

# O MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE NATURAL À POLUIÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS: O EXEMPLO DE ARARAQUARA-SP

Fábio José Meaulo<sup>1</sup>

**Resumo** - Atualmente o crescimento desordenado dos centros urbanos brasileiros tem resultado em sérios problemas ambientais. Esses problemas podem ser minimizados e/ou evitados a partir de estudos específicos no meio físico. A área de estudo de 270 Km<sup>2</sup> abrange a zona urbana e parte da zona rural do município de Araraquara (SP), região central do Estado de São Paulo. Está inserida no contexto geológico da Bacia Sedimentar do Paraná. Ocorrem litologias das formações Botucatu, Serra Geral, Adamantina, sedimentos correlatos e sistemas aquíferos correspondentes. A estratégia metodológica adotada nesta pesquisa foi: revisão bibliográfica; trabalhos de campo; trabalho laboratorial; integração dos dados e análise dos resultados do método de mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos (FOSTER et al., 2002). Os índices de vulnerabilidade natural das formações geológicas são: Botucatu e Serra Geral (Alta), Adamantina (Baixa a Moderada) e os sedimentos recentes (Extrema). O mapa de vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP, 1:50. 000) e o ensaio de aplicação do mapa são instrumentos que reúnem um conjunto de informações capaz de subsidiar todo tipo de intervenção antrópica no meio físico, contribuindo para as tomadas de decisões governamentais e para a elaboração de programas de políticas públicas ambientais.

**Abstract** - Currently the disorientated growth of the Brazilian urban centers has resulted in serious environmental problems. These problems can be minimized and/or be prevented by specific environmental studies. The studies developed in 270 Km<sup>2</sup> (urban and part of the rural zone) of Araraquara city (SP), located on center region of the São Paulo State. The geologic mapping of the study area is located in the NE of the Paraná Sedimentary Basin. The litostratigraphic and aquifers systems sequence is formed by: Botucatu Formation; Serra Geral Formation; Adamantina Formation; Cenozoic sediments. The adopted methodological strategy in this research was: bibliography revision; field works; laboratorial work; integration of the data and analysis of the results

---

<sup>1</sup> Doutorando do Programa de Geociências e Meio Ambiente da UNESP, Campus Rio Claro (SP).  
Rua 11, 2627, Rio Claro (SP) – CEP 13500-240. F: (19) 3533-8085 – meaulo@fortgeo.com.br

of the method of mapping of the natural vulnerability of aquifer (FOSTER et al., 2002). The natural units of vulnerability are: low to moderate (Adamantina Formation); high (formations Serra Geral and Botucatu); extreme (Cenozoic sediments). The mapping of natural vulnerability to groundwater of Araraquara area (SP, 1:50.000) and the test of application of the map are instruments that congregate a group of information capable to subsidize all type of anthropogenic intervention in the environment, contributing for governmental decisions and the elaboration of public politics to environmental programs.

**Palavras-Chave** - Vulnerabilidade de Aquíferos; Água Subterrânea.

## **INTRODUÇÃO**

O Município de Araraquara (SP) possui bons indicadores de desenvolvimento econômico e índice de qualidade de vida da população local. Entretanto, ele possui 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 cidade de Araraquara está situada na região central do Estado de São Paulo. 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 através das rodovias: SP-330 que liga São Paulo a Limeira e a SP-310 que liga Limeira a Araraquara. Outro acesso é alcançado pela rodovia SP-255 que liga Ribeirão Preto a Araraquara. A Figura 1 mostra a localização e as principais vias de acesso à área pesquisada.

Para o desenvolvimento desta investigação foi estabelecida a seguinte premissa da pesquisa: a partir do pleno conhecimento do meio físico da área de um município é possível planejar e otimizar recursos 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).

## **MÉTODO DE MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE NATURAL DE AQUIFEROS**

O método de mapeamento da vulnerabilidade natural à poluição de aquíferos consiste na hierarquização de índices relativos à maior ou menor sensibilidade a poluir a 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 do recurso hídrico subterrâneo. 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, podem-se considerar as propriedades protetoras do solo sobre um aquífero, como sorção, filtrabilidade, decomposição, condutividade hidráulica e relacioná-las com um poluente específico. Em outras palavras, as classes de vulnerabilidade são unidades que mensuram, de forma comparativa e relativa, a capacidade atenuadora dos estratos sobrepostos ao nível d'água.

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. Geralmente, nos estudos de planejamento municipal, são utilizadas escalas 1:50.000 ou maiores.

Conforme já mencionado, essa escala de trabalho permite que o mapa de vulnerabilidade natural contribua 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).

