

## Evolução da Zona Saturada em Agricultura de Vazante: Açude Cajueiro, Pernambuco

**Abelardo Antônio de A. Montenegro**

Departamento de Tecnologia Rural/Área de Recursos Hídricos/Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE  
Av. D. Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos - Recife, PE - monte@hotlink.com.br

**Suzana M. G. L. Montenegro**

Departamento de Engenharia Civil/Centro de Tecnologia e Geociências/Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

**Antônio Celso D. Antonino**

Departamento de Energia Nuclear/Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

**Adriano Luiz Normandia Monteiro**

Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Recebido: 01/02 - revisão: 04/02 - aceito: 04/03

### **RESUMO**

*Avalia-se a circulação hídrica entre o Açude Cajueiro, situado em Tuparetama (PE), e suas vazantes, em duas seções transversais. A partir de leituras diárias de nível d'água no açude e em piezômetros instalados, e com base em caracterização hidráulica da zona saturada, a dinâmica de fluxo é analisada. Através de modelo numérico em diferenças finitas, as recargas oriundas de eventos de precipitação e as descargas por evaporação do lençol foram estimadas. As perdas do lençol para a atmosfera podem atingir valores elevados, em situações onde o lençol está próximo à superfície. Esses aportes representam importantes contribuições para as culturas desenvolvidas nas vazantes, dispensando o uso da irrigação para culturas de ciclo curto.*

**Palavras-chave:** Fluxo saturado, subirrigação, vazante.

### **INTRODUÇÃO**

A prática da agricultura em grande escala em regiões semi-áridas é condicionada por fatores limitantes relacionados à disponibilidade de recursos hídricos e conservação ambiental. Na região semi-árida do Brasil, a agricultura de pequena escala ou de subsistência é de fundamental importância do ponto de vista social, com a promoção da fixação do homem no campo. Uma das alternativas para a prática da agricultura de pequena escala consiste na chamada agricultura de vazante.

A agricultura de vazante consta da implantação de cultivo nas margens de açudes, em declive suave, acompanhando o declínio e recuo de seus espelhos hídricos. A vazante se destaca, dentre as alternativas de utilização hídrica dos açudes para fins agrícolas, como um método de baixo custo, que não requer implantação de sistemas de adução e irrigação (Antonino e Audry, 2001). Fundamentalmente, o procedimento de vazante pode ser classificado como método de subirrigação, no qual a umidade do perfil é parcialmente ou totalmente dependente da presença de um lençol freático raso e das propriedades

relacionadas à ascensão capilar. Em geral, culturas de ciclo curto são implantadas, em particular, capim-elefante e milho.

A evolução temporal da zona saturada, tanto do ponto de vista quantitativo quanto qualitativo, assume fundamental importância no rendimento das culturas de vazante. Em particular, a interação ou conexão hidráulica entre a zona de saturação e o açude desempenha relevante controle na profundidade do lençol e na concentração de sais abaixo da rizosfera.

Este estudo focaliza a dinâmica da zona saturada em aquífero conectado ao Açude Cajueiro, localizado no Sertão de Pernambuco (Tuparetama-PE), em cujas margens é praticada a agricultura de vazante. O estudo está inserido no programa denominado “Projeto Açudes”, iniciado em 1994, conjuntamente pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Universidade Federal de Pernambuco e pelo Instituto Francês de Pesquisa para o Desenvolvimento (IRD, ex-ORSTOM), tendo por objetivo a elaboração de um modelo de gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos de açudes do Estado de Pernambuco.

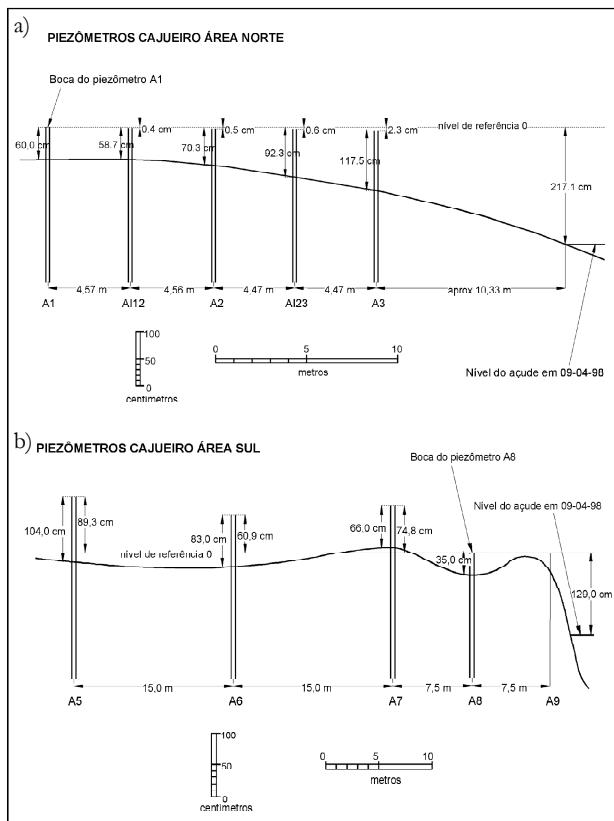


Figura 1. Seção transversal de monitoramento da Estação Norte (a) e da Estação Sul (b).

