

**MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE UM SOLO
ALUVIAL SÓDICO EM CONDIÇÕES DE DRENAGEM SUBTERRÂNEA**

C 342157

U A Z

OSVALDO HÉLIO DANTAS SOARES

Engenheiro Agrônomo

T
631.587
S 655.m
1996

BCT / UFC CATIVO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À COORDENAÇÃO
DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
COM ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM IRRIGAÇÃO E DRENAGEM,
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

Fortaleza - CE
Agosto/1996

UFC/BU/BCT 15 Mai 1997



R593400 Monitoramento do processo de recuperacao
C342157

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S655m Soares, Osvaldo Hélio Dantas.

Monitoramento do processo de recuperação de um solo aluvial sódico em condições de drenagem subterrânea / Osvaldo Hélio Dantas Soares. – 1996.

105 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 1996.

Orientação: Prof. Dr. Luís Carlos Uchoa Saunders.

Coorientação: Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa.

1. Engenharia Agrícola. I. Título.

CDD 630

Esta dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários a obtenção do Grau de Mestre em Agronomia com Área de concentração em Irrigação e Drenagem, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca Central e no Departamento de Engenharia Agrícola da referida Universidade.

A citação de qualquer trecho desta dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.

Oswaldo Hélio Dantas Soares

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 18, 09, 1986

Luís Carlos Uchôa Saunders, Doutor
Orientador da Dissertação

Raimundo Nonato Távora Costa, Doutor
Co-Orientador da Dissertação

Fernando Felipe Ferreyra Hernandez, Doutor
Conselheiro

UFC/BU/BCT 15/05/1997



R593400 Monitoramento do processo de
C342157 recuperaçao
T631.587 S655m

À Deus, pela Divina iluminação.

À minha avó Júlia e sobrinha Cristiane: "*in memoriam*".

À meus pais Osvaldo e Zulmira, pelos primeiros ensinamentos.

Aos meus irmãos Nélio, Elizabeth, Mauro, Izaú, Salomão, Hédio, Nédio, Daniel e Cristian.

À Janaína, pela paciência e compreensão.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Desenvolvimento Rural do Amapá - RURAP, através do Governo do Estado do Amapá, pela oportunidade concedida para a realização deste curso.

À Universidade Federal do Ceará por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela acolhida.

Aos produtores rurais, pela motivação encontrada em nossas atividades profissionais.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao RURAP, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Professor Luís Carlos Uchôa Saunders, pelos sábios ensinamentos e encaminhamento à arte da drenagem agrícola.

Ao Eng^o.Agr^o. e amigo, Raimundo Nonato Távora Costa, pela dedicação dispensada na execução da presente pesquisa.

Ao Professor Fernando Felipe Ferreyra Hernandez, pelas sugestões e críticas apresentadas.

Ao Professor Adunias dos Santos Teixeira, pela colaboração e incentivo.

Aos Professores do Curso de Mestrado, especialmente àqueles do Departamento de Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos transmitidos e incentivo à iniciação científica na área de irrigação e drenagem.

Aos colegas: Júlio Cesar, Izali, George, Aristides, Damião, Joaquim, Ênio e Antônio Jackson, pela amizade e convívio durante o curso.

À amiga Maria José (Zezé), que em todos os momentos esteve presente na caminhada deste objetivo.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, do Curso de Mestrado e da Fazenda Experimental Vale do Curú.

Enfim, à todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Solos salinos, sódicos e salino-sódicos	3
2.1.1. Efeitos sobre o solo e as culturas	3
2.1.2. Recuperação de solos afetados por sais	6
2.2. Parâmetros hidrodinâmicos do solo	10
2.2.1. Condutividade hidráulica do solo saturado	11
2.2.2. Porosidade efetiva ou drenável	13
2.3. Avaliação de desempenho de drenagem subterrânea	16
2.4. Equações de dimensionamento de sistemas de drenagem	21
2.4.1. Regime de escoamento permanente	22
2.4.2. Regime de escoamento não permanente	28
3. MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1. Caracterização da área do experimento	33
3.2. Sistema de drenagem subterrânea	35
3.3. Parâmetros físico-hídricos e químicos do solo	37
3.4. Descarga dos drenos laterais e leituras dos poços de observação	37

	Página
3.5. Medida da condutividade hidráulica do solo saturado pelo método do poço	40
3.6. Análise de parâmetros químicos do solo e da água	44
3.7. Análise de desempenho do sistema de drenagem subterrânea	44
3.7.1. Parâmetros de drenagem.....	45
3.7.2. Desempenho hidráulico	45
3.7.3. Rede de fluxo subterrânea.....	48
3.7.4. Espaçamento entre drenos laterais	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1. Análise evolutiva dos parâmetros do solo e da água	52
4.2. Condutividade hidráulica do solo saturado pelo método do poço	65
4.3. Parâmetros hidrodinâmicos do solo através da descarga de drenos	71
4.3.1. Fator de reação ou fator de intensidade de drenagem	74
4.3.2. Condutividade hidráulica do solo saturado e transmissividade.....	75
4.3.3. Porosidade efetiva ou espaço poroso drenável	80
4.4. Desempenho hidráulico de drenos laterais.....	81
4.4.1. Caracterização da rede de fluxo.....	84
4.4.2. Espaçamento entre drenos laterais	86
5. CONCLUSÕES.....	89
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXOS.....	102

LISTA DE QUADROS

QUADRO	Página
01 Dados climáticos médios da Estação Agrometeorológica da FEVC no período de 1968 a 1992	34
02 Parâmetros físico-hídricos do solo da área do experimento	38
03 Parâmetros químicos do solo da área do experimento	39
04 Parâmetros químico-hídricos do solo	55
05 Parâmetros químicos da água de irrigação, água dos poços de observação e água dos drenos laterais	60
06 Medidas de tendência central e de dispersão de K_o na área do experimento	67
07 Densidade de fluxo de drenagem (R), carga hidráulica (h) e relação R/h em função do tempo	71
08 Análise estatística da equação $R/h = 0,05 \times 10^{-3} + 14,7 \times 10^{-3} \cdot h$...	79
09 Carga hidráulica de entrada ($h_{ent.}$), carga hidráulica total ($h_{tot.}$), descarga por unidade de comprimento (q_u) e resistência de entrada ($r_{ent.}$)	82
10 Análise estatística da equação $h_{ent.} = 0,011 + 4,3 \cdot q_u$	84
11 Espaçamento entre drenos laterais e desvios percentuais obtidos pelas equações em regime de fluxo não permanente....	88

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Página
01 Ilustração dos termos da equação de DONNAN.....	23
02 Ilustração dos termos da equação de HOOGHOUDT	25
03 Ilustração dos termos da equação de ERNST	26
04 Geometria de drenos laterais em duplo nível	27
05 Ilustração dos termos da equação de GLOVER-DUMM	29
06 Ilustração dos termos da equação de DEBOER-CHU	32
07 Croqui da área do experimento.....	36
08 Croqui da área do experimento ilustrando o local dos testes	41
09 Dados de campo para estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado (K_o) pelo método do poço	43
10 Croqui da área do experimento ilustrando a distribuição dos poços de observação	47
11 Croqui da área do experimento ilustrando a distribuição espacial dos poços de observação para confecção da rede de fluxo.....	49
12 Vista geral dos poços de observação	50
13 Proporção de íons no valor de saturação de base trocáveis	53
14 Variação da CE nas camadas I,II e III do solo em função do período de amostragem	56
15 Variação da PST nas camadas I, II e III do solo em função do período de amostragem	58
16 Variação da concentração de cátions na água de irrigação (I), água dos poços de observação (P) e água dos drenos laterais (D), em função do período de amostragem: (A) sódio, (B) cálcio, (C) magnésio, (D) potássio.....	61

