

# INFLUÊNCIA DE ZONAS DE RECARGA E DESCARGA NA SALINIDADE DE VALE ALUVIAL DE SEMI-ÁRIDO

Montenegro, A.A.A.<sup>1</sup>; Montenegro, S.M.G.L.<sup>2</sup>; Figueiredo, A.C.<sup>3</sup> & Bastos, D. C.<sup>4</sup>

**Resumo** - A dinâmica das concentrações de sais em aquíferos aluviais sob prática de irrigação, associada a condições climáticas específicas de clima semi-árido é o principal foco deste trabalho. É discutida a importância do acoplamento de modelos computacionais de fluxo e transporte de sais na zona saturada e não saturada de solo, levando em consideração a variabilidade espacial e as incertezas das propriedades hidráulicas do meio poroso. Assume-se a zona não saturada como constituída de dois solos contrastantes em termos de classes texturais. De acordo com as simulações, verifica-se a importância das descargas do aquífero por ascensão capilar no processo de salinização secundária, interferindo de modo pronunciado nas concentrações de sais no solo e no aquífero, particularmente onde predominam solos francos. A metodologia é aplicada a um estudo de caso na Zona Agreste do Estado de Pernambuco.

**Abstract** - Salt concentration dynamics in irrigated alluvial aquifers in semi-arid climate is discussed. Coupling numerical models for both the unsaturated and the saturated zones is highlighted, acknowledging uncertainties and spatial variability of the hydraulic properties. The unsaturated zone is assumed as composed of two contrasting soil units regarding texture. Based the simulation results, capillary flow components of groundwater discharge play a major role on the secondary salinization process, and controlling groundwater salinity both in groundwater and soil, mainly in loam soils. The methodology is applied to a case study in the Agreste Zone of Pernambuco State.

**Palavras-Chave** - Salinização secundária; aluvião; semi-árido.

---

<sup>1</sup> Prof. Departamento de Tecnologia Rural da UFRPE Av. D. Manoel de Medeiros, s/n. Dois Irmãos – Recife –PE, tel. 33021273, fax.3302106,1 e-mail [monte@hotlink.com.br](mailto:monte@hotlink.com.br)

<sup>2</sup> Prof. Departamento de Engenharia Civil da UFPE. Av. Acad. Hélio Ramos, s/n/, Cidade Universitária- Recife-PE, tel. 32718709, e-mail [suzanam@ufpe.br](mailto:suzanam@ufpe.br)

<sup>3</sup> Bolsista de Aperfeiçoamento do CNPq, DTR – UFRPE Av. D. Manoel de Medeiros, s/n. Dois Irmãos – Recife –PE, tel. 33021273, fax.33021061, e-mail [adrianacarfi@hotmail.com](mailto:adrianacarfi@hotmail.com)

<sup>4</sup> Pós graduando em Agronomia Ciência do Solo, UFRPE Av. D. Manoel de Medeiros, s/n. Dois Irmãos – Recife –PE, tel. 33021220, e-mail [dancesarbr@hotmail.com](mailto:dancesarbr@hotmail.com)

## INTRODUÇÃO

Os aquíferos aluviais do Nordeste brasileiro vêm sendo amplamente utilizados dentre outros fins para a pequena agricultura irrigada. As manchas aluvionares presentes no Nordeste brasileiro, por constituírem fontes renováveis de recursos hídricos, particularmente em zonas de domínio do cristalino, devem ser consideradas como áreas prioritárias para o desenvolvimento agrícola de pequena escala. Se apoiada em sistema produtivo com manejo de sais, a agricultura irrigada em manchas aluvionares é capaz de reduzir impactos ambientais - quando comparada com agricultura de grande porte, bem como permitir ações participativas das comunidades rurais.

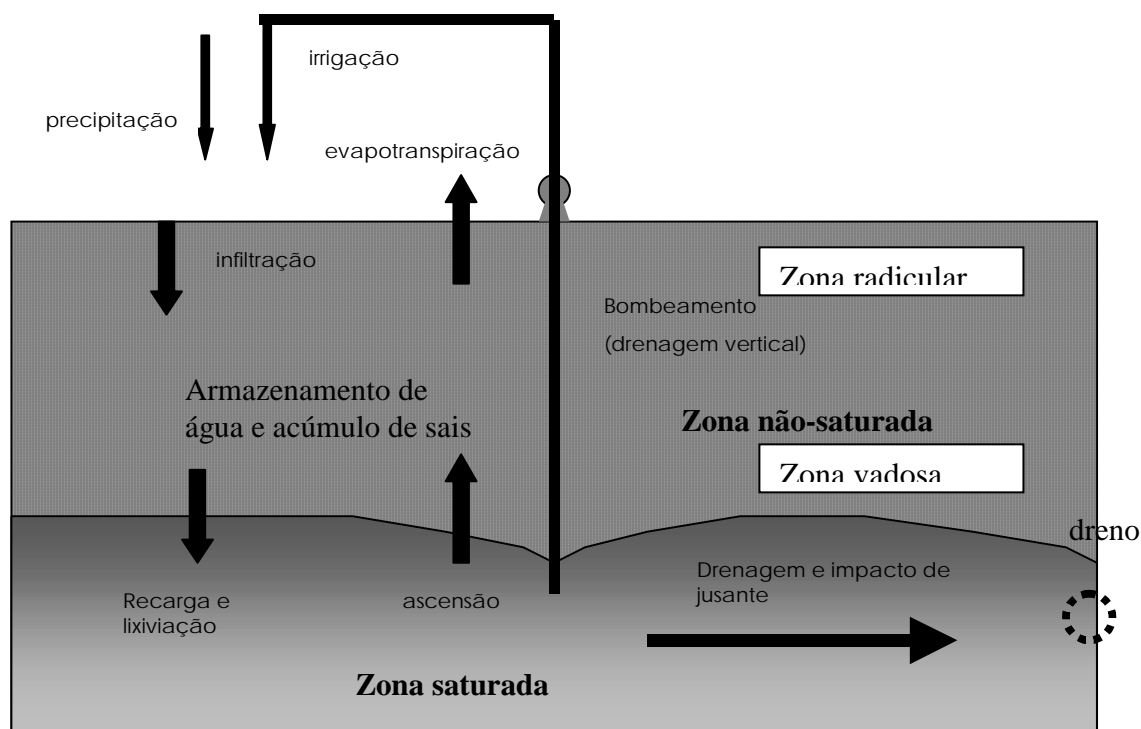
Devido a fatores climáticos, aos métodos de irrigação utilizados, e a condições edáficas, os sais dissolvidos contidos na água de irrigação e na água do aquífero podem-se acumular progressivamente. Tal acumulação pode comprometer a qualidade do solo e, em consequência (através do ciclo da água no sistema), contribuir para a degradação da água subterrânea.

A presença de lençol livre próximo à superfície está não só associada a uma drenagem reduzida, mas também à utilização de sistemas de irrigação ineficientes. O acúmulo excessivo de sais na zona não-saturada, devido à ascensão capilar, é denominado salinização secundária (Gui, 1987). As regiões saturadas de um perímetro, onde os fluxos ascendentes predominam, são conhecidas como regiões de descarga (Salama et al., 1993).

