

## Capítulo 3

---

# **Vulnerabilidade natural do solo em áreas agrícolas**

**Subsídio à avaliação do risco  
de contaminação do lençol  
freático por agroquímicos**

*Marco Antonio Ferreira Gomes*

*Cláudio Aparecido Spadotto*

*Maria Conceição Peres Young Pessoa*

## Introdução

O estudo do movimento de agrotóxicos no perfil do solo envolve muitos fatores, e isso tem contribuído para que o fenômeno seja ainda pouco conhecido no meio técnico-científico (TUON et al., 1995). Sabe-se, no entanto, que o movimento de agrotóxicos e nutrientes no solo se realiza por meio de difusão e pelo fluxo de massa em água, segundo Hunter e Stabbe (1972), associado às transformações químicas e biológicas e processos de adsorção e persistência do produto (MERKLE et al., 1967; KANAZAWA, 1989; BARRIUSO et al., 1992).

O presente trabalho propõe um método simplificado de avaliação da vulnerabilidade natural do solo, como forma de subsidiar estudos relativos à movimentação de agroquímicos, sobretudo aqueles voltados à avaliação de riscos de contaminação da água subterrânea. Para tanto, considerou-se a relação entre condutividade hidráulica e declividade dos principais solos agrícolas brasileiros (Tabela 1), tomando por referência as classes de 1º, 2º e 3º níveis categóricos (EMBRAPA, 1999) e, ainda, a profundidade do lençol freático a partir da superfície dos mesmos até o nível de base do Córrego do Espriado, para a obtenção de três classes gerais de vulnerabilidade, denominadas de baixa, média e alta. No entanto, no item resultados, foram consideradas subdivisões tais como muito baixa/baixa, baixa/média e média/alta em razão de situações de transição. Entende-se vulnerabilidade como sendo a susceptibilidade de um compartimento, solo ou água, por exemplo, ser adversamente afetado por uma carga contaminante qualquer, conforme a proposição de Foster (1993) e do Instituto Geológico (1997) para aquíferos. Enquanto esses autores adotaram índices de vulnerabilidade, no presente trabalho optou-se por classes de vulnerabilidade, com situações de abordagem em escala de trabalho mais detalhada e específica para os solos abordados.

## Metodologia de trabalho

O presente estudo foi desenvolvido para os principais solos da Micro-bacia do Córrego do Espriado, localizada no Município de Ribeirão Preto, SP, mais precisamente entre as coordenadas 21º11'44,51" e 21º17'34,05" de latitude sul; 47º39'31,69" e 47º45'27,58" de longitude oeste. A altitude

**Tabela 1.** Condutividade hidráulica estimada dos principais solos agrícolas brasileiros considerando as classes de 1º, 2º e 3º níveis categóricos, em função da textura, estrutura, estabilidade de agregados e profundidade do solo.

Classe de solo	Textura dominante	Estrutura dominante	Estabilidade agregados	Profundidade (Horiz. A+B)	Condutividade hidráulica
Latossolos Vermelhos Eutroféricos, distroféricos, aluminoféricos, eutróficos e distróficos	Argilosa	Blocos sub-angulares	Estável	Profundo	Alta
	Argilo-arenosa	Granular	Pouco estável	Profundo	Média
	Arenosa	Granular	Pouco estável	Profundo	Média
Latossolos Vermelho-Amarelos Acriféricos, ácidos, distroféricos, distróficos e eutróficos	Argilosa	Blocos sub-angulares	Estável	Profundo	Alta
	Argilo-arenosa	Granular	Pouco estável	Profundo	Média/alta
	Arenosa	Granular	Instável	Profundo	Alta
Latossolos Amarelos Acriféricos, ácidos, distroféricos, distróficos e eutróficos	Argilosa	Blocos sub-angulares	Estável	Profundo	Média
	Argilo-arenosa	Blocos sub-angulares	Estável	Profundo	Média
	Arenosa	Blocos sub-angulares	Estável	Profundo	Média
Nitossolos Vermelhos Distroféricos e eutroféricos	Argilosa	Blocos angulares	Estável	Relativamente Pouco profundo	Alta
Argissolos Vermelhos Eutroféricos, distróficos e eutróficos	Argilosa	Blocos sub-angulares	Estável	Pouco profundo	Média
	Argilo-arenosa	Blocos sub-angulares	Estável	Pouco profundo	Média
Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos, distróficos, aluminicos	Argilosa	Blocos sub-angulares	Estável	Pouco profundo	Média
	Areno-argilosa	Blocos sub-angulares	Estável	Pouco profundo	Média/baixa
Argissolos Amarelos Distroféricos e eutróficos	Argilosa	Blocos sub-angulares	Estável	Pouco profundo	Média/baixa
	Areno-argilosa	Blocos sub-angulares	Estável	Pouco profundo	Média