FIGURA	Página	
17	Variação da concentração de ânions na água de irrigação (I), água dos poços de observação (P) e água dos drenos laterais (D), em função do período de amostragem: (A) cloreto, (B) carbonato + bicarbonato.....	62
18	Variação da RAS da água de irrigação (I), água dos poços de observação (P) e água dos drenos laterais (D), em função do período de amostragem	64
19	Distribuição espacial dos valores da condutividade hidráulica do solo saturado ($m \cdot dia^{-1}$) na área do experimento	66
20	Histograma de freqüência relativa dos valores de K_o	67
21	Mapa de isolinhas da condutividade hidráulica do solo saturado na área do experimento	69
22	Superfície de resposta mostrando a variabilidade espacial de K_o na área do experimento	70
23	Densidade de fluxo de drenagem (R) e carga hidráulica (h) em função do tempo.....	73
24	Densidade de fluxo de drenagem (R) em função da carga hidráulica (h).....	76
25	Relação R/h em função da carga hidráulica (h)	78
26	Relação entre carga hidráulica de entrada (h_{ent}) e descarga por unidade de comprimento (q_u).....	83
27	Mapa da rede de fluxo do lençol freático na área do experimento, no dia 28/09/95.....	85
28	Superfície de resposta mostrando o comportamento do lençol freático na área do experimento, no dia 28/09/95	87

MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE UM SOLO ALUVIAL SÓDICO EM CONDIÇÕES DE DRENAGEM SUBTERRÂNEA

Autor: OSVALDO HÉLIO DANTAS SOARES

Orientador: Prof. Dr. LUÍS CARLOS UCHÔA SAUNDERS

Co-Orientador: Dr. RAIMUNDO NONATO TÁVORA COSTA

RESUMO

O presente trabalho foi conduzido durante o período de agosto de 1995 a janeiro de 1996, na Fazenda Experimental Vale do Curú, município de Pentecoste-CE, com objetivo de monitorar os parâmetros físico-hídricos e químicos de um solo aluvial sódico em processo de recuperação. Procurou-se, também, analisar o funcionamento do sistema de drenagem subterrânea.

Amostras de solo, da água de irrigação, água dos poços de observação e água da descarga de drenos laterais, foram analisadas e comparadas com os dados obtidos em 1988. Os resultados revelam modificações nos parâmetros analisados, tais como a redução do pH e elevação da Condutividade Elétrica (CE) em todas as camadas do perfil do solo. Verifica-se ainda, incremento nos valores da condutividade hidráulica do solo saturado, correspondendo a um comportamento de redução na Percentagem de Sódio Trocável (PST). Quanto ao aspecto de salinidade e sodicidade, o solo é atualmente classificado como um solo não sódico.

As análises químicas da água mostram variação nos valores da CE, na Relação de Adsorção de Sódio (RAS), pH, íons solúveis e classificação de águas. Os resultados mostram que, no período analisado, a água de irrigação melhorou em qualidade, enquanto que a água de descarga dos drenos laterais e água dos poços de observação apresentaram alterações nos índices de salinidade e sodicidade.

O sistema de drenagem subterrânea, instalado em dois níveis de profundidade, é constituído por sete linhas de drenos laterais com comprimento de 125,0 m e espaçados entre si de 17,5 m. Foi construído com manilhas de barro, sem acoplamento, de comprimento médio de 0,30 m, ficando assentado sobre uma camada de seixo rolado e areia grossa lavada de 0,10 m. Para obtenção de dados do lençol freático, foram instalados poços de observação. A descarga dos drenos laterais eram medidas por meio de cronômetro e recipiente de volume conhecido, após recargas por irrigação.

As medidas simultâneas de cargas hidráulicas e descargas de drenos laterais, em função do tempo, proporcionaram estimativas do fator de intensidade de drenagem, condutividade hidráulica do solo saturado, transmissividade e porosidade drenável. Sendo um dos principais parâmetros utilizados no cálculo do espaçamento entre drenos laterais, a condutividade hidráulica do solo saturado foi ainda estimada pelo método do poço ou trado, com número de testes suficiente para um estudo sobre a variabilidade espacial do parâmetro.

O desempenho hidráulico de drenos laterais foi avaliado por meio da carga hidráulica de entrada, carga hidráulica total e resistência de entrada. O valor obtido para resistência de entrada, de $4,3 \text{ dias.m}^{-1}$, demonstra um desempenho muito ruim para a linha de dreno avaliada, conforme metodologia proposta pela FAO. Este resultado pode estar relacionado com as especificidades dos solos aluviais, tempo de instalação das linhas de drenos (10 anos), deposição de sedimentos pelas junções das manilhas e a desuniformidade dos envoltórios, além de possível desalinhamento das manilhas.

As linhas de fluxo do lençol freático mostram o sentido do fluxo subterrâneo para os drenos laterais, evidenciando a importância da presença dos drenos como determinante no sentido do fluxo.

Quanto ao cálculo do espaçamento entre drenos laterais, a equação de Glover-Dumm foi a que apresentou menor erro relativo, em relação ao espaçamento de campo.

MONITORING OF THE RECLAMATION PROCESS IN AN ALLUVIAL ALKALINE SOIL HAVING A SUBSURFACE DRAINAGE SYSTEM

Author: OSVALDO HÉLIO DANTAS SOARES

Adviser: Professor LUÍS CARLOS UCHÔA SAUNDERS

Co-Adviser: RAIMUNDO NONATO TÁVORA COSTA

ABSTRACT

With the objective to analyse the evolution of physical and chemical parameters in an alluvial alkaline soil in process of reclamation and evaluate the drainage system, a research was conducted from August 1995 to January 1996 in the Curu Valley Experimental Station at Pentecoste-Ce.

Sample from the soil, irrigation water and drainage water (from the drains and from holes in the soil profile) were analyzed and related with data obtained in 1988, when the system was tested. The results of these analyses show the soil characteristics have changed, with decrease in pH, and increase in Electrical Conductivity (EC) in the entire soil profile studied. In addition, the saturated hydraulic conductivity increased as a result of the decrease in the Exchangeable Sodium Percentage (ESP), what made the soil be classified as normal, according to its salinity and alkalinity.

The chemical analyses of the drainage water show variation in the EC, Sodium Adsorption Ratio (SAR), pH, soluble ions concentration, and in its level of salinity and alkalinity, with increase in its quality.

The subsurface drainage system, previously installed at two different depths, was built of clay pipes 0.30 m long, with lateral drains 125.0 m long and spaced at 17.5 m from each other. The envelope was built using two 0.10 m layer of gravel and coarse sand. To evaluate the drain discharge it was used the volumetric method.

