DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DE SOLOS ALUVIAIS ATRAVÉS DA DESCARGA DE DRENOS SUBTERRÂNEOS (1)

A.A. MILLAR (2) & P.C.F. GOMES (3)

RESUMO

Estudou-se num campo piloto a caracterização das propriedades hidráulicas de solos aluviais, através de testes de descarga de drenos subterrâneos. Recuperou-se e limpou-se um sistema de drenagem numa área de 1,3 ha, contendo drenos de manilhas de 60 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro, com um total de cinco linhas de drenos de 70 m de comprimento, instalados a uma profundidade de 1,4 m e 20 m de espaçamento. Instalou-se uma rede simétrica de 25 poços de observação e estruturas de saída nas linhas de drenos, para facilitar a medida da vazão. Esta área foi recarregada durante 15 dias, e durante o período de descarga fizeram-se medidas simultâneas, a cada duas horas, da profundidade do lençol em todos os poços e da vazão nas cinco linhas de drenos.

Para a análise dos dados usou-se a fórmula de Hooghoudt, para fluxo permanente, e a de Glover Dumm, para fluxo não permanente, objetivo principal do trabalho. A expressão para fluxo não permanente não caracterizou adequadamente a condutividade hidráulica efetiva da área de fluxo, o fator de intensidade de drenagem e a porosidade drenável do perfil que contribui para o fluxo aos drenos. O uso da equação para fluxo permanente proporcionou valores de condutividade hidráulica mais próximos aos valores representativos obtidos por outros métodos de campo. Contudo, e devido à grande estratificação textural dos perfis, requer-se maior número de testes com condições variáveis de recarga, para definir o melhor procedimento de análise dos resultados.

SUMMARY: DETERMINATION OF HYDRAULIC PROPERTIES OF ALLUVIAL SOILS THROUGH TILE DRAIN DISCHARGE

The hidraulic properties of an alluvial soil were studied in a pilot area through discharge tests of tile drains. The test area consisted of 1,3 ha which had tile drains of 60 cm lenght and 10 cm diameter. The area had 5 tile lines of 70 m lenght, installed at 1,4 m depth and 20 m spacing. Twenty five observation wells were installed with symetric distribution in the area. The whole area was recharged for 15 days and during the discharge period simultaneous 2-hourly measurements of water table depth in all wells and discharge rates in the 5 tile drain outlets were made.

Data analysis were done by using Hooghoudt's formula for steady state flow and Glover-Dumm's formula for transient flow. It was found that the transient flow expression did not characterize properly the effective hydraulic conductivity, drainage intensity factor and drainable porosity of the complete area. The use of the steady state expression gave K values more related to the ones obtained by auger hole and piezometer. Despite these findings, and due to the presence of significant textural stratification, more tests are required, specially having variable recharge conditions before a proper data analysis can be defined for these highly mixtured alluvial soils.

INTRODUCÃO

A heterogeneidade do solo é um dos maiores problemas na determinação dos parâmetros hidráulicos que definem o delineamento de um sistema de drenagem. Particularmente em solos aluviais, a condutividade hidráulica varia consideravelmente nas direções vertical e horizontal (Maasland, 1957). A taxa de infiltração e o espaço poroso drenável e a capacidade de armazenamento de água e recarga dos solos variam muito com sua textura e estrutura (Dieleman e Trafford, 1976; Gomes e Millar, 1978).

Através dos procedimentos tradicionais pode-se reunir informações de todos os parâmetros requeridos, mas em condições de muita variabilidade do perfil de solo é desejável apoiarse em resultados de campo, através do uso de um delineamento preliminar. A vantagem dos testes de campo é a coleta, em pouco tempo, de vasta informação, como condutividade hidráulica, capacidade de armazenamento, porosidade drenável e espessura do aquífero, além do fornecimento de dados sobre o regime do lençol freático sob as condições experimentais de profundidade e espaçamento de drenos (Dieleman, 1973).