Fonte: Gomes et al., (1996a, 1996b).

média é de 600 m e o relevo dominante do tipo suave ondulado. O solo é constituído predominantemente por Latossolos Vermelhos Eutroféricos e Distroféricos e Latossolos Vermelhos Distroféricos, classificados pelo Sistema Brasileiro mais antigo como Latossolo Roxo dos tipos Eutrófico e Distrófico em proporções semelhantes e Latossolo Vermelho-Escuro Distrófico (MIKLÓS; GOMES, 1996). Na porção mais a jusante da área, representativa da recarga do Aquífero Guarani, predominam solos arenosos do tipo



Latossolo Vermelho Distrófico psamítico (LVdq) e Neossolo Quartzarênico (RQo), conforme Embrapa (1999).

O método adotado preconiza a influência de determinadas propriedades físicas do solo nos potenciais de infiltração e escoamento superficial da água. Propriedades como textura, estabilidade de agregados e profundidade do solum (horizonte A+B), em conjunto, permitem a estimativa da condutividade hidráulica, aqui classificada em alta ( $>25 \text{ cm h}^{-1}$ ); média ( $12,5 \text{ cm h}^{-1}$  a  $25 \text{ cm h}^{-1}$ ) e baixa ( $2,5 \text{ cm h}^{-1}$  a  $12,5 \text{ cm h}^{-1}$ ), adaptado de Smith e Browing (1946) citado por Kramer (1969), e exemplificada na Tabela 1 para as principais classes de solos agrícolas brasileiros.

A condutividade hidráulica (K) é aqui definida como o fluxo de água no solo saturado (Q), avaliado no tempo (T), a partir de uma seção vertical conhecida (A) + (L) e submetida a uma carga hidráulica constante (rH), onde  $Q = \text{fluxo lido (mL h}^{-1}\text{)}$ ;  $A = \text{área da seção (cm}^2\text{)}$ ;  $T = \text{tempo (1 hora)}$ ;  $L = \text{comprimento da seção (cm)}$  e  $H = \text{carga hidráulica constante (2 cm) + comprimento da seção (cm)}$ . K é então definido pela equação de Darcy:  $K = Q/A.T \times L/H$ .

A classificação de condutividade hidráulica foi submetida a tratamento estatístico para validação do método envolvendo variáveis como textura, estrutura, estabilidade de agregados e profundidade do solo. Valores numéricos foram atribuídos para os níveis de cada variável, como textura argilosa = 2,0; areno-argilosa = 1,0 e arenosa = 0. Com os dados definidos numericamente, foi realizada análise fatorial discriminada (ASENCIO, 1989) para verificar se o parâmetro condutividade hidráulica poderia ser obtido apenas com quatro variáveis citadas. O método propõe as classes alta, média e baixa de condutividade hidráulica para cada classe de solo conforme sua proximidade ao centro de cada nível. A classificação de condutividade hidráulica, obtida pelas estimativas de densidade Kernel com amplitudes desiguais (SAS INSTITUTE, 1988), coincidiu com a classificação feita preliminarmente, proporcionando consistência aos resultados obtidos (GOMES et al., 1996a). Em seguida foram estabelecidas as classes de relevo ou declividade do terreno, com adoção de três níveis principais e seus respectivos valores percentuais, conforme Lemos e Santos (1982) e Embrapa (1999): a) plano ( $< 3 \%$ ); b) suave ondulado ( $3 \%$  a  $8 \%$ ) e c) ondulado ( $8 \%$  a  $20 \%$ ). Valores acima de  $20 \%$  de declividade foram descartados nessa avaliação, pois se referem a áreas com forte restrição agrícola.