Um adequado entendimento dos mecanismos de recarga e descarga em perímetros irrigados é essencial para o desenvolvimento sustentável da agricultura, particularmente em regiões semi-áridas. Infiltração, recarga, evapotranspiração, ascensão e salinização são fenômenos dependentes de processos de fluxo e de transporte nas zonas não-saturada e saturada dos solos.

Tendo em vista a característica não-linear dos fluxos em meios não-saturados, e a variabilidade espacial das propriedades hidráulicas dos solos e dos aquíferos, balanços de água e de sais em áreas irrigadas são de difícil previsão. Tais questões têm sido intensamente abordadas na literatura, em particular para apoio à gestão e manejo de perímetros irrigados (Rijtema, 1969; Spalding & Exner, 1980; Suassuna e Audry, 1992; Salama et al., 1993; Oosterbaan, 1994; Couldrain-Ribstein et al., 1995). Dentre as ferramentas de apoio à gestão, destacam-se os modelos matemáticos de larga escala (Chen et al., 1994a; 1994b; Russo et al., 1994; Tseng & Jury, 1994; Harter & Yeh, 1996; Kim et al., 1997; Montenegro, 1997a), alguns deles considerando componentes de incerteza nas propriedades hidráulicas (Van Rooy, 1987), e combinando iterativamente as zonas saturadas e não-saturadas (Montenegro, 1997b).

A Figura 1 apresenta modelo esquemático de fluxo e transporte de sais em aluviões irrigados, com lençol freático raso. Pode-se notar o ciclo progressivo de acúmulo de sais, constituído pelos componentes irrigação-infiltração-lixiviação-bombeamento-irrigação e, nas áreas propensas a descargas, irrigação-infiltração-lixiviação-ascensão.



Fonte: Ribeiro et al. (2003).

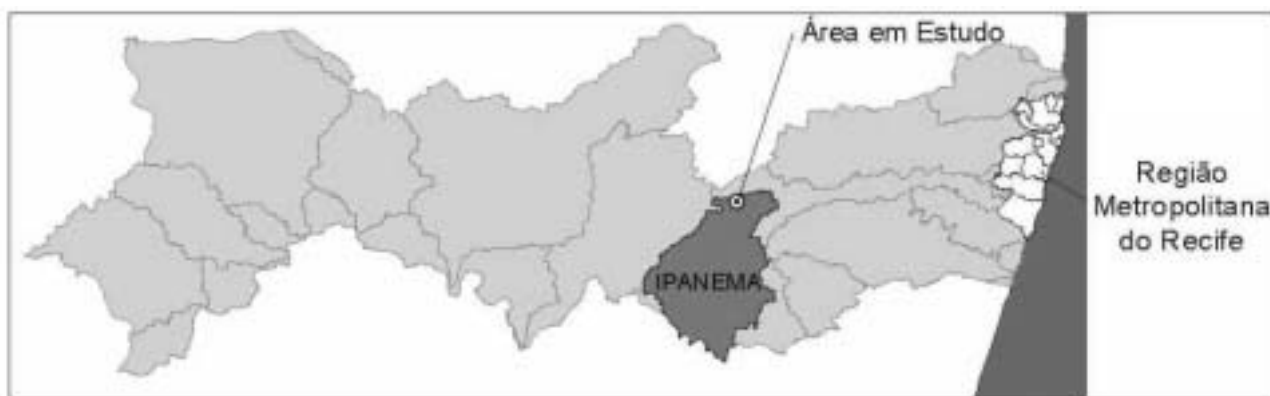
**Figura 1** - Modelo conceitual do risco de salinização de solo e aquífero decorrente de irrigação.

## MATERIAIS E MÉTODOS

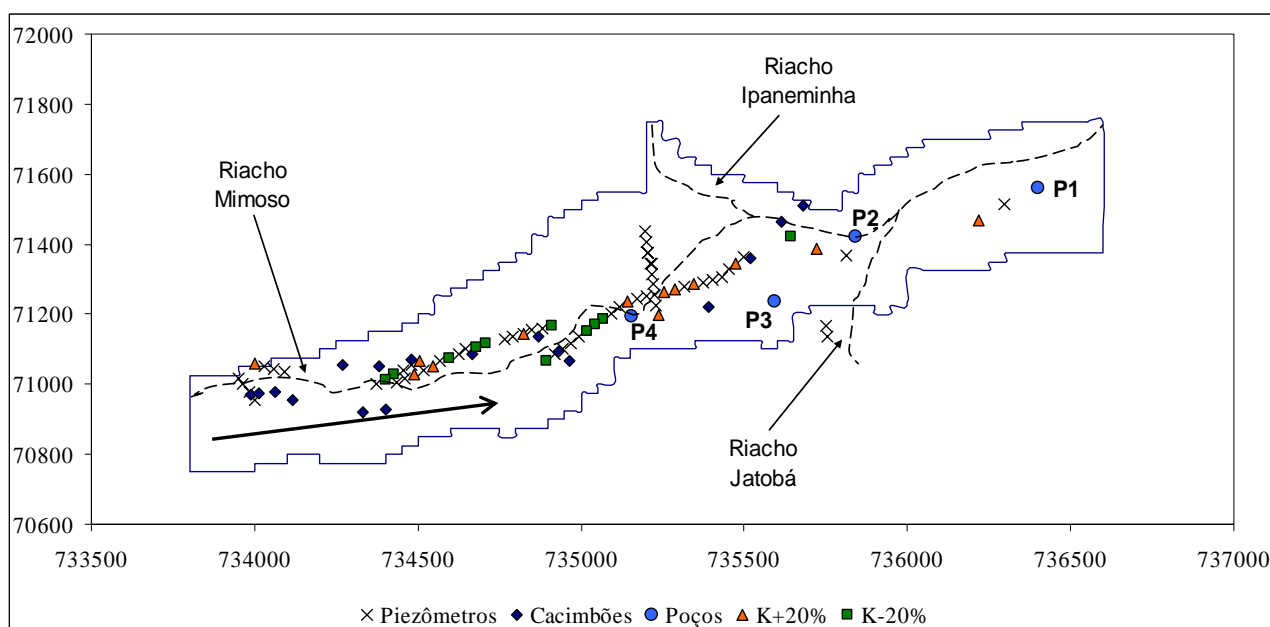
### Domínio de Estudo

O estudo vem-se desenvolvendo em área de assentamento da Fazenda Nossa Senhora do Rosário, município de Pesqueira-PE. Está localizada em uma sub-bacia do sistema do Rio Ipanema, em sua porção ocidental mais a montante. Abrangendo parte dos municípios de Arcoverde e de Pesqueira, do Estado de Pernambuco, numa área de 194,82 km<sup>2</sup>, localiza-se entre 8° 34' 17" e 8° 18' 11" de Latitude Sul, e 37° 1' 35" e 36° 47' 20" de Longitude Oeste. Ao norte faz limite com a bacia do rio Ipojuca e ao oeste com a bacia do rio Moxotó (Figura 2).

Nesta Fazenda estão assentadas cerca de 50 famílias, que desenvolvem agricultura irrigada desde Dezembro de 1991, em lotes de cerca de 1 hectare. Parte da Fazenda (cerca de 60 ha) localiza-se sobre um aluvião, que é utilizado como fonte de suprimento para a agricultura irrigada, através de quatro poços Amazonas com ponteiras e 14 cacimbões construídos pelos agricultores. O aquífero aluvial é relativamente raso, com profundidade média de 10 metros, possuindo cerca de 15 km de extensão e 300 metros de largura. Neste estudo, esta formação geológica será referida como 'aluvião Mimoso', tendo em vista a vila de mesmo nome situada em suas proximidades (Figura 3).