## MATERIAL E MÉTODOS

### Domínio de estudo

O Açude Cajueiro está localizado no município de Tuparetama (PE), Alto Pajeú, inserido em uma bacia hidrográfica de área 147,75 Km<sup>2</sup> (Silva, 1997).

No acompanhamento do Açude Cajueiro foram definidos dois domínios para monitoramento de campo, os quais estão indicados na Figura 1. Uma seção transversal foi instalada na margem direita do açude, aqui denominada Estação Norte (Figura 1a), equipada inicialmente com 3 piezômetros, e complementada posteriormente com mais dois piezômetros. Outra seção transversal foi locada na margem esquerda do açude, denominada Estação Sul (Figura 1b), possuindo inicialmente dois piezômetros, e recebendo posteriormente mais dois adicionais.

Perfis litológicos das seções correspondentes aos piezômetros nos dois domínios são apresentados na Figura 2. A composição granulométrica das seções é apresentada na Tabela 1.

A Estação Norte apresenta inclinação suave, com micro-topografia plana, onde predominam solos de textura

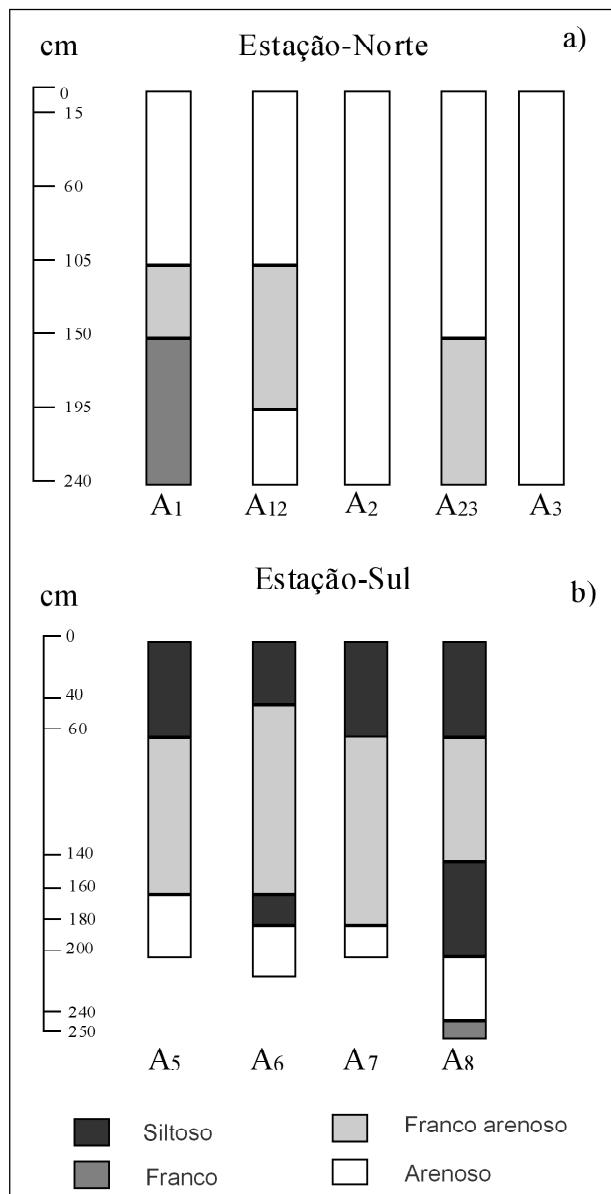


Figura 2. Perfis litológicos nos piezômetros instalados a) na Estação Norte e b) na Estação Sul.

Tabela 1. Composição granulométrica média nas Estações Norte e Sul.

Estação	Locação	% Areia	% Argila	% Silte
Norte	A1	85,0	10,4	4,6
	A2	65,4	19,0	15,6
	A3	85,0	11,4	3,6
Sul	A5	83,0	11,4	5,6
	A7	79,0	13,4	7,6

arenosa. Em contraste, a inclinação da Estação Sul é acentuada, a micro-topografia é do tipo ondulada, com ocorrência de solos de textura franca, e intercalações de camadas franco-arenosas.