Há várias expressões matemáticas que descrevem o fluxo de água subterrânea para linhas de drenos paralelos (Kirkham et alii, 1974; Van Schilfgaard, 1974; Raadsma, 1974; Wesseling, 1973). Estas fórmulas são baseadas em simplificações das condições de campo, sendo comum considerar homogêneo o perfil do solo, com as mesmas características hidráulicas na região do fluxo, e quando o perfil não é homogêneo, é restrito a duas ou três camadas horizontais diferentes. Outras simplificações são a homogeneidade em propriedades transmissoras do volume de aterro perto dos drenos e a condição de dreno ideal, ou seja, a não existência de resistência de entrada da água para os drenos (Child e Young, 1958).

Há duas fórmulas que são amplamente empregadas nas práticas do delineamento de

 ⁽¹⁾ Contribuição conjunta do CPATSA/EMBRAPA, SUDENE e DNOCS. Convé-nio EMBRAPA/SUDENE/DNOCS. Apresentado no XVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, São Luiz, MA, Julho 1977. Recebido para publicação em outubro de 1977 e aprovado em abril de 1978.
(2) Projeto BRA/74/008, FAO/PNUD, Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópi-co Semi-Árido, CPATSA/EMBRAPA, Petrolina-PE.
(2) Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópi-

⁽³⁾ Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido, CPATSA/EMBRA-PA, Petrolina-PE.

drenagem e testes de sistemas, sendo a de Hooghoudt (Raadsma, 1974) para condições de fluxo permanente e a de Glover Dumm (Wesseling, 1973) para fluxo não permanente. As suas limitações são discutidas por Dieleman e Trafford (1976). Os solos de perfis relativamente homogêneos permitem avaliar satisfatoriamente a operação de sistemas de drenagem e obter adequadas estimativas de condutividade hidráulica e espaçamento de drenos (Perrier et alii, 1972; Dumm e Winger, 1964). Isso nem sempre acontece no caso de solos aluviais muito estratificados, especialmente com o uso de equações de fluxo não permanente, sendo necessário maior volume de pesquisa, especialmente em condições de campo (Van Schilfgaard, 1974).

Neste trabalho apresentam-se informações de testes de descarga num sistema de drenagem subterrânea implantado em área de solo aluvial com problemas de sódio. Para sua análise usa-se, principalmente, a teoria para fluxo não permanente, mas também compara-se com a situação de fluxo permanente.

MATERIAIS E MÉTODOS

1. Estudo teórico - No caso de fluxo não permanente as normas de drenagem se prendem ao rebaixamento do lençol freático num certo tempo, a partir de uma situação inicial. Para descrever esta situação tem-se usado a equação da continuidade na seguinte forma (Dieleman e Ridder, 1973):

$$\partial h/\partial t = (KD/V)(\partial^2 h/\partial x^2)$$
 (1)

onde KD é a transmissividade (m^2 /dia), h é a carga hidráulica (m), a qual é função de x e t; x é a coordenada horizontal de posição (m); t é o tempo (dias) e V é o espaço poroso drenável.

A equação (1) fica sujeita às seguintes condições iniciais e de contorno:

$$t=0$$
 $h=Ri/V=h_0$ $0 (lençol freático inicial-
mente horizontal)$

$$t>0$$
 h= 0 x= 0, x= L (água nos drenos a nível zero)

onde Ri é a recarga instantânea por unidade de área (m), e h_O é a altura do lençol freático inicialmente horizontal sobre o nível dos drenos.

A solução da equação (1) para as condições anteriores é apresentada por Carslaw e Jaeger (1959), como sendo a seguinte:

$$h(x,t) = (4h_0/\pi) \sum_{n=1,3,5,5}^{\infty} (1/n) \exp((-n^2 \alpha t) \sin(n\pi x/L))$$
(2)

onde $\alpha = \pi^2 \text{KD}/\text{VL}^2$ (Fator de intensidade de drenagem, dias⁻¹) (3)

Para a altura do lençol freático no ponto médio entre drenos a qualquer tempo t, $h_t = h (1/2L, t)$ pode-se substituir x= 1/2L na equação (2) obtendo:

$$h_{t} = 4h_{0}/\pi \ \hat{\Sigma} (1/n) \exp (-n^{2}\alpha t)$$
(4)

Segundo Wesseling (1973) os valores dos termos da equação (4) diminuem com o aumento de n. Certo tempo depois do término da recarga, $t \approx 0.4/\alpha$, o segundo termo e os seguintes são desprezíveis, obtendo-se:

$$h_t = (4/\pi) h_0 \exp(-\alpha t) \tag{5}$$

Colocando o valor de α (equação 3) na equação 5

obtem-se a forma da conhecida expressão de Glover-Dumm (Wesseling, 1973).