**Figura 2** - Mapa do estado de Pernambuco com divisão de bacias hidrográficas e identificação da área em estudo.

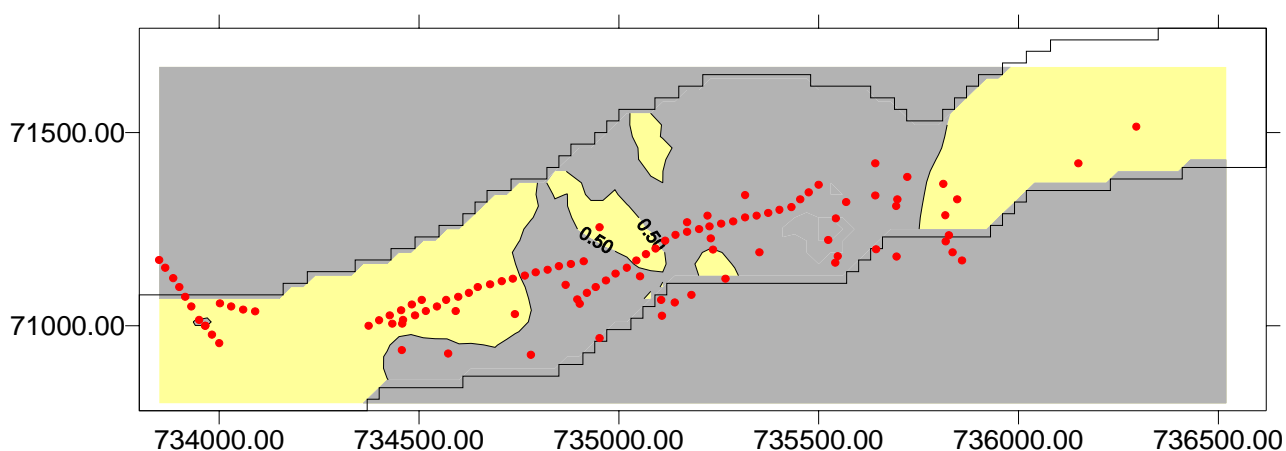


**Figura 3** - Esquema com locação dos poços e piezômetros na área monitorada (com seta indicando direção preferencial de fluxo), em sistema de coordenadas UTM.

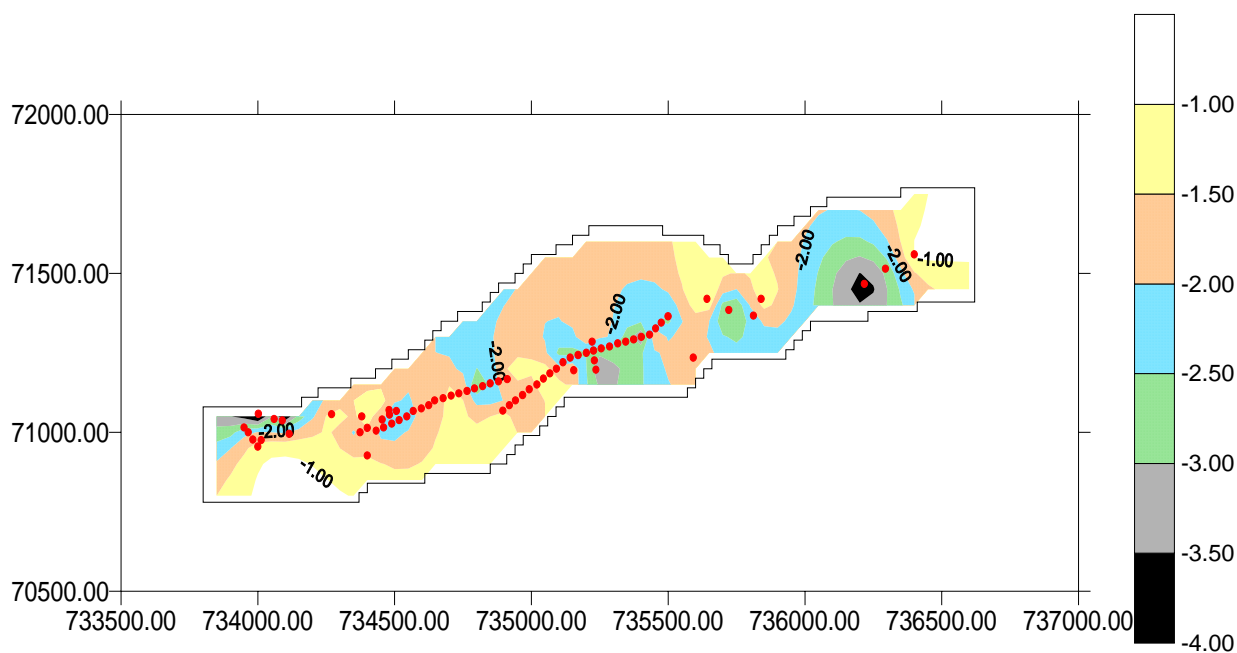
Com base em levantamento de campo para caracterização hidráulica do aluvião (Montenegro et al., 2003), 70 amostras de solo deformadas e indeformadas foram coletadas em três profundidades do aluvião. Solos francos e franco arenosos (segundo classificação triangular proposta pelo Serviço de Solos dos Estados Unidos) são dominantes, representando ao todo 75% do total de amostras analisadas. Montenegro e Montenegro (1997) descrevem metodologia indireta para cálculo das propriedades hidráulicas dos solos do aluvião Mimoso, baseada em dados de textura das amostras coletadas. Utilizando metodologia geostatística indicadora, pode-se construir mapa dos solos dominantes (e contrastantes) no aluvião (Montenegro, 1997b) (Figura 4). Esta técnica tem sido aplicada em geologia e em hidrologia, em particular na avaliação de semi-

variogramas experimentais a partir de perfis de sondagem (Johnson & Dreiss, 1989; Johnson, 1995), e para representar regiões contrastantes de alta e baixa permeabilidade em solos (Desbarats, 1987). Johnson (1995) destaca que a aproximação indicadora considera as características estruturais em escalas relevantes para investigação de processos de contaminação e manejo de solos.

Mackay e Montenegro (1996) procederam a detalhado estudo da variabilidade espacial nas propriedades hidráulicas da zona saturada do aluvião. Testes de condutividade hidráulica foram realizados em 63 piezômetros especialmente construídos para fins de caracterização e monitoramento. Com base em medidas replicadas de campo e no semi-variograma resultante, mapa de condutividade hidráulica da zona saturada foi gerado para o domínio (Figura 5). Esse mapa demonstra o elevado grau de variabilidade espacial das propriedades hidráulicas do aquífero.