With the values of hydraulic head and discharge from the drain, the reaction factor, saturated hydraulic conductivity, transmissivity and drainage porosity were calculated. Having been a parameter used in the calculation of the drain spacing, the saturated hydraulic conductivity was also estimated throughout the Auger-Hole method, having been given emphasis to the spatial variability of this parameter.

In the evaluation of the drainage performance, it was found a value of 4.3 days.m^{-1} to the entry resistance factor, what shows that the system was not working properly. This performance may be associated with the soil hydraulic characteristics, age of the drainage system (10 years old), clogging of the pipes(specially in the connections), non-uniformity of the envelope, and mis-alignment of the pipes.

The results also show that the water table flows towards the drains, what shows the importance of this drainage system. It was also found that the Glover-Dumm approach best estimated the drain spacing.

1. INTRODUÇÃO

A salinização e a sodificação dos solos têm proporcionado, ao longo do tempo, expansão de áreas com restrições às explorações agrícolas nas regiões do Nordeste brasileiro. No levantamento de solos dos Estados da Bahia ao Ceará, totalizando 1.110.000 Km², foram delimitadas áreas correspondentes a 85.931 Km² de solos afetados por sais, representando 7,74% da área mapeada destes Estados (Pereira *apud* CORDEIRO, 1988). No Estado do Ceará, COELHO & FERREYRA (1986) realizando estudos de caracterização dos solos afetados por sais, revelam que os solos sódicos e salino-sódicos ocorrem em 25% da área estudada. A acumulação de sais solúveis e sódio trocável deve-se, principalmente, às condições climáticas, relevo, gênese dos solos, qualidade da água de irrigação e drenagem interna do solo.

Os perímetros irrigados, localizados próximos aos cursos d'água, são constituídos por solos aluviais, caracterizados pela variabilidade espacial dos parâmetros físicos e químicos. Devido a sua posição topográfica, estão predispostos à inundação e lençol freático elevado. Em geral, são solos de textura variáveis, em camadas estratificadas, resultantes de deposição recente e de boa fertilidade. A baixa condutividade hidráulica dificulta a lixiviação dos sais solúveis e, conseqüentemente, a recuperação destes solos. Por outro lado, os problemas de drenagem e perigos de salinidade nessas áreas, são agravados com as práticas de irrigação.

O monitoramento constitui um importante procedimento para diagnosticar os efeitos alcançados pela aplicação das técnicas utilizadas na recuperação de um solo afetado por sais em áreas irrigadas. Com base nos resultados, torna-se possível a recomendação de novas práticas de manejo

para incrementar a produtividade.

O sistema de drenagem subterrânea instalado em áreas irrigadas, além de prevenir e solucionar problemas relacionados com o lençol freático elevado, constitui uma das principais infra-estruturas no processo de dessalinização dos solos, propiciando, dessa maneira, condições favoráveis de umidade, aeração e balanço de sais às raízes das plantas cultivadas.

Entretanto, os diversos fatores intervenientes no funcionamento adequado do sistema, tornam imprescindíveis a realização de estudos hidrológicos a campo, através da avaliação de desempenho hidráulico do sistema. Os ensaios permitem obter informações dos parâmetros hidrodinâmicos do solo, para sua aplicação em projetos de drenagem em áreas similares; comprovar os espaçamentos entre drenos laterais; estudar a validade das equações teóricas para as condições em regime de fluxo subterrâneo; estabelecer critérios de drenagem conforme a flutuação do lençol freático e determinar a direção do fluxo subterrâneo.

Face ao exposto, o presente trabalho teve como objetivo monitorar os parâmetros físico-hídricos e químicos de um solo aluvial sódico em processo de recuperação, como também, analisar o desempenho hidráulico dos drenos laterais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Solos salinos, sódicos e salino-sódicos

2.1.1. Efeitos sobre o solo e as culturas

Segundo MAAS & HOFFMAN (1977), o efeito mais comum da salinidade é o atrofiamento geral no crescimento da planta. Com o aumento da concentração de sais acima de um nível tolerável, a taxa de crescimento e tamanho máximo na maioria das plantas decresce progressivamente. Comentam ainda que, muito embora a maioria das plantas respondam à salinidade como uma função do potencial osmótico do solo, sem considerar o tipo de sal presente, algumas plantas herbáceas e a maioria das espécies lenhosas são susceptíveis à toxicidade de íons específicos.

O controle da salinidade do sistema solo-água é um dos objetivos fundamentais da drenagem, além da remoção do excesso de água, promovendo uma redução acentuada do teor de sais da solução do solo, de tal forma a estabelecer um balanço favorável na zona radicular. As propriedades físicas do solo são muito afetadas pela concentração de sódio no solo, sendo a permeabilidade, talvez a mais crítica, com redução drástica da sua condutividade hidráulica. Os danos causados pela salinidade são devidos principalmente à elevada pressão osmótica na solução do solo, o que reduz a disponibilidade de água à planta (CRUCIANI, 1989).

PRISCO (1980) assinala que o excesso de sais no solo provoca uma diminuição irreversível na permeabilidade do sistema radicular para a água. Como consequência disto, as plantas podem sofrer "seca fisiológica", desde que sejam cultivadas em ambientes de alta demanda evaporativa. A

baixa permeabilidade do sistema radicular das plantas cultivadas, sob condições de estresse salino, também determina, diariamente, o fechamento dos estômatos mais cedo do que sob condições de ausência do referido estresse. Resulta, então, uma menor taxa fotossintética diária, o que constitui uma das causas do reduzido crescimento das espécies cultivadas em solos salinos. Por outro lado, plantas cultivadas sob condições de salinidade, apresentam o metabolismo do sistema radicular alterado, o qual acarreta uma redução na síntese e/ou translocação de hormônios sintetizados na raiz e necessários ao metabolismo foliar. Como resultado, há diminuição no crescimento das folhas e aceleração dos processos de envelhecimento destes órgãos.

Pesquisando a variação da concentração de sais na solução de um solo aluvial vértico cultivado com arroz (*Oriza sativa* L.), sob inundação, FERREYRA & COELHO (1984) concluíram que no solo estudado, mesmo apresentando condutividade hidráulica praticamente nula, houve uma grande influência da concentração salina da água mantida em sua superfície, sobre a concentração de sais na solução do solo a 0,20 m de profundidade, sugerindo que, mediante o controle da água sobre o solo, pode-se melhorar as condições de salinidade na camada superficial, o que é importante em culturas de arroz sob inundação. Concluíram ainda, que o Na^+ e o Cl^- foram os íons que apresentaram as mais altas concentrações na solução do solo, sendo os principais responsáveis pelos valores da condutividade elétrica.

FERREYRA & COELHO (1986) estudando o efeito de doses de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) em solos sódicos, verificaram que os tratamentos com aplicação de 6,0 e 12,0 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de gesso, incrementaram a produtividade do arroz cultivado em solo sódico de baixa condutividade hidráulica. Observaram ainda, que a aplicação de 18,0 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de gesso provocou efeito depressivo sobre o rendimento da cultura - o gesso ocasionou ligeira acidificação da camada superficial do solo. Na presença de gesso, o cálcio substitui o sódio trocável e, através da lixiviação pela água de irrigação, são removidos os íons Na^+ e OH^- , causando um decréscimo no pH e no teor de sódio do solo. Concluíram, também, que a baixa condutividade hidráulica do solo e a

solubilização do gesso, ocasionaram uma elevação inicial da condutividade elétrica da solução do solo a 0,20 m de profundidade, notando-se, porém, decréscimo gradual do teor de sais em todas as profundidades, o que evidencia melhoramento das condições de movimento d'água.