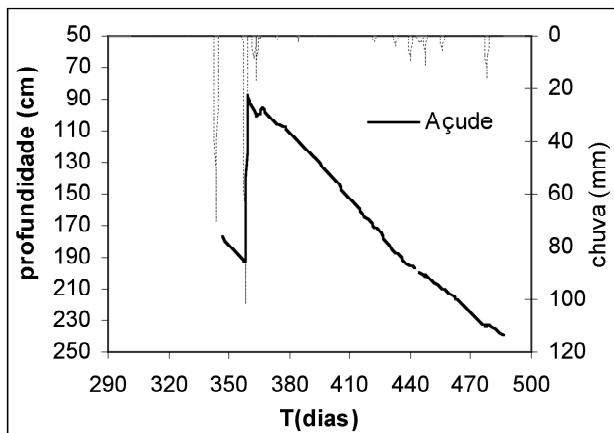


Figura 3. Chuva e Flutuação de nível d'água no açude (em relação a N.R.).

Tabela 2. Testes de condutividade hidráulica, com réplicas (m/dia).

	Estação Norte	Estação Sul
Piezômetro A <sub>1</sub>	K <sub>1</sub> = 1,56 Prof: 200 cm K <sub>2</sub> = 1,49 K <sub>3</sub> = 1,78	Piezômetro A <sub>5</sub> K <sub>1</sub> = 2,72 Prof: 178 cm K <sub>2</sub> = 2,53 K <sub>3</sub> = 2,60
Piezômetro A <sub>2</sub>	Prof: 190 cm K <sub>2</sub> = 2,04 K <sub>3</sub> = 1,64	Piezômetro A <sub>7</sub> K <sub>1</sub> = 2,12 Prof: 190 cm K <sub>2</sub> = 2,37 K <sub>3</sub> = 1,94
Piezômetro A <sub>3</sub>	K <sub>1</sub> = 2,87 Prof: 142 cm K <sub>2</sub> = 1,83 K <sub>3</sub> = 2,28	

#### Monitoramento do nível d'água no açude e da piezometria no contorno das vazantes

Foi realizado acompanhamento sistemático do nível d'água no açude (Figura 3) e nos piezômetros nas Estações Norte e Sul, a nível diário no período de Outubro de 1997, dia 303, até Abril de 1998, dia 486 (Figuras 4a e 4b). A precipitação no período é apresentada no gráfico da Figura 3. Pode-se notar a consistência dos dados medidos, em particular a recuperação dos níveis em função da ocorrência de chuvas intensas. Três períodos distintos podem ser identificados na variação do nível d'água do lençol freático. Esses períodos estão evidenciados nas Figuras 4a e 4b.

Foram realizados testes de campo de condutividade hidráulica, utilizando a metodologia do furo do trado (Millar, 1988). Furos de sondagem de 2" não-revestidos foram adotados, e monitorada a recuperação do nível freático após a retirada de um certo volume de água. Montenegro et al. (1997) apresentam discussão e estatísticas dos testes realizados. Para estimativa dos fluxos saturados, assumidos horizontais, valores médios de condutividade hidráulica foram estimados para as estações Norte e Sul, a partir de testes realizados e replicados em cada

