering and Environmental Sciences, 1988. Technical Report.

FOSTER, S.S.D.; HIRATA, R.C.A.; GOMES, D.; D'ELIA, M. PARIS, M. **Groundwater quality protection**: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. Washington: The World Bank, 2002.

HAERTLE, A. Toxic organic chemicals: destruction and waste treatment. **Poll. Tech. Review**, Paris, v.1, p 40-317, 1983.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo**. São Paulo, 1981. 2 v. (Série Monografias, n 5).

_____. **Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do plano da Bacia Hidrográfica do Tietê/Jacaré**. São Paulo, 2000. 2v. (Relatório Técnico, n 40.674)

MEAULO, F. J. **Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP)**. 2004. 108f. Dissertação (Mestrado em

| | |
|---|--|
| Recebido em: 02/12/2005 | <i>HOLOS Environment</i> , v.6 n.2, 2006 - P. 89 |
| Liberado para Publicação em: 30/06/2006 | ISSN:1519-8421 (CD-ROM) / ISSN:1519-8634 (ON-LINE) |

Geociências e Meio Ambiente)-Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

MEAULO, F. J., LIMA, A. A., CERRI, L. E. S. Análise das principais alterações dos sistemas de avaliação dos índices de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero, MétodoGOD. In:

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16., 2005a., João Pessoa. **Anais...**, João Pessoa: ABAS-PB, 2005. p. 1-13.

MEAULO, F. J. (Coord.) **Desenvolvimento do software de vulnerabilidade natural à poluição ambiental: FortGEO software**. Rio Claro: Fortgeo/Incunesp, 2005b,. (Relatório de Pesquisa FAPESP, Programa de Inovação Tecnológica em Pequenas Empresas – Fase I)

MILANI, E. J. Intraplate tectonics and the evolution of the Paraná Basin, SE Brazil. In: **Inversion tectonics of the Cape Fold Belt, Karoo and cretaceous basins of Southern África**. Holanda: A.A. Balkema, 1992. p. 101-108.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. 1997. 255f. Tese (Doutorado em Estratigrafia) Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

OLIVEIRA, J. B. **Solos do Estado de São Paulo**: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Campinas: Instituto Agrônomo, 1999.

PEJON, O. J. **Estudos geológicos-geotécnicos da região urbana de Araraquara-SP**. 1987. 2 v. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

PETRI, S., FULFARO, V. J. **Geologia do Brasil**: fanerozóico. São Paulo: Edusp, 1983.

ROSS, J. L. S., MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Laboratório de Geomorfologia, Depto de Geografia FFLCH-USP/Laboratório de Cartografia Geotécnica - Geologia Aplicada - IPT/FAPESP, 1997.

SOARES, P. C., LANDIM, P. M. B., FULFARO, V. J., SOBREIRO NETO, A. F. Ensaio de caracterização estratigráfica do cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.10, n. 3, p.177-185, 1980.

| | |
|---|--|
| Recebido em: 02/12/2005 | <i>HOLOS Environment</i> , v.6 n.2, 2006 - P. 90 |
| Liberado para Publicação em: 30/06/2006 | ISSN:1519-8421 (CD-ROM) / ISSN:1519-8634 (ON-LINE) |

ZALÁN, P. V., WOLFF, S., CONCEIÇÃO, J. C. J., MARQUES, A., ASTOLFI, M. A. M., VIEIRA, I. S., APPI, V. T., ZANOTTO, O. A. Bacia do Paraná. In: RAJA-GABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J. (Coord.) Origem e evolução de bacias sedimentares. **Boletim Técnico Petrobrás**, Rio de Janeiro, p. 135-168, 1990.