Ao estudar os efeitos do gesso e da concentração salina da água na condutibilidade hidráulica do solo, MELO *et al.* (1988) concluíram que: (1) a aplicação do gesso proporcionou aumentos na condutibilidade hidráulica dos solos, os quais tiveram valores nulos nas testemunhas; (2) a condutibilidade hidráulica, determinada com a aplicação da solução de maior concentração salina, apresentou valores entre cinco e dez vezes mais elevados que os obtidos com aplicação do gesso; (3) em todos os tratamentos, os valores da condutibilidade hidráulica tiveram correlação com a textura do solo, com os valores mais elevados correspondendo ao solo com menor teor de argila.

Os efeitos adversos da salinidade sobre as plantas, constituem um dos fatores limitantes da produção agrícola, devido principalmente, ao aumento do potencial osmótico do solo e toxidez resultante da concentração salina e dos íons específicos. Em solos sódicos, o efeito é mais sobre as características físicas do solo, devido a dispersão dos colóides, provocando desestruturação do solo, criando problemas de compactação, diminuindo conseqüentemente a aeração e dificultando o movimento de água e desenvolvimento radicular, além do efeito tóxico do sódio (CORDEIRO, 1988).

Mcneal & Coleman *apud* EL-MORSY *et al.* (1991), medindo os efeitos dos valores da concentração eletrolítica (**CE**) de uma solução sobre a condutividade hidráulica (**K**) de um solo, concluíram que, do ponto de vista das condições físicas do solo, a alta **CE** da água de irrigação não criam problemas. Entretanto, a irrigação feita com água de alta **CE**, causará impactos significativos sobre a produtividade das culturas.

KATERJI *et al.* (1992) estudando os efeitos da salinidade na cultura do feijão, concluíram que os efeitos da salinidade sobre a área foliar e matéria seca, apareceram 20 a 40 dias após a semeadura e se revelaram pela diminuição de aproximadamente 15% e decréscimo na produção de grãos em

aproximadamente 28%, embora a média da salinidade, expressa como CE_{es} , fosse igual a $2,4 \text{ dS.m}^{-1}$ para a maioria dos tratamentos salinos.

LETEY (1993) revisando a literatura sobre os efeitos da salinidade e sodicidade nas propriedades físicas do solo, observou que a taxa de infiltração e a condutividade hidráulica do solo, são afetadas pela relação de adsorção de sódio (**RAS**) e condutividade elétrica (**CE**) da água de irrigação. Em geral, aumentando a **RAS** e diminuindo a **CE** da água de irrigação, a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração tendem a decrescer. Estes resultados sugerem que as águas salinas podem ser aplicadas aos solos sem destruir suas propriedades físicas, devido à alta **CE** que contrabalança os altos valores da **RAS** da água. Em geral, isso tem sido observado no campo, notando-se que aplicações de água com alto teor salino não reduzem a taxa de infiltração ou a condutividade hidráulica do solo.

Ao realizar estudos de manejo de água salina para produção ótima das culturas, HAMDY *et al.* (1993) concluíram que o uso de água salina para irrigação, deverá ser evitada durante o estágio inicial de crescimento das plantas. Para as culturas do algodão e do trigo, a utilização de água com **CE** igual a $2,0 \text{ dS.m}^{-1}$, não causou limitações à germinação ou estabelecimento das plântulas. Em solos de textura grossa, a água de irrigação com **CE** igual a $4,0 \text{ dS.m}^{-1}$ tornou-as críticas. Ambas as culturas sofreram drástica deterioração quando a **CE** da água de irrigação alcançou valores acima de $8,0 \text{ dS.m}^{-1}$ em todos os tipos de solos.

2.1.2. Recuperação de solos afetados por sais

Na recuperação de solos salinos e sódicos, basicamente, se utilizam duas técnicas fundamentais: a lavagem dos sais e o uso de melhoradores químicos (PIZARRO, 1978; AYERS & WESTCOT, 1991), sendo aspectos importantes a qualidade da água, as práticas de irrigação e as condições de drenagem (RICHARDS, 1954).

Para que os solos sódicos sejam recuperados através da lixiviação, duas condições devem ser satisfeitas: (1) a água de lixiviação deve ser relativamente alta em Ca^{2+} e Mg^{2+} ; e (2) a água deve percolar através do perfil do solo, de modo que estes cátions divalentes possam ser transportados aos sítios de troca de cátions para permutar com o sódio. A água, tendo baixa condutividade elétrica (**CE**), causa nos solos sódicos a dispersão e deterioração da permeabilidade, porém, se tem alta **CE**, gera um efeito floculante sobre as partículas do solo e causam a agregação das argilas. Conseqüentemente, a permeabilidade elevada prevalece quando são usadas águas de alto teor salino (DOERING & REEVE, 1965).

Segundo PIZARRO (1978), a técnica de lavagem de sais solúveis do solo, com a finalidade de reduzir a elevada salinidade inicial a níveis toleráveis pelas culturas, denomina-se lavagem de recuperação. Por outro lado, a lavagem de manutenção é recomendada com o propósito de impedir a ressalinização do solo, ocasionada pela contribuição dos sais da água de irrigação, água do lençol freático, e outros fatores, uma vez que o solo esteja dessalinizado. Em ambos os casos, a aplicação pode ser feita de maneira contínua ou intermitente. Na lavagem contínua, mantém-se uma lâmina d'água constante, permitindo que os sais sejam removidos mais rapidamente, sendo recomendada para solos de boa permeabilidade. A lavagem intermitente é recomendada para os solos que possuem baixa permeabilidade, lençol freático profundo com baixo teor salino e períodos de baixa taxa de evaporação.

O tipo e a quantidade de melhorador químico a ser aplicado no solo, com o propósito de substituir o sódio trocável, depende das características do solo, do tempo que requer sua reação e das limitações econômicas. Por seu custo relativamente baixo, o gesso é o melhorador químico mais comumente usado, para a recuperação de solos afetados por sais. Do ponto de vista da eficiência, é vantajoso lavar os sais solúveis do solo antes de aplicar o melhorador químico; como conseqüência da eliminação dos sais solúveis, uma maior proporção de cálcio fornecida pelo melhorador químico é adsorvido pelo complexo de troca do solo (RICHARDS, 1954).

Conforme Kelley *apud* MOURA (1989), o uso do gesso, como melhorador químico, apresenta as seguintes vantagens: (1) deslocamento efetivo do sódio adsorvido na micela, convertendo a argila sódica em cálcica; (2) reação com o Na_2CO_3 , freqüentemente presente nos solos sódicos, resultando em CaCO_3 e Na_2SO_4 , que devem ser lixiviados; (3) a solubilidade do gesso aumenta na presença dos íons sódio e cloreto, componentes dos sais solúveis desses solos; (4) o gesso é de fácil aplicação e é encontrado com facilidade no mercado.