A taxa de descarga dos drenos no tempo t, quando expressada por unidade de superfície $(\mathbf{R}_t),$ pode ser obtida da equação de Darcy:

$$R_t = -(2KD/L) (dh/dx) x = 0$$
 (6)

Diferenciando a equação (2), com respeito a x, e substituindo x = 0, obtem-se para a equação (6):

$$R_{t} = (8/\pi^{2}) \alpha R_{i} \sum_{n=1,3,5}^{2} \exp(-n^{2}\alpha t)$$
(7)

Considerando só o primeiro termo, tem-se:

$$\mathbf{R}_{t} = (8/\pi^{2}) \ \alpha \mathbf{R}\mathbf{i} \ \exp(-\alpha t) \tag{8}$$

Comparando-se as equações (5) e (8), deduz-se que durante a recessão na descarga tem-se:

$$\mathbf{R}_{\mathsf{f}} = (2\pi \mathbf{K} \mathbf{d} / \mathbf{L}^2) \, \mathbf{h}_{\mathsf{f}} \tag{9}$$

e também $R_{t_2}/R_{t_1} = h_{t_2}/h_{t_1} = \exp[-\alpha(t_2-t_1)]$ (10)

Na equação (9) tem-se incluído o valor d de Hooghoudt, no lugar de D para levar em conta a resistência radial ao fluxo perto do dreno.

Quando se usa a fórmula de Kraijenhoff Van de Leur (Dieleman, 1973) para o período de recessão, obtém-se o mesmo resultado.

De acordo com a equação (10), se plotarmos R_t ou h_t numa escala logarítmica e o tempo t numa escala linear obtém-se uma linha reta. A linearização dos dados de campo permitem determinar α , o fator de intensidade de drenagem, a partir da informação de descarga de drenos com determinado espaçamento. Por outro lado, conhecendo α , V e L pode-se obter a transmissividade KD do perfil do solo, e conseqüentemente a condutividade hidráulica média que representa as condições naturais da área dos drenos.

2. Descrição do campo piloto de testes - O trabalho foi executado no projeto de irrigação de São Gonçalo no Estado da Paraíba. As características gerais da área e do perfil do solo foram descritas por Gomes e Millar (1978).

Essa área (1,3 ha), já com um sistema de drenagem, foi recuperada e transformada em campo piloto de testes de drenagem subterrânea. Esse sistema consiste de drenos de manilhas de 60 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro, com um total de cinco linhas de drenos de aproximadamente 70 m de comprimento, instalados a uma profundidade de 1,4 m e 20 m de espaçamento entre linhas.

O sistema de drenagem foi originalmente instalado por volta de 1945. As linhas de drenos vinham operando ultimamente através dos trabalhos em execução do Convênio DNOCS/SUDENE, mas foi extensamente limpa antes dos testes usando uma ponta metálica de forma elíptica, que leva uma peça móvel e funciona com jato de água a pressão. Por outro lado, construíram-se estruturas de saída, das linhas dos drenos aos coletores, as quais permitiram o controle e a medida da descarga dos drenos.

3. Medidas e metodologia - Para os testes de descarga de drenos é necessária a instalação de poços de observação na área. Na Figura 1 mostra-se um mapa esquemático do campo piloto indicando as linhas de drenos, o coletor de campo e parcelar e a distribuição de poços de observação. A rede de poços, com um total de 25, obedeceu a seguinte distribuição: (1) poços na distância intermediária entre as linhas de drenos; (2) poços a 5 m do dreno; (3) poços a 1,5 m do dreno; (4) poços a 0,5 m do dreno e (5) um poço sobre a linha do dreno D₃. Os poços de observação foram instalados de acordo com o procedimento descrito por Millar (1977). Usaram-se tubos de PVC de uma polegada de diâmetro, instalados até a profundidade dos drenos.

