

## ESTIMATIVA DA VULNERABILIDADE NATURAL DE AQÜÍFEROS: UMA CONTRIBUIÇÃO A PARTIR DA RESISTIVIDADE E CONDUTÂNCIA LONGITUDINAL

Antonio Celso de Oliveira Braga

Recebido em 14 janeiro, 2008 / Aceito em 24 março, 2008  
Received on January 14, 2008 / Accepted on March 24, 2008

**ABSTRACT.** This paper describes the results obtained with DC resistivity method using vertical electrical soundings (Schlumberger array), applied to environmental studies involving the groundwater. Aquifers natural vulnerability, important tool in environmental studies, can be estimate starting from geoelectrical methods, whose parameters resistivity and longitudinal conductance, allied to the type of aquifers occurrence (unconfined and confined aquifer) and water table depth, they allowed to obtain an index of corresponding natural vulnerability to the usually used. The results, applied in a preliminary phase of studies, are good, allowing a better direction and programming of the posterior phases.

**Keywords:** Resistivity, longitudinal conductance, aquifer vulnerability.

**RESUMO.** Este trabalho descreve os resultados obtidos com o método da eletrorresistividade usando a técnica da sondagem elétrica vertical (arranjo Schlumberger) aplicada em estudos ambientais envolvendo as águas subterrâneas. A vulnerabilidade natural de aquíferos, importante ferramenta em estudos ambientais, pode ser estimada a partir de métodos geoeletricos, cujos parâmetros resistividade e condutância longitudinal, aliados ao tipo de ocorrência dos aquíferos (livre a confinado) e profundidade do nível d'água, permitiram obter um índice de vulnerabilidade natural correspondente ao normalmente utilizado. Os resultados, aplicados em uma fase preliminar de estudos, são bons, permitindo um melhor direcionamento e programação das fases posteriores.

**Palavras-chave:** Resistividade, condutância longitudinal, vulnerabilidade de aquíferos.

## INTRODUÇÃO

A contaminação de aquíferos se dá basicamente em função do tipo e carga da fonte geradora introduzida no solo, bem como da vulnerabilidade natural dos aquíferos. O termo vulnerabilidade pode ser utilizado para representar as características intrínsecas de um aquífero que determinam sua susceptibilidade a ser adversamente afetado por uma carga contaminante (Foster, 1987).

A vulnerabilidade de um aquífero é, portanto, um conjunto de características que determina o quanto ele poderá ser afetado pela carga do contaminante. São considerados aspectos fundamentais da vulnerabilidade: o tipo de aquífero (livre a confinado), a profundidade do nível d'água e as características dos estratos acima da camada de interesse, em termos de grau de consolidação e litologia.

Considerando um aquífero livre, a vulnerabilidade natural pode ser entendida em função da: a) acessibilidade hidráulica da zona não saturada à penetração de contaminantes – advecção de contaminantes; e, b) capacidade de atenuação da camada que cobre a zona saturada, resultado da retenção ou reação físico-química de contaminantes – dispersão, retardação e degradação (Foster & Hirata, 1988).

Os componentes que determinam a vulnerabilidade dos aquíferos são resultantes de uma combinação de vários fatores. Entretanto, na prática pode-se simplificar e utilizar apenas os parâmetros tipo de ocorrência da água subterrânea, características e litologia das camadas geológicas acima do aquífero e profundidade do nível d'água. Nessa avaliação inicial, a determinação da vulnerabilidade natural de aquíferos deve ser tomada com precaução, devido ao fato de que existem diversos tipos de contaminantes, cada um com suas características definidas.

Nesse contexto, auxiliando os estudos ambientais em uma fase preliminar, o método da eletrorresistividade utilizando a técnica da sondagem elétrica vertical apresenta como produtos principais: (a) a resistividade elétrica dos materiais geológicos, permitindo identificar as diferentes litologias e até obter uma correlação com a condutividade hidráulica (Shevvin et al., 2006 e Mazac et al., 1990); (b) o parâmetro de Dar Zarrouk condutância longitudinal, o qual permite estimar a proteção de aquíferos frente a contaminantes (Braga et al., 2006); (c) a determinação da 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.

## CARACTERIZAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL

### Hidrogeologia e geologia

Dentre vários sistemas de avaliação geral da vulnerabilidade natural de um aquífero, destaca-se o apresentado em IG (1997), adap-

tado de Foster & Hirata (1988). Nesse sistema considera-se a interação dos fatores intrínsecos, a forma de ocorrência da água subterrânea (tipo de aquífero), o arcabouço litológico que sustenta o aquífero na zona não saturada e a profundidade do nível d'água.