Fuller *apud* CORDEIRO (1988) observa que as práticas adequadas de manejo, visando a recuperação de solos com excesso de sais solúveis e sódio trocável, ou ainda, com o objetivo de evitar o aumento da percentagem de sódio trocável (**PST**) a níveis que dificultem, ou mesmo impeçam, sua utilização para a agricultura, são feitas normalmente levando-se em consideração as características físicas e químicas do solo, clima, qualidade da água, métodos e freqüência de irrigação, sistema de drenagem, preparo do solo, incorporação de resíduos orgânicos, uso de fertilizantes e manejo das culturas, tanto em solos normais, sob condições de irrigação, como na recuperação de solos afetados por sais e sódio trocável.

Ao investigar a lixiviação de solos salinos drenados por manilhas, TALSMAN (1967), com base na análise dos resultados, concluiu que durante a inundação, a dessalinização procedeu-se mais rapidamente próximo aos drenos do que na parte central entre eles, enquanto, durante a fase de rebaixamento do lençol freático, a dessalinização foi a mesma em toda a área.

SOMMERFELDT & PAZIUK (1975) constataram ser possível a recuperação de um solo salino, utilizando-se drenos subsuperficiais instalados à 1,25 m de profundidade. O nível do lençol freático foi rebaixado suficientemente para permitir atividade normal das raízes. O excesso de sais foi lixiviado para profundidades maiores que a dos drenos.

Rhoades *apud* SALAZAR *et al.* (1988) informa que o único meio econômico de controlar a salinidade, é manter um fluxo d'água de boa qualidade, no sentido vertical descendente, através da zona das raízes. Isso implica na necessidade da prática de lavagem, através da aplicação extra de

água, além da requerida pelas culturas (uso consuntivo), visando manter um equilíbrio de sais e evitar salinização. O requerimento de lavagem é estimado à base de um balanço de sais, no perfil do solo. Nesse processo, um sistema de drenagem subterrânea artificial é condição imprescindível para a retirada da água de lavagem, como também para manter o nível do lençol freático a tal profundidade que não afete as culturas nem facilite a acumulação de sais.

A quantidade de água que deverá lixiviar o perfil do solo para remover os sais solúveis dependerá primeiramente do nível de salinidade inicial do solo, da técnica de aplicação da água e do tipo de solo (HELALIA *et al.*, 1991).

OLIVEIRA (1986) pesquisando sobre a lavagem e a aplicação de gesso na recuperação de um solo sódico, verificou que os efeitos do gesso tornam-se evidentes a partir dos vinte dias, desde que o teor hídrico seja propício e que a aplicação seja feita sobre o solo. Ao referir-se a Abdel, cita que a eficiência do gesso na lixiviação do sódio, cresce com o teor de água no solo. Observou ainda, que durante as lavagens não é aconselhável, para as condições locais, haver intervalos de regas superiores a sete dias, pois a capilaridade poderá reconduzir os sais às camadas superficiais.

Após realizar o manejo integrado do solo na recuperação de um solo sódico, COSTA (1988) observou melhoria das condições de movimento d'água no perfil do solo, traduzida pelo aumento dos valores médios da condutividade hidráulica do solo saturado. O tratamento mecânico da subsolagem contribuiu com a lavagem dos sais e a aplicação do gesso mostrou-se eficaz na substituição do sódio trocável.

Segundo VERHOEVEN (1973), a eficiência de lavagem para a recuperação de um solo salino, depende da umidade do solo, da velocidade de lavagem, da distribuição por tamanho dos poros do solo, da disposição espacial dos poros de diferentes tamanhos e da distribuição vertical dos sais solúveis ao longo do perfil do solo.

SELASSIE *et al.* (1992) definem que a eficiência da recuperação está na redução do total de sais e sódio trocável, como uma função da quantidade de água adicionada. Assim, a recuperação de solos salinos é

baseada na dissolução e transporte de sais a partir de um dado volume ou profundidade do solo, enquanto que a recuperação de solos sódicos requer a substituição do Na^+ pelo Ca^{2+} no complexo de troca e a remoção do Na^+ através de um sistema de drenagem.

2.2. Parâmetros hidrodinâmicos do solo

O estudo da água subterrânea realizado através da estimativa e avaliação das propriedades físicas do solo, constitui o aspecto principal para definição dos problemas de drenagem. Dentre os principais parâmetros hidrodinâmicos do solo, de interesse para o dimensionamento do sistema de drenagem bem como para a pesquisa, destacam-se a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) e a porosidade drenável (f). A condutividade hidráulica, que representa a capacidade do solo de transmitir água, é necessária ao cálculo do espaçamento entre drenos, em condições de regime de fluxo permanente ou não permanente. Já a porosidade drenável, que compõe a fração do volume do solo por onde a água se movimenta e drena após exceder a capacidade de campo, é necessária, juntamente com a condutividade hidráulica, para o cálculo do espaçamento entre drenos em condição de regime de fluxo não permanente e importante para a caracterização de critérios de drenagem.

2.2.1. Condutividade hidráulica do solo saturado

KESSLER & OOSTERBAAN (1973) denominam de condutividade hidráulica o fator de proporcionalidade **K** da equação de Darcy para o fluxo da água no solo, e que representa sua propriedade de transmissão de água, que depende principalmente do número e diâmetro dos poros presentes. Se estes estão uniformemente distribuídos, o solo é considerado homogêneo ou isotrópico para tal propriedade, ou seja, a condutividade hidráulica é a mesma em todas as direções. Por outro lado, se os solos apresentam estratificação, de forma que a condutividade hidráulica varia de um ponto a outro, denominam-se heterogêneo ou anisotrópico.

Vários são os métodos, de campo e de laboratório, empregados na estimativa da condutividade hidráulica (PIZARRO, 1978; MILLAR, 1988; KLAR, 1988; CRUCIANI, 1989; LIBARDI, 1995). Segundo GOMES & MILLAR (1978), os métodos, especialmente do poço e do piezômetro, podem ser usados em solos aluviais, desde que sujeitos a algumas restrições. Em primeiro lugar, o número de medições por unidade de área deverá ser bem maior e mais bem distribuído espacialmente que no caso de solos normais, especialmente no caso do piezômetro que gera informação de uma camada restrita do solo. Quando se tem conhecimento prévio da profundidade de instalação dos drenos subterrâneos, a estimativa da condutividade hidráulica através do piezômetro naquela profundidade, poderá dar melhor caracterização do fluxo. Contudo, o método do poço, pelas suas características de simplicidade, facilidade de instalação e rapidez nas medições, é o mais indicado, porque, além dessas características, dá uma média das condições de transmissão da água numa camada de solo, bem maior que no caso do piezômetro. Dada a sua rapidez de execução, permite obter maior número de dados numa área por igual tempo, em relação aos outros métodos. KESSLER & OOSTERBAAN (1973) e PIZARRO (1978), afirmam que o erro do método na estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado é da ordem de 10 a 20%.

Na estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado para fins de dimensionamento de sistemas de drenagem, os métodos de campo devem ser preferidos (KESSLER & OOSTERBAAN, 1973; CRUCIANI, 1989; FAO, 1986). SAUNDERS *et al.* (1978) em estudos da condutividade hidráulica em condições de campo, justificam tal processo em função da maior aproximação das condições reais, pois em condições de laboratório utilizam-se simples amostras de solo que podem conduzir a grandes erros, ocasionados por alterações das condições naturais do solo.