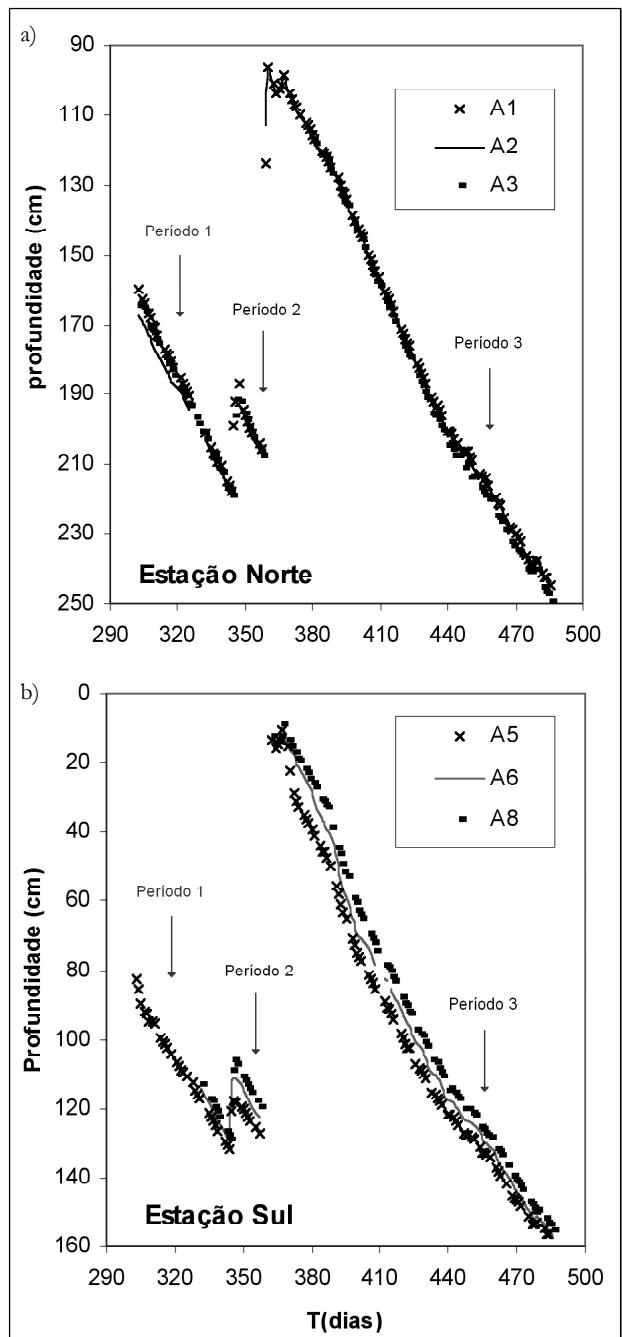


Figura 4. Flutuações de nível d'água nos piezômetros (em relação a N. R.) da Estação Norte (a) e da Estação Sul (b).

piezômetro, conforme indicado na Tabela 2. Foi considerada a média harmônica, segundo a expressão para "n" piezômetros:

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{n} \left( \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \dots + \frac{1}{K_n} \right) \quad (1)$$

Quando a condutividade hidráulica não sofre grandes variações, pode ser utilizada a média aritmética, embora a

média harmônica seja a formalmente recomendada (Huyakorn e Pinder, 1983; Cirilo e Cabral, 1989).

### Estimativa de fluxo entre açude e aquífero freático

A circulação subterrânea, focalizada na interação do lençol freático com o açude, foi avaliada através dos sucessivos perfis do nível d'água nas seções transversais Norte e Sul.

Neste estudo, convencionou-se que o fluxo é positivo quando se processa do açude para o lençol, e negativo quando o lençol recarrega o açude.

Para o cálculo dos fluxos “q”, aplicou-se a lei de Darcy, escrita como:

$$q = -K_m \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (2)$$

onde  $\Delta h/\Delta x$  é gradiente de carga hidráulica ( $L^\circ$ ); e  $K_m$  a condutividade hidráulica média ( $LT^{-1}$ ).

### Simulações numéricas de fluxo saturado

Visando o estudo das taxas de recarga do aquífero durante os eventos de precipitação, bem como as taxas de evaporação do lençol, foram realizadas simulações numéricas do fluxo saturado, para o período de estudo. Combinando-se a Equação (2) com a equação da continuidade, e aplicando-se a hipótese de Dupuit - considerando a carga hidráulica ao longo de uma linha vertical como constante, o escoamento subterrâneo bi-dimensional em meios porosos não-confinados pode ser descrito através da seguinte equação diferencial:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) - R = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

onde  $x, y$  são coordenadas cartesianas ( $L$ );  $K_{xx}, K_{yy}$  representam as condutividades hidráulicas principais, nas direções  $x$  e  $y$  ( $LT^{-1}$ );  $h$  a carga hidráulica ( $L$ );  $R$  o fluxo volumétrico por unidade de volume, representando as fontes/retiradas de água ( $LT^1$ ); e  $S$  a porosidade específica do material poroso ( $L^\circ$ ).

Adotou-se uma aproximação por diferenças finitas para a Equação (3), segundo metodologia discutida em McDonald e Harbaugh (1984), utilizando o modelo Modflow proposto por aqueles autores.

Internamente, o modelo adota a Expressão (1) para cálculo da condutividade hidráulica média  $K_m$ . Neste estudo, o aquífero foi assumido heterogêneo e isotrópico, com  $K_{xx} = K_{yy} = K_m$ , este último calculado entre células adjacentes.

O termo de fluxo volumétrico  $R$  é dependente do tempo, variando de acordo com eventos de precipitação, bem como com a ocorrência de ascensões capilares, estas últimas dependentes da profundidade do lençol freático. Para as simulações realizadas, considerou-se ocorrência de recarga nos dias de precipitação apenas, enquanto a variação temporal da evaporação do lençol foi aproximada por três períodos de valor constante (períodos 1, 2 e 3, das Figuras 4a e 4b).