A partir dessas características, atribui-se valores de: 0,0 a 1,0 para o tipo de ocorrência da água subterrânea; 0,3 a 1,0 para o tipo litológico e características granulométricas acima da zona saturada do aquífero; e, 0,4 a 1,0 para a profundidade do nível d'água (ou do topo do aquífero confinado). O produto dos três parâmetros será o *índice de vulnerabilidade*, numa escala de 0–1. Como resultado, define-se o grau de vulnerabilidade natural do aquífero como: nenhum, desprezível, baixo, médio, alto e extremo.

### Método da eletrorresistividade

Os diferentes tipos de materiais existentes no ambiente geológico apresentam como uma de suas propriedades fundamentais o parâmetro físico resistividade elétrica, o qual reflete algumas de suas características servindo para caracterizar seus estados, em termos de alteração, fraturamento, saturação etc., e até identificá-los litologicamente, sem necessidade de escavações físicas.

As resistividades dos solos, quando saturados, podem identificar e caracterizar os diferentes tipos de materiais geológicos localizados em subsuperfície. Entretanto, quando os solos encontram-se secos, porção localizada acima do nível d'água, seus valores são considerados atípicos, apresentando uma ampla faixa de variação não identificando os materiais em subsuperfície em termos litológicos.

Na aplicação do método da eletrorresistividade, utilizando a técnica da sondagem elétrica vertical (SEV) – arranjo Schlumberger, determina-se a profundidade do nível d'água subterrânea, espessura e resistividade das camadas e ainda o parâmetro de Dar Zarrouk, condutância longitudinal. Esses parâmetros obtidos a partir de uma única campanha podem auxiliar na determinação do índice de vulnerabilidade de aquíferos.

### Condutância longitudinal – S

Para uma seqüência de  $n$  camadas, homogêneas e isotrópicas com resistividade  $\rho_i$  e espessura  $h_i$ , o parâmetro de Dar Zarrouk condutância longitudinal ( $S_i$ ), respectivamente unitária e total é definido como:

$$S_i = \frac{h_i}{\rho_i} \quad (\text{siemens}) \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} \quad (\text{siemens}) \quad (2)$$

Esse parâmetro, além de auxiliar na definição do modelo geoeletrico final, é utilizado em outras questões práticas, como bem demonstrou Henriet (1975). A determinação da condutância longitudinal da camada sobrejacente a um aquífero pode estimar o grau de sua proteção natural frente a um contaminante migrando verticalmente.

Quanto maior o valor de  $S$  da camada sobrejacente, maior será o grau de proteção do aquífero, frente a esses contaminantes, pois: (1) quanto maior a espessura da camada sobrejacente: maior o tempo de percolação do poluente – maior filtro; e, (2) quanto menor sua resistividade: mais argiloso – menos permeável. Seus resultados poderiam orientar futuras instalações de áreas de disposição de resíduos, bacias de tratamento de efluentes etc.

A Figura 1 apresenta uma ilustração de uma seção geoeletrica obtida através de sondagens elétricas verticais, cujos parâmetros condutância longitudinal da camada sobrejacente e a resistência transversal do aquífero, permitem estimar o grau de proteção desse aquífero frente a contaminantes.

### Densidade de ensaios geofísicos representativos

Nesse tipo de estudo, o número de ensaios geofísicos a ser executado é de fundamental importância, cujos modelos geoeletricos resultantes das interpretações das SEVs devem apresentar uma correlação satisfatória. A distância entre os centros de SEVs contínuas – malha adotada depende, de um lado, do caráter e fase da investigação, e de outro, das estruturas geológicas existentes. Na medida do possível, deve-se iniciar por um levantamento de caráter regional e posteriormente detalhar os locais de maior interesse.

Para estabelecer uma malha de ensaios, estimando a quantidade de SEVs a serem executadas em função da profundidade de investigação (m) e das dimensões da área de estudo (m<sup>2</sup>), pode-se utilizar a equação a seguir:

$$SEV = \left( \frac{\sqrt{\text{área}}}{2 \times \text{prof. inv.}} \right)^2 \quad (3)$$

Entretanto, a programação de uma campanha por SEV, deve aliar, além da qualidade e segurança dos resultados, prazos disponíveis e custos. Em áreas de estudo com grandes dimensões, cujas profundidades a serem investigadas são relativamente pequenas, a aplicação da Equação 3 pode-se tornar inviável, tanto economicamente como em termos de prazos. As relações entre as dimensões da área de estudo e a escala do trabalho devem ser consideradas na definição da malha ideal.