**Figura 4** - Distribuição dos solos franco arenosos (amarelo) e francos (cinza).



**Figura 5** - Logaritmo da condutividade hidráulica da zona saturada (m/ d).

## Estimativas de fluxo e transporte

A dinâmica hidrológica do aluvião em resposta a eventos de evapotranspiração, de precipitação pluviométrica e de irrigação é investigada neste estudo com base em modelagem integrada das zonas saturada e não-saturada. Em virtude da variabilidade temporal de eventos climáticos e hidrológicos típica do semi-árido Nordeste, a profundidade do lençol freático no domínio em estudo apresenta marcante sazonalidade, com variações anuais superiores a 3 metros (Montenegro et al., 2003). Tais oscilações têm grande importância na duração de eventos de recarga e na magnitude de fenômenos capilares, como é discutido neste trabalho. A depender das concentrações salinas presentes na franja capilar, significativos aportes podem ocorrer em direção à rizosfera, provenientes de lençol freático raso. Com efeito, tais contribuições oriundas da zona saturada são passíveis de ocorrer mesmo durante a estação seca, devido aos reduzidos conteúdos de umidade na subsuperfície do aluvião. Com a lixiviação, estes sais retornam para o aquífero, e degradam as reservas hídricas subterrâneas, caso não haja eficiente circulação na zona saturada.

De modo a simular a potenciométrica do aluvião em resposta aos componentes de recarga e descarga, bem como às explorações através de cacimbões, o modelo PARADIGM (Mackay, 1993), desenvolvido na Universidade de Newcastle- Inglaterra, foi selecionado, tendo em vista sua potencialidade em simular eficientemente variabilidade temporal de eventos hidrológicos e variabilidade espacial de propriedades hidráulicas de meios porosos.

Para previsão de componentes hídricos e de sais na zona não-saturada, adotou-se modelo simplificado, baseado em discretização espacial do solo em três células (célula de sub-superfície, célula radicular e célula capilar), o qual apresentou adequado comportamento quando comparado a modelos numéricos tradicionais baseados na Equação de Richards (Montenegro et al., 2002).

Devido à marcante variação espacial e temporal da profundidade do lençol freático, especial atenção foi dedicada ao comportamento da componente capilar.

Aproximação “quasi-permanente” (sucessão de soluções permanentes) foi adotada para o fluxo, utilizando forma integrada da Equação de Darcy ao longo da franja capilar (Equação 1), expressa como:

$$z = \int_0^{\psi_b} \left[ 1 + \frac{q}{K(\psi)} \right]^{-1} d\psi \quad (1)$$

onde  $K(\psi)$  é a condutividade hidráulica em função de  $\psi$ , que representa a tensão no contorno superior da coluna de solo e “ $q$ ” o fluxo capilar, na profundidade “ $z$ ”. Quando a ascensão capilar é desprezível, recarga difusa é passível de ocorrer, dependendo de eventos de irrigação e

pluviometria. Para avaliar a recarga, foi utilizado modelo de Green-Ampt (1913), com aproximação proposta por Mein and Larson (1971). A taxa de infiltração acumulada  $F$  pode ser escrita como:

$$f = K \left( 1 + \frac{n_a \psi_f}{F} \right) \quad (2)$$

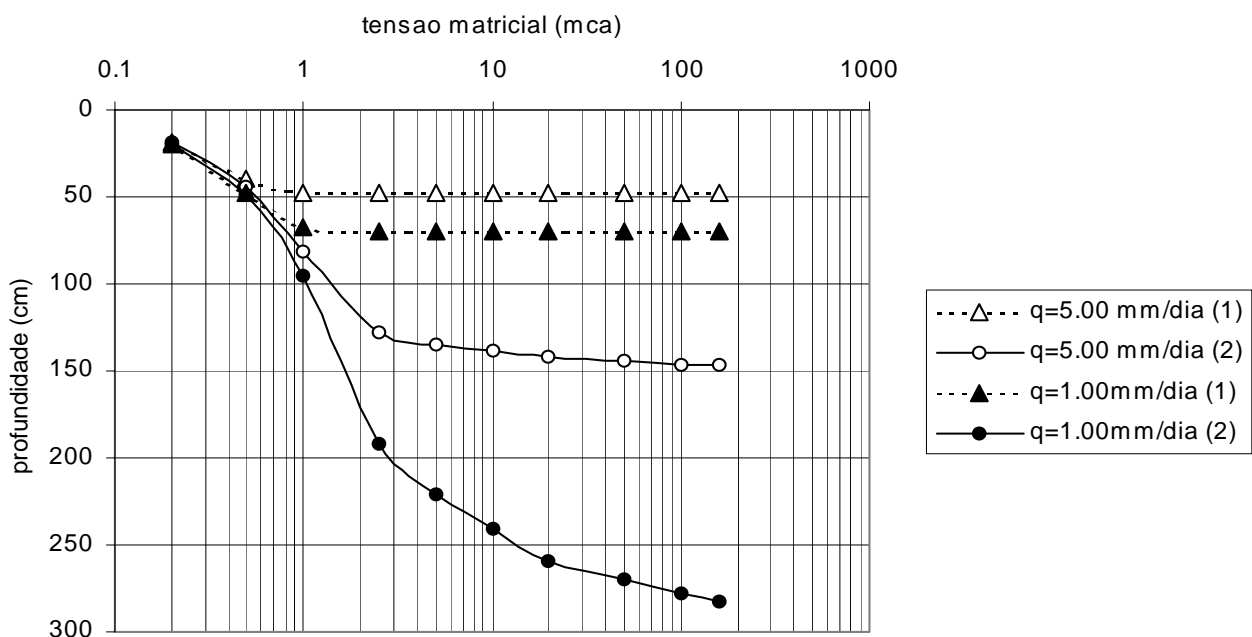
onde  $\psi_f$  é a sucção efetiva na frente de molhamento,  $K$  a condutividade hidráulica e  $n_a$  é a porosidade disponível, igual à diferença entre a porosidade efetiva e a umidade inicial antes da infiltração. Substituindo-se  $f=dF/dt$  e integrando-se (2), resulta em:

$$F - n_a \psi_f \ln \left( 1 + \frac{F}{n_a \psi_f} \right) = K t \quad (3)$$

Estimativas para os parâmetros de Green-Ampt baseados em informação textural, conteúdo de material orgânica e densidade global são apresentadas por Rawls and Brakensiek (1983).

Os fluxos capilar e de recarga difusa para os solos francos e franco arenosos, dominantes do aluvião, foram avaliados de acordo parâmetros hidráulicos propostos por Rijtema (1969), incluindo a curva característica tensão-umidade.

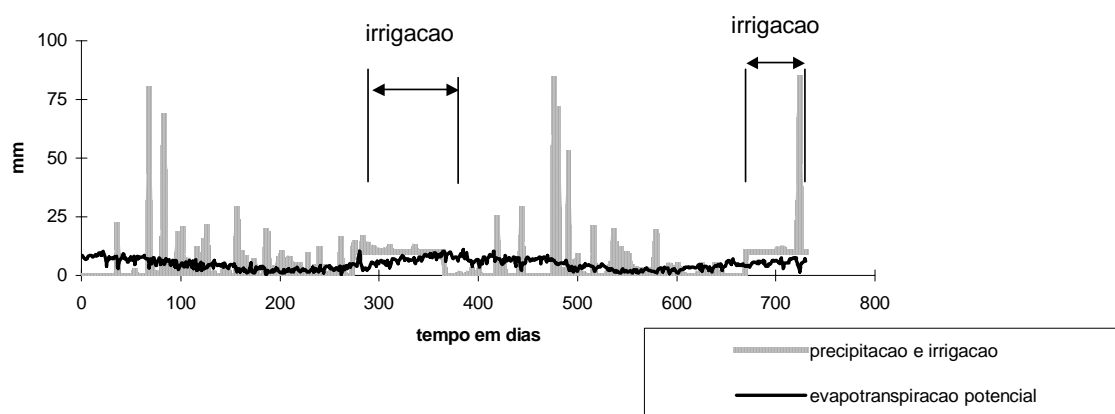
A Figura 6 apresenta os fluxos de ascensão capilar para os dois tipos de solo, conforme discutido por Montenegro e Montenegro (2004).