BOUWER & JACKSON (1974), avaliando diversas técnicas para estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado, asseguram que o método mais efetivo é através das medidas das descargas dos drenos e posição do lençol freático. Observam ainda, que a variabilidade é muito maior a partir dos erros na medição da condutividade hidráulica, do que os relacionados aos métodos de medidas. SKAGGS (1976) apresenta um método de determinação da condutividade hidráulica, baseado nas medidas do lençol freático com drenos instalados no campo.

Ao medir a condutividade hidráulica do solo saturado (K_o) em um solo franco siltoso, ROGERS *et al.* (1985) obtiveram valores de aproximadamente $0,024 \text{ m.dia}^{-1}$ na camada superficial e um pequeno aumento para a profundidade próxima de 0,60 m. EL-HUSNY (1979), em estudo comparativo de dois métodos de estimativa de K_o em um solo aluvial eutrófico, sob condições de campo, obteve um valor médio da ordem de $0,0865 \text{ m.dia}^{-1}$. Concluiu ele, que os valores devem ser sempre apresentados em termos médios, tendo em vista a variabilidade espacial das características físico-hídricas do solo.

Em solos estratificados, tais como os solos aluviais, a condutividade hidráulica do solo saturado (K_o), medida pelo método auger-hole (poço), varia consideravelmente. Numerosos testes em um solo franco siltoso e franco argilo-siltoso, mostram que a condutividade hidráulica varia não somente entre os poços (variabilidade do solo), mas também com a profundidade do poço, profundidade do lençol freático e profundidade da água removida do poço (ROGERS & CARTER, 1987).

A condutividade hidráulica não permanece constante ao longo do tempo para um mesmo solo, devido aos processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem continuamente, como, por exemplo, a alteração do complexo de íons trocáveis e a migração de partículas de argila durante o fluxo (KLAR, 1988). Segundo Quirk & Schofield *apud* MELO *et al.* (1988), a diminuição da condutividade hidráulica, com o decréscimo da concentração da solução aplicada, é devida, principalmente, à dispersão e expansão das argilas e sua translocação pela solução de fluxo, causando obstrução dos poros condutores.

Investigando a variabilidade da condutividade hidráulica do solo saturado (K_o) pelo método auger-hole, ROGERS *et al.* (1991) verificaram que os valores obtidos mostraram variação espacial moderada e que estes valores podem ser utilizados para prognosticar a profundidade do lençol freático e os movimentos das substâncias químicas dissolvidas no perfil do solo.

SOUZA (1991), realizando estudos de avaliação de desempenho do sistema de drenos subsuperficiais e tratamentos mecânicos na melhoria das condições de drenabilidade dos solos do Perímetro Maniçoba-BA, encontrou uma diferença não significativa entre a condutividade hidráulica medida pelo método do poço e da descarga de drenos.

2.2.2. Porosidade efetiva ou drenável

A porosidade efetiva, também denominada porosidade livre de água ou porosidade drenável (f), é definida como o volume de água que será drenada livremente por unidade de volume do solo saturado, através do rebaixamento do lençol freático. Juntamente com a condutividade hidráulica do solo saturado (K_o), é necessária para o cálculo do espaçamento entre drenos em condições de fluxo não permanente, e importante para a caracterização de critérios de drenagem que envolvem o coeficiente de drenagem ou taxa de

remoção do excesso de água e a profundidade desejável do lençol freático (CRUCIANI, 1989).

A porosidade drenável é um parâmetro do solo de grande importância para a drenagem, pois representa a fração do volume do solo por onde a água livre se movimenta, ou seja, a água que excede a capacidade de campo e que deve ser drenada (PIZARRO, 1978).

Shumacher *apud* KIEHL (1979), classificou a porosidade do solo em porosidade capilar, também denominada microporosidade, e porosidade não capilar ou macroporosidade; a macroporosidade é também referida como porosidade de aeração, porque é a porosidade encontrada no solo na capacidade de campo, isto é, depois do solo ter sido saturado com água, e ter ocorrido a percolação da maior parte da água não retida no solo, momento em que o ar passa a ocupar os poros não capilares.

Entretanto, conforme REICHARDT (1988), a capacidade de campo é o resultado de um comportamento dinâmico da água no perfil do solo, e não uma característica intrínseca de sua matriz. Variações nas condições iniciais e de contorno do processo de drenagem interna, levam a valores distintos de capacidade de campo, não lhe atribuindo, portanto, um conceito universal.

Os valores da porosidade drenável (f), segundo Johnson *apud* PIZARRO (1978), podem variar conforme a textura do solo, de aproximadamente 1,0% à 25,0%. Os valores médios de f encontrados pelos autores, a seguir, variam conforme o tipo de solo pesquisado: QUEIROZ (1987), $f = 1,4$ à 5,2%; SUGUINO *et al.* (1988), $f = 7,0$ à 24,0%; COSTA (1988), $f = 2,5$ à 5,3%; SOUZA (1991), $f = 16,0\%$; PONTES *et al.* (1992), $f = 9,0$ à 20,0%.

Valores representativos da porosidade drenável (f), para uso nas equações de regime de fluxo não permanente, são difíceis de medir precisamente. Entretanto, um erro na estimativa de f , de aproximadamente 25%, resultará um erro no cálculo do espaçamento entre drenos, equivalente a 10% (FAO, 1986).

TAYLOR (1960) demonstra um procedimento para estimativa da porosidade drenável, baseado nas medidas de descarga dos drenos e da profundidade do lençol freático no perfil do solo.

SKAGGS (1976) apresenta soluções numéricas expressas graficamente, que possibilitam estimar a relação K_o/f , pela medida da flutuação do lençol freático devido a drenagem e subirrigação. Já Dumm *apud* OTTO (1988), propôs a utilização de um gráfico, K_o x f , válido para regiões irrigadas dos Estados Unidos.

FERNANDES *et al.* (1989) ao realizarem estudo de estimativa da porosidade drenável (f), em função da condutividade hidráulica do solo saturado (K_o), em um solo orgânico, verificaram que a equação obtida do gráfico proposto pelo *United State Departament of the Interior*, apresentou satisfatório ajuste aos dados de f e K_o .

Segundo PIZARRO (1978), quando não se dispõe de dados suficientes, o valor da porosidade drenável (f) pode ser estimado em função da condutividade hidráulica do solo saturado (K_o), através da equação:

$$f = \sqrt{K_o} \quad (1)$$

sendo f expresso em % e K_o em cm.dia^{-1} .

Conforme CRUCIANI (1989) e PONTES *et al.* (1992), o valor da porosidade drenável pode ser estimado em função do potencial da água do solo, após o rebaixamento do nível do lençol freático, empregando-se a curva característica de umidade daquele solo.

GALDINO (1988) ao investigar algumas características do solo de várzea, verificou que o modelo empírico proposto por Van Beers não foi eficaz na estimativa da porosidade drenável. Resultado similar foi obtido por OTTO (1988).