A relação matricial entre as classes de condutividade hidráulica e de declividade resultou na classificação dos potenciais de infiltração e de escoamento superficial da água no solo (Tabelas 2 e 3).

**Tabela 2.** Potencial de infiltração em relação à declividade e condutividade hidráulica do solo.

Condutividade hidráulica	Declividade ou classes de relevo do solo		
	Plano (< 3 %)	Suave ondulado (3 % a 8 %)	Ondulado (> 8 % < 20 %)
Baixa	Médio	Baixo	Baixo
Média	Alto	Médio	Baixo
Alta	Alto	Alto	Médio

Fonte: Adaptado de Gomes et al. (1996a).

**Tabela 3.** Potencial de escoamento superficial em relação à declividade e condutividade hidráulica do solo.

Condutividade hidráulica	Declividade ou classes de relevo do solo		
	Plano (< 3 %)	Suave ondulado (3 % a 8 %)	Ondulado (> 8 % < 20 %)
Baixa	Médio	Alto	Alto
Média	Baixo	Médio	Alto
Alta	Baixo	Baixo	Médio

Fonte: Adaptado de Gomes et al. (1996a).

As Tabelas 2 e 3 evidenciam, em síntese, que os potenciais de infiltração e de escoamento da água mantêm relação inversa entre si.

Potencial de infiltração classificado como alto (em decorrência da alta condutividade hidráulica e da baixa declividade da área) indica alta vulnerabilidade à contaminação do compartimento água do lençol freático, com possibilidade de chegada do produto contaminante até os corpos d'água



mais profundos ou à zona saturada do Aquífero em discussão. Como o lençol freático nessa avaliação foi substituído pela zona saturada do Aquífero, esse parâmetro passou a ser neutro e a ênfase, transferida para a condutividade hidráulica do solo e a declividade do terreno.

Potencial de escoamento superficial classificado como alto, por sua vez, indica que a área é mais vulnerável à erosão e à contaminação dos corpos d'água superficiais. Haverá perda de fertilidade e remoção de pesticidas do compartimento solo, via transporte pluvial, até os cursos d'água.

Neste estudo, para efeito de profundidade do lençol freático ou zona saturada, foi considerada a linha de base do Córrego do Espreado para todos os solos, conforme levantamento de profundidade do nível d'água a partir de sondagens elétricas (INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA, 1994).

## Resultados

A Tabela 4 contém as informações sobre a avaliação da vulnerabilidade dos solos da Microbacia do Córrego do Espreado na região de Ribeirão Preto, SP, principalmente em relação aos Latossolos Vermelhos Distróficos psamíticos e Neossolos Quartzarênicos (representativos das áreas de recarga do Aquífero Guarani) a partir da integração dos parâmetros condutividade hidráulica x declividade do terreno x potencial de infiltração x potencial de escoamento x profundidade da zona saturada.

Esses solos exibem valores mais elevados de vulnerabilidade natural em relação aos demais, o que significa que quando expostos à determinada carga potencialmente contaminante como agrotóxicos, por exemplo, podem oferecer riscos de contaminação para o Aquífero.

Com os resultados contidos na Tabela 4, adaptado de Gomes et al., (1996b, 2002), foram elaborados mapas de condutividade hidráulica (Fig. 1) e de declividade (Fig. 2) para os solos da microbacia do Córrego do Espreado. Com a combinação das informações obtidas (Fig. 1 e 2 e Tabela 4) foi elaborado o mapa final, integrando os dados de potencial de infiltração, potencial de escoamento superficial e vulnerabilidade, conforme mostra a Fig. 3.