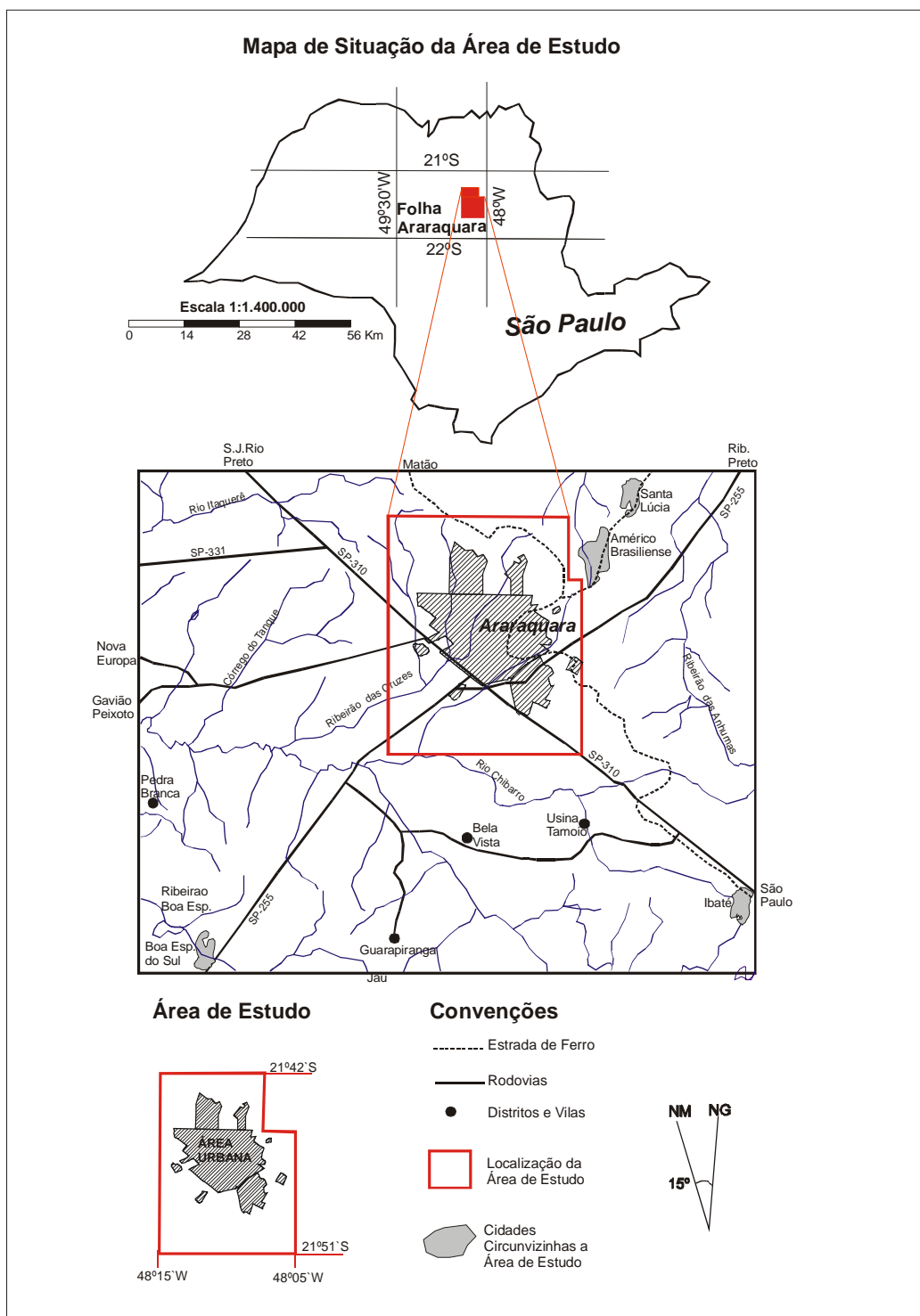


Figura 1 - Localização da área de estudo no Estado de São Paulo e as principais vias de acesso.

### Princípios sobre o método da vulnerabilidade

O método de mapeamento da vulnerabilidade natural desenvolvido por Foster e Hirata (1988) e aprimorado por FOSTER et al., (2002) se fundamentam nos mecanismos de recarga da água subterrânea e na capacidade natural de atenuação de fluidos, podendo variar em função das condições geológicas superficiais e das profundidades do nível d'água.

Esses últimos autores sugerem que o mapeamento deve ser elaborado a partir das características intrínsecas dos materiais naturais. Assim, ao invés de aplicar um controle universal sobre a potencialidade à poluição por diferentes usos e ocupação do solo e descarte de efluentes, que demanda maior custo efetivo, sugerem-se adotar a avaliação do risco de poluição específica para o tipo de fonte potencial (tanques sépticos, disposição de resíduos sólidos e líquidos, áreas de cultivo, entre outras) e adotar tipo e nível de controle de acordo com a capacidade de atenuação da zona não saturada. Essas são as premissas básicas do conceito da vulnerabilidade à poluição de aquíferos. Tendo em vista a complexidade dos fatores que governam o transporte de poluentes nesses 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 tratar 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 para manejar as atividades potencialmente poluidoras e as diversas e complexas condições hidrogeológicas. Entretanto os mapas de vulnerabilidade são instrumentos preventivos e orientativos para auxiliar no planejamento do uso e ocupação do solo, na medida em que neles são definidas áreas de maior e/ou menor susceptibilidade à poluição pela atividade humana.

### **Desenvolvimento do conceito da vulnerabilidade**

Nos países europeus os mapas de vulnerabilidade natural estão sendo produzidos desde a década de 70 e 80. Dentro do panorama brasileiro, a aplicação desses mapas ganhou força no início da década de 90, para atender as necessidades 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 (HAERTTE, 1983; ALLER et al., 1987; FOSTER e HIRATA, 1988; apud FOSTER et al., 2002). A aplicação do termo era relacionada à suscetibilidade à poluição antrópica de aquíferos, entretanto, não havia uma definição formal.

Uma útil e consistente definição, para vulnerabilidade à poluição do aquífero, foi à análise das características intrínsecas dos estratos que separam a zona saturada do aquífero da zona não saturada (zona vadosa ou de aeração), determinando a sensibilidade desta última frente aos efeitos adversos da carga poluente aplicada na superfície (FOSTER et al., 1987). O conceito e aplicação do método podem ser expressos por dois fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade.

O Quadro 1 resume os principais fatores aplicados ao método de Foster et al., (2002). Outro fator que deve ser considerado e incluído no conceito da vulnerabilidade é a mobilidade natural e a persistência do poluente na zona não saturada. Entretanto, este fator não aparece no mapeamento da vulnerabilidade, pois é determinado pela estrutura de planejamento e controle das atividades antrópicas na ocupação do solo.

O método de mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos possui a denominação na língua inglesa de GOD (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 subterrâneo. A Figura 2 ilustra a espacialização dos atributos mencionados que compõem o método GOD.

O Quadro 2 apresenta uma definição prática para cada classe de vulnerabilidade natural de aquíferos. Elas variam de desprezível à extrema. A nomenclatura de cada classe possui caráter restritivo, refletindo a sensibilidade natural das características dos estratos geológicos na zona não saturada e das condições hidrogeológicas do aquífero (ocorrência e profundidade do nível d'água subterrâneo).

A Figura 3 apresenta o Método GOD (FOSTER et al., 2002), ilustrando o sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade natural do aquífero. Este sistema é subdividido em três fases interligadas e sucessivas:

1ª Fase: identificação do tipo e grau de confinamento hidráulico da água subterrânea, apresentada 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, em termos relativos.