**Figura 6** - Comparação entre taxas de ascensão capilar em solos francos arenosos (1) e franco siltosos (2)- Fonte: Ribeiro et al. (2003).

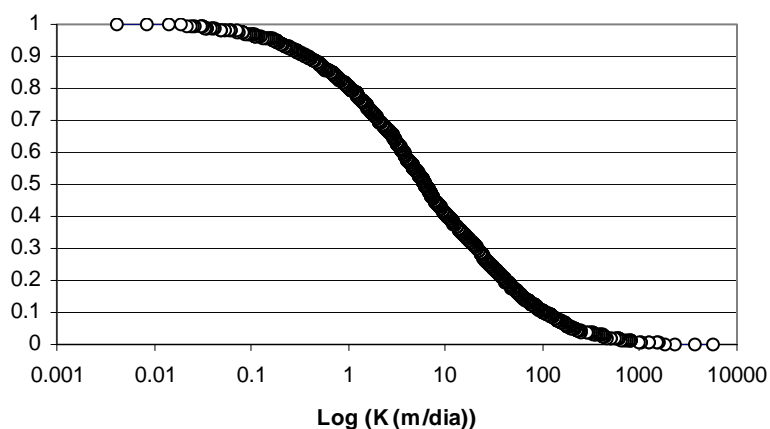
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando-se dados climáticos locais, simulou-se dinâmica de sais na zona não-saturada e saturada do aluvião. Condições de equilíbrio foram adotadas como inicialização da modelagem. A modelagem foi então inicialmente conduzida por um período de seis anos, de modo a inicializar perfis de umidade e salinidade da zona não saturada. Calendário agrícola sugerido por CISAGRO(1991) foi adotado, com cultivo de beterraba de Setembro a Novembro, com cenários reais de precipitação e evapotranspiração. Adotou-se coeficiente de lixiviação de 1,20, conforme recomendação da CISAGRO(1991). Fluxos e transporte de sais foram simulados na zona não saturada.



**Figura 7** - Dados climáticos da estação de Pesqueira, para dois anos consecutivos.

O modelo simplificado foi integrado e acoplado ao modelo PARADIGM para fluxo e transporte em meios saturados. Distribuições de salinidade e carga hidráulica no aluvião foram simuladas, considerando a variabilidade espacial de solos (representada no mapa apresentado na Figura 5) , e a distribuição espacial dos lotes irrigados e de condutividade hidráulica da zona saturada, conforme Figura 5 e Figura 8, após krigagem das condutividades hidráulicas.

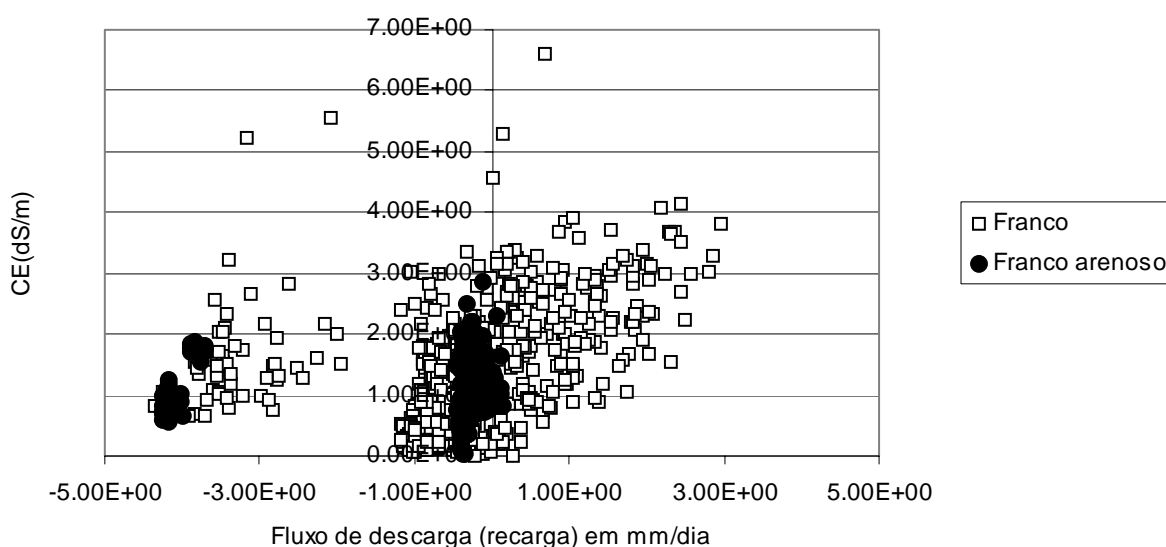


**Figura 8** - Distribuição de frequência acumulada das condutividades hidráulicas na malha de discretização.

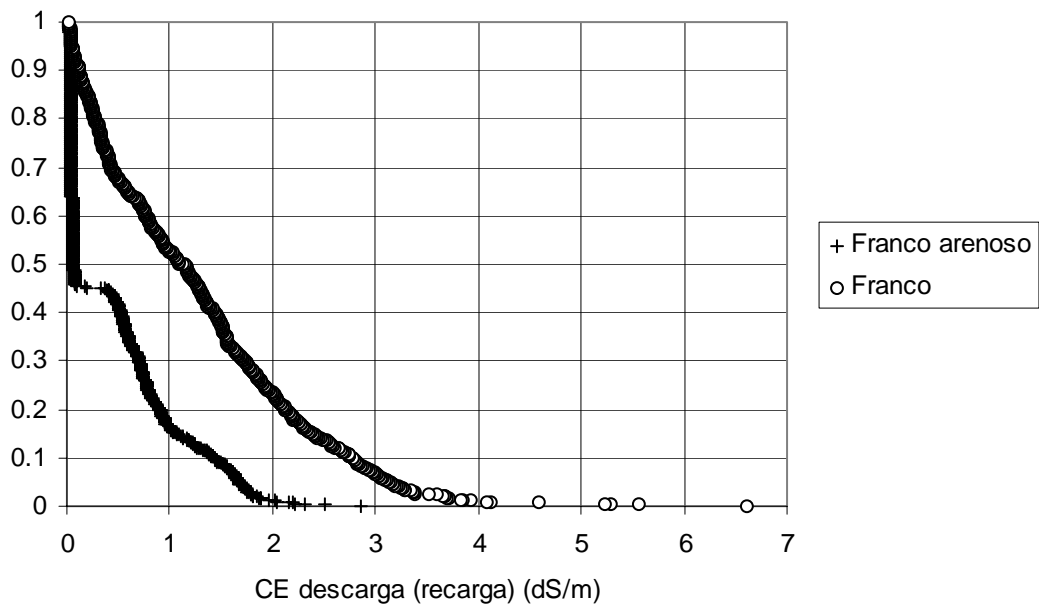


A partir da análise dos resultados simulados, áreas críticas exibindo altos conteúdos de sais podem ser identificadas, as quais são consistentes com observações de campo. Tais áreas críticas estão situadas na parte média e baixa do aluvião, para onde se concentram os sais aplicados ao sistema através do contorno superior e dos lotes irrigados.