Fizeram-se três testes de descarga dos drenos. Para cada teste, a área do campo piloto foi previamente recarregada. Para tal fim fecharam-se os coletores e as linhas de drenos subterrâneos, através de tampas plásticas. Durante quinze dias inundou-se a área, sendo necessária a construção de diques internos com a finalidade de obter melhor distribuição da água. Uma vez completado o período de recarga fizem-se medidas simultâneas, a cada duas horas, da profundidade do lençol em todos os pocos, e da vazão nas cinco linhas de drenos. A profundidade do lençol foi medida mediante uma sonda elétrica (Millar, 1977), e a vazão mediante o método volumétrico usando baldes de 20 litros e cronômetro.



Figura 1. Mapa esquemático do campo piloto de testes indicando as linhas de drenos e a distribuição de poços de observação.

4. Análise dos dados - A informação de campo foi adequadamente transformada para os cálculos, como segue: (a) As vazões obtidas em litros/segundo foram convertidas em m/dia, através da seguinte relação:

 $R = (q \times 10^{-3} \times 86400)/LC$

onde q é a vazão do dreno em litros/seg., C é o comprimento do dreno e L é o espaçamento entre drenos; (b) Os dados de profundidade do lençol freático foram convertidos em valores de carga hidráulica. Por exemplo, suponha que a profundidade do lençol num poço esteja a 0,8 m do extremo do tubo. Se o extremo do poço está a 0,2 m acima da superfície e os drenos a 1,4 m abaixo da superfície a carga hidráulica é:

h = 1,4-(0,8-0,2) = 0,8 m

(c) A informação anterior foi adequadamente colocada em gráficos para obter os dados para os cálculos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 apresentam-se os dados de taxa de descarga e carga hidráulica em função do tempo, para um dos testes de descarga de drenos. A taxa de descarga corresponde ao dreno intermediário D_3 do campo piloto. Utilizou-se o dreno do meio para evitar o efeito de bordaduras no rendimento da descarga. O rendimento de descarga neste teste variou consideravelmente de um dreno para outro, sendo da ordem de 400 litros num período de seis dias. A variação da descarga acumulada é um reflexo da heterogeneidade do perfil dos solos aluviais.

A informação da Figura 2 indica que tanto a vazão como a carga hidráulica diminuíram rapidamente com o tempo. A taxa de descarga diminui com uma relação de $1.4 \ge 10^{-4} \text{ m/dia}^2$ até dois dias, sendo da ordem de $0.4 \times 10^{-4} \text{ m/dia}^2$ do $2.^{\circ}$ ao $4.^{\circ}$ dia. A carga hidráulica diminui mais rapidamente durante o primeiro dia para logo diminuir a uma taxa de 0.5 m/dia, até o fim do teste.



Figura 2. Taxa de descarga e carga hidráulica em função do tempo num gráfico normal.

A Figura 3 mostra a mesma informação da Figura 2 em papel monolog. Os quadrados nas retas, correspondem a dados das curvas da Figura 2. De acordo com a análise teórica, quando a informação de campo é plotada nesse papel, obtém-se uma linha reta que fica descrita pela equação (10). Mediante o gráfico da Figura 3 pode-se obter o parâmetro conhecido como fator de intensidade de drenagem α . O fator α é o coeficiente angular da reta, considerando-se que a equação (10), também pode ser descrita como:

 $\mathbf{R}_{t} = \mathbf{R}_{0} \mathbf{e}^{-\alpha t} \mathbf{e} \mathbf{h}_{t} = \mathbf{h}_{0} \mathbf{e}^{-\alpha t}$ (11)

ou $\ell n R_t = \ell n R_0 - \alpha t e \ell n h_t = \ell n h_0 - \alpha t$ (12)

A equação (12) é a relação da reta da Figura 3, onde $\ell n R_0 \in \ell n h_0$ são as interseções na ordenada, e α é a declividade das retas. O fator pode ser obtido graficamente, resultando ser $\alpha = 2,3$ tan θ , sendo θ o ângulo da reta com respeito à horizontal.

