



DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n1p45-51>

## Modelagem da intrusão da água de um rio com diferentes concentrações de sais

Gabriel C. Marino<sup>1</sup>

---

### Palavras-chave:

capilaridade  
fluidodinâmica  
problema de Henry  
salinidade

### RESUMO

Para considerações de intrusão de água em meio subterrâneo a capilaridade, também entendida como força de sucção, é uma grandeza física que influencia a dinâmica do processo. Neste trabalho é apresentada uma investigação do comportamento do escoamento subterrâneo e as interações entre água doce e água salinizada na área de descarga de um rio. Objetivou-se realizar uma modelagem preditiva para identificar e representar o processo de intrusão das águas de um rio meio ao lençol freático comparando diferentes concentrações de sais nas águas do rio e águas subterrâneas. Como modelo conceitual foi definido um rio em região de descarga. A modelagem foi realizada no software SUTRA sendo o método de solução por elementos finitos. Observou-se a formação de uma camada de água doce sobre o lençol freático salinizado quando considerada intrusão de água doce. Para as considerações com intrusão de água salinizada foi identificada a formação de fingers. Os resultados do modelo possibilitaram identificar que a intrusão de água doce no lençol freático salinizado é dificultada pela presença de sais. A intrusão é mais difícil quanto maior a concentração de sais nas águas subterrâneas.

---

### Key words:

capillarity  
fluid dynamics  
Henry problem  
salinity

## Modelling of intrusion of river water with different salts concentrations

### ABSTRACT

Considerations about water intrusion underground by capillarity, also understood as suction force is a physical quantity that influence the dynamics of process and interaction between freshwater and saline water. This paper presents an investigation of the behaviour of groundwater flow and interactions between freshwater and saline water in the discharge region of a river. This study aimed to conduct a predictive modelling to identify and represent the river water intrusion in water table comparing different salt concentrations in river water and groundwater. The conceptual model was defined as a river discharge region. The modelling was performed using software SUTRA finite element solution method. Formation of layer of fresh water over the salinized water table was observed when considered a simulation with a freshwater intrusion. For considerations about saline water intrusion a formation of fingers was identified. From the results of model it was possible to observe that the intrusion of freshwater in water table is complicated by the presence of salts. The intrusion is more difficult as concentration of salts increases in the groundwater.

## INTRODUÇÃO

Para a hidrologia, a modelagem matemática é uma ferramenta importante que auxilia na identificação, previsão e avaliação do escoamento de águas em meio subterrâneo. Diversos softwares abordam problemas específicos para os processos hidrológicos destacando-se o SUTRA pela abordagem do Problema Henry. O Problema de Henry considera que o desequilíbrio das concentrações e da diferença de densidade entre os fluidos tem forte influência nos efeitos de escoamento fluidodinâmico podendo esta diferença ser uma perturbação suficiente para impulsionar o deslocamento de água em meio poroso (Post & Kooi, 2003). Este modelo pode não apenas ser aplicado na avaliação de diversos problemas reais de hidrologia mas também apropriado para estudos relativos ao comportamento de salinização em diferentes processos (Boufadel et al., 2011) como intrusão de água do mar e rios (Bear & Cheng, 2009; Glendenning & Vervoot, 2010; 2011; Werner et al., 2013; Lamontagne et al., 2014) e irrigação (Mass, 2007; Eeman et al., 2011).

Considerações significativas sobre a interação entre água doce e água salinizada em meio subterrâneo foram destacadas por Mass (2007) e Eeman et al. (2011). Nesses trabalhos foram evidenciadas considerações sobre a zona de transição entre água salinizada e água doce para o problema de irrigação de solos. Através de uma abordagem simplificada considerando duas valas de irrigação, Eeman et al. (2011) simularam o fluxo de intrusão de água doce sobre o lençol freático salinizado verificando que a água doce tende a se manter no topo, próximo à superfície formando uma lâmina de água doce em que a espessura da lâmina depende da taxa de infiltração de água na superfície enquanto a espessura da zona de transição tende a estreitar nas proximidades das valas. Para problemas abordando a intrusão de águas de rios se destaca o trabalho de Jolly et al. (1998) que simulou o ciclo hidrológico de um rio identificando a existência de uma correlação entre nível do rio, nível do lençol freático e concentrações de sais na água do rio. Bear & Cheng (2009) realizaram estudos abordando a intrusão da água do mar identificando o comportamento da zona de transição entre águas subterrânea doce e água de intrusão salinizada. Foram avaliadas perturbações como o efeito do bombeamento de água subterrânea na estabilidade da concentração de sais para a zona de transição entre os fluidos. Simmonds & Narayan (1997) tal como Post & Kooi (2003) realizaram uma consideração para um perfil poroso com água salinizada no topo e água fresca na parte inferior e observaram a tendência de formação de fingers que, conforme descrito por Mariano et al. (2007) ocorre quando um fluido tende a se deslocar meio a outro fluido com maior velocidade formando caminhos preferenciais, devido às diferentes características físicas e de escoamento entre os fluidos.