A distribuição de sais no aquífero apresenta forte correlação com o tipo de solo. Quando lençol freático raso ocorre em regiões de solos finos, uma região de descarga distribuída pode-se estabelecer, e produzir acúmulo de soluto e reconcentração na zona saturada. Com efeito, conforme destacado em Salama et al. (1993), a distribuição de sais em aquíferos livres está intimamente ligada à distribuição espacial e temporal das zonas de descarga e recarga. A Figura 9 apresenta a integração ao longo do tempo do fluxo ascendente (positivo) entre as zonas saturada e não-saturada, para um período de simulação de 50 meses após implementação da irrigação. As regiões de descarga (valores positivos) nas áreas de solos francos estão, em termos gerais, associadas a áreas de alto teor de sais dissolvidos na zona saturadas (Figura 9). A nuvem de pontos à esquerda representa o comportamento dos lotes irrigados. A influência da reconcentração devido a ciclos sucessivos de irrigação e bombeamento pode ser verificada nos altos valores de condutividade elétrica na zona saturada, para as áreas de solos francos. A Figura 10 exhibe a distribuição de frequência acumulada das condutividades elétricas da zona saturada, em áreas com solos contrastantes.

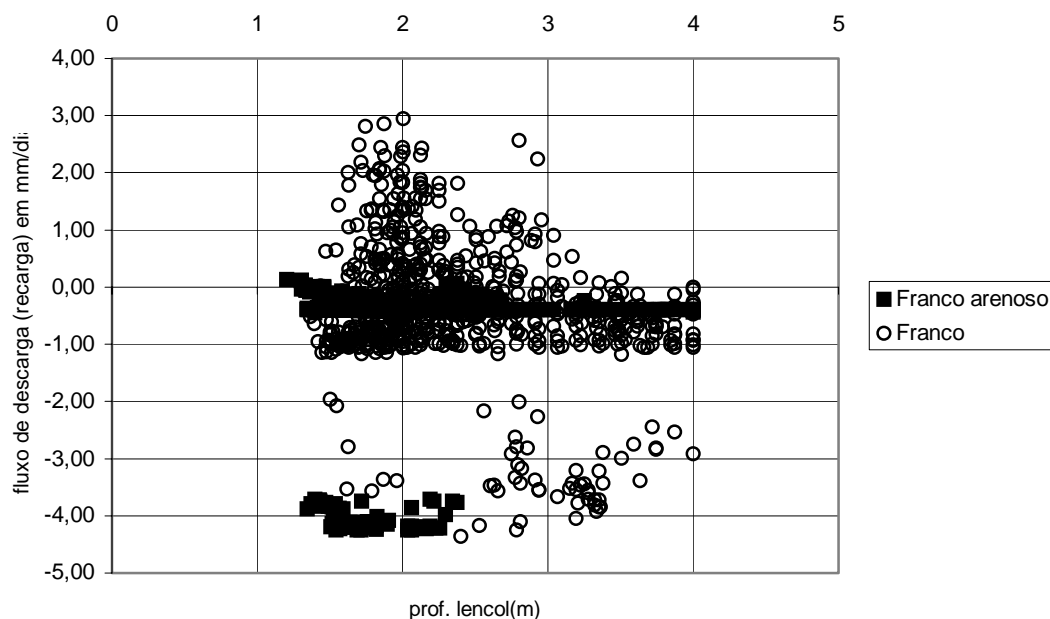


**Figura 9** - Relação entre fluxo de recarga (negativo) e ascensão (positivo) e a salinidade da zona saturada.



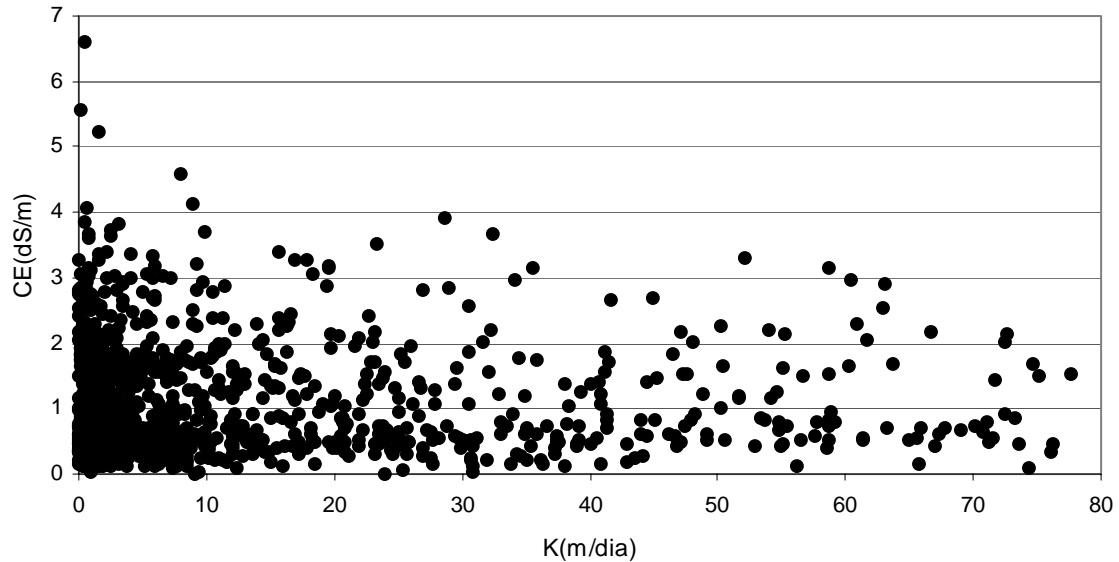
**Figura 10** - Distribuição de frequência das salinidades na zona saturada em áreas de solos contrastantes.

Observa-se que a profundidade do lençol e o estabelecimento de regiões de descarga têm maior relevância em áreas de solo franco, conforme Figura 11. A nuvem inferior de pontos está relacionada às áreas dos lotes irrigados, onde lâminas de lixiviação (negativas) são aplicadas. Tais lâminas são mais efetivas (produzem valores mais elevados) em áreas de solos franco-arenosos.



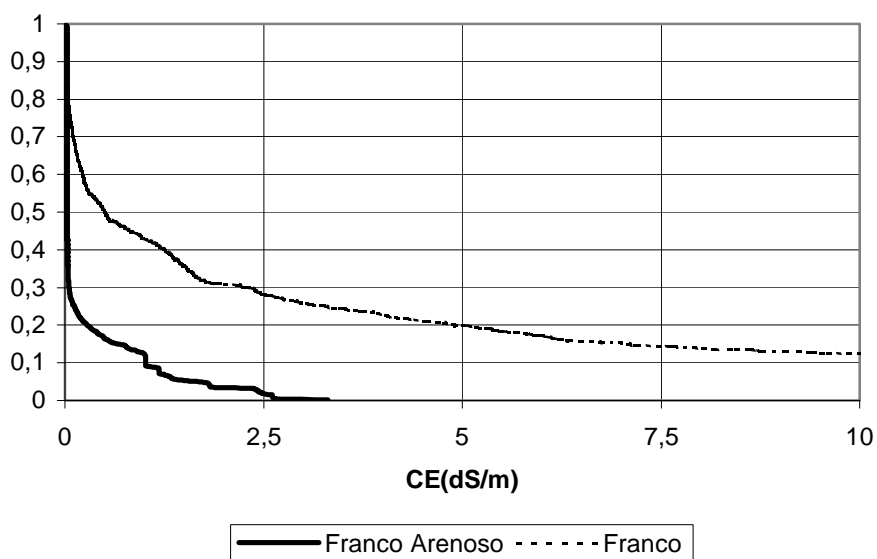
**Figura 11** - Relação entre profundidade do lençol freático e fluxo de descarga (positivos) e de recarga (negativos).