O valor da porosidade drenável não é constante, pelo simples fato de que a água no solo está sempre em estado dinâmico, nunca estático. Seu valor depende da proximidade do lençol freático em relação à superfície do solo, de sua flutuação no perfil e direção de deslocamento (TAYLOR, 1960;

BOUWER & JACKSON, 1974; CRUCIANI, 1989). PANDEY *et al.* (1992) realizaram estudos em laboratório para investigar a variação da porosidade drenável em relação a profundidade do lençol freático e constataram que incorporando-se a porosidade drenável variável no cálculo, aumenta-se a precisão na estimativa do espaçamento entre drenos quando comparados com o uso de um valor constante para a porosidade drenável. GUPTA *et al.* (1994) obtiveram um acerto de aproximadamente 70% na predição do lençol freático, utilizando a porosidade drenável como uma função da carga hidráulica.

Ao estudar sistemas de drenagem em regime de fluxo não permanente, SEDIYAMA *et al.* (1990) verificaram que o efeito da porosidade drenável depende principalmente dos critérios de drenagem, da profundidade dos drenos e da recarga do lençol freático.

2.3. Avaliação de desempenho de drenagem subterrânea

Para Wesseling & Van Someren *apud* QUEIROZ (1987), um sistema de drenagem é considerado eficiente, quando é capaz de assegurar uma rápida retirada do excesso d'água no solo, enquanto que para PILLSBURY (1967), é sua habilidade de providenciar uma rizosfera livre de sais.

MILLAR (1988) informa da necessidade de se esquematizar uma sistemática de testes, com a finalidade de avaliar o funcionamento de um sistema já implantado e gerar informações que definam mais propriamente os fatores de delineamento. Os testes, que normalmente se reduzem às medições da variação do nível do lençol freático e vazão das linhas de drenos, em função do tempo, proporcionam informações valiosas do fator de intensidade de drenagem (α), condutividade hidráulica (K), transmissividade (KD), profundidade e posição da camada de impedimento (D_o) e porosidade efetiva ou espaço poroso drenável (f). Tais informações, podem ser analisadas por quaisquer das equações de fluxo d'água para os drenos, sendo que as

equações de Hooghoudt (fluxo permanente) e Glover-Dumm (fluxo não permanente) são mais adequadas, em razão da sua simplicidade.

Beltran *apud* SOUZA (1991), afirma que a avaliação dos sistemas de drenagem tem por objetivo verificar o funcionamento dos mesmos, para corrigir as possíveis disfunções provenientes da elaboração de um projeto incorreto. Tanto em áreas irrigadas, como em parcelas experimentais, a avaliação de desempenho do sistema de drenagem dentre outras finalidades, compreendem: (1) estudo das condições de fluxo d'água até os drenos para comprovar que a teoria de drenagem se adapta ao modelo de fluxo; (2) estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado e da porosidade drenável mediante medições que envolvam um grande volume do solo; (3) estudo da relação entre a posição do lençol freático e a produção das culturas; (4) estudo da influência do manejo da água de irrigação sobre a recarga do lençol freático.

As operações de limpeza e manutenção das estruturas de drenagem, contribuem para o bom funcionamento do sistema. Conforme PIZARRO (1978), a principal causa que diminui a eficiência de desempenho dos drenos, consiste no depósito de sedimentos, os quais podem entrar pelas juntas ou perfurações e acumular-se no interior do dreno, chegando às vezes a obstruí-los totalmente. A formação dos depósitos dependem da natureza do solo e das condições de instalação dos drenos. Os solos com pouca estabilidade, como os arenosos e siltosos, causam maiores problemas de sedimentação, dentre os quais os mais perigosos são os que apresentam maior percentagem de silte, pois as pequenas partículas de silte são facilmente transportadas pela água até mesmo com baixa velocidade. Por sua vez, os solos argilosos apresentam boa estabilidade dos agregados, podendo os drenos funcionarem sem problemas por muitos anos. Outras causas que afetam o funcionamento do dreno são a deposição de compostos de ferro, idade do material, má conservação do dreno coletor, erro no cálculo do espaçamento ou diâmetro dos drenos, deficiência de instalação, etc.

SEMANAPALLI *et al.* (1986) avaliaram o desempenho hidráulico de dois sistemas de drenagem subterrânea no Perímetro Irrigado de Sumé-PB,

utilizando manilhas de barro e como material filtrante, areia grossa lavada e seixos rolados. Através da análise da resistência ao fluxo de entrada, da fração de perda de carga e do rebaixamento do lençol freático, constataram que, embora os sistemas tenham apresentado resistências de entrada moderada, de aproximadamente $2,3 \text{ dias.m}^{-1}$, satisfizeram aos critérios agrônômicos (velocidade de rebaixamento do lençol freático) nas condições em regime de fluxo não permanente. Ainda no mesmo trabalho, informam que a avaliação do desempenho hidráulico de um sistema, além de permitir a definição de constantes hidrológicas básicas para sua aplicação em projetos de drenagem em áreas similares, serve para demonstrar as mudanças no solo ao longo do tempo, facilitando a obtenção de critérios de drenagem mais reais.

QUEIROZ (1987) procedendo à avaliação do desempenho hidráulico de dois sistemas pilotos de drenagem subterrânea, usando manilhas de barro, constatou uma diferença significativa entre os valores dos parâmetros hidrodinâmicos do solo, obtidos pelas teorias de Hooghoudt (regime de fluxo permanente) e Glover-Dumm (regime de fluxo não permanente), tendo ainda recomendado esta última, tanto por medida de segurança, como por representar uma condição de fluxo mais adequada aos perímetros irrigados. Os valores da carga hidráulica de entrada e da fração de perda de carga foram elevados, caracterizando algum defeito no funcionamento dos sistemas ou uma particularidade dos solos aluviais. Concluiu ainda, que a equação de Glover-Dumm, a princípio, superestimou os espaçamentos quando comparadas com as equações obtidas experimentalmente.

Segundo DIELEMANN & TRAFFORD (1976), na avaliação do desempenho das linhas de drenos, a carga hidráulica de entrada do fluxo subterrâneo constitui um parâmetro importante, tanto como um valor singular, como uma fração da perda de carga total. Consideram ainda a resistência de entrada, definida como a relação entre a carga hidráulica de entrada e a taxa de unidade de fluxo medida no final do dreno.

Os dados coletados no estudo hidrológico do solo, podem ser processados e apresentados graficamente, com a finalidade de auxiliarem na

avaliação de desempenho do sistema de drenagem subterrânea. Tal representação gráfica compreende, entre outras, a confecção de mapas com as curvas de níveis do lençol freático (mapa de *isohypsas*). Através de sua interpretação, conforme RIDDER (1973), MILLAR (1988) e CRUCIANI (1989), pode-se extrapolar algumas informações de interesse, tais como: direção do fluxo d'água subterrânea, gradiente hidráulico, áreas de recarga e descarga, valor relativo da condutividade hidráulica e resistência radial.

Conforme CRUCIANI & GODOY (1980), metodologias que caracterizem o comportamento do lençol freático são as únicas que apresentam eficiência em estudos para áreas com problemas de drenagem. COSTA (1994) evidenciou o funcionamento adequado de drenos laterais, utilizando como parâmetro a descrição de uma rede de fluxo.

