

## IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS NO ESTADO DE SÃO PAULO VULNERÁVEIS À CONTAMINAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

CLAUDIO APARECIDO SPADOTTO<sup>1</sup>, RAFAEL MINGOTTI<sup>2</sup>, GIOVANNA NAVES BERALDO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Pesquisador, Ph.D., Embrapa Informática Agropecuária, Campinas/SP, (19) 3211-5700, claudio.spadotto@embrapa.br

<sup>2</sup> Analista, Dr., Embrapa Territorial, Campinas/SP.

<sup>3</sup> Mestranda em Geografia, Unicamp, Campinas/SP.

Apresentado no  
L Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2021  
08 a 10 de novembro de 2021 – Congresso On-line

**RESUMO:** Os solos atuam como um filtro natural e influem na vulnerabilidade de corpos de água subterrânea à contaminação por agrotóxicos e outras substâncias químicas orgânicas. Com o objetivo de caracterizar a vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação no estado de São Paulo, em base territorial e escala exploratória, esse trabalho foi elaborado utilizando o índice TR, propriedades médias dos solos e dados de recarga hídrica líquida anual. Foi possível identificar áreas nas diferentes categorias de vulnerabilidade com base no índice TR, destacando-se áreas vulneráveis na região centro-nordeste do estado, onde ocorrem importantes atividades agrícolas. Também foi possível a identificação das classes de solos predominantes nas áreas com maior vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação.

**PALAVRAS-CHAVE:** solos, vulnerabilidade; SIG.

## IDENTIFICATION OF AREAS IN SÃO PAULO STATE VULNERABLE TO GROUNDWATER CONTAMINATION

**ABSTRACT:** Soils act as a natural filter and influence the vulnerability of groundwater to contamination by pesticides and other organic chemicals. In order to characterize the vulnerability of groundwater to contamination in the state of São Paulo, on a territorial basis and on an exploratory scale, this work was carried out using the TR index, average soil properties and annual net water recharge data. It was possible to identify areas in the different categories of vulnerability based on the TR index, highlighting vulnerable areas in the central-northeast region of the state, where important agricultural activities take place. It was also possible to identify the predominant soil classes in areas with greater vulnerability of groundwater to contamination.

**KEYWORDS:** soils, vulnerability; GIS.

**INTRODUÇÃO:** Os solos atuam como um filtro natural, onde ocorrem os processos de sorção, degradação e transporte dos agrotóxicos e outras substâncias químicas orgânicas e influem na vulnerabilidade de corpos de água subterrânea à contaminação. A vulnerabilidade de aquíferos à poluição é um conceito inverso ao da capacidade de assimilação de cargas contaminantes pelos corpos de água, com a diferença adicional de que o aquífero possui uma cobertura não saturada que proporciona mais proteção (Foster et al., 1988). Existem diversos índices de vulnerabilidade à contaminação de corpos de água subterrâneos por agrotóxicos (Gomes et al.,

2006); entretanto, para que esses índices possam ser utilizados na avaliação de áreas específicas, é necessário levar em conta características de cada agrotóxico, o que traz complexidade à avaliação. Além disso, esses índices demandam diversos dados de entrada, o que limita ainda mais a sua utilização. Em estudos de maior abrangência geográfica, em escala cartográfica menor, alguns dados de entrada podem ser obtidos remotamente, com posterior integração em um sistema de informações geográficas - SIG (Budiman et al., 2003; Spadotto et al., 2012). O objetivo deste trabalho foi aplicar o índice TR (Mingoti e Spadotto, 2016; Mingoti et al., 2016), baseado em propriedades dos solos e na recarga hídrica líquida, para caracterização da vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação no estado de São Paulo, em base territorial e escala exploratória.