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

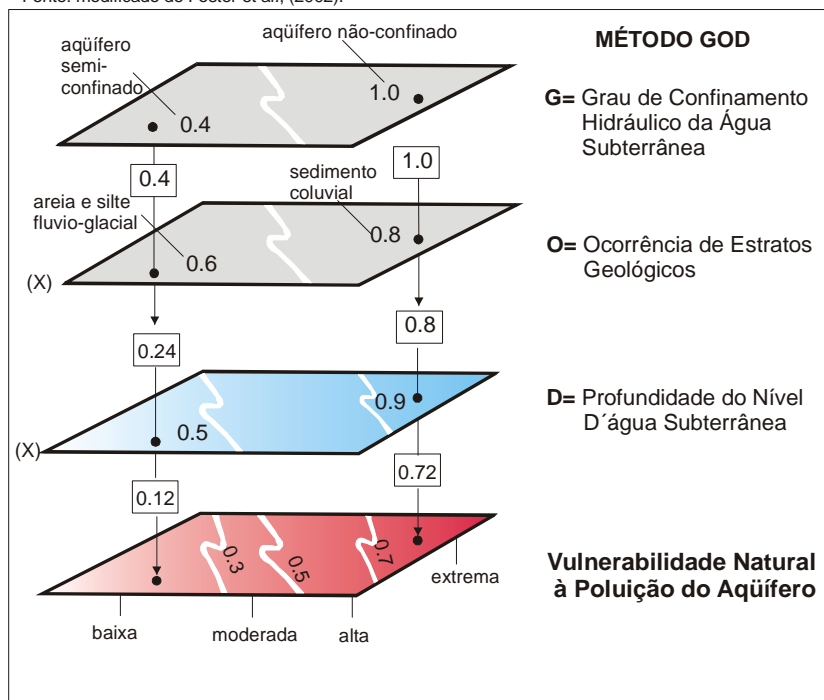


Figura 2 - Confeção do mapa de vulnerabilidade à poluição do aquífero usando o Método GOD.

**Quadro 1** – Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade à poluição do aquífero

Componentes 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 superior 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.
	Mineralogia do estrato da zona não-saturada ou camadas confinantes	Características litológicas deste estrato	Análises difratométricas de Raios-X (preliminar) para obter relação do tipo de argilo-mineral e capacidade de atenuação de fluidos.

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



**Quadro 2** - As classes de vulnerabilidade natural de aquíferos e definições correspondentes.

<b>Classes de Vulnerabilidade</b>	<b>Definição Correspondente</b>
Extrema	Vulnerável à maioria dos poluentes de rápido impacto na água. Aplicável em inúmeros cenários de poluição. Imprescindível à 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.
Alta	Vulnerável a vários poluentes (exceção para os fortemente absorvidos) em muitos cenários de poluição. Necessário realizar estudos qualitativos e quantitativos (geofísicos) que identifiquem as condições hidrogeológicas locais.
Moderada	Vulnerável para alguns poluentes. Apresenta capacidade atenuadora mais eficaz que as classes alta e extrema. Resíduos e/ou efluentes resultam em risco de contaminação quando são continuamente descartados ou em situação de vazamento. Necessário realizar estudos de detalhe qualitativos e específicos para cada tipo de empreendimento.
Baixa	Somente vulnerável para poluentes conservativos (baixa mobilidade), quando continuamente e largamente descartados ou em situação de vazamento. Necessários estudos de detalhe qualitativos para cada tipo de empreendimento.
Desprezível	Presente em camadas confinadas com insignificante fluxo subterrâneo vertical.

Fonte: modificado de Foster *et al.* 2002.

