

## Índice de Vulnerabilidade de Água Subterrânea à Contaminação – VIX

Claudio A. Spadotto<sup>1</sup>

### Introdução

Água é essencial para a manutenção da vida e os recursos hídricos são fundamentais para várias atividades humanas. Historicamente a presença ou ausência de água determina a ocupação de territórios e o futuro de gerações.

A água cobre grande parte da superfície da Terra, no entanto, apenas cerca de 2,5% são de água doce. Os maiores volumes de recursos hídricos em todo o planeta estão concentrados em seis países, entre eles, o Brasil, com cerca de 12% da água doce disponível.

Além do volume de água, a sua qualidade merece, ou deveria merecer, grande atenção. Diversas atividades humanas afetam a qualidade e a potabilidade das águas. Essas atividades, especialmente quando desenvolvidas em áreas onde as águas subterrâneas estão em condições de maior vulnerabilidade à contaminação, representam uma grande ameaça à qualidade da água, podendo, por consequência, colocar em risco a conservação da biodiversidade, o equilíbrio dos ecossistemas e a sobrevivência da espécie humana.

Dos 8,5 milhões de quilômetros cúbicos de água doce, na forma líquida, 98,5% são de água subterrânea. Esses milhões de quilômetros cúbicos representam uma reserva estratégica, especialmente em momentos de falta de chuvas e de escassez de água superficial.

Nesse contexto, identificar as áreas com maior vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação torna-se imprescindível para o ordenamento e o planejamento de atividades humanas no espaço geográfico, assim como para a adoção de medidas mitigadoras dos seus possíveis impactos negativos.

Nesse Comunicado Técnico é apresentado o Índice de Vulnerabilidade de Água Subterrânea à Contaminação (VIX), desenvolvido em base científica, com algumas simplificações para condição não saturada do solo.

### Descrição do índice VIX

É tido que em um meio poroso unidimensional e homogêneo, a equação de conservação de massa para um contaminante químico (CQ) não-reativo, sem degradação, pode ser escrita como:

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = - \frac{\partial qs}{\partial z} \quad [1]$$

<sup>1</sup> Engenheiro Agrônomo, Ph.D. em Ciência de Solo e Água, pesquisador da Embrapa Gestão Territorial, Campinas, SP. E-mail: claudio.spadotto@embrapa.br

onde  $C$  e  $q_s$  são, respectivamente, concentração e fluxo do CQ,  $\theta$  representa o teor volumétrico de água do solo,  $t$  é o tempo e  $z$  a profundidade do solo.

Desprezando o transporte na fase adsorvida, a dispersão hidrodinâmica e a difusão, o fluxo de massa do CQ pode ser escrito como:

$$q_s = q \cdot C \quad [2]$$

onde  $q$  é o fluxo de água no solo.

De onde,

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = - \frac{\partial q \cdot C}{\partial z} \quad [3]$$

ou

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial v C}{\partial z} \quad [4]$$

onde  $v$  é velocidade efetiva de convecção para um CQ não-reativo e é dada por:

$$v = \frac{q}{\theta} \quad [5]$$

Além do fluxo de massa na fase solo-água, dois outros processos de transporte de CQ no solo são difusão na fase líquida e difusão na fase de vapor. Quando o fluxo de massa por convecção é pequeno ou desprezível, o CQ é capaz de se mover no solo por esses processos. Muitos modeladores do transporte de CQs no solo incluem a dispersão na equação de fluxo para levar em conta a sua difusão por causa das variações na velocidade da água, entretanto, em baixos fluxos de água em solos uniformes, esse termo é relativamente sem importância.

A mobilidade convectiva pode ser estimada pelo tempo de convecção ( $tc$ ), o qual é definido como:

$$tc = \frac{L}{v} \quad [6]$$

ou

$$tc = \frac{L \cdot \theta}{q} \quad [7]$$

Assim, o inverso do tempo de convecção pode ser usado como índice de vulnerabilidade intrínseca de corpos de água subterrâneos à contaminação, calculado pela expressão:

$$VIX = \frac{R}{L \cdot F} \quad [8]$$

onde  $R$  é a recarga hídrica líquida anual (cm),  $L$  representa a profundidade do corpo de água subterrâneo (cm) a partir da superfície do solo (zona não saturada) e  $F$  é a umidade na capacidade de campo do solo ( $v/v$ ). O índice  $VIX$  é adimensional.

O valor de  $R$  é obtido a partir de dados meteorológicos de precipitação pluviométrica e de evapotranspiração potencial, além de dados da irrigação, quando houver. A recarga hídrica líquida é obtida pela soma da precipitação e da irrigação, subtraindo a evapotranspiração. O valor de  $L$  é obtido a campo por meio de perfuração até o corpo de água subterrâneo; enquanto o valor de  $F$  é proveniente de ensaio de laboratório.

Em estudos com maior abrangência geográfica, em escala menor e, portanto, com maior generalização e menor detalhe, os valores de  $R$ ,  $L$  e  $F$  podem ser estimados remotamente:  $R$  pode ser calculado por meio da interpolação espacial de dados de estações meteorológicas, utilizando o método do inverso da distância ponderada ou geoestatística;  $L$  pode ser estimado pela aplicação de funções analíticas em sistemas de informações geográficas (SIG), a partir de modelo digital de elevação (MDE), como o proposto por Rennó et al. (2008); e  $F$  pode ser baseado em mapas pedológicos em conjunto com dados de trabalhos como o de Gomes e Spadotto (2004). Assim, o índice  $VIX$  pode ser aplicado em um SIG.