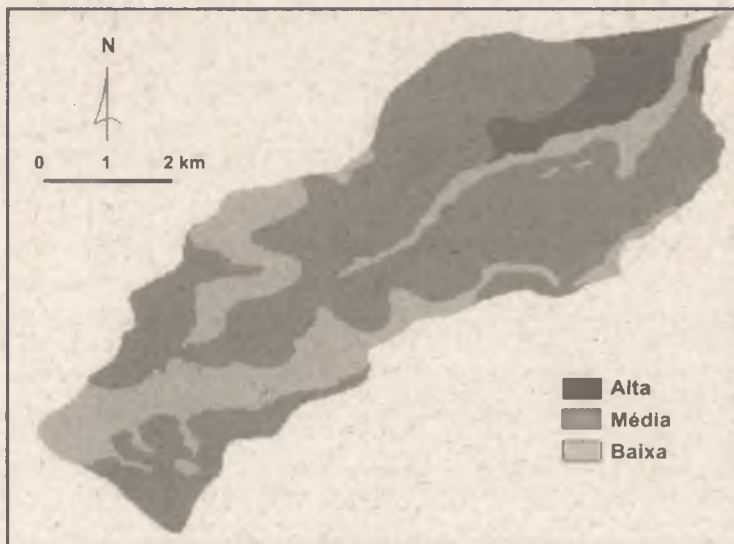
**Tabela 4.** Classificação da vulnerabilidade em função da integração de informações de condutividade hidráulica, declividade do terreno, potenciais de infiltração, escoamento superficial da água e profundidade do lençol freático para os solos agricultáveis da Microbacia do Córrego do Espriado, Município de Ribeirão Preto, SP.

Classe de solo	Condutividade hidráulica	Declividade terreno <sup>(1)</sup>	Potencial infiltração de água	Potencial escoamento de água	Profundidade lençol freático/zona saturada <sup>(2)</sup>	Vulnerabilidade (classes)
Latosolos Vermelhos Eutroférricos e Distroférricos argissólicos	Média/alta	Suave ondulado	Médio	Médio	Profundo	Baixa/média
Nitossolos Vermelhos Eutroférricos latossólicos	Média/alta	Ondulado	Médio	Médio	Muito profundo	Muito baixa/baixa
Latosolos Vermelhos Distroférricos psamíticos	Média/alta	Plano a suave ondulado	Médio/alto	Médio/baixo	Profundo a pouco profundo	Média/alta
Latosolos Vermelho-Amarelos Distroférricos plínticos	Média	Plano a suave ondulado	Médio	Médio	Profundo	Média
Neossolo Quartzarênico	Alta	Suave ondulado	Alto	Baixo	Pócuo profundo	Alta

<sup>(1)</sup>Plano: 0 % a 3 %; suave ondulado: 3 % a 8 %; ondulado: 8 % a 20 %, conforme Lemos e Santos (1982) e Embrapa (1999).

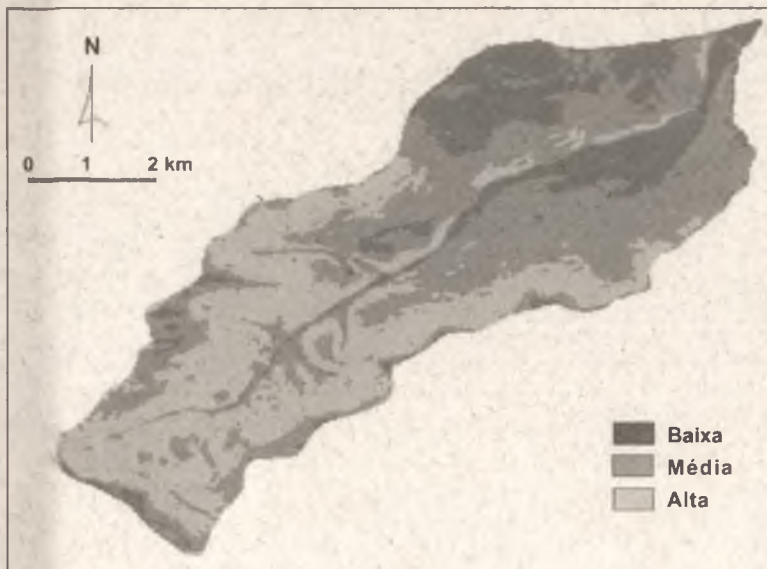
<sup>(2)</sup> Foi considerado como topo da zona saturada o nível de base do Córrego do Espriado de acordo com levantamento de profundidade do nível d'água (IPT, 1994). Para efeito de entendimento das diferenças entre as escalas relativas de profundidade da zona saturada, foi adotado o seguinte esquema, com intervalos de valores: muito profundo (> 40 m); profundo (20 m – 40 m); pouco profundo (< 20 m).