A modelagem do processo de intrusão das águas de um rio é relevante para o entendimento do processo de migração das plumas de concentrações de sais, meio ao lençol freático. Propõe-se que os princípios de intrusão das águas de um rio e do mar são similares. Xin & Ling Li (2013) prevê que os mesmos podem provocar alterações nas águas subterrâneas e vegetação, em função das concentrações de sais que podem conter íons tóxicos. Vervoot & Zee (2012) identifica que a

captação de água subterrânea para os sistemas de irrigação, sobretudo nas regiões áridas e regiões costeiras, necessita de desenvolvimento tecnológico em prol da sustentabilidade do recurso natural a fim de controlar a qualidade das águas. O entendimento do processo de intrusão das águas e o escoamento das plumas e concentrações de sais no meio subterrâneo, constituem ferramenta fundamental visando à tomada de medidas de prevenção e controle.

Objetivou-se neste trabalho realizar uma modelagem para identificação e representação do comportamento do processo de intrusão das águas de um rio no lençol freático para diferentes concentrações de sais. O entendimento do processo de salinização é imprescindível para auxiliar avaliações eco-hidrológicas cujos desenvolvimento e sobrevivência da vegetação dependem das concentrações de sais das águas subterrâneas que, por sua vez, são influenciadas pela água de intrusão do rio.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Modelo conceitual

Considerou-se, visando à elaboração do modelo conceitual, a problemática de salinização dos rios e águas subterrânea. Como exemplo foram considerados os prováveis impactos quando a contaminação das águas dos rios por resíduos industriais, esgotos ou alterações antrópicas na costa aumentando as concentrações de sais dos rios e a exploração descontrolada das águas subterrâneas para suprir as necessidades de áreas irrigadas. Essas questões estão relacionadas com problemas de desequilíbrio ambiental, passíveis de aumentar a quantidade de solos improdutivos e áreas desertificadas. Para estudo do caso foi proposta uma abordagem conceitual do processo de descarga de águas do rio em região de solo granular, considerando um rio com água doce sendo a água subterrânea salinizada e um rio salinizado com a água subterrânea doce.

A abordagem dimensional possibilitou a identificação do raio de influência direta do fluxo de águas na seção vertical e horizontal no sentido das margens do rio. Com base nos estudos de Simmonds & Narayan (1997), Jolly et al. (1998) e Eeman et al. (2011) foi possível propor uma abordagem dimensional satisfazendo a representatividade física de um rio com resolução adequada para a zona de transição entre águas salinizada e doce tomando-se uma abordagem física aproximada para o Rio Murray localizado no sul da Austrália. O modelo conceitual e as dimensões consideradas, são apresentados na Figura 1.

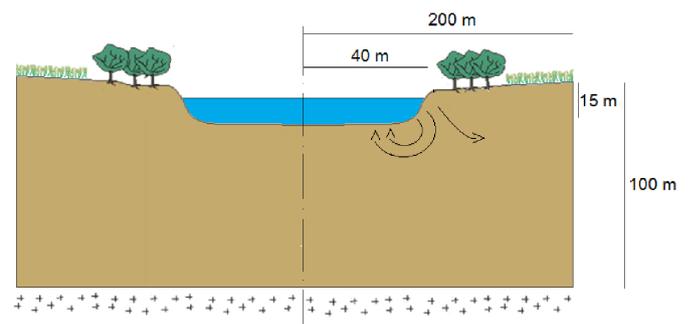


Figura 1. Modelo conceitual e abordagem dimensional

Realizou-se uma abordagem isométrica para um rio com leito em formato trapezoidal com profundidade de 15 m e nível de água de 14 m. Foi considerada camada de solo de 100 m com propriedades uniformes, a distância entre o centro do rio até o leito foi determinada em 40 m, e até o ponto mais longe em solo, em 200 m.

**Considerações matemáticas**

Para a modelagem matemática considerou-se um domínio em duas dimensões com volumes de controle distribuídos em uma malha grid. A geometria foi dividida em oito zonas com malha refinada nas regiões 1, 3 e 4, nas quais foi necessário maior nível de detalhamento em virtude da maior velocidade do fluxo de água de intrusão, além da presença da interface, água salinizada e água doce. Na região 1 a malha foi definida com uma distância entre nós de 3,5 m na horizontal de 1,5 m na vertical; na região 3 a malha apresenta variação horizontal de até 1,5 m e 2 m na vertical. A região 4 foi considerada a distância entre pontos de 1,5 m para horizontal e também para vertical. O modelo trabalhou com a quantidade total de 676 nós e 626 elementos apresentando continuidade nas soluções numéricas e resultados satisfatórios. As simulações foram realizadas para três diferentes concentrações de sais 0,0357; 0,0267 e 0,0178 kg kg<sup>-1</sup>.