A vazante do Açude Cajueiro foi discretizada segundo duas malhas horizontais de 300 m x 45 m, perpendiculares ao eixo do açude, compostas de 66 células retangulares (3 linhas e 22 colunas), uma para cada estação da Figura 1. Para resultados mais precisos, a malha foi refinada na região próxima ao açude. Para a Estação Norte, a discretização foi de 1 m do açude ao piezômetro A1. Para a Estação Sul adotou-se discretização de 3 m entre o açude e o piezômetro A5. O aquífero foi representado por uma única camada, adotando-se a hipótese de Dupuit na solução numérica, ou seja, escoamento aproximadamente horizontal. Como condições de contorno foram adotadas, no lado oposto ao açude, leituras diárias dos piezômetros A1 e A5, para as Estações Norte e Sul respectivamente - condição de carga conhecida, e no lado do açude, foram assumidas leituras diárias de níveis deste. Para as bordas laterais da malha considerou-se limite de fluxo nulo, levando em consideração a simetria.

As condições de contorno adotadas, juntamente com a hipótese de Dupuit, conduzem a uma modelagem essencialmente unidimensional das seções transversais apresentadas na Figura 1. Embora reconhecendo o potencial do modelo numérico adotado para simular fluxos em duas ou até três dimensões, o modelo conceitual assumido neste estudo reduz a modelagem a uma única dimensão.

Objetivando calibrar a recarga/descarga “R” para reproduzir as medidas transientes de níveis piezométricos, foi adotada condição inicial equivalente à distribuição de cargas hidráulicas medidas em campo ao início do período de estudo e com monitoramento completo (dia 31 de Outubro de 1997), correspondendo ao dia (303). Partindo-se desta condição, simulou-se a dinâmica transiente para as Estações Norte e Sul, calibrando-se os parâmetros “evapotranspiração” e “recarga”.

A obtenção do valor calibrado ótimo foi procedida analisando-se o erro mínimo entre cargas observadas e simuladas, utilizando o erro médio dos desvios quadráticos dado pela seguinte expressão:

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{N} \right]^{1/2} \quad (4)$$

onde RMSE (Root mean squared error) representa o erro médio dos desvios quadráticos, “ $O_i$ ” são valores observa-

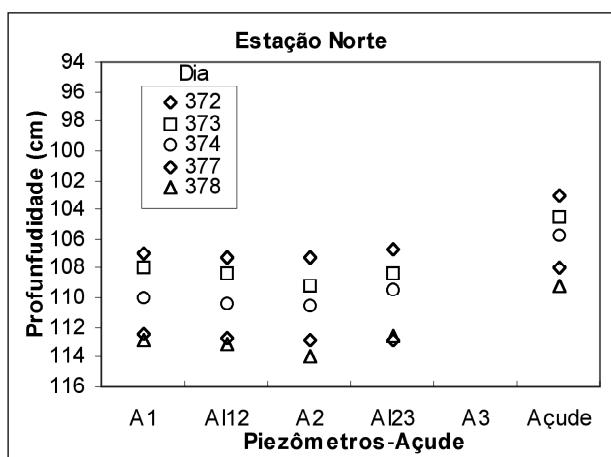


Figura 5. Perfis de nível d'água no açude e nos piezômetros da Estação Norte, 14, 15, 16, 19 e 20 dias após a ocorrência de precipitação intensa.

dos em campo, "S<sub>i</sub>" são os valores calculados na simulação, e "N" o número de cargas hidráulicas nos pontos monitorados, ao longo do tempo.

Adicionalmente ao critério anterior, e considerando que a variação de nível d'água em função do tempo exibe comportamento aproximadamente linear nos períodos 1 a 3 (Figuras 4a e 4b), comparou-se os coeficientes angulares (*a*) de regressão da curva média de piezometria medida em cada estação, e da curva de piezometria simulada, nos períodos sob ausência de recarga, de modo a calibrar a descarga do lençol.

Inicialmente foram assumidas taxas de recarga equivalentes aos valores das precipitações. Partiu-se então para o refinamento da calibração, ajustando-se a primeira recarga (com calibração visual) e atribuindo-se valores para a segunda recarga, até atingir um resultado de erro mínimo, conforme Equação (4). Após obtenção de um valor aceitável calibrado, para a segunda recarga, refinou-se a primeira recarga seguindo o mesmo critério.