Como uma tentativa de contribuição na programação de uma campanha de SEV envolvendo estudos de vulnerabilidade de

aquíferos, a Figura 2 apresenta um ábaco, que pode ser utilizado como um indicativo inicial para orientar a quantidade de ensaios a serem desenvolvidos, em uma determinada área de trabalho. A utilização do ábaco é simples:

- 1) de posse das dimensões da área de pesquisa –  $z$  (metros quadrados) deve-se encontrar a reta correspondente;
- 2) ao longo dessa reta, determinar a escala ( $x$ ) de trabalho a ser utilizada; e,
- 3) nesse ponto, tomar o valor correspondente ao eixo  $y$  – *quantidade de SEVs recomendadas* ( $y$ ). Recomenda-se, entretanto, um número mínimo de três ensaios.

Ressalta-se que esse ábaco foi elaborado considerando áreas de trabalho até 10.000.000 m<sup>2</sup>. Isso se deve ao fato de que a grande maioria dos trabalhos, para fins hidrogeológicos e ambientais, apresentam áreas menores que este limite estabelecido, e a metodologia de cálculo deve mudar para áreas maiores.

Entretanto, através das Equações 4 e 5 (Tabela 1), a metodologia anterior pode ser sintetizada, incluindo áreas maiores que as do ábaco, estimando-se a quantidade de SEVs, em função das dimensões da *área de pesquisa* e das *escalas sugeridas*, simultaneamente.

Os valores obtidos para as quantidades de SEVs devem ser aproximados, de preferência para mais, facilitando a programação. Deve-se ressaltar, entretanto, que a quantidade de ensaios finais estará sempre ligada às especificidades de cada projeto e de suas etapas de execução.

## RESULTADOS

### Ábaco para estimar a proteção natural de um aquífero

Visando obter uma estimativa preliminar da proteção de uma camada aquífera, o ábaco da Figura 3 apresenta as relações do parâmetro condutância longitudinal unitária com as resistividades e espessuras em função da litologia da camada sobrejacente (Braga, 2006). Ressalta-se que a resistividade elétrica apresenta uma relação direta com a condutividade hidráulica dos materiais geológicos. Esta correlação é diretamente proporcional em escala regional, mas localmente pode não ocorrer se os sedimentos apresentam uma granulometria de média a fina com presença de seixos. Nesse caso a resistividade aumenta, mas não a condutividade hidráulica.

Na correlação com a proteção de aquíferos frente a contaminantes, recomenda-se tomar os valores de  $S \geq 1,0$  siemens (mínimo de  $S > 0,3$ ) para as camadas sobrejacentes, como os adequados. Entretanto, na utilização do ábaco para obter esse tipo de correlação, valores da condutância longitudinal isoladamente não bastam para definir o grau de proteção de um aquífero, pois

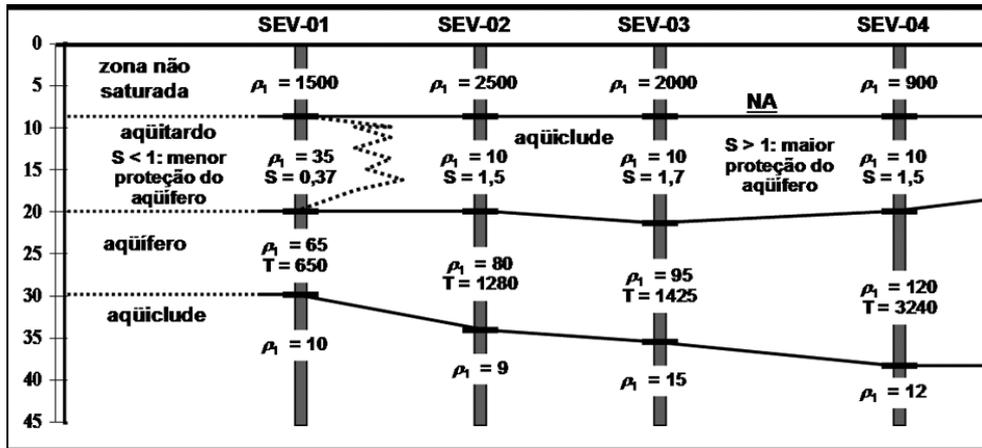


Figura 1 – Seção geoeétrica e o grau de proteção de um aquífero.