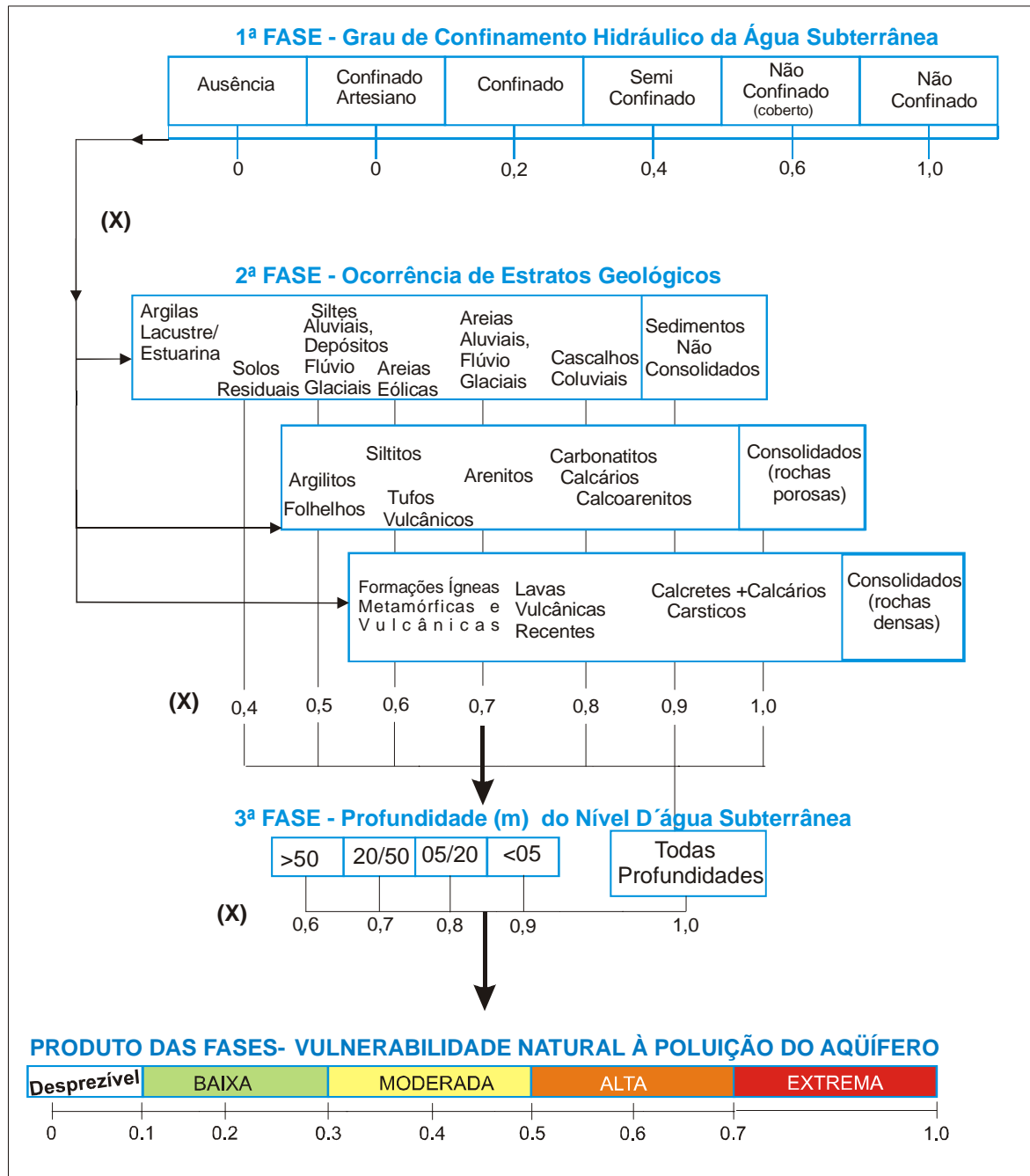


Figura 3 - Sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero

### Limitações do Método de Mapeamento da Vulnerabilidade

Andersen e Gosk (1989) citam que as principais limitações associadas com os tipos gerais de mapeamento aplicado à vulnerabilidade são os mapas de grande escala, universo do poluente e o cenário que o poluente está inserido.

Foster *et al.*, (2002) apresentam algumas considerações sobre as condições hidrogeológicas que são limitadores na aplicação do sistema de avaliação da vulnerabilidade natural à poluição do aquífero: presença de cursos d'água superficiais indefinidos (permanentes ou intermitentes), devido às incertezas na avaliação das suas condições hidrológicas, na definição da qualidade do curso da

água e na 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, também, no grau de confinamento do aquífero; compactação de argilas, que podem ser fraturadas e geralmente significam incertezas sobre a magnitude de qualquer componente de fluxo preferencial; aplicação em aquíferos fissurados (fraturados).

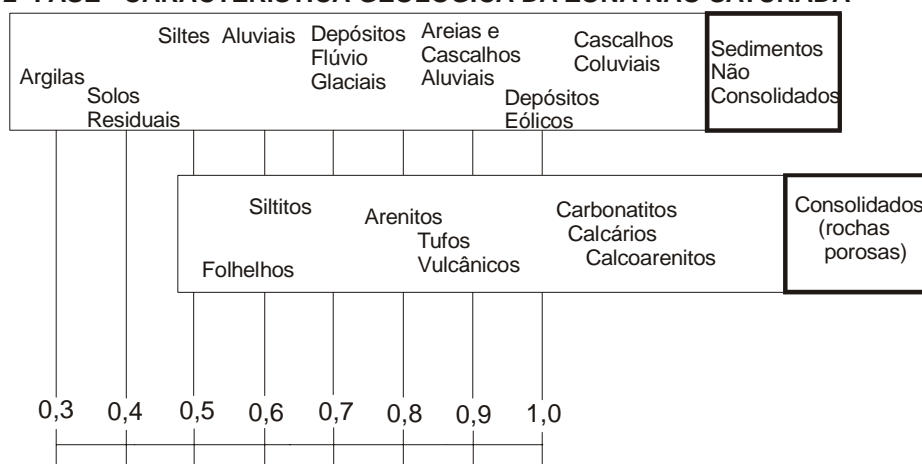
### **Análise das alterações dos sistemas de avaliação dos índices de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero, Método GOD**

As principais alterações nas fases dos sistemas de avaliação dos índices de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero, Método GOD de Foster e Hirata (1988) para o sistema de avaliação atual de Foster et al. (2002), são apresentadas, a seguir:

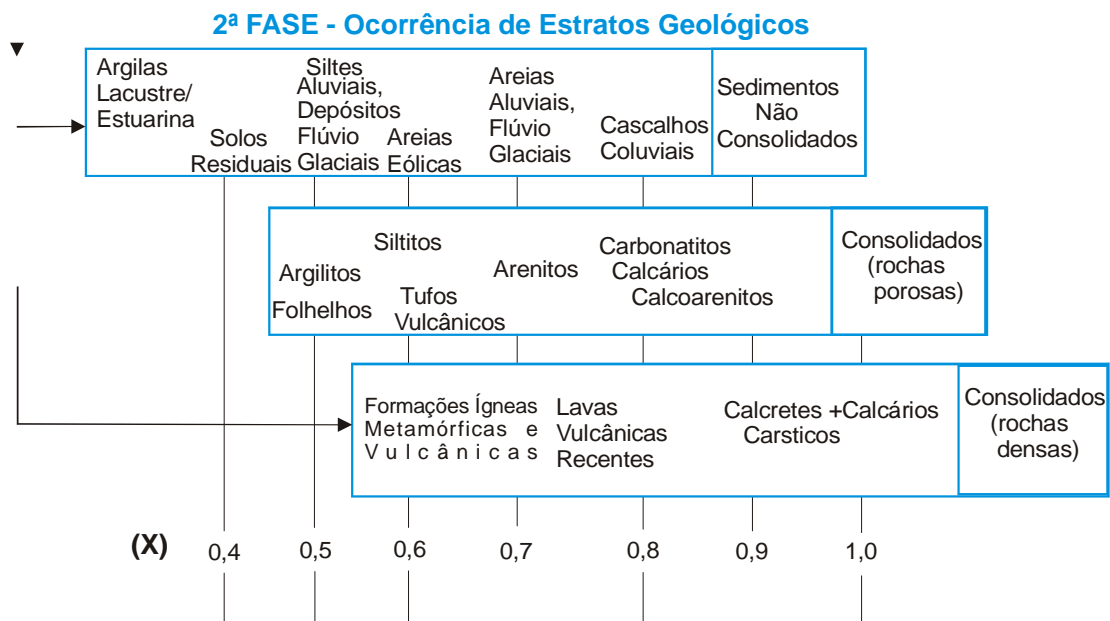
1ª Fase: grau de confinamento hidráulico da água subterrânea: os parâmetros do sistema de classificação (nomenclatura; valores dos atributos) nesta fase permaneceram inalterados;

2ª Fase: ocorrência de estratos geológicos da zona não-saturada: foram realizadas diversas modificações de caráter restritivo, nos parâmetros do sistema de avaliação (nomenclatura e tipo do material geológico; valores atribuídos para alguns tipos de materiais), assim como a inclusão de tipos de rochas: ígneas, metamórficas e as sensíveis à dissolução química.