**MATERIAL E MÉTODOS:** A partir do Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (OLIVEIRA et al., 1999; OLIVEIRA, 1999), foi gerado um plano de informação da vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação, por meio do Tempo de Retenção – TR, baseado no conceito de tempo de convecção ou de percurso (DAVIDSON et al., 1968; RAO et al., 1985):  $TR = ((L \times FC) / Q) \times RF$ ; em que: L = profundidade do aquífero ou lençol freático (m); FC = umidade do solo na capacidade de campo (V/V); Q = recarga hídrica líquida anual ( $m^3/m^2/ano$ ); e RF = Fator de retenção do contaminante no solo (adimensional). O RF para contaminantes químico-orgânicos, como os agrotóxicos, foi calculado como:  $RF = 1 + ((BD \times OC \times K_{OC}) / FC)$ ; onde: BD = densidade do solo ( $kg/m^3$ ); OC = teor de carbono orgânico do solo (M/M);  $K_{OC}$  = coeficiente de sorção normalizado para OC, assumido como  $1 m^3/kg$ . Foi considerado que quanto menor o TR, maior é a vulnerabilidade do corpo de água subterrâneo à contaminação. Pela análise das equações para obtenção de RF e TR, as áreas mais susceptíveis à contaminação (menores valores do índice TR) devem contemplar: valores mínimos de profundidade do lençol freático, densidade global e teor de carbono orgânico do solo, e valores máximos de recarga hídrica líquida anual. Os cálculos do TR foram realizados utilizando os valores médios de espessura dos horizontes, FC, BD e OC, para o horizonte “A” e para o horizonte subsuperficial diagnóstico “B” ou “C”, de cada classe do 2º nível taxonômico (subordem) presente no Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (OLIVEIRA et al., 1999). Os valores de espessura dos horizontes, BD e OC foram obtidos diretamente da descrição das classes registradas por Oliveira (1999). Os valores de FC foram estimados utilizando a metodologia de Mingoti et al. (2016), a qual, por sua vez, adota funções de pedotransferência apresentadas em Tomasella et al. (2000) e parâmetros de retenção de água nos solos, os quais foram estimados por meio do software Qualisolo (NAIME et al., 2006), utilizando valores médios de granulometria, densidade de partículas e BD provenientes de Oliveira (1999). A recarga hídrica líquida anual foi estimada como a diferença entre as médias históricas de chuva (ALVARES et al., 2015) e a evapotranspiração (ALVARES et al., 2013). A profundidade do lençol freático foi estimada por meio da aplicação do modelo *Height Above the Nearest Drainage* - HAND (NOBRE et al., 2011) nos dados do Modelo Digital de Elevação - DEM do projeto *Shuttle Radar Topographic Mission* – SRTM, disponibilizados pelo *United States Geological Survey* – USGS, em seu portal na internet, no formato raster com resolução espacial de 90m. Todos os dados de entrada foram convertidos para formato raster com resolução espacial de 90m (resolução espacial da evapotranspiração) no Sistema de Referência SIRGAS 2000 e no Sistema de Projeção Policônica, utilizando o aplicativo de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ESRI ArcGIS v. 10.3. O processamento das equações e a obtenção dos resultados foram nesse SIG, utilizando os padrões de resolução espacial, sistemas de referência e de projeção citados.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** A Figura 1 mostra as áreas do estado de São Paulo nas diferentes categorias de vulnerabilidade com base no índice TR. Pode-se destacar uma área com

$TR \leq 0,5$  ano e, conseqüentemente, com maior vulnerabilidade das águas subterrâneas na região centro-nordeste do estado, onde ocorrem importantes atividades agrícolas (IBGE, 2017; GARCIA e VIEIRA FILHO, 2021). É importante notar que, em áreas agrícolas, algumas propriedades do solo mudam com o preparo do solo e o grau de mudança varia com o tipo de solo e o manejo adotado. Os solos predominantes nas áreas com os menores valores do índice TR ( $\leq 0,5$  ano) são: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, típico A moderado, textura média/argilosa (26,9% das áreas com maior vulnerabilidade); NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico, típico A fraco (14,9%) e NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico, chernossólico (11,2%). O ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, típico A moderado, textura média/argilosa é a classe de solo com maior área no estado de São Paulo, ocupando 40,7% do território; enquanto as áreas com NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico, típico A fraco e NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico, chernossólico são comparativamente muito menores (em torno de 2,2% cada).