Em referência ao monitoramento das concentrações em meio subterrâneo, foram definidos quatro pontos fixos de monitoramento determinados por quatro nós da malha grid sendo os NOD 30, NOD 40, NOD 125 e NOD 356. A Figura 2 apresenta a divisão das zonas geométricas e a localização dos nós considerados para monitoramento do processo.

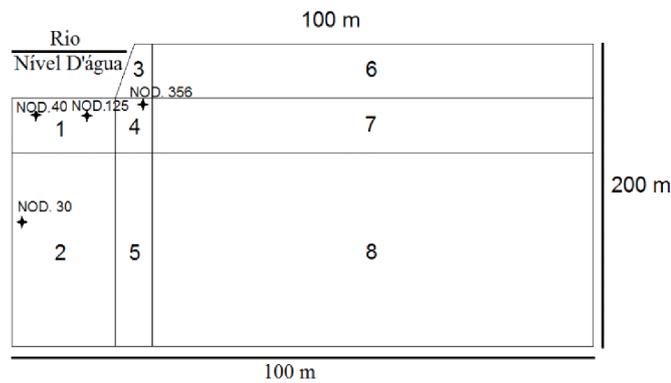


Figura 2. Divisão das zonas geométricas e nós para monitoramento numérico

O modelo matemático implementado no SUTRA aborda a variação de densidade e o transporte de soluto nos diferentes fluidos. O modelo apresenta equações de escoamento de águas e movimento de solutos em meio subterrâneo.

Com vista à modelagem, foram realizadas importantes abordagens sobre saturação e capilaridade. O modelo saturado-insaturado considerou, para  $S_w = 1$ , que o meio é saturado e para  $S_w < 1$  o meio é insaturado. O modelo prevê que, fisicamente e quando  $S_w < 1$ , a água adere à superfície dos grãos de solo em virtude da tensão superficial; a pressão do fluido é menor que a atmosférica formando a franja capilar. A pressão do fluido,  $p$ , é medida em relação ao plano ou à pressão atmosférica. A pressão negativa calculada define a espessura da franja capilar. A Eq. 1, que correlaciona saturação e capilaridade considerada para o modelo, é apresentada a seguir:

$$S_w = S_{wres} + (1 - S_{wres}) \left[ \frac{1}{1 + (ap_c)^n} \right]^{\left(\frac{n-1}{n}\right)} \tag{1}$$

sendo:

$S_{wres}$  - saturação residual

Para o fluxo na zona saturada considerou-se que as concentrações do fluido variam espacial e temporalmente; esta variação sofre perturbações impostas pela densidade do fluido e pressão do meio. As considerações sobre pressão e densidade são perturbações suficientes para impulsionar o fluxo de água no sistema calculado pela Lei de Darcy, Eq. 2 (Voss, 1984):

$$\underline{v} = - \left( \frac{kk_r}{gS_w\mu} \right) (\nabla p - \rho \underline{g}) \tag{2}$$

em que:

$\underline{v}(x, y, t)$  - velocidade média do fluido

$\underline{k}(x, y)$  - permeabilidade do meio

$k_r(x, y, t)$  - permeabilidade relativa para o fluxo do fluido

$g$  - a aceleração da gravidade

O vetor de gravidade é definido em relação à direção da elevação vertical. Considera-se que se a coordenada espacial  $y$  é direcionada para cima,  $\underline{\nabla}$ (elevação) é um vetor com valor  $g = (x, y)$  é o mesmo que  $g = (0, -|g|)$  conforme Eq. 3:

$$\underline{g} = -|g|\underline{\nabla}(\text{elevação}) \tag{3}$$

As equações implementadas para o cálculo do transporte de soluto definem que a massa de soluto transportada no meio poroso ocorre através do fluxo de água subterrânea e existe difusão molecular iônica assumindo que o soluto é transportado das áreas de menores para as maiores concentrações. A Eq. 4, abaixo, apresenta as considerações sobre o transporte de soluto.

$$\frac{\partial(\epsilon S_w \rho C)}{\partial t} + \frac{\partial[(1-\epsilon)\rho_s C_s]}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot (\epsilon S_w \rho \underline{v} C) + \underline{\nabla} \cdot [\epsilon S_w \rho (D_m I + D) \cdot \underline{\nabla} C] + \epsilon S_w \rho \Gamma_w + (1-\epsilon)\rho_s \Gamma_s + Q_p C^* \tag{4}$$

sendo:

$\epsilon$  - porosidade

$D_m$  - difusão molecular aparente

$I$  - identidade do tensor

$D(x,y,z)$  - dispersão do tensor

$\Gamma_w(x,y,z)$  - fonte de massa de soluto no fluido

$\Gamma_s$  - fonte de massa adsorvida

$Q_p$  - massa de fluido

Para a solução do modelo foram implementados valores numéricos para cada variável sendo realizadas variações considerando-se níveis mínimos e máximos. Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros de entrada para o modelo, os valores numéricos de referência para a simulação realizada tal como os valores mínimos e máximos considerados para