Adicionalmente, para solos com diferentes camadas (ou horizontes) pode ser utilizada a equação:

$$VIX_n = \frac{R}{\Pi(L_i \cdot F_i)} \quad [9]$$

onde  $\Pi$  indica o produto da expressão  $(L_i \cdot F_i)$  por camada,  $i$  designa a camada ( $i = 1, \dots, n$ ) e  $n$  o número de camadas. Os valores de  $L$  e  $F$  são únicos para cada camada até o topo do corpo de água subterrâneo.

## Aplicação do índice $VIX$

Como exemplo de aplicação do índice  $VIX$ , são aqui apresentados os cálculos realizados para duas áreas com diferentes tipos de solos da região de Ribeirão Preto (SP). A estimativa da recarga hídrica líquida anual ( $R = 43$  cm) foi feita a partir de dados anuais de precipitação e evapotranspiração potencial obtidos

no Banco de Dados Climáticos do Brasil (BANCO..., 2014). Nenhuma irrigação foi considerada.

Para a umidade do solo na capacidade de campo ( $F$ ) foram usados os valores médios dos intervalos para Latossolos Argilosos e Neossolos Quartzarênicos apresentados por Gomes e Spadotto (2004).

Três diferentes profundidades do corpo de água subterrâneo ( $L$ ) foram consideradas e, para cada solo, o valor de  $F$  foi assumido ser o mesmo do horizonte mais profundo com dados disponíveis ( $BW_1$  no Latossolo Argiloso e  $C_2$  no Neossolo Quartzarênico) até o topo do lençol freático. Os resultados do índice  $VIX$  nas áreas com diferentes solos e vários horizontes estão na Tabela 1.

**Tabela 1** – Valores do índice  $VIX$  calculado para as áreas com Latossolo Argiloso e Neossolo Quartzarênico da região de Ribeirão Preto (SP), considerando os diferentes horizontes dos solos.

Área - Solo	Prof. do Lençol Freático (m)	$VIX$
Área 1 - Latossolo Argiloso	1	0,065
	2	0,024
	3	0,015
Área 2 - Neossolo Quartzarênico	1	0,270
	2	0,101
	3	0,062

Recarga hídrica líquida anual calculada  $R = 43$  cm.

**Fonte:** Elaborado pelo autor a partir dos dados dos solos presentes em Gomes e Spadotto (2004).

Ficam evidentes os maiores valores do índice  $VIX$  para a área com o Neossolo Quartzarênico, o que representa maior vulnerabilidade à contaminação; lembrando que, tratando-se da mesma região, a precipitação e a evapotranspiração consideradas foram as mesmas. Como esperado, para os dois solos, quanto mais profundo o lençol freático, menos vulnerável à contaminação. A vantagem do uso do índice  $VIX$  é que, através dele, é possível quantificar e facilmente comparar os diferentes níveis de vulnerabilidade.

## Referências

BANCO de dados climáticos do Brasil. [Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite; Piracicaba: ESALQ/USP, 2014]. Disponível em: < <http://www.bdcclima.cnpm.embrapa.br/resultados/index.php?UF=sp> >. Acesso em: 10 out. 2014.

bdclima.cnpm.embrapa.br/resultados/index.php?UF=sp >. Acesso em: 10 out. 2014.

GOMES, M. A. F.; SPADOTTO, C. A. **Subsídio à avaliação de risco ambiental de agrotóxicos em solos agrícolas brasileiros**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 5p. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico, 11). Disponível em: < [http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPMA/5842/1/comunicado\\_11.pdf](http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPMA/5842/1/comunicado_11.pdf) >. Acesso em: 10 nov. 2014.

RENNÓ, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J., WATERLOO, M. J. Hand, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008.

**Comunicado  
Técnico, 2**

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:  
**Embrapa Gestão Ambiental**  
Av. Soldado Passarinho, 303, Fazenda Chapadão.  
CEP 13070-115, Capinas, SP  
**Fone:** (19) 3211-6200  
[www.embrapa.br/gestao-territorial](http://www.embrapa.br/gestao-territorial)

**Embrapa**

Ministério da  
Agricultura, Pecuária  
e Abastecimento

GOVERNO FEDERAL  
**BRASIL**  
PAÍS RICO E PAÍS SEM POBREZA

**1ª edição**

1ª impressão (2014): versão on-line

**Comitê de  
publicações**

**Presidente:** Mirian Therezinha Souza da Eira  
**Secretário-Executivo:** Rosângela Galon Arruda  
**Membros:** Alba Chiesse da Silva, Helena Sicoli,  
Ivan Sérgio Freire de Sousa, Eliane Gonçalves  
Gomes Assunta, Rosana Hoffman Câmara,  
Chang das Estrelas Wilches, Marita Féres  
Cardilo, Otávio Valentim Balsadi, Jeane de  
Oliveira Dantas

**Expediente**

**Editoração eletrônica:** Daniela Maciel  
**Normalização Bibliográfica:** Daniela Maciel  
**Revisão de texto:** Wilma Inês Araújo