Investigando a drenagem subterrânea no Perímetro Irrigado de Bebedouro-PE, através de estudo do lençol freático, SALAZAR *et al.* (1989), após interpretação do mapa de *isohypsas*, mostram uma tendência do fluxo lateral subterrâneo na direção das áreas mais baixas, acompanhando com algumas exceções a topografia do terreno.

Um modelo físico de laboratório, usando três tipos de solos, foi estudado por PIRES (1980) que, dentre outros objetivos, obteve uma rede de fluxo originada pelos valores teóricos do potencial total e da função corrente.

Ao avaliar um sistema de drenagem na recuperação de um solo sódico no vale do Curu-CE, COSTA (1988) concluiu, com base nos resultados do rendimento do sistema de drenagem, ser possível utilizar eficientemente drenos rasos em solos aluviais de regiões semi-áridas.

Procurando definir critérios de dimensionamento e avaliação de desempenho hidráulico num sistema de drenagem subterrânea no Perímetro Irrigado de Maniçoba-BA, SUGUINO *et al.* (1988) verificaram que o espaçamento entre drenos laterais a 30,0 m foi o mais adequado, em função dos custos e exigências de irrigação.

Investigando a eficiência de drenos abertos e cobertos e de algumas teorias de drenagem em regime de fluxo não permanente, LOUREIRO *et al.* (1985) verificaram que, salvo algumas exceções, todas as

equações estudadas superestimaram o valor do espaçamento de campo, crescendo essas superestimações com os aumentos dos intervalos de tempo e com a variação na posição do lençol freático.

CAIXETA *et al.* (1986), fazendo avaliação do desempenho hidráulico e análise da eficiência de equações de dimensionamento em regime de fluxo não permanente, verificaram que todas as equações estudadas tenderam a superestimar o espaçamento de campo, sendo que as teorias de Glover, Tapp-Moody e Boussinesq-Schilfgaard foram as que menos superestimaram esse valor. Entretanto, as teorias de Glover e Boussinesq-Schilfgaard, considerando uma variação de aproximadamente 20% em relação ao valor de campo, apresentaram a melhor eficiência.

Investigando o desempenho hidráulico de um sistema de drenagem, RODRIGUES *et al.* (1988), analisaram que as equações mais eficientes foram as de Glover, Tapp-Moody e Boussinesq-Schilfgaard.

Ao comparar o desempenho dos drenos subterrâneos com diferentes materiais filtrantes, submetidos ao regime de fluxo não permanente, ANTONINI (1989) concluiu que todas as equações estudadas tenderam a superestimar o espaçamento entre drenos, à medida que aumentava a resistência radial ao fluxo d'água no solo, até mesmo quando o conceito de profundidade equivalente de Hooghoudt foi utilizado. As estimativas de espaçamento entre drenos, mais coerentes com o de campo, feitas pelas equações estudadas, dependeram da eficiência do material filtrante em diminuir a resistência ao fluxo d'água no solo. Observou ainda, que em todos os casos estudados, houve relação linear entre a descarga dos drenos e a carga hidráulica tomada no ponto médio entre eles.

SEDIYAMA *et al.* (1990) citam que dentre as diversas equações para dimensionamento de drenos em regime de fluxo não permanente, a equação de Glover-Dumm é a de maior eficiência.

Através de um modelo físico de laboratório, utilizando dois tipos de solos de várzeas, BERNARDO *et al.* (1992) testaram a validade de algumas equações de drenagem para espaçamento entre drenos subterrâneos, sob regime de fluxo não permanente. Dentre as equações avaliadas, a de Glover e

a de Hammad foram as que apresentaram os melhores desempenhos. À medida em que o dreno se afastou da camada de impedimento, a equação de Glover tornou-se mais eficiente. Os resultados obtidos indicaram a seguinte ordem de preferência das teorias de drenagem: Glover, Hammad, Tapp-Moody, Bouwer-Schilfgaard e Boussinesq-Schilfgaard.

2.4. Equações de dimensionamento de sistemas de drenagem

As expressões matemáticas utilizadas para o dimensionamento de um sistema de drenagem, estabelecem uma relação entre a profundidade dos drenos e o espaçamento entre eles, considerando-se as características hidrodinâmicas e geométricas do solo, culturas, práticas de manejo das culturas e solo e critérios de drenagem. Tais expressões, que descrevem o fluxo de água subterrânea para as linhas de drenos paralelos, são baseadas em uma série de simplificações das condições de campo, sendo comum considerar, segundo Child & Young *apud* MILLAR & GOMES (1978), a homogeneidade do perfil do solo, com as mesmas características hidráulicas na região do fluxo. 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 de água para os drenos.

A maioria das equações se fundamentam nas suposições de Dupuit e Forchheimer, apresentadas por DIELEMAM & RIDDER (1973), PIZARRO (1978) e CRUCIANI (1989), que pressupõem: (1) para pequenas inclinações do lençol freático, as linhas de fluxo em direção aos drenos são aproximadamente horizontais em qualquer seção vertical; (2) as velocidades associadas às linhas de fluxo são proporcionais à declividade do lençol freático, independente da profundidade. Estas suposições implicam na redução das dimensões do fluxo, ou seja, o fluxo bidirecional se transforma em

unidirecional, e a velocidade do fluxo na superfície freática é proporcional ao gradiente hidráulico.

Os critérios de drenagem são formulados de acordo com o tipo de fluxo prevalecente: (1) condição de fluxo permanente, ou seja, os potenciais totais na superfície freática não variam com o tempo ($\partial\psi_{tot}/\partial t=0$). Nesta condição, a capacidade de descarga dos drenos é igual à recarga; tal situação corresponde ao caso de uma precipitação de intensidade constante e longa duração; (2) condição de fluxo não permanente, ou seja, os potenciais totais na superfície freática variam com o tempo ($\partial\psi_{tot}/\partial t \neq 0$). Neste caso, os critérios de drenagem são formulados em função da velocidade com que se deseja rebaixar o nível freático, após ter-se processado a recarga (WESSELING, 1973).

De acordo com LUTHIN (1973), em condições de campo, tendo em vista a $\partial\psi_{tot}/\partial t \neq 0$, o dimensionamento de drenagem, baseado na oscilação do lençol freático é mais correta. Por outro lado, segundo o ILRI (1980) - *International Institute for Land Reclamation and Improvement*, quando o tempo utilizado for grande, como é o caso da agricultura, é possível utilizar-se equações de espaçamento entre drenos para regime de fluxo permanente, baseado na profundidade média do lençol freático e na descarga média dos drenos para o período em consideração. Esse método pode ser chamado de estado semi-permanente.

2.4.1. Regime de escoamento permanente

De acordo com WESSELING (1973), Donnan em 1946, baseado nas suposições de fluxo horizontal unidirecional, apresentou a seguinte equação:

$$S^2 = \frac{4K}{R}(B^2 - D^2) \quad (2)$$

Quando a drenagem é efetuada com drenos que ficam assentados sobre a camada de impedimento, $D = 0$, (MILLAR,1988), a equação reduz-se a:

$$S^2 = \frac{4K.B^2}{R} \quad (3)$$

A Figura 01 ilustra os termos geométricos da equação de DONNAN.