Tabela 1. Valores numéricos implementados para simulação

Parâmetro	Valor de referência	Mínimo	Máximo
Porosidade	0.30 <sup>a</sup>	0.25	0.40
Permeabilidade	1 e <sup>-10</sup>	1E <sup>-5</sup>	1E <sup>-13</sup>
Dispersividade longitudinal	0.25 m <sup>a,b</sup>	5E <sup>-3</sup>	12.5
Dispersividade transversal	0.025 m <sup>a,b</sup>	5E <sup>-4</sup>	1.25
Concentração de sal	0.0357 kg kg <sup>-1</sup>	0.0	0.0357
Fluxo de água subterrânea	5.78E <sup>-5</sup> m s <sup>-1</sup>	5.78E <sup>-9</sup>	3E <sup>-2</sup>
Difusividade molecular	10E <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> <sup>a,b</sup>	N/a	N/a
Difusividade aparente	18.8571E <sup>-6</sup>	N/a	N/a
Densidade da água	1000 kg m <sup>-3</sup> <sup>c,d,e,f</sup>	N/a	N/a
Densidade do sal	700 kg m <sup>-3</sup> <sup>c,d,e,f</sup>	N/a	N/a

Fontes: <sup>a</sup>Eeman et al. (2011), <sup>b</sup>Pietro et al. (2001), <sup>c</sup>Werner et al. (2013), <sup>d</sup>Banerjee et al. (2011), <sup>e</sup>Jolly et al. (1998), <sup>f</sup>Simmomns & Narayan (1997)

extrapolação e identificação de prováveis variações nos resultados dados pelo modelo.

Os valores implementados se mantiveram dentro dos limites reais para propriedades do solo. As extrapolações foram realizadas a fim de se observar a variação do comportamento do processo para diferentes condições iniciais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nas simulações e nos resultados do modelo foi possível observar que o comportamento de intrusão de águas e a direção do deslocamento da pluma são influenciados pela concentração de sal, fluxo de águas do lençol freático e propriedades do solo. Verificou-se que para simulações com intrusão de água doce no lençol freático salinizado a água doce de intrusão tende a migrar, preferencialmente na direção horizontal mantendo-se no topo das águas subterrâneas salinizadas formando uma lente de água doce (Eeman et al., 2011). Em condições opostas, considerando a intrusão a partir de um rio com água salinizada meio ao lençol freático doce, verificou-se a tendência do fluido salinizado em migrar em direção vertical para o fundo do lençol freático (Simmons & Narayan, 1997; Pietro et al., 2001; Post & Kooi, 2003). Na Figura 3 são apresentados os resultados para um mesmo modelo alternando as concentrações de sais entre águas do rio e lençol freático sendo, na Figura 3A, um rio de água doce e lençol freático salinizado e na Figura 3B um rio de água salinizada e lençol freático com água doce. Observa-se, então, a diferença da tendência do escoamento da pluma das águas de intrusão do rio.

Tornou-se patente que as forças de capilaridade tendem a interferir na espessura da zona de transição entre água

doce e salinizada. Para identificar este efeito foram realizadas investigações com variação da porosidade do domínio aos extremos mínimo e máximo. Quando realizada a variação da porosidade para o caso da intrusão de água doce no lençol freático salinizado observou-se que, para a porosidade próxima do valor máximo 0.40, a espessura da zona de transição entre água doce e salinizada, diminui. Verificou-se que o aumento da porosidade reduz a força de sucção gerando uma zona de transição menor entre o meio saturado-insaturado aumentando a escala de  $S_w = 0$  até  $S_w = 1$  reduzindo as frações de vazios meio aos poros que aumentariam a zona de contato e facilitariam a transferência de soluto entre águas de intrusão do rio e do lençol freático; com isto, a espessura da zona de transição entre água doce e água salinizada também é reduzida, o soluto mais denso se mantém na parte inferior tendendo a se concentrar no fundo do aquífero mantendo menores concentrações na zona de transição saturada-insaturada; este é, também, um fator que altera o processo difusivo de transferência de soluto entre a água doce e água salinizada, as quais se encontram no topo do aquífero; já para a intrusão de água de um rio salinizado, o aumento da porosidade provoca aumento da zona de transição entre água salinizada e água doce cuja ocorrência é devida, sobremaneira, ao aumento da porosidade que facilita o deslocamento dos sais mais densos e que estão no topo tendendo a migrar para o fundo do aquífero com maior velocidade, formando fingers.