A circulação subterrânea na zona saturada, representada pela condutividade hidráulica, também tem influência nas concentrações mais elevadas de sais. Pode-se verificar, na Figura 12, que a ocorrência de condutividades elétricas mais elevadas dá-se para condutividades hidráulicas inferiores a 10m/dia.



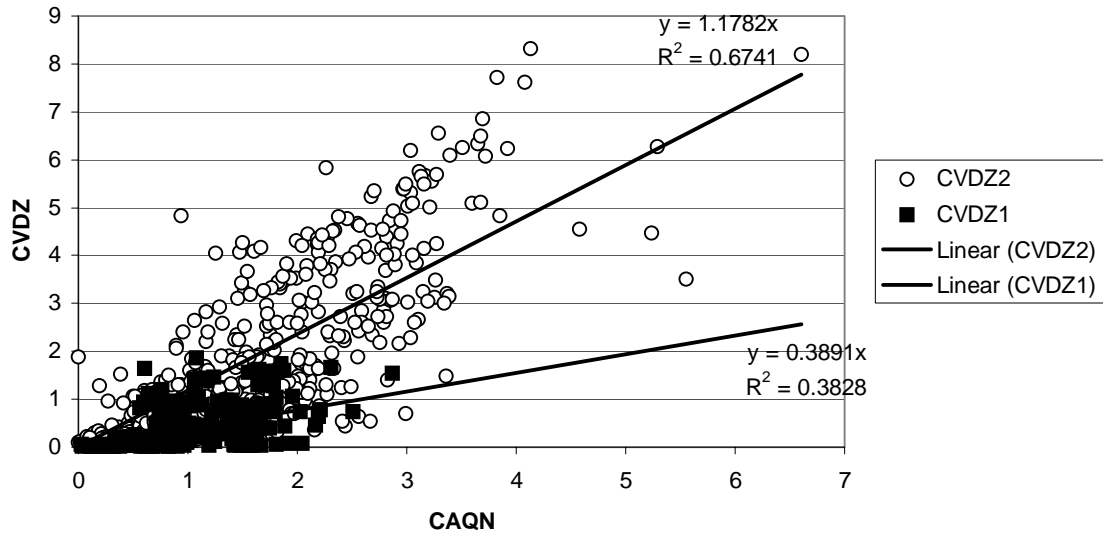
**Figura 12** - Relação entre circulação na zona saturada e condutividade elétrica no aquífero.

Durante 50 meses de irrigação no vale, pode-se verificar as distintas dinâmicas de salinidade dos solos contrastantes. Os solos francos exibem via de regra maiores condutividades elétricas, conforme apresentado na Figura 13, seja devido às menores taxas de infiltração (e graus de lavagem), e/ou a predominância de fluxos de ascensão que tendem a concentrar sais no perfil não saturado.



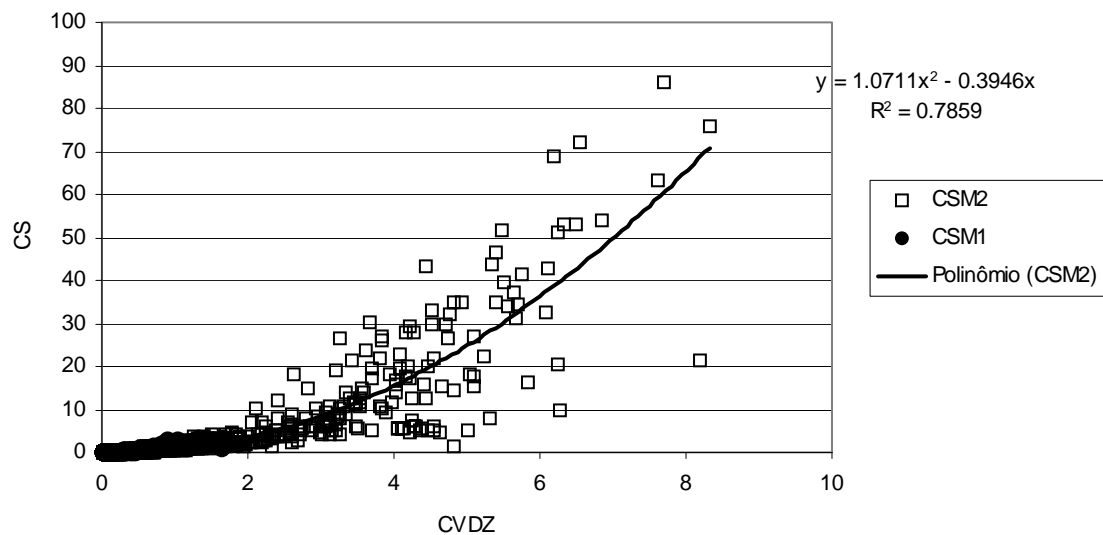
**Figura 13** - Distribuição de freqüência acumulada das concentrações de sais na zona não-saturada, para solos contrastantes.

A conexão hidráulica, promovida pela ascensão capilar, tem influência decisiva no transporte ascendente de sais, podendo-se detectar correlação entre a salinidade da zona saturada e a salinidade da zona vadosa, principalmente para solos francos (Figura 14).



**Figura 14** - Relação entre salinidade do lençol e a salinidade da zona vadosa, para solos contrastantes.

A partir da zona vadosa, os sais tendem a se mover para as camadas superiores do solo, gerando altas salinidades nas áreas de solos francos, conforme evidenciado na Figura 15.



**Figura 15** - Relação entre salinidade da zona vadosa e a salinidade da zona de raízes, para solos contrastantes.

## CONCLUSÕES

Este estudo demonstra a adequação de ferramentas computacionais que acoplam as zonas saturadas e não saturadas, quando se deseja estudar a salinização de aquíferos aluviais em regiões semi-áridas, e com lençol freático relativamente raso. Pode-se extrair desse estudo as seguintes conclusões:

- A ocorrência de lençol freático raso, em áreas de solos finos (francos), desempenham forte controle hidráulico à recarga difusa, e os sais se acumulam nos perfis de solo, tanto na zona saturada quanto na não saturada;
- A salinização secundária é o principal mecanismo de salinização dos vales aluviais no semi-árido, particularmente onde predominam solos de textura fina (francos);
- Com a ascensões capilares, motivadas pelas elevadas demandas atmosféricas das regiões semi-áridas, ciclos de reconcentração são estabelecidos, gerando a salinização das águas subterrâneas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico- **CNPq**- Brasil, da “Overseas Development Administration”- **ODA**- Inglaterra, do Banco do Nordeste, e da **FACEPE**, Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco. O suporte logístico da Universidade Federal Rural de Pernambuco- **UFRPE**, da Universidade Federal de Pernambuco- **UFPE**, e da **EMATER- PE** foram fundamentais para realização dessa pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHEN, Z.; GOVINDARAJU, R.S.; KAVVAS, M.L. Spatial averaging of unsaturated flow equations under infiltration conditions over areally heterogeneous fields. 1- Development of models, *Water Resour. Res.*, v.30:p.523-533, 1994a.
- [2] CHEN, Z.; GOVINDARAJU, R.S.; KAVVAS, M.L. .Spatial averaging of unsaturated flow equations under infiltration conditions over areally heterogeneous fields. 2- Numerical Simulations, *Water Resour. Res.*, v.30:p.535-548, 1994b.
- [3] CISAGRO (Companhia Integrada de Serviços Agropecuários). Projeto de Irrigação da fazenda Nossa Senhora do Rosario-Pesqueira-PE. Pernambuco, Recife-PE. 1991.
- [4] COULDRAIN-RIBSTEIN, A.; LOOSEMORE, T.; ROCHAT, P.; QUINTANILLA, J.; YOUNGER, P. Use of a groundwater model in assessing possible sources of salinity on the

- central Bolivian Altiplano, In: Models for Assessing and Monitoring Groundwater Quality, IAHS Publ. n. 227, Wallingford, GB: p.11-19, 1995.
- [5] DESBARATS, A. J.. Numerical estimation of effective permeability in sandshale formations. *Water Resources Research*, v.23 (2): p.273-286, 1987
- [6] GUI, C.X. Effects of irrigation on the chemical balance in the ecological environment of water and soil, In: Proceedings of the Vancouver Symposium of the IAHS, Publ. n. 169, Wallingford, GB. 1987.
- [7] HARTER, T.; YEH, T. C. J. Stochastic analysis of solute transport in heterogeneous, *Water Resour. Res.*, v. 32: p.1585- 1595, 1996.
- [8] JOHNSON, N.M. Characterization of alluvial hydrostratigraphy with indicator semivariograms, *Water Resour. Res.*, v. 31 (12): p. 3217-3227, 1995.
- [9] JOHNSON, N.M. e DREISS, S.J. Hydrostratigraphic interpretation using indicator geostatistics. *Water Resour. Res.*, v.25 (12): p.2501-2510, 1989.
- [10] KIM, C. P.; STICKER, J. N. M.; FEDDES, R. A. Impact of soil heterogeneity on the water budget of the unsaturated zone, *Water Resour. Res.*, v.33: p.991- 999, 1997.
- [11] MACKAY, R. A Study of the effect of the extent of site investigation of radiological performance, Volume 1- Development of the synthetic site model, Report No. DoE/HMIP/RR/93.052, Water Resource Systems Research Unit, Newcastle University, UK. 1993.
- [12] MACKAY, R. e MONTENEGRO, A. A. A.. Salinity control for sustainable small scale agriculture, Final Report to the Overseas Development Administration (ODA), UK. 30p.1996.
- [13] MEIN, R. G., e C. L. LARSON. *Modeling infiltration component of the rainfall-runoff process*, Bulletin 43, Water Resources Research Center, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA, 1971.
- [14] MONTENEGRO, S.M.G.L., MONTENEGRO, A.A.A Uso de Funções de Transferência Hidropedológica em uma Área Irrigada do Estado de Pernambuco Visando Modelagem espacial Estocástica; XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória- ES. 1997.
- [15] MONTENEGRO, A.A.A. Stochastic Hydrogeological Modelling of Aquifer Salinization from Small Scale Agriculture in Northeast Brazil, University of Newcastle upon Tyne. Inglaterra. 231p. 1997a. (Tese de Doutorado).
- [16] MONTENEGRO, S. M. G. L. Stochastic analysis of salt accumulation in heterogeneous irrigated soils: a case study in Northeast Brazil. University of Newcastle upon Tyne. Inglaterra. 277p. 1997b. (Tese de Doutorado).

- [17] MONTENEGRO, A. A. de A.; MACKAY, R.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Coupled unsaturated saturated modelling of salinization risk in an alluvial irrigated area of North-East Brazil. *Acta Universitatis Carolinae Geologica*, v. 46, n. 2/3, p. 593- 594, 2002b.
- [18] MONTENEGRO, S.M.G.L; MONTENEGRO, A.A.A.; MACKAY, R.; OLIVEIRA, A.S.C. Dinâmica hidro-salina em aquífero aluvial utilizado para a agricultura irrigada familiar em região semi-árida. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre- RS, v. 8, n. 2, p. 85-92, 2003.
- [19] MONTENEGRO, S.M.G.L.; MONTENEGRO, A.A.A. Aproveitamento sustentável de aquíferos aluviais no semi- árido (no prelo). In: CABRAL, J.J.S.P.; FERREIRA, J.P.L.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; COSTA, W.D. (Org.). *Água subterrânea: aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento (no prelo)*. Recife, v. 1, p. 44-102. 2004.
- [20] OOSTERBAAN, R. J. Agricultural Drainage Criteria, In: H. P. Ritzema eds. *Drainage Principles and Applications*. ILRI Publication 16. Second edition.. The Netherlands, 1994.
- [21] RAWLS, W. J. e D. L. BRAKENSIEK. A procedure to predict Green and Ampt infiltration parameters. In: *Advances in Infiltration*. ASCE. USA. p 102- 113, 1983.
- [22] RIBEIRO, M.R.; FREIRE, F. J.; MONTENEGRO, A.A.A.. Solos Halomórficos no Brasil: Ocorrência, Gênese, Classificação, Uso e Manejo sustentável. In: SBCS. (Org.). *Tópicos especiais em ciência do solo*. Viçosa-MG, v. 01, p. 165. 208. 2003.
- [23] RITJEMA, P. E.. Soil moisture forecasting. Nota 513. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding. Wageningen. The Netherlands. 28p. 1969.
- [24] RUSSO, D.; ZAIDEL, J.; LAUFER, A.. Stochastic analysis of solute transport in partially saturated heterogeneous soil 1. Numerical experiments, *Water Resour. Res.*, v.30: p.769-779, 1994.
- [25] SALAMA, R. B.; FARRINGTON, P.; BARTLE, G. A.; WATSON, G. D.. Distribution of recharge and discharge areas in a first-order catchment as interpreted from water level patterns. *Journal of Hydrology*, v.143: p.259- 277, 1993.
- [26] SPALDING, R. F.; EXNER, M. E. Areal, vertical, and temporal differences in ground-water chemistry: I. Inorganic constituents. *J. Environ. Qual.*, v.9: p.466-479, 1980.
- [27] SUASSUNA, J.; AUDRY, P. Estudo da Salinidade das águas de irrigação das propriedades do GAT e da sua evolução sazonal, CNPq- Fundação Joaquim Nabuco, Instituto de Tropicologia, Recife. 1992.
- [28] TSENG, P. H; JURY, W. A. Comparison of transfer function and deterministic modelling of area-averaged solute transport in a heterogeneous field, *Water Resour. Res.* v.30: p.2051-2063, 1994.

- [29] VAN ROOY, D. Conditional stochastic simulation of groundwater contamination- a case study. Technical University of Denmark, Series Paper 42, 154 p. 1987.