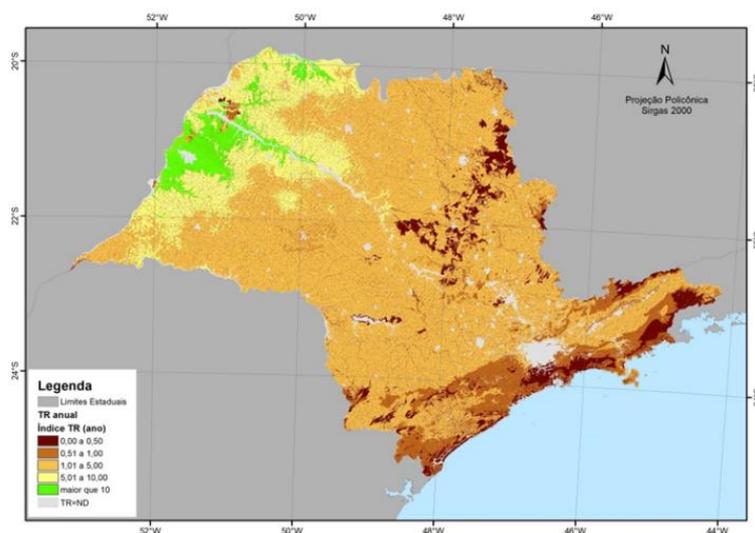


FIGURA 1. Áreas no estado de São Paulo nas diferentes categorias de vulnerabilidade, com base no índice TR.

**CONCLUSÕES:** Verificou-se que a aplicação do índice TR no estado de São Paulo possibilitou a identificação, em base territorial, das áreas mais vulneráveis à contaminação da água subterrânea e das classes de solo nessas áreas. Trabalhos em escalas mais detalhadas devem ser realizados, considerando a dependência espacial dos dados e a capacidade de atenuação dos solos nos diferentes usos.

**AGRADECIMENTOS:** Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS:

- ALVARES, C. A.; de MATTOS, E. M.; SENTELHAS, P. C.; MIRANDA, A. C.; STAPE, J. L. Modeling temporal and spatial variability of leaf wetness duration in Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 120, p. 455–467, 2015.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

- BUDIMAN, M.; MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; SANTOS, H. G. dos. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFS) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 50p. (Embrapa Solos. Documentos, 45).
- DAVIDSON, J. M.; REICK, C. E.; SANTELMAN, P. W. Influence of water flux and porous materials on the movement of selected herbicides. **Soil Science Society of America Journal**, v. 32, p. 629–633, 1968.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C.; ROCHA, G. A. **Riscos de poluição de águas subterrâneas: uma proposta de avaliação regional**. São Paulo: ABAS, 1988. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22664>> Acesso em: 01 jul. 2021.
- GARCIA, J. R.; VIEIRA FILHO, J. E. R. A nova geografia da agropecuária brasileira e os desafios logísticos. **Confins**, n. 50, 2021. DOI: 10.4000/confins.37395. Disponível em: <<http://journals.openedition.org/confins/37395>> Acesso em: 01 jul. 2021.
- GOMES, M. A. F.; SPADOTTO, C. A.; PEREIRA, A. S.; MATALLO, M. B.; LUCHINI, L. C. Movimento do herbicida tebutiuron em dois solos representativos das áreas de recarga do aquífero Guarani. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 479-483, 2006. DOI: 10.1590/S1415-43662006000200032.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Censo Agropecuário 2017**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>> Acesso em: 01 jul. 2021.
- MINGOTI, R.; SPADOTTO, C. A. Identificação de regiões do estado do Mato Grosso suscetíveis à contaminação da água subterrânea. *In*: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 20, 2016, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016. P 1021–1022.
- MINGOTI, R.; SPADOTTO, C. A.; MORAES, D. A. de C. Suscetibilidade à contaminação da água subterrânea em função de propriedades dos solos no Cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1252–1260, 2016.
- NAIME, J. de M.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A. Determinações físicas do solo a partir da granulometria: programa Qualisolo. *In*: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16, 2006, Aracaju. **Resumos [...]**. Aracaju: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 1 CD-ROM. 5 p.
- NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M. G.; RENNÓ, C. D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. Height above the nearest drainage: a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1–2, p. 13–29, 2011.
- OLIVEIRA, J. B. **Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico**. Campinas: Instituto Agrônômico (Boletim Científico, v. 45), 1999. 112 p.
- OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: Legenda expandida**. Campinas: Instituto Agrônômico; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 1999. 64 p. e mapa.
- RAO, P. S. C.; HORNSBY, A. G.; JESSUP, R. E. Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater. **Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings**, v. 44, p. 1–8, 1985.
- SPADOTTO, C. A.; HOLLER, W. A.; MARTINHO, P. R. R.; FOIS, N. S.; MORAES, D. A. de C.; DALTIÓ, J.; TRAJANO, S. R. da S. **Interfaces de modelos ambientais e sistemas de informação geográfica para a gestão territorial da contaminação de recursos hídricos**. Campinas: Embrapa Gestão Territorial, 2012. 37p. (Embrapa Gestão Territorial. Documentos, 1).
- TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, p. 327–338, 2000.