Da análise matemática se deduz que o valor de α deve ser idêntico, seja usando a informação da taxa de descarga, ou de carga hidráulica, o que implica que ambas as retas devem ser paralelas. As retas da Figura 3 não são para-



Figura 3. Taxa de descarga e carga hidráulica em função do tempo num gráfico monologarítmico.

lelas, sendo isso observado nos três testes executados, o que dificultou para o cálculo de α . A melhor forma de calcular α é tomar um ciclo completo do logarítmo, resultando tan $\theta = 1/2$ $(t_2 - t_1)$. Usando os dados de descarga obtem-se que tan $\theta = 1/2, 6 = 0,38$ dias⁻¹, e $\alpha = 2,3$ tan $\theta = 2,3$ x 0,38= 0,87 dias⁻¹. Usando os dados de carga hidráulica obtém-se um valor de α igual a 0,32 dias⁻¹. A falta de concordância dos valores de α deve-se principalmente à grande heterogeneidade dos perfis de solo da área estudada. Considerando a natureza do processo, o valor mais adequado é calculado através dos dados de vazões, já que os valores de carga hidráulica estão mais sujeitos a erros devido à estratificação do perfil. Da inspeção dos valores de carga hidráulica, é provável que, ainda usando uma média dos seis poços em torno do dreno D₃ (Figura 1), haja defasagem em relação à vazão de descarga devido à variação da condutividade hidráulica das diferentes camadas.

Na Figura 4 mostra-se a relação entre a taxa de descarga e a carga hidráulica. Os círculos indicam valores tomados das curvas da Figura 2. Esse gráfico, importante, permite calcular a condutividade hidráulica, e também dá informação sobre o fluxo da água na posição dos drenos.

Analisando o fluxo da água para os drenos como uma situação de fluxo permanente, obtém-se uma relação conhecida como fórmula de Hooghoudt (Dieleman e Trafford, 1976), a qual, em forma simplificada, pode ser escrita como $R = Ah + Bh^2$. O primeiro termo indica a contribuição de água das camadas abaixo dos drenos, e o segundo termo a contribuição das camadas acima dos drenos. Por inspeção da relação gráfica entre R e h, é possível definir a contribuição do fluxo. No caso da Figura 4, a relação é predominantemente reta, indicando, assim, que a componente do fluxo para os drenos foi da camada abaixo deles. Somente para cargas hidráulicas expressivas no início do teste, houve uma contribuição das camadas acima dos drenos, como indica a tendência para altos valores de h (Figura 4).



Figura 4. Taxa de descarga do dreno subterrâneo em função da carga hidráulica medida em pontos médios entre drenos.

A informação da Figura 4 permite calcular a transmissividade do estrato transmissor de água. Como foi evidenciado, a relação entre R e h é da forma R = Ah, linha reta, sendo A = 8Kd/L², o coeficiente do primeiro termo da fórmula de Hooghoudt (Dieleman e Trafford, 1976), ou a declividade da reta da Figura 4. Dessa forma, obtemos que $R/ha = 8 \text{ Kd/L}^2$, ou Kd = (R/h) $(L^2/8)$, onde d é o estrato equivalente de Hooghoudt, e (R/h) é obtido da Figura 4. Também pode-se obter'o valor de Kd usando a relação (9) a qual difere da situação de fluxo permanente pelo fator 2π no lugar de 8. Da Figura 4 obtém-se $R/h= 5,33 \times 10^{-4}$, e usando a equação (9) obtémse Kd= 0.034 m²/dia. Uma inspecão do perfil do solo indicou que a profundidade da camada impermeável encontra-se entre 1 e 3 m e, portanto,

o estrato equivalente (d) é 0,8 a 2,15 m. Usando esses valores de d, obtém-se K entre 0,015 e 0,04 m/dia. Esses valores de K são consideravelmente menores que os valores representativos obtidos pelos métodos tradicionais (Gomes e Millar, 1978).

Usando a equação (3), pode-se calcular a porosidade efetiva das camadas transmissoras. Feitos os cálculos obtém-se um valor em torno de 0,004, o qual está longe dos valores representativos em solos. A porosidade efetiva, de acordo com a relação empírica $V = R^{1/2}$, onde K dado em m/dia, é 0,32 - 0,45, quando se usam valores de K= 0,1 - 0,2 m/dia como obtidos através de métodos tradicionais (Gomes e Millar, 1978). O anterior está indicando que os valores de α , Kd ou R/h não correspondem com os valores normais reais das condições de descarga, e que a análise como fluxo não permanente não descreve adequadamente a descarga da área de testes. Uma análise sob as condições de fluxo permanente dá outro tipo de informação (Figura 5).