Considerando para fluxo de intrusão das águas superficiais de rios, lagos e oceanos, observou-se efeito de recirculação de parte das águas de intrusão (Simmons & Narayan, 1997; Pietro et al., 2001; Post & Kooi, 2003; Lamontagne et al., 2014). A avaliação do escoamento das águas indicou que na zona 1 (Figura 2) predomina o fluxo no sentido de sucção da água subterrânea em razão da pressão exercida pelo rio, verificando-se uma variação do tamanho da seção de sucção no fundo do rio em função das concentrações de sais e do peso da coluna de água do rio. Predominantemente, a zona 3 apresentou o fluxo de descarga de água do rio sobre o lençol freático e a zona 4 o fluxo de passagem de recirculação da água do rio, que segue da zona 3 para a zona 1.

Referente à investigação do sistema de recirculação de águas, realizou-se uma avaliação por parâmetros geométricos conforme metodologia utilizada por Mariano et al. (2007). Para identificação geométrica, a zona de transição entre a água doce e salinizada foi dividida em um ponto médio de concentração a fim de representar uma linha de interface.

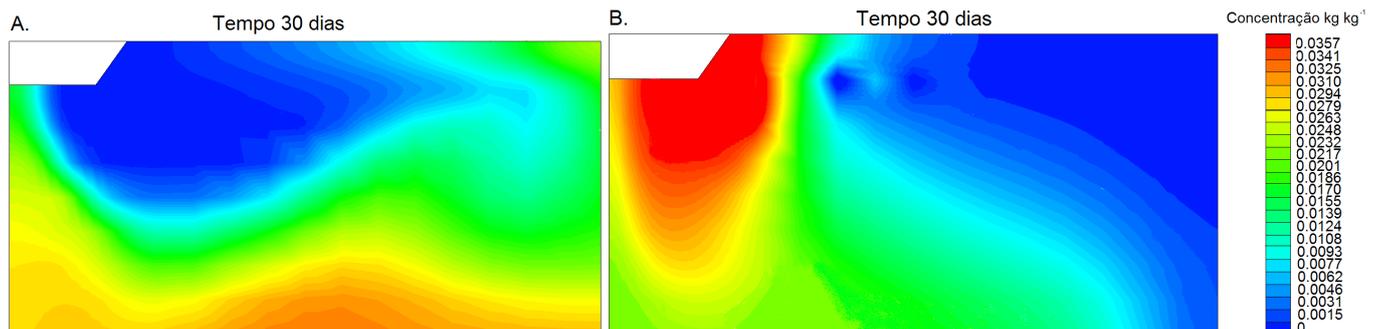


Figura 3. Simulação de um rio doce e água subterrânea salinizada 0,0357 kg kg<sup>-1</sup> (A); Simulação do rio de água salinizada 0,0357 kg kg<sup>-1</sup> e água subterrânea doce (B)

Constatou-se que o fluxo de água succionada para o fundo do rio tende a apresentar formação geométrica triangular similar a uma seção de corte 2D para o tronco de um cone. A partir dos resultados das simulações avaliou-se que a concentração de sais na água é fator influente e provoca alterações na região de sucção. Os resultados gráficos e as considerações geométricas são apresentados nas Figuras 4A e 4B. Foi possível observar a seção do tronco de um cone com maior largura de base, maior largura de topo e menor altura quando considerada a simulação com intrusão de água doce do rio em aquífero salinizado e a formação do tronco de um cone com menor largura de base, menor topo e maior altura quando simuladas as condições de intrusão de água de um rio salinizado no lençol freático de água doce.

A análise das forças atuantes e as regiões de recirculação das águas sugerem que o cone com menor comprimento tem

raio de influência para menores profundidades; já o cone com maior comprimento atinge um raio de influência até maiores profundidades. A partir das simulações realizadas foi possível sugerir que a velocidade da alteração de concentrações de sais nas águas subterrâneas está relacionada com a taxa de recirculação de água pelo fundo do rio, o peso da coluna de água sugere maior força de sucção e maior volume de recirculação das águas.

Realizou-se, para uma investigação detalhada sobre o avanço das concentrações de sais, a avaliação dos resultados das concentrações ao longo do tempo, para os pontos de monitoramento NOD 30, NOD 40. Foi possível observar uma diferença entre o tempo necessário para estabilização das concentrações das águas subterrâneas para as diferentes concentrações simuladas. Os resultados das concentrações das águas do lençol freático ao longo do tempo para intrusão de água a partir de um rio doce ou rio salinizado, são apresentados na Figura 5A e 5D. Pode-se observar que para o tempo de 600 dias as concentrações de água do rio doce e lençol freático salinizado Figuras 5A e 5B não estão estabilizadas nos NOD 30 e NOD 40. Para o caso do rio salinizado e lençol freático doce é possível observar que no tempo de 600 dias as concentrações se encontram estabilizadas, Figuras 5C e 5D.