A definição das classes de vulnerabilidade teve como referências os potenciais de lixiviação e de escoamento superficial (Fig. 3), já que a presente abordagem pretendeu subsidiar estudos de risco de contaminação de água subterrânea. Os valores de vulnerabilidade apresentados permitem orientação mais adequada para o gerenciamento ambiental de áreas agrícolas, sobretudo em relação à aplicação de agroquímicos (fertilizantes e agrotóxicos).



**Fig. 1.** Classificação quanto à condutividade hidráulica dos solos.

Fonte: Gomes et al. (1996b) e Gomes et al., (2002).

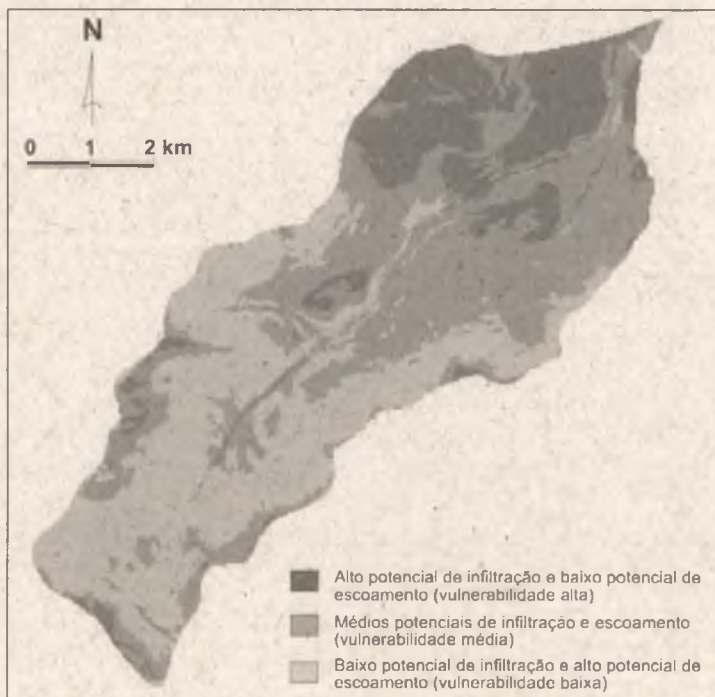


**Fig. 2.** Classificação quanto à declividade dos terrenos.

Fonte: Gomes et al. (1996b, 2002).



### Microbacia do Córrego do Espriado Ribeirão Preto, SP



**Fig. 3.** Potencial de escoamento de infiltração de água no solo e estimativa de vulnerabilidade.

Fonte: Gomes et al. (1996b, 2002).

## Conclusão

Os resultados apresentados na Tabela 4 e espacializados nos mapas contidos nas Fig. 1, 2 e 3, com ênfase para os parâmetros condutividade hidráulica, declividade do terreno e potencial de infiltração de água no solo, respectivamente, todos em função da profundidade da zona saturada, permitem a classificação da vulnerabilidade do solo frente a uma carga contaminante.

O potencial de infiltração de água no solo classificado como alto indica condição ambiental de vulnerabilidade alta do solo frente à carga contaminante, o que pode ser compreendido como uma condição favorável, a priori, à contaminação do lençol freático.

Para o potencial de escoamento alto (vulnerabilidade baixa), o contaminante tende a se escoar superficialmente, seja em suspensão ou

adsorvido a pequenos agregados ou torrões, tornando o solo menos exposto à condição de contaminação. Nesse caso, os cursos d'água tendem a ser comprometidos.

Os resultados apresentados permitem, ainda, orientar o gerenciamento rural no sentido de adoção de procedimentos que evitem riscos de contaminação do lençol freático. Entre esses procedimentos estão a seleção e aplicação de agrotóxicos que, preferencialmente, fiquem retidos no solo e que apresentem degradação rápida. Além dos agrotóxicos, os adubos nitrogenados devem ser selecionados, principalmente visando maior eficiência da planta na absorção de nitrogênio, uma vez que esse elemento nas suas diversas transformações no solo pode gerar compostos nocivos ao meio ambiente.