Figura 5. Relação R/h em função da carga hidráulica.

Na Figura 5 mostra-se a relação entre R/h para a mesma série de dados anteriormente discutidos. Novamente, usando a fórmula simplificada de Hooghoudt R= Ah + Bh² obtém-se R/h= A + Bh, relação que descreve a reta da Figura 5, coeficiente B= 4K/L² (Dieleman e Trafford, 1976) sendo igual à declividade da relação. No caso da Figura 5, B= 7,54 x 10⁻⁴ m/dia, obtém-se K= 7,54 x 10⁻⁴ x 20³/4= 0,075 m/dia, valor este mais próximo aos valores obtidos pelos métodos tradicionais (Gomes e Millar, 1978). Da análise anterior se deduz que o método de descarga de drenos dá informação valiosa das condições de fluxo de água para os mesmos. Contudo, observa-se que sua aplicação no caso de solos aluviais muito estratificados apresenta várias inconsistências com os dados obtidos sendo necessário realizar estudos mais detalhados, a fim de obter informações sob diferentes condições de fluxo permanente e não permanente para definir as características da descarga e assim definir também a metodologia mais apropriada para a análise dos resultados. Além dos trabalhos em condições de campo, pode ser de utilidade fazer pesquisas em condições controladas, usando modelos reduzidos.

LITERATURA CITADA

- CARSLAW, H.S. & JAEGER, J.C. Conduction of heat in solids. Oxford University Press, London, 2nd ed., 1959. 510p.
- CHILD, E.C. & YOUNG, E.G. The nature of the drain channel as a factor in the design of a land drainage system. J. Soil Sci, 9(2):316-331, 1958.
- DIELEMAN, P.J. Deriving soil hydrological constants from field drainage tests, *In*: IILRI, ed. Drainage principles and applications. Holland, International Institute for Land Reclamation and Improvement (IILRI), V.3, 1973. p. 329-350.
- DIELEMAN, P.J. & RIDDER, N.A. DE Elementary groundwater hydraulics. *In*: IILRI, ed. Drainage principles and application. Holland, International Institute for Land Reclamation and Improvement (IILRI), V.1, 1973. p. 153-199.
- DIELEMAN, P.J. & TRAFFORD, B.D. Drainage testing. Roma, FAO, 1976. 172p. (Irrigation and drainage paper 28).
- DUMM, L.D. & WINGER, R.J. Subsurface drainage system design for irrigated area using transient-flow concept. Amer. Soc. Agr. Eng. Trans., 7(2):147-151, 1964.
- GOMES, P.C.F. & MILLAR, A.A. Problemática da caracterização das propriedades hidráulicas de solos aluviais para fins de drenagem subterrânea. R. bras. Ci. Solo. 2:, 1978. (neste número).
- KIRKHAM, D.; TOKSOZ, S. & VAN DER PLOEG, R.R.-Steady flow to drains and wells, *In*: J. Van Schilfgaarde, ed. Drainage for agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1974. p. 203-244. (Agronomy Series 17).
- MAASLAND, M. Soil anisotropy and land drainage. In: J.N. Luthin, ed. Drainage of agricultural lands, Madison, American Society of Agronomy, 1957. p. 216-285.
- MILLAR, A.A. Drenagem de terras agrícolas. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1977. 308p. (no prelo).
- PERRIER, E.R.; MACKENZIE, A.J.; GRASS, L.B.; SHULL, H.H. - Performance of a tile drainage system: An evaluation of a tile desing and management. Amer. Soc. Agr. Trans., 15(3):440-444, 1972.
- RAADSMA, S. Current draining practices in flat areas of humid regions in Europe. *In*: J. Van Schilfgaarde, ed. Drainage for agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1974. p. 115-143. (Agronomy Series 17).
- VAN SCHILFGAARDE, J. Nonsteady flow to drains. In: J, Van Schilfgaard, ed. Drainage for agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1974. p.245-270. (Agronomy Series 17).
- WESSELING, J. Subsurface flow into drains. In: IILRI, ed. Drainage principles and applications, Holland, International Institute for Land Reclamation and Improvement (IILRI), V.2, 1973. p.2-56.