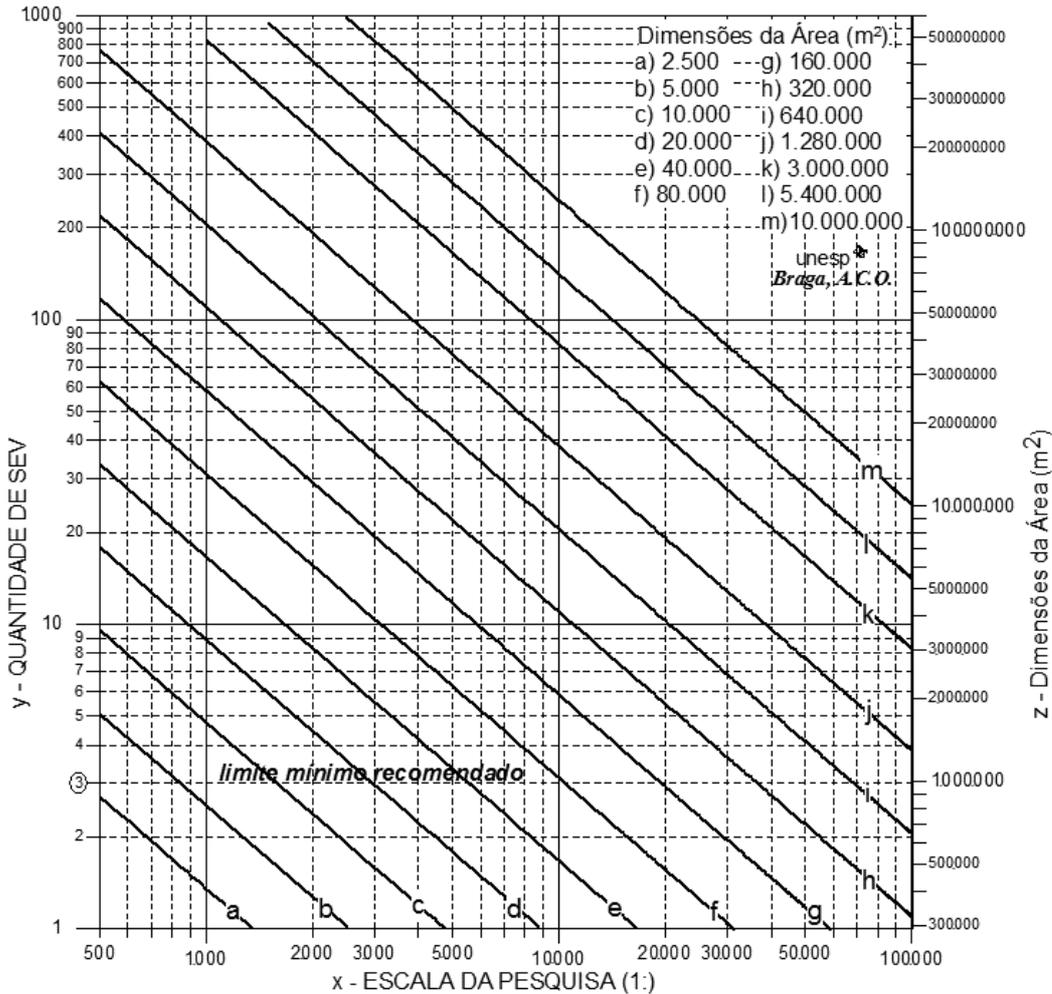
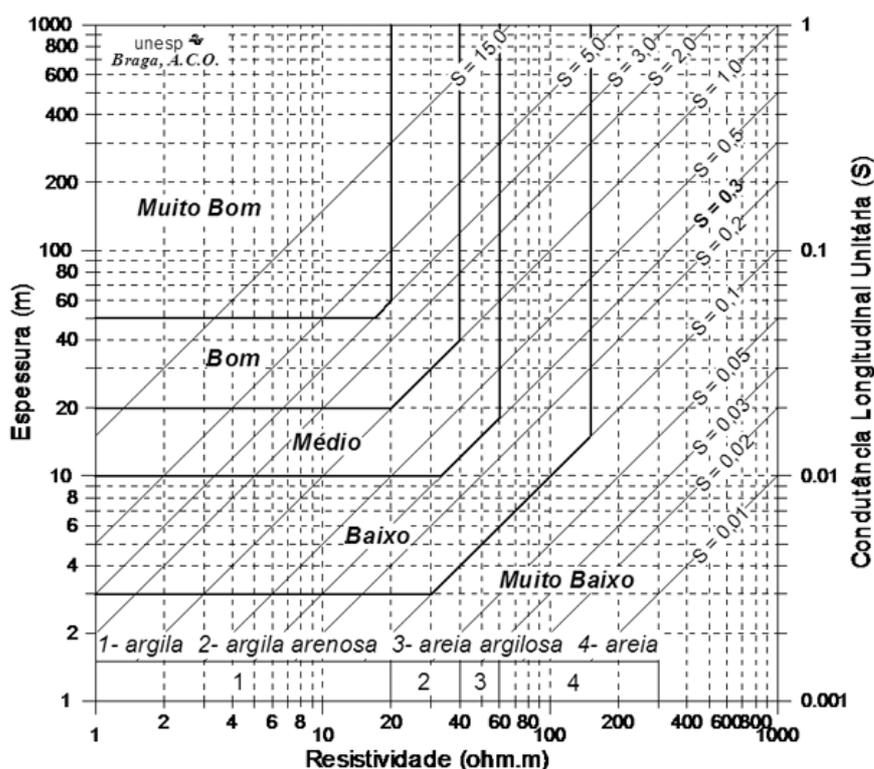