Com base na análise textural apresentada na Tabela 1, estimou-se o conteúdo de umidade na saturação utilizando função de transferência hidropedológica proposta por Saxton et al. (1986), e expressa como:

$$q_s = i + j(\%ARE) + m \log_{10}(\%ARG) \quad (5)$$

onde  $\theta_s$  é o conteúdo de umidade na saturação;  $i = 0,332$ ;  $j = -7,251 \times 10^{-4}$ ;  $m = 0,1276$ ; ARE o conteúdo de areia; e ARG o conteúdo de argila.

A porosidade total foi assumida igual ao conteúdo de umidade na saturação.

Para estimativa do rendimento específico do aquífero freático, Younger (1993) propôs a seguinte relação para solos franco arenosos:

$$S = 0.54 \times \theta_s \quad (6)$$

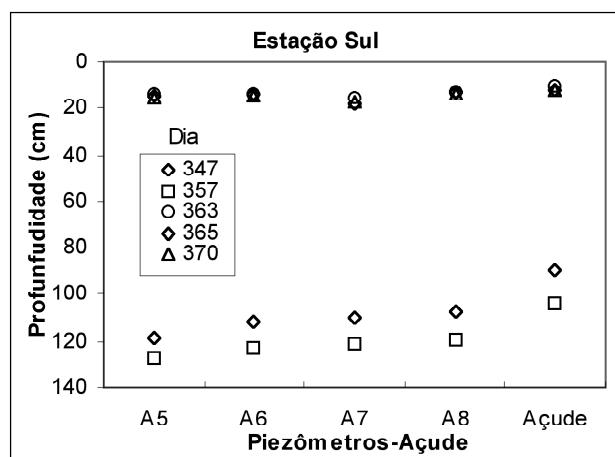


Figura 6. Perfis de nível d'água no açude e nos piezômetros da Estação Sul, antes e após ocorrência de precipitação intensa, no dia 357.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Monitoramento e evolução piezométrica da zona saturada no contorno das vazantes

Pelo comportamento do perfil piezômetro-açude da Estação Norte, pode-se observar que o açude é fonte de recarga ao lençol, durante o período de análise de dados. A Figura 5 ilustra alguns desses perfis.

A Estação Sul apresenta comportamento semelhante à Estação Norte, com o açude como fonte de recarga ao lençol, conforme ilustrado na Figura 6 para alguns dias de monitoramento. O dia 357 corresponde à data 24/12/1997, onde ocorreu precipitação intensa de 101,3 mm e rápida recuperação do nível freático.

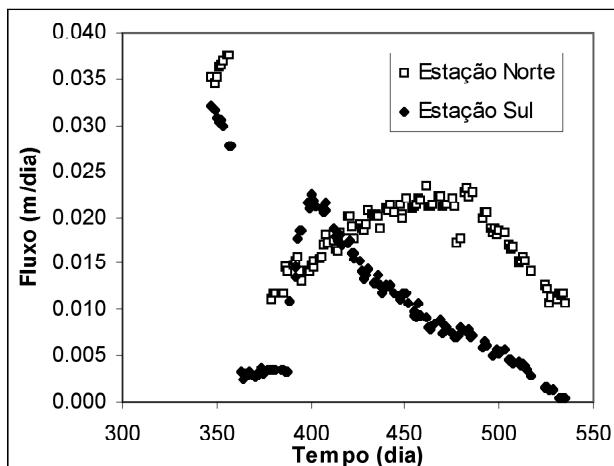
### Comportamento do fluxo entre o açude e o aquífero freático

As Estações Norte e Sul apresentaram fluxo positivo na interface açude-lençol. As estimativas utilizando a Equação (2) estão apresentadas na Figura 7.

Pela função de transferência hidropedológica proposta por Saxton et al. (1986), Equação (5), obteve-se uma umidade de saturação média para a Estação Norte de 0,43, determinada pelo valor médio entre piezômetros A2 e A3, e de 0,41 para a Estação Sul, a partir da média dos piezômetros A5 e A7. Vale salientar que Montenegro et al. (2000) verificaram o bom desempenho da metodologia de Saxton et al. (1986) para análise de curvas características de solos de várzea localizada a 10 km do Açude Cajueiro, o que sugere a aplicabilidade desta função para o presente estudo. Tal desempenho foi melhor para as amostras com baixo grau de estruturação, com teores de areia superiores a 80%.

**Tabela 3.** Calibração da evaporação do lençol e erros nos ajustes entre a curva de piezometria observadas e simuladas, para as Estações Norte e Sul.