A diferença de tempo necessário para o equilíbrio das concentrações de sais no aquífero sugere diferença na velocidade do avanço da pluma de água doce ou salinizada no meio saturado. A identificação da diferença de velocidade do avanço da pluma foi avaliada a partir dos cálculos dos coeficientes angulares para o perfil de concentração ao longo do tempo nos pontos de monitoramento NOD 125 e NOD 356. Os valores de coeficiente angulares calculados confirmaram diferentes velocidades de avanço da pluma para diferentes concentrações de sais. Identificou-se que o avanço da pluma de água doce meio no lençol freático salinizado é mais lento para maiores concentrações de sais em meio subterrâneo,

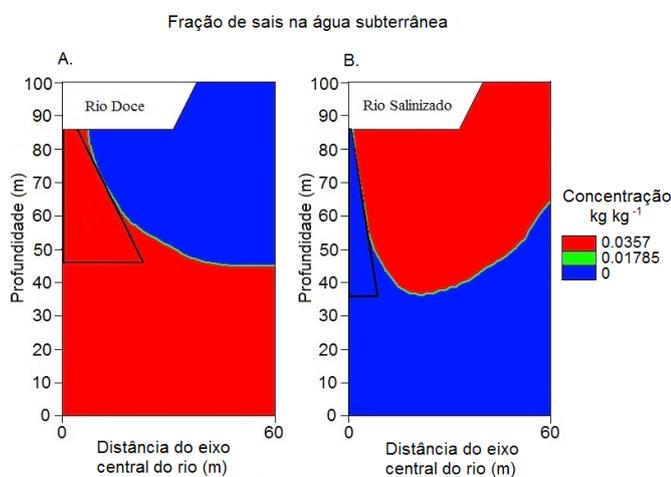


Figura 4. Representação das frações de sais e formação do tronco de um cone de escoamento de água salinizada (A); Representação do tronco de um cone para escoamento da água doce (B)

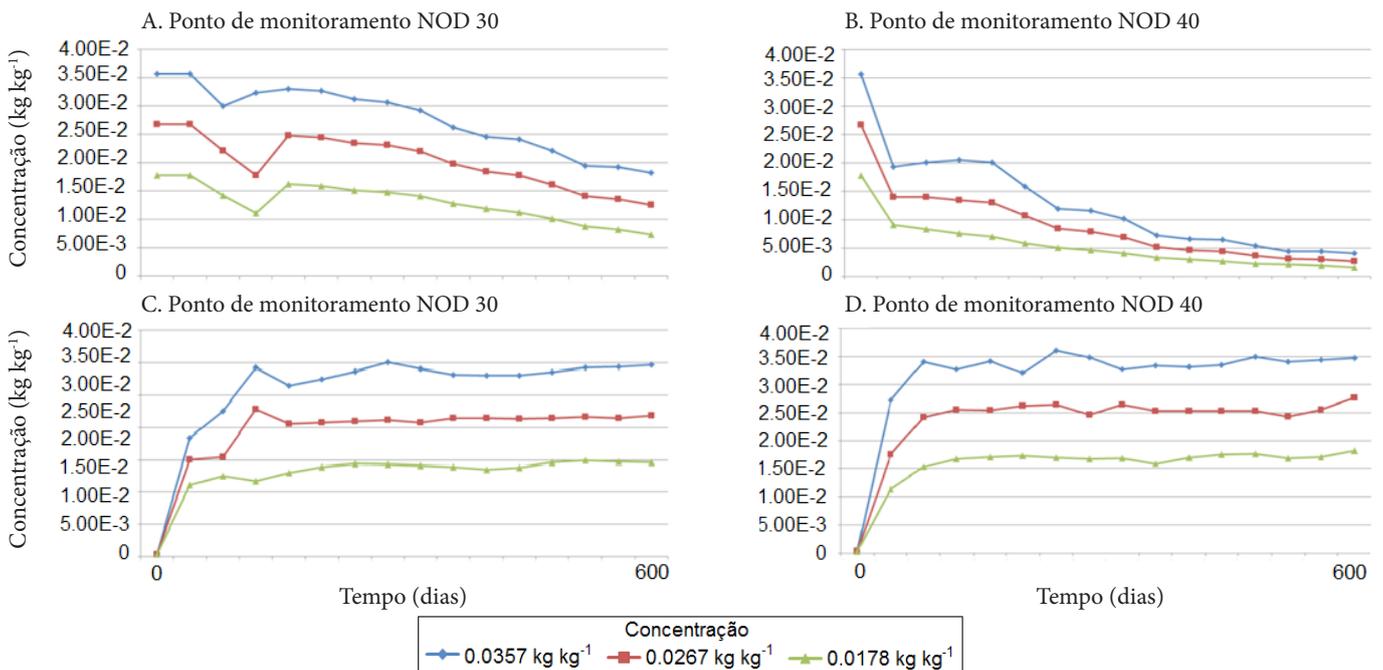


Figura 5. Concentrações de sais ao longo do tempo para os pontos de monitoramento da água subterrânea salinizada (A) (B) e água subterrânea doce (C) (D)