Figura 2 – Ábaco para estimar a quantidade de ensaios geofísicos em função das dimensões da área de estudo e escala programada.

**Tabela 1** – Estimativa da quantidade de SEVs em função da escala de trabalho e dimensões da área de pesquisa.

Áreas (m <sup>2</sup> )	Escalas Sugeridas (1:)	Equações
≤ 1.280.000	≤ 20.000	$y = (x^{-1}) \times (1,14 z^{0,905})$ (4)
>1.280.000 e ≤ 10.000.000	10.000 a 30.000	
> 10.000.000	25.000 a 500.000	$y = (x^{-2}) \times (16,7 z^{1,05})$ (5)

onde,  $y$  = quantidade de SEVs recomendadas;  $x$  = escala de trabalho e  $z$  = dimensões da área de pesquisa (m<sup>2</sup>).

**Figura 3** – Relação condutância longitudinal unitária e proteção natural do aquífero (Braga, 2006).

um valor elevado de  $S$  (por exemplo:  $S = 1,0$  siemens), pode corresponder a baixos valores de resistividade, mas por outro lado, a espessura também é pequena. Portanto, o ideal é conjugar valores de condutância longitudinal com a resistividade da camada, a qual identifica a litologia predominante.

Ressalta-se que com a ocorrência de contaminantes nos solos e águas subterrâneas, não se pode aplicar esse tipo de correlação, pois os valores naturais de resistividade modificam-se em função da presença desses contaminantes, resultando em uma correlação totalmente inadequada.

No caso de aquífero livre, onde a camada sobrejacente corresponde à zona não saturada, os valores de resistividade não

identificam a litologia dessa camada. Entretanto, o valor da resistividade obtido para a camada saturada pode ser extrapolado para os sedimentos sobrepostos, desde que a litologia seja aproximadamente a mesma. Dessa maneira, o grau de proteção do aquífero livre pode ser estimado.

### Estimativa da vulnerabilidade natural de aquífero

A Figura 4 apresenta a seqüência para se obter um índice de vulnerabilidade natural a partir de ensaios geofísicos da eletrorresistividade com mesma escala de valores e graduação que os apresentados em IG (1997). Observa-se nessa seqüência proposta que o tipo litológico e características granulométricas são substituídos