#### **2ª FASE - CARACTERÍSTICA GEOLOGICA DA ZONA NÃO SATURADA**



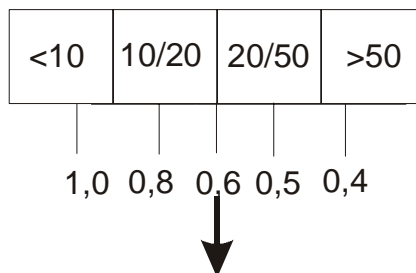
Foster e Hirata (1988)



Foster et al., (2002)

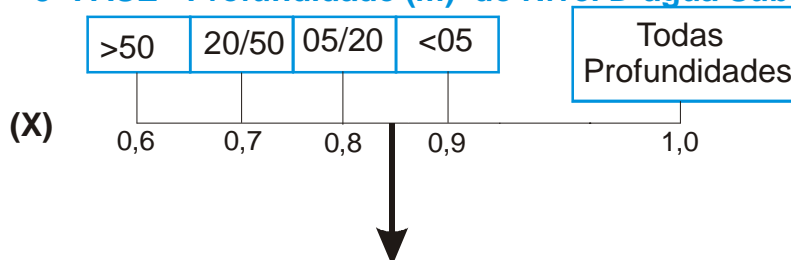
3ª Fase: profundidade (m) do nível d'água subterrânea: as alterações realizadas são de caráter restritivo, no que se refere aos valores das profundidades do nível d'água subterrânea e na escala numérica de valoração.

**3ª FASE - PROFUNDIDADE (m) DA ÁGUA SUBTERRÂNEA**



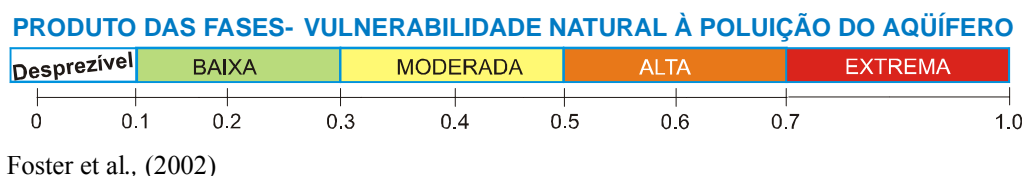
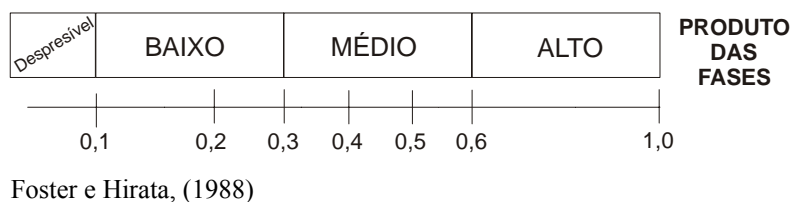
Foster e Hirata, (1988)

**3ª FASE - Profundidade (m) do Nível D'água Subterrânea**



Foster et al., (2002)

Produto das Fases: foram efetuadas mudanças na nomenclatura e aumento no número das classes de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero.



De modo geral, a metodologia de Foster et al., (2002) caracteriza-se pelo caráter restritivo da valoração dos atributos geológicos (2ª fase) e hidrogeológicos (3ª fase) em comparação com a metodologia de Foster e Hirata, (1988). Vale ressaltar que ambas as metodologias avaliadas, não adotam classes de vulnerabilidade de caráter impeditivo para o uso e ocupação do solo. Entretanto, recomenda-se a realização de estudos qualitativos e/ou quantitativos de investigação geológica e hidrogeológica, dependendo da classe de vulnerabilidade natural atribuída para uma determinada área.

## SÍNTESE SOBRE O CONHECIMENTO DO MEIO FÍSICO

O presente item apresenta uma síntese sobre o conhecimento atual do contexto do meio físico, fundamentado em dados da literatura e os desenvolvidos nesta pesquisa.

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, Córrego Capaúva, Córrego do Tanquinho, Córrego da Serralha, Córrego Caixa d'água e Córrego Água Azul

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.

O contexto das províncias geomorfológicas da área de estudo é subdividido em Planalto Ocidental e Cuestas Basálticas. Segundo a divisão geomorfológica do Estado de São Paulo, esta primeira província abrange aproximadamente 50% da unidade federativa, sendo caracterizada por

sistemas Colina Amplas e Colinas Médias com transições tênues entre ambos, tornando difícil o traçado de seus limites. Ocorrem ainda, subordinadamente, morrotes alongados (IPT, 1981). Predominam nestes sistemas, valores de declividade no intervalo de 2,5 a 20% associados geologicamente às rochas arenosas do Grupo Bauru (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.

### **Geologia e hidrogeologia regional**

Segundo Milani (1992) a coluna cronoestratigráfica da Bacia Sedimentar do Paraná é representada por cinco seqüências formais de sedimentação que datam do Ordoviciano-Siluriano (Formação Rio Ivaí, ZALÁN et al., 1987) ao Cretáceo (Grupo Bauru, PETRI e FULFARO, 1983; Figura 4). Neste contexto, a área pesquisada é representada pela seqüência 5, conforme demonstrado no Quadro 3.

A hidrogeologia da Bacia é complexa e formada por sete sistemas aquíferos principais. Entretanto nesta síntese, os dados dos sistemas aquíferos referem-se ao Estado de São Paulo, ou seja, Aquífero Guarani, Serra Geral, Bauru e Cobertura Cenozóica.

Cetesb et al. (1998) apresenta um resumo das principais das características físicas e hidrogeológicas dos sistemas aquíferos aflorantes na UGRHI Tietê/Jacaré (Quadro 4). Vale ressaltar que os dados de vulnerabilidade do aquífero apresentados no Quadro 4, são válidos para a escala de trabalho 1:1.000.000. Portanto os estudos de vulnerabilidade em escalas maiores podem sofrer alterações classificatórias restritivas nos índices de avaliação.