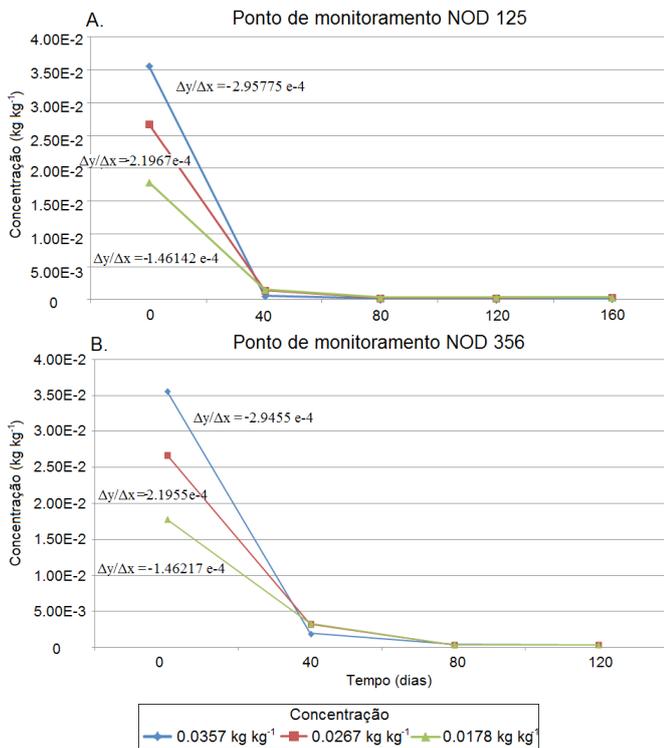


Figura 6. Evolução da concentração ao longo do tempo para intrusão de água de um rio de água doce e lençol freático com água salinizada para (A) Ponto de monitoramento NOD 125 e (B) Ponto de monitoramento NOD 356

enquanto se verificou, para considerações da velocidade do avanço de uma pluma de água salinizada em água doce, que quanto maior a concentração de sal no rio, maior também a velocidade de escoamento da pluma.

Os gráficos com valores calculados para coeficiente de inclinação da reta nos pontos de monitoramento NOD 125 e NOD 356, são apresentados na Figura 6A e 6B.

Os gráficos com valores do coeficiente de inclinação da reta para o rio com águas salinizadas e água subterrânea doce nos pontos de monitoramento NOD 125 e NOD 356, são apresentados na Figura 7A e 7B.

O cálculo dos coeficientes angulares para os gráficos de concentração ao longo do tempo, indicou haver uma velocidade maior do escoamento da pluma de águas salinizadas em meio à água subterrânea doce podendo-se destacar a maior facilidade de transferência de sais das águas dos rios e mares para as águas subterrâneas doces motivando as pesquisas quanto à qualidade da água dos rios e estabilidade da interface de água salinizada e água doce no lençol freático.

## CONCLUSÕES

1. Foi possível observar que a intrusão das águas de um rio no lençol freático apresenta diferentes comportamentos, conforme as concentrações de sais presentes nas águas.
2. Verificou-se, para as simulações, que a água doce de intrusão tende a formar uma lâmina de água acomodando no topo do lençol freático salinizado. Para a intrusão de água salinizada observou-se a formação de fingers no sentido vertical tendendo a água salinizada acomodar no fundo do lençol freático.
3. A água de um rio doce tem maior dificuldade de intrusão no lençol freático salinizado do que quando

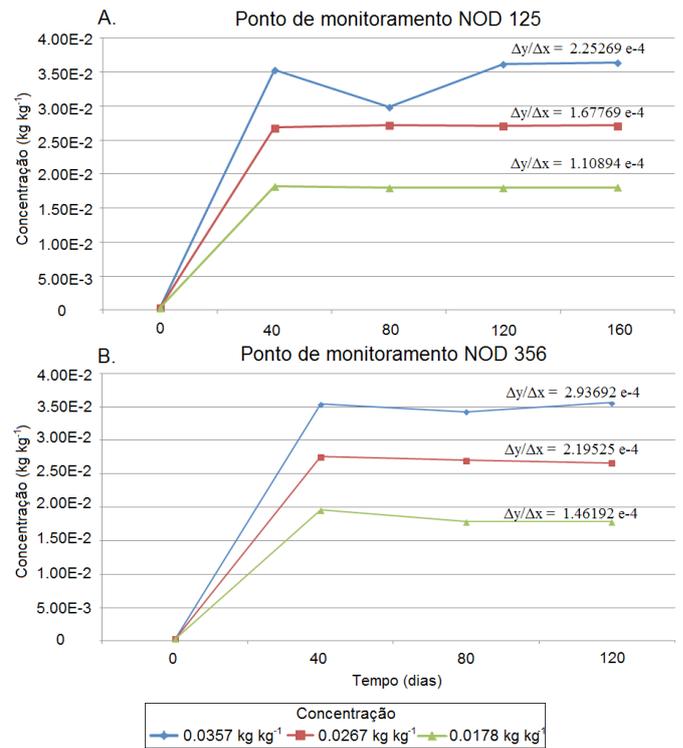


Figura 7. Evolução da concentração ao longo do tempo para intrusão da água de um rio com água salinizada e lençol freático com água para (A) Ponto de monitoramento NOD 125 e (B) Ponto de monitoramento NOD 356

considerada uma situação contrária, um rio salinizado e lençol freático doce.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio financeiro do CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e com cooperação técnica da AMBRATEC Geologia e Engenharia Ltda.