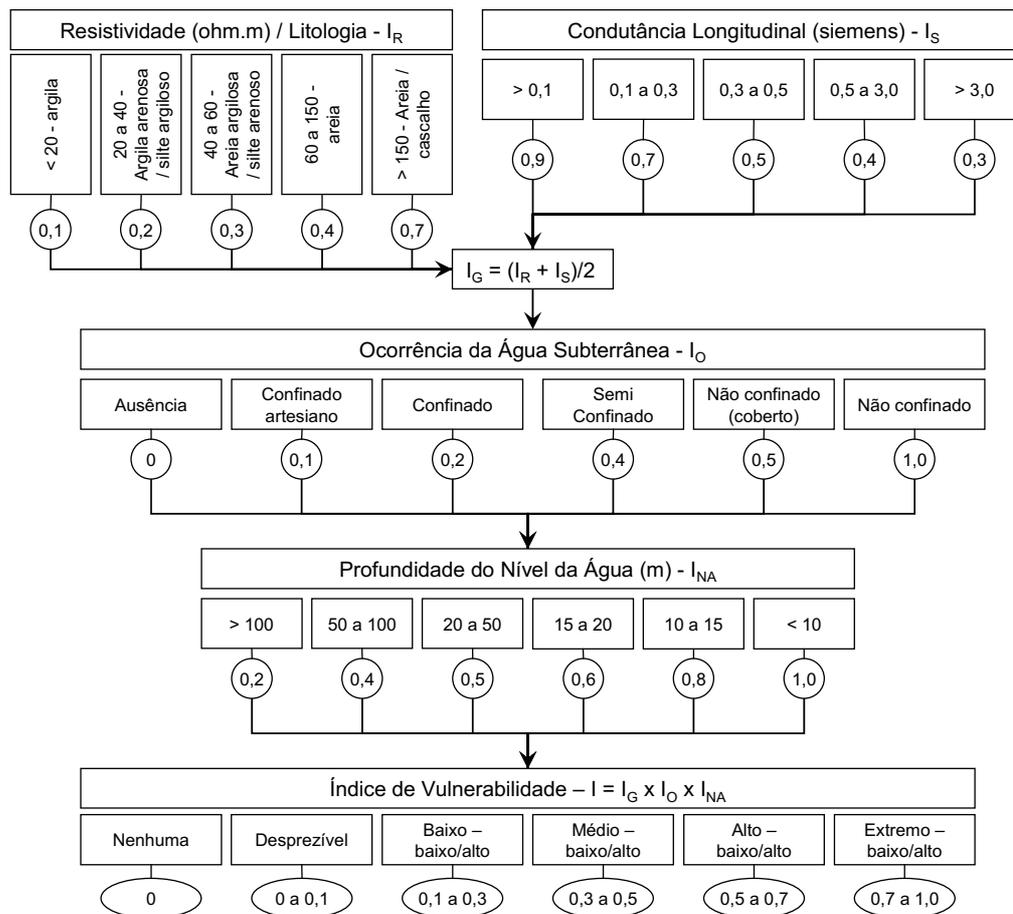


Figura 4 – Índice de vulnerabilidade natural do aquífero – parâmetros geoeletricos.

pela resistividade e condutância longitudinal, gerando um índice geofísico ( $I_G$ ). O produto dos índices: *geofísica*, *ocorrência* e *profundidade* do nível d'água subterrânea determina o índice de vulnerabilidade a ser tomado, gerando mapas de vulnerabilidade natural das águas subterrâneas.

A partir dessa estimativa trabalhos de proteção e/ou remediação das águas subterrâneas poderão ser programados e orientados de maneira mais precisa e econômica, facilitando a adoção das medidas necessárias.

### Aplicações práticas

A metodologia proposta foi aplicada em uma área próxima ao município de Rio Claro-SP – Caso 1, através do desenvolvimento de 27 sondagens elétricas verticais – arranjo Schlumberger (Fig. 5). A geologia local é composta por sedimentos arenosos da Fm. Botucatu – Bacia Sedimentar do Paraná. O estudo teve como finalidade determinar a vulnerabilidade natural de um aquífero livre a partir de ensaios geofísicos.

Como pode ser constatado, a litologia das zonas não saturada e saturada era praticamente homogênea. Portanto a resistividade da camada aquífera foi extrapolada para os sedimentos da zona não saturada, permitindo a aplicação da metodologia proposta. Na figura anterior observam-se as faixas de vulnerabilidade do aquífero, sendo na área central de desprezível a médio e a norte e leste da área de alto a extremo. Nesse caso, o parâmetro fundamental na definição dos índices de vulnerabilidade foi a espessura da zona não saturada (maior na região central).

A Figura 6 apresenta os resultados de um levantamento de 40 sondagens elétricas verticais – arranjo Schlumberger, em uma área industrial localizada no estado de Minas Gerais – Caso 2. A geologia local é formada por sedimentos arenosos e argilosos e rochas metamórficas. Como o aquífero considerado é livre e as profundidades do nível d'água subterrânea apresentaram pequenas variações, o parâmetro com maior destaque na definição do índice de vulnerabilidade foi a resistividade (litologia), a qual pode identificar camadas argilosas, arenosas e areno-argilosas.

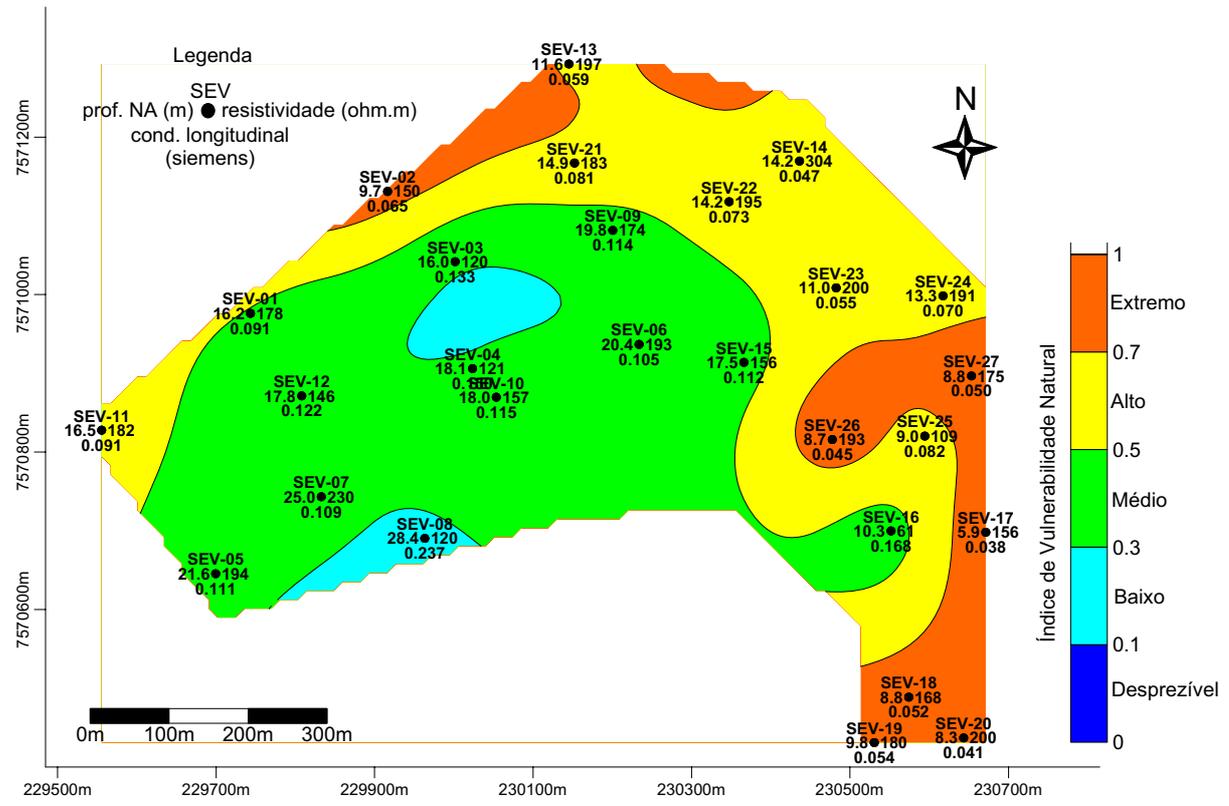


Figura 5 – Mapa de vulnerabilidade natural do aquífero livre – Caso 1.

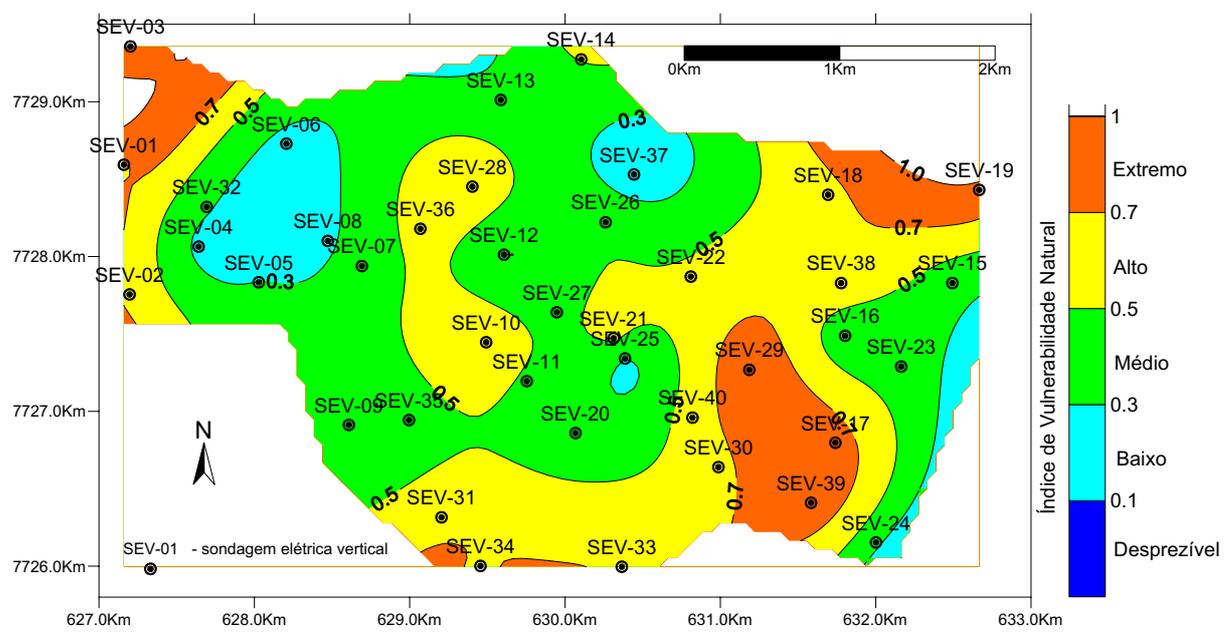


Figura 6 – Mapa de vulnerabilidade natural do aquífero livre – Caso 2.

A vulnerabilidade natural do aquífero livre apresenta zonas de índices de alto a extremo, indicando locais de maior atenção e monitoramento.

## CONCLUSÕES

Levantamentos efetuados pelo método da eletrorresistividade, técnica da sondagem elétrica vertical, obtendo as resistividades, espessuras e parâmetros de Dar Zarrouk, das diferentes camadas geológicas, permitem extrair um grande número de informações, as quais podem subsidiar estudos, tanto envolvendo a captação de águas subterrâneas, como no monitoramento e preservação dos aquíferos frente a contaminantes diversos.

Produtos tais como identificação litológica, determinação do nível d'água – mapa potenciométrico, identificação de aquíferos promissores, delimitação de plumas de contaminação etc., permitem aplicar essa metodologia de maneira simples e a custos reduzidos, com relativo sucesso. A aplicação dessa metodologia geoeletrica na determinação do índice de vulnerabilidade natural de aquíferos revela-se bastante promissora, trazendo grande auxílio em estudos ambientais, principalmente em áreas com dimensões médias a grandes.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Departamento de Geologia Aplicada – IGCE/UNESP, bem como os técnicos envolvidos nos trabalhos apresentados.

## REFERÊNCIAS

BRAGA ACO. 2006. Métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida Aplicados nos Estudos da Captação e Contaminação de Águas

Subterrâneas: Uma Abordagem Metodológica e Prática. Tese de Livre-Docência na disciplina Métodos Geoeletricos Aplicados à Hidrogeologia do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista – Unesp. 121p.

BRAGA ACO, MALAGUTTI FILHO W & DOURADO JC. 2006. Resistivity (DC) method applied to aquifer protection studies. ISSN 0102-261X, Revista Brasileira de Geofísica, 24(4): 573–581.

FOSTER SSD. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. TNO Committee on Hydrological Research Information, 38.

FOSTER SSD & HIRATA RCA. 1988. Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. Lima: CEPIS/PAHO/WHO, 78 p.

HENRIET JP. 1975. Direct applications of the Dar Zarrouk parameters in ground water surveys. Geophysical Prospecting, 24: 344–353.

IG. 1997. Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. Instituto Geológico, CETESB, DAEE, Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Coordenação: HIRATA RCA, BASTOS CRA & ROCHA GA. São Paulo: Instituto Geológico, CETESB, 1: 144 p.

MAZAC O, CISLEROVA M, KELLY WE, LANDA I & VENHODOVA D. 1990. Determination of hydraulic conductivities by surface geoelectrical methods. In: WARD S (Ed.). Geotechnical and environmental geophysics, 125–131.

SHEVNIN V, RODRÍGUEZ OD, MOUSATOV A & RYJOV A. 2006. Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data. Geofísica Internacional, 45(3): 195–207.

## NOTA SOBRE O AUTOR

**Antonio Celso de Oliveira Braga** é geólogo formado pela Universidade Estadual Paulista – Unesp (1978). Doutor em Geociências (1997) e Livre-docente na disciplina Métodos Geoeletricos Aplicados na Hidrogeologia (2006) pela Universidade Estadual Paulista – Unesp/Campus de Rio Claro. Foi geólogo no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (1978 a 1995). Desde 1998 é docente do Departamento de Geologia Aplicada – IGCE/Unesp – Rio Claro, atuando em hidrologia e geofísica aplicada à hidrogeologia e estudos ambientais, envolvendo os métodos geoeletricos.