## Referências

- ASENCIO, L. J. **Técnicas de análisis de datos multidimensionales**: bases teóricas y aplicaciones en agricultura. Madrid: Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, 1989. 301 p.
- BARRIUSO, E.; FELLER, C.; CALVET, R.; CERRI, C. Sorption of atrazine, tebutryn and 2,4-D herbicides in two Brazilian Oxisols. **Geoderma**, Amsterdam, v. 53, p.155-167, 1992.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1999. 412 p.
- FOSTER, S. **Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas**: um método baseado em dados existentes. São Paulo: Instituto Biológico, 1993. 92 p.
- GOMES, M. A. F.; SPADOTTO, C. A.; PESSOA, M. C. P. Y. Avaliação da vulnerabilidade natural do solo em áreas agrícolas: subsídio à avaliação do risco de contaminação do lençol freático por agroquímicos. **Pesticidas, Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 12, p. 169-179, 2002.
- GOMES, M. A. F.; SPADOTTO, C. A.; LUIZ, A. J. B.; NEVES, M. C. Método de classificação preliminar dos potenciais de infiltração e de escoamento superficial da água no solo: subsídio à avaliação do risco de contaminação por agroquímicos. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia. **Resumos expandidos...** Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996a. 4 p. 1 CD-ROM.
- GOMES, M. A. F.; NEVES, M. C.; SPADOTTO, C. A.; LUIZ, A. J. B. Mapeamento expedito dos potenciais de infiltração e de escoamento superficial da água para os solos da

microbacia do Córrego do Espraiado em Ribeirão Preto—SP. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia: SBCS: ESALQ, 1996b. 4 p. 1 CD-ROM.

HUNTER, V. H.; STABBE, E. H. Movement and persistence of picloram in soil. **Weed Science**, Ithaca, v. 20, n. 5, p. 486-489, 1972.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Carta pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo**: quadrícula Ribeirão Preto-SP. São Paulo: IAC, 1990. Escala 1:100.000.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA. **Caracterização do potencial de contaminação das águas subterrâneas pro agroquímicos**: hidrogeologia da microbacia. São Paulo: [s.n.], 1994. 15 p. 2 mapas. (Relatório nº 32605).

INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO. **Plano cartográfico do Estado de São Paulo**: folhas SF-23-V-C-I-2-SO-D, SF-23-V-C-I-2-SO-E, SF-23-V-C-I-2-SO-F, SF-23-V-C-IV-3-SE-D, SF-23-V-C-I-IV-3-SE-F e 23-V-C-I-3-NE-B. São Paulo: IGC, 1990. Escala 1:10.000.

KANAZAWA, J. Relationship between the soil sorption constants for pesticides and their physicochemical properties. **Environmental Toxicology and Chemistry**, Elmsford, v. 8, p. 477-484, 1989.

KRAMER, P. J. **Plant and soil water relationships**: a modern synthesis. New York: McGraw-Hill, 1969. 482 p.

LEMOZ, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Campinas, SP: SBCS-SNLCS, 1982. 45 p.

MERKLE, M. G.; BOVERY, R. W.; DAVIS, F. S. Factors affecting the persistence of picloram in soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 59, p. 413-415, 1967.

MIKLÓS, A. A. W.; GOMES, M. A. F. **Levantamento semi-detalhado dos solos da Bacia Hidrográfica do Córrego Espraiado, Ribeirão Preto-SP**. Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 1996. 48 p. Relatório técnico.

OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil**: guia auxiliar para seu reconhecimento. 2. ed. Jaboticabal: Funep, 1992. 201 p.

INSTITUTO GEOLÓGICO. **Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto Geológico: Cetesb: DAEE, 1997. 2 v., 144 p. (Série Documentos).

SAS INSTITUTE. **SAS procedures guide**: release 603 edition. Cary: SAS Institute, 1988. 441 p.

TUON, R. L.; MONTEIRO, R. T. R.; LIBARDI, P. L.; COMPTE, V. Deslocamento miscível de 14 C atrazina em colunas de solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 1995. p. 2404-2405.