	Período	Período (dias)	$a$ Observado	$R^2_{\text{observado}}$	$a$ Simulado	$R^2_{\text{simulado}}$	$EV_{\text{calibrada}} (\text{mm dia}^{-1})$
Norte	1	303 - 344	-0,0177	0,9968	-0,0155	0,9962	8,00
	2	347 - 358	-0,0206	0,9906	-0,0175	0,9791	9,00
	3	370 - 437	-0,0199	0,9959	-0,0183	0,9990	8,50
	1	303 - 344	-0,0115	0,9975	-0,0114	0,9971	7,00
Sul	2	346 - 357	-0,0116	0,9968	-0,0100	0,9821	6,50
	3	372 - 437	-0,0149	0,9918	-0,0132	0,9960	7,67

**Figura 7.** Fluxo no contorno lençol-açude. Valores positivos ocorrem do açude para o lençol.

Substituindo-se os valores de  $\theta_s$  estimados pelo modelo de Saxton et al (1986), obtém-se os valores  $S_{\text{Norte}} = 0,23$  e  $S_{\text{Sul}} = 0,22$ , adotados neste estudo (Equação 6).

### Calibração da evaporação nas Estações Norte e Sul

Durante o período de simulação, que se desenvolveu entre os dias 303 e 440 (Figuras 4a e 4b), foram testados diversos valores de evaporação para as Estações Norte e Sul, para os períodos 1, 2 e 3. O mínimo erro quadrático médio, para a solução calibrada, foi de 6,97%. No tocante à comparação entre os coeficientes angulares ( $a$ ) das curvas de piezometria medida e calibrada, a Tabela 3 resume os resultados obtidos, bem como os valores calibrados para evaporação do lençol para os períodos 1 a 3, além dos coeficientes de determinação da regressão  $R^2$ .

Dispõe-se de medidas de evaporação em Tanque Classe "A" para o período 3 da Tabela 3. O valor médio diário é de 10,30 mm/dia. Considerando as condições locais de bordadura, velocidade do vento e umidade relativa, e adotando-se a metodologia sugerida por Doorenbos e Pruitt (1977), o coeficiente de tanque pode ser assumido como igual a 0,75, fornecendo para a evapotranspiração potencial

média o valor de 7,73 mm/dia. Deste modo, o lençol supre 100% e 99% da evapotranspiração potencial, nas estações Norte e Sul, respectivamente.

### Calibração das recargas das Estações Norte e Sul

Ocorreram durante período em estudo duas precipitações significativas: a primeira de 70 mm, e a segunda de 101,3 mm, em um dia.

Na calibração foram obtidos os seguintes valores:

1º recarga: 60 mm para a Estação Norte e 48 mm para a Estação Sul;

2º recarga: 250 mm para a Estação Norte e 255 mm para a Sul.

Observa-se que os valores da primeira recarga foram inferiores à precipitação enquanto os valores da segunda recarga, superiores. Tal comportamento pode ser explicado considerando-se a condição de umidade do solo antecedente ao evento de chuva.

Os cenários de calibração tanto de recarga como de evaporação estão apresentados pelas Figuras 8a e 8b para as Estações Norte e Sul, respectivamente.

## CONCLUSÕES

O açude representou importante elemento de contribuição hídrica para a vazante estudada. O fluxo saturado avaliado foi sempre no sentido açude lençol. As perdas do lençol para a atmosfera podem atingir valores altos, em situações onde o lençol está elevado. Fluxos ascendentes verticais de 9 mm/dia representam aportes significativos de subirrigação para as culturas desenvolvidas nas vazantes. Esses valores ressaltam a tese de ser a irrigação dispensável para culturas de ciclo curto desenvolvidas nas vazantes.

As taxas de recarga dependem da intensidade de precipitação. A primeira recarga, resultante de uma precipitação diária de 70 mm, representou 77% desta. Para a segunda recarga, originada de uma precipitação de 101,3 mm, a