Fonte: modificado de Milani (1992)

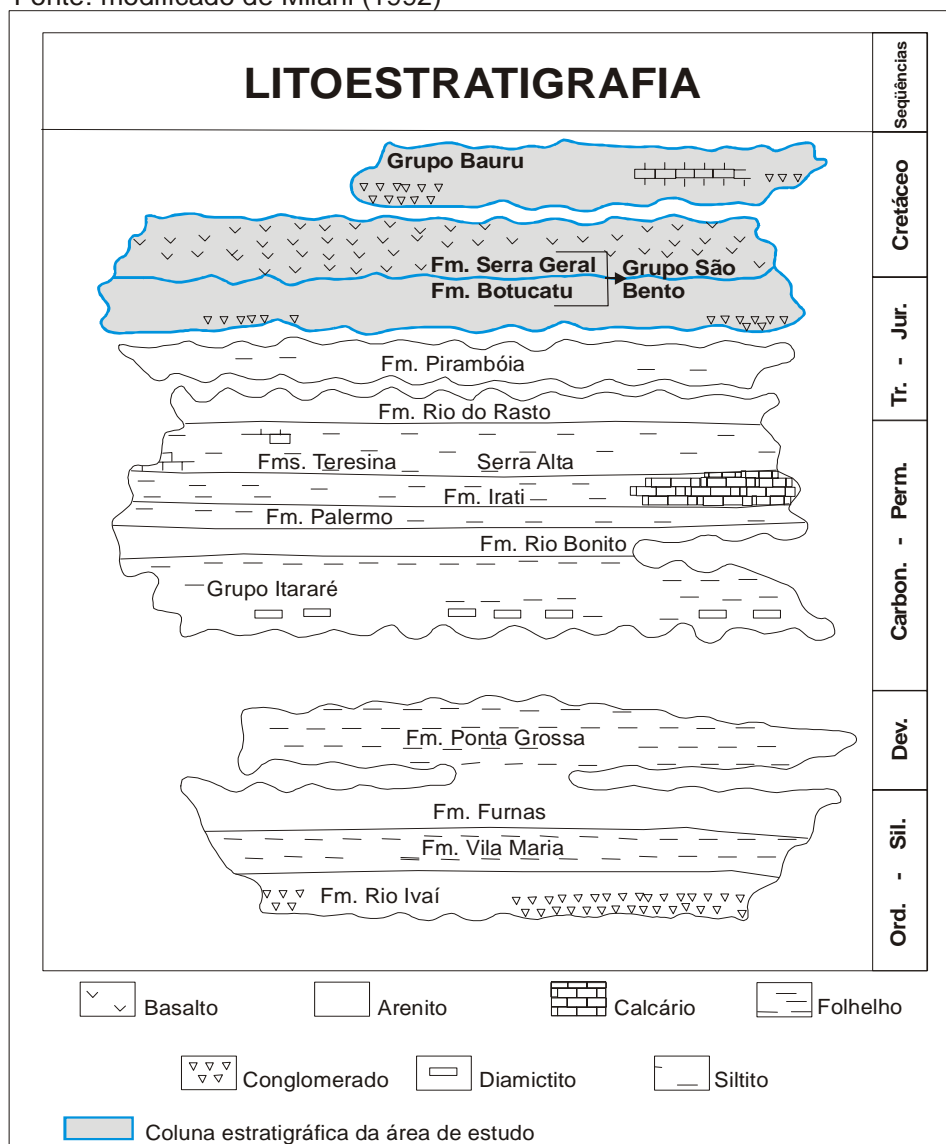


Figura 4 - Coluna cronoestratigráfica da Bacia do Paraná

**Quadro 3**– Síntese do conhecimento geológico regional.

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

(\* estratigrafia da área de estudo)

**Quadro 4 – Resumo das características físicas e hidrogeológicas regionais dos sistemas aquíferos da UGRHI Tietê/Jacaré**

Idade	Sistema Aquífero	Aquífero	Características Hidrogeológicas	Unidade Geológica	Geometria do Aquífero				Hidráulica do Aquífero					Características Hidroquímicas Principais			Vulnerabilidade do Aquífero																		
					Área de afloramento (Km <sup>2</sup> )	Espess. média (m)	Ext. Subsup. (km <sup>2</sup> )	Espess. média confinada (m)	Vazão média (m <sup>3</sup> /h)	Prof. Poços (m)	Capac. Especif. m <sup>3</sup> /h/m	Perm. Aparente (m/d)	Coef. Armaz.	pH	Resíduo seco a 105°C (mg/l)	Classif. das águas	Unidade	Nível D'água (m)	Índice																
Cenozóico	Quaternário	Cobertura Cenozóica	Extensão limitada, granular livre, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico.	Arenitos de granulação variável, argilas e cascalhos das seguintes unidades litoestratigráficas: Formação Adamantina e Formação Botucatu e correlatos.	3600	30	-	-	1 a 30	10 a 30	0,1 a 50	-	-	-	-	-	Cobertura Cenozóica	<10	ALTO alto																
																		10 a 20	ALTO baixo																
Mesozóico	Cretáceo Superior	Bauru	Extensão regional, granular, livre a semi-confinado, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico.	Formação Adamantina – Depósitos fluviais com predominância de arenitos finos a muito finos, podendo apresentar cimentação e nódulos carbonáticos, com lentes de siltos arenosos e argilitos, ocorrendo em bancos maciços. Estratificação plano-paralela e cruzada de pequeno a médio porte.	~8000	190	-	-	8 a 30	100 a 200	0,5 a 1,0	0,1 a 0,3	0,0001 a 0,01	4,0 a 9,8	100 a 200	Águas fortemente bicarbonatadas cálcicas principalmente no domínio dos espigões e interflúvios. Nos vales predominaram águas bicarbonadas cálcio magnesianas.	Adamantina	<10	MÉDIO alto																
																		10 a 50	MÉDIO baixo																
Triássico a Cretáceo Inferior	Serra Geral	Serra Geral	Extensão limitada, fissurado, caráter eventual, livre a semiconfinado, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico.	Formação Serra Geral – Rochas vulcânicas toleíticas em derrames basálticos de coloração cinza a negra, textura afanítica com intercalações de arenitos intertrapianos, finos a médios, de estratificação cruzada tangencial.	32000	150	104000	-	5 a 70	50 a 150	0,01 a 10	-	-	6 a 7	< 200	Bicarbonatadas cálcicas, secundariamente e magnesianas	Serra Geral		Não Definido																
																		Botucatu -Guarani	Botucatu Livre	Extensões regionais, granulares, livres a confinados, homogêneos, contínuos, isotrópicos.	Formação Botucatu – Arenitos eólicos avermelhados de granulometria fina a média com estratificações cruzadas de médio a grande porte, depósitos fluviais restritos de natureza areno-conglomerática e camadas localizadas de siltos e argilitos lacustres.	16000	250 (livre)	-	-	10 a 100	50 a 250	0,03 a 17	0,2 a 4	0,001 a 0,2	< 100	Bicarbonatadas magnesianas e cálcio-magnesianas	Botucatu (porção livre)	<10	ALTO alto
																																		> 20	MÉDIO baixo
		Botucatu Confinado				500 (confinado)	136800	500	50 a 600	300 a 1700	0,01 a 26	0,5 a 4,6	0,000001 a 0,0001	Ácido a Neutro	200	Zona de menor confinamento: águas bicarbonatadas cálcicas e cálcio-magnesianas.		Não Definido																	
									60 a 5300				Alcalino	650	Zona de maior confinamento: águas bicarbonatadas sódicas passando a cloro-sulfatadas das sódicas a oeste.																				