## LITERATURA CITADA

- Baneerjee, P.; Singh, V. S.; Chattopadhyay, K.; Chandra, P. C.; Singh, B. Artificial neural network model as a potential alternative for groundwater salinity forecasting. *Journal of Hydrology*, v.398, p.212-220, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.016>
- Bear, J.; Cheng, A. H. D. *Modeling groundwater flow and contaminant transport*. Springer, 2009. 834p.
- Boufadel, M. C.; Xia, Y.; Li, H. Modeling solute transport and transient seepage in laboratory beach under tidal influence. *Environmental Modelling & Software*, v.26, p.899-912, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.005>
- Eeman, S.; Leijnse, A.; Raats, P. A. C.; Zee, S. E. A. T. M. van der. Analysis of the thickness of a fresh water lens and of the transition zone between this lens and upwelling saline water. *Advances in Water Resource*, v.34, p.291-302, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.12.001>
- Glendenning, C. J.; Vervoot, R. W. Hydrological Impacts of rainwater harvesting (RWH) in a case study catchment: The Arvari River, Rajasthan, India. Part. 1 Field-scale impacts. *Agricultural Water Management*, v.98, p.331-342, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.09.003>

- Glendenning, C. J.; Vervoot, R. W. Hydrological Impacts of rainwater harvesting (RWH) in a case study catchment: The Arvari River, Rajasthan, India. Part 2. Catchment – Scale impacts. *Agricultural Water Management*, v.98, p.715-730, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.11.010>
- Jolly, I. D.; Narayan, K. A.; Armstrong, D.; Walker, G. R. The impact of flooding on modelling salt transport processes to streams. *Environmental Modelling & Software*, v.13, p.87-104, 1998. [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00003-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00003-6)
- Lamontagne, S.; Taylor, A. R.; Cook, P. G.; Crosbie, R. S.; Brownbill, R.; Williams, R. M.; Brunner, P. Field assessment of surface water-groundwater connectivity in a semi-arid river basin (Murray-Darling, Australia). *Hydrological Processes*, v.28, p.1561-1562, 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9691>
- Mariano, G. C.; Baptista, R. M.; Quadri, M. B.; Machado, R. A. F.; Bolzan, A.; Nogueira, A. L.; Lopes, T. J. Effective interfacial tension and geometrical parameters relationship for the description of oil leakages from submarine pipelines. *Mechanical & Chemical Engineering Transactions*, v.11, p.635-640, 2007.
- Mass, K. Influence of climate change on a Ghijben-Herzberg lens. *Journal of Hydrology*, v.347, p.223-228, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.020>
- Pietro, C., Destouni, G., Schwarz, J. Seawater intrusion in coastal aquifers: Effects of seasonal variations in extraction and recharge rates. In: *International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers – Monitoring, Modeling and Management*, 1, Essaouira. Proceedings....Essaouira: U. S. Geological Survey, 2001. CD-Rom
- Post, V. E. A.; Kooi, H. Rates salinization by free convection in high-permeability sediments: insights from numerical modeling and application to the Dutch coastal area. *Hydrogeology Journal*, v.11, p.549-559, 2003. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-003-0271-7>
- Simmons, C. T., Narayan, K. A. Mixed convection process below a saline disposal basin. *Journal of Hydrology*, v.194, p.263-285, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03204-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03204-0)
- Vervoot, R. W.; Zee, S. E. A. T. M. van der. On stochastic modelling of groundwater uptake in semi-arid water-limited systems: Root density and seasonality effects. *Ecohydrology*, v.5, p.580-595, 2012. <http://dx.doi.org/10.1002/eco.1288>
- Voss, C. I. A finite-element simulation model for saturated-unsaturated, fluid-density dependent ground-water flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute transport. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigation Report 81-4369, (rev. 1990), 1984. 409p.
- Werner, A. D.; Bakker, M. Post, V. E. A.; Vandenbohede, A.; Lu, C. Ataie-Ashtiani, B.; Simmons, C. T.; Barry, D. A. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, v.5, p.3-26, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.004>
- Xin, J. K. P.; Ling Li, D. A. Barry. Modelling of groundwater-vegetation interactions in a tidal marsh. *Advances in Water Resources*, v.57, p.52-68, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.04.005>