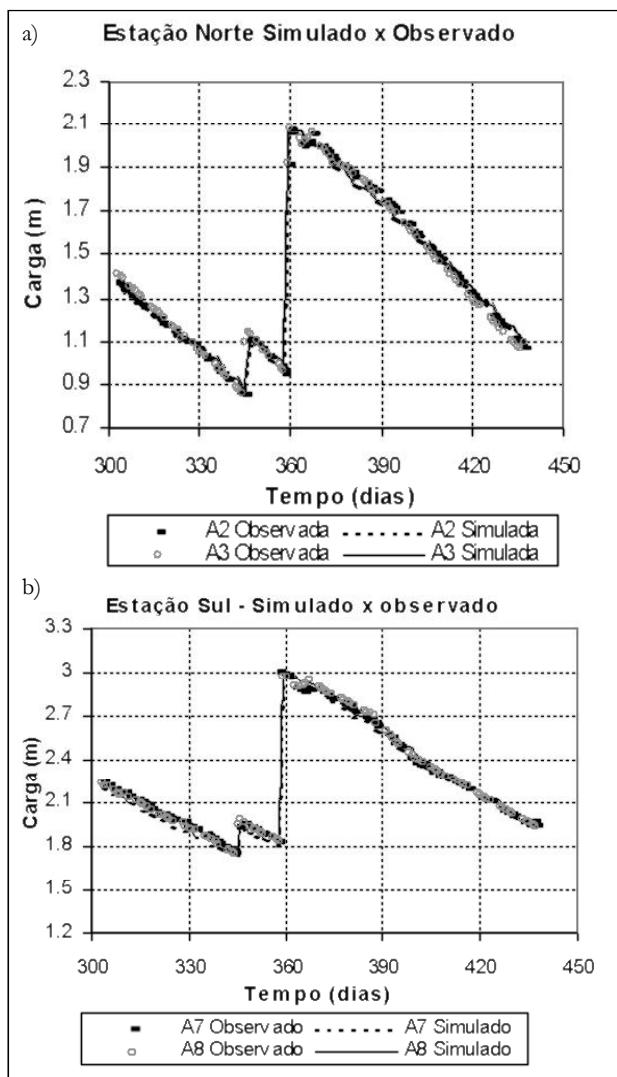


Figura 8. Calibração da Estação Norte (a) e da Estação Sul (b).

elevação média do lençol foi de 252 mm, ressaltando a importância da contribuição dos escoamentos superficiais da bacia e da umidade antecedente na manutenção dos potenciais hidráulicos das vazantes.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro e logístico do CNPq/ORSTOM, em particular a participação do Dr. Pierre Audry. Igualmente, reconhece-se o importante trabalho dos revisores para aprimoramento deste documento.

## REFERÊNCIAS

ANTONINO, A. C. D. e AUDRY, P. (2001). Utilização de água no cultivo de vazante no semi-árido do nordeste do Brasil. Recife:

- Ed. da UFPE; IRD Institut de Recherche pour le Développement, França. 100 p.
- CIRILO, J. A. e CABRAL, J. J. S. P. (1989). Modelos de águas subterrâneas. In: R. V. da Silva (ed.): *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*. ABRH, Rio de Janeiro, p. 302-377.
- DOORENBOS, J. & PRUITT, W. O. (1977). *Las necesidades de aguas de los cultivos*. Roma, Estudios FAO: Riego y Drenaje, 24, 143 p.
- HUYAKORN, P. S. & PINDER, G. F. (1983). *Computational methods in subsurface flow*. Academic Press, Inc. New York, 473 p.
- MACDONALD, M. G. & HARBAUGH, A. W. (1984). *A modular three-dimensional finite-difference ground water flow model*, documentação do modelo MODFLOW, U.S. Geological Survey, 528 p.
- MILLAR, A. A. (1988). *Drenagem de terras agrícolas: bases agronómicas*. Edittera Editorial Ltda, São Paulo, 306 p.
- MONTENEGRO, S.; ANTONINO, A. C. e MONTENEGRO, A. A. (2000). Avaliação de metodologia indireta para estimativa de propriedades hidráulicas de solos do semi-árido do nordeste. In: V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal-RN, *Anais 1*, p. 186-194.
- MONTENEGRO, A. A.; MONTENEGRO, M. G. S.; SILVA, V. P.; SOARES, E. e CAVALCANTE, M. (1997). Dinâmica de lençol freático em agricultura de vazante. In: III Workshop Projeto Açudes. Recife, PE. *Anais*.
- SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J.; ROMBERGER, J. S. & PAPENDICK, R. I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 50, p. 1051-1056.
- SILVA, V. P. (1997). Balanço hídrico e risco de salinização. In: III Workshop Projeto Açudes. Recife, PE. *Anais*.
- YOUNGER, P. L. (1993). Simple generalized methods for estimating aquifer storage parameters. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol. 26, p. 127-135.

## Groundwater Dynamics in a Seepage Zone: Cajueiro Reservoir, Pernambuco

### ABSTRACT

This work deals with subsurface flow between a small Reservoir (named "Açude Cajueiro", in Tuparetama PE) and its porous boundaries or seepage zones, considering two transects. Based on daily water level readings in piezometers and at the reservoir, and on the hydraulic characteristics of the porous media, the subsurface flow pattern can be investigated. A finite difference numerical model has been applied to assess recharge events and groundwater evaporation. Upward flow from the water table is an important moisture control process, especially when the water table is shallow. This component enables crop development near seepage zones without irrigation, in particular for crops with a short growth cycle.

Key words: groundwater flow; subirrigation; seepage zone.