Fonte: modificado de Cetesb (1998).



## RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos nesta fase do desenvolvimento da pesquisa permitiram determinar os índices de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero livre da área de Araraquara (SP), na escala 1:50000, utilizando a metodologia proposta por Foster et al. (2002). O Quadro 5 apresenta os principais atributos do método GOD para caracterizar a área estudada. O produto final dessa pesquisa, o mapa de vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP, Figura 5) é o documento cartográfico que reúne um conjunto de informações capazes de subsidiar todo tipo de intervenção antrópica no meio físico, contribuindo para as tomadas de decisões governamentais, otimizando recursos financeiros e norteando a elaboração de programas de políticas públicas ambientais.

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

Ocorrência da Água Subterrânea (tipo de aquífero)	Caracterização Geológica da Zona Não-Saturada (unidade geológica)	Profundidade e da Água Subterrânea (N.A.).	Índice de Vulnerabilidade de (classe)	Informações Complementares
Cobertura Cenozóica, aquífero livre ou não confinado.	Sedimentos arenosos correlatos à Formação Botucatu	Todas as profundidades do nível d'água	Extrema	A característica do material geológico exerce maior influência na determinação da classe de vulnerabilidade
Bauru, aquífero livre ou não confinado.	Formação Adamantina	< 5-20m > 20m	Moderada 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.
Guarani, livre a confinado.	Formação Botucatu	< 5-20m	Alta	O tipo de ocorrência da água subterrânea pode sofrer alterações mais ou menos restritivas.

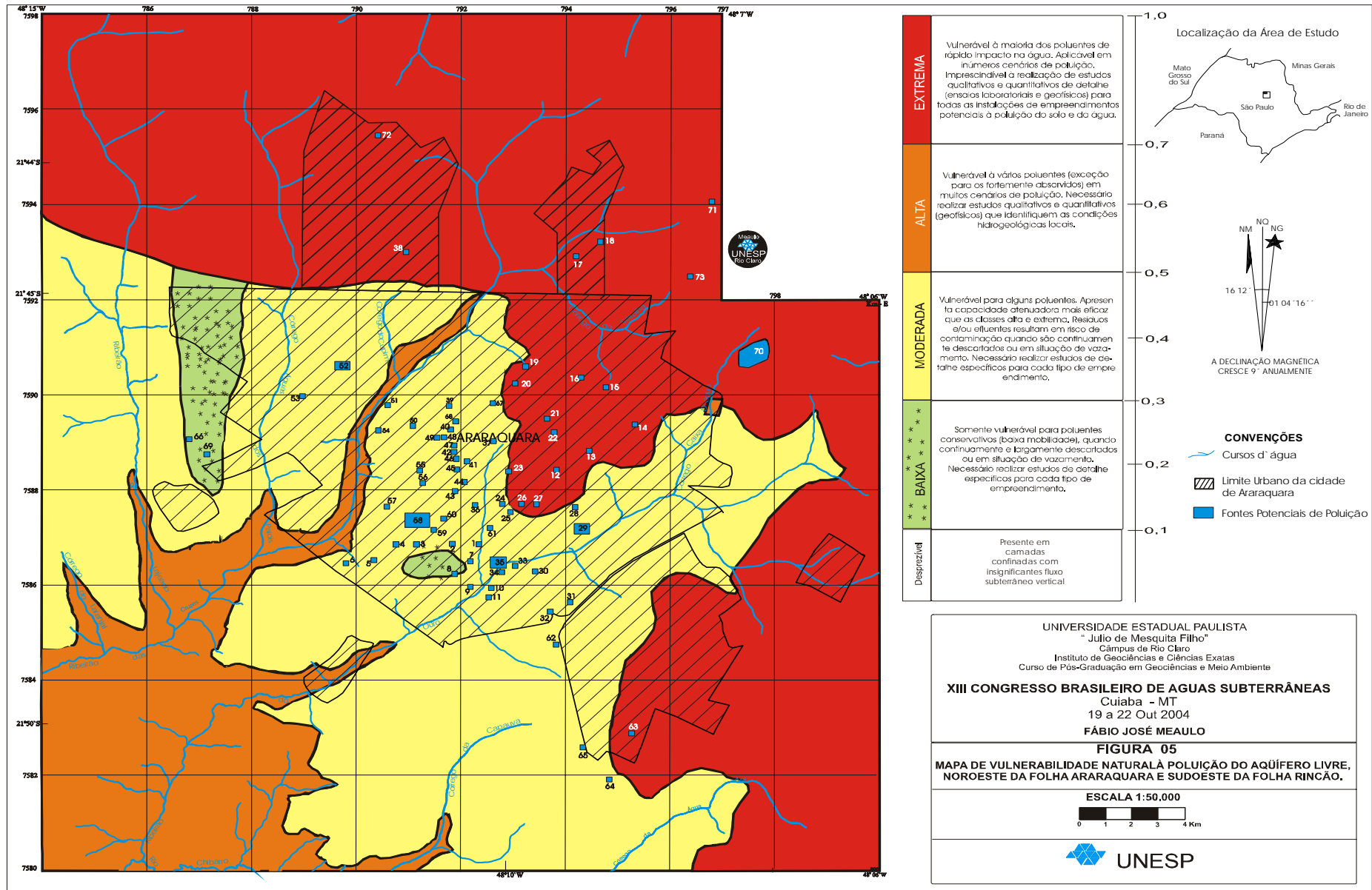
Fonte: Meaulo (2004)

O Quadro 6 sintetiza as principais informações sobre o conhecimento geológico e hidrogeológico da área estudada, resultando num documento de consulta dinâmica para o entendimento geral da pesquisa.

**Quadro 6** – Síntese das principais informações sobre o conhecimento geológico e hidrogeológico da área de Araraquara (SP).

Idade	Litoestratigrafia	Descrição da Unidade	Descrição da cobertura	Mineralogia (difração raios – X)	Capacidade de atenuação relativa	Sistema aquífero	Característica do aquífero e a vulnerabilidade natural dos materiais correspondentes (consulte o mapa de vulnerabilidade)			
Quaternário	Sedimentos de fundo de vale	-	-	-				Extrema	<p><b>Extrema:</b> Vulnerável à maioria dos poluentes de rápido impacto na água. Aplicável em inúmeros cenários de poluição. Imprescindível à 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.</p>	
Cenozóico	Sedimentos correlatos à Formação Botucatu	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		
Mesozóico	Eocretáceo	Formação Adamantina, Grupo Bauru	Solo silto-arenoso residual, vermelho a verm. alaranjado	Grãos angulares a subangulares, subesféricos, hialino a avermelhado, moderada seleção, quartzo e magnetita polidas.	Quartzo; hematita (magnetita); caulinita e gibsita.	Menor grau de cristalinidade e maior capacidade de atenuação de fluidos.	Bauru	Granular livre	Moderada a baixa	<p><b>Moderada:</b> Vulnerável para alguns poluentes. Apresenta capacidade atenuadora mais eficaz que as classes alta e extrema. Resíduos e/ou efluentes resultam em risco de contaminação quando são continuamente descartados ou em situação de vazamento. Necessário realizar estudos de detalhe qualitativos e específicos para cada tipo de empreendimento.</p> <p><b>Baixa:</b> Somente vulnerável para poluentes conservatórios (baixa mobilidade), quando continuamente e largamente descartados ou em situação de vazamento. Necessários estudos de detalhe qualitativos para cada tipo de empreendimento.</p>
	Eojurássico a Neocretáceo	Formação Serra Geral, Grupo São Bento.	Basalto toleítico fraturado, cor cinza esverdeado.	Grãos grossos a muito finos, angulares a subangulares, subesféricos a subelongados, hialino e avermelhado, má seleção, quartzo e magnetita (abundante).	-		Serra Geral	Fissurado, livre a semiconfinado.	Alta	<p><b>Alta:</b> Vulnerável a vários poluentes (exceção para os fortemente absorvidos) em muitos cenários de poluição. Necessário realizar estudos qualitativos e quantitativos (geofísicos) que identifiquem as condições hidrogeológicas locais.</p>
	Eojurássico	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 fluidos intermediários.	Botucatu-Guarani	Granular livre	Alta	

Fontes: Meaulo (2004)



## 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: o método de mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos mostrou-se eficaz para a área estudada e pode ser perfeitamente aplicado em outras áreas que mantenham as semelhanças geológicas e hidrogeológicas. Trata-se de uma ferramenta de análise qualitativa: de baixo custo operacional, caráter preventivo e orientativo e pode subsidiar as tomadas de decisões no planejamento de uso e ocupação do solo; os sedimentos correlatos à Formação Botucatu (vulnerabilidade extrema) requerem a implantação de medidas e ações que assegurem a implantação de atividades potencialmente não poluidoras, referente 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 as principais fontes de abastecimento de água superficial (cabeceiras de drenagens) do município de Araraquara (SP).

A partir das informações apresentadas durante o desenvolvimento desta pesquisa constata-se a validade da hipótese formulada: 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.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALBINET, M. e MARGAT, J. **Cartographie de la vulnérabilité a la pollution des nappes d'eau souterraine**. Bulletin BRGM ZME 2<sup>nd</sup> Series v. 3, n<sup>o</sup>4, p. 13-22, 1970.
- [2] ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J.; HACKETT, G. **DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potencial using hydrogeologic settings**. Washington: Environmental Protection Agency Report 600/2-87-035, 1987.
- [3] ALMEIDA, F.F.M. Síntese sobre a tectônica da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 03. 1981, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBG, 1981. v.1, p. 1-20.
- [4] ANDERSEN, L.J. e GOSK, J. Applicability of vulnerability maps. **TNO Committee for Hydrological Research: Proceeding and Information**. The Netherlands. 1987, v 38, p. 321-332.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023: informação e documentação – referências e elaboração**. Rio de Janeiro, 2002.
- [6] COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo, 1997**. São Paulo: 1998. 2v.

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] HAERTLE, A. **Toxic organic chemicals: destruction and waste treatment.** Poll Tech Review. v.1, p 40-317, 1983.
- [11] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo.** São Paulo, 1981. 2v. (Série Monografias, 5).
- [12] MEAULO, F. **Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP).** 2004. 108f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente)-Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- [13] 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.** Wite e Ransorne , p. 101-108, 1992.
- [14] OLIVEIRA, J.B. **Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico.** Campinas: Instituto Agrônomo, 1999.
- [15] PEJON, O.J. **Estudos geológicos-geotécnicos da região urbana de Araraquara-SP.** 1987. 2v. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- [16] PETRI, S. e FULFARO, V.J. **Geologia do Brasil: Fanerozóico.** São Paulo, Edusp. 631p, 1983
- [17] 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.
- [18] 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. E MILANI, E.J. (Coord.) **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Boletim Técnico Petrobrás.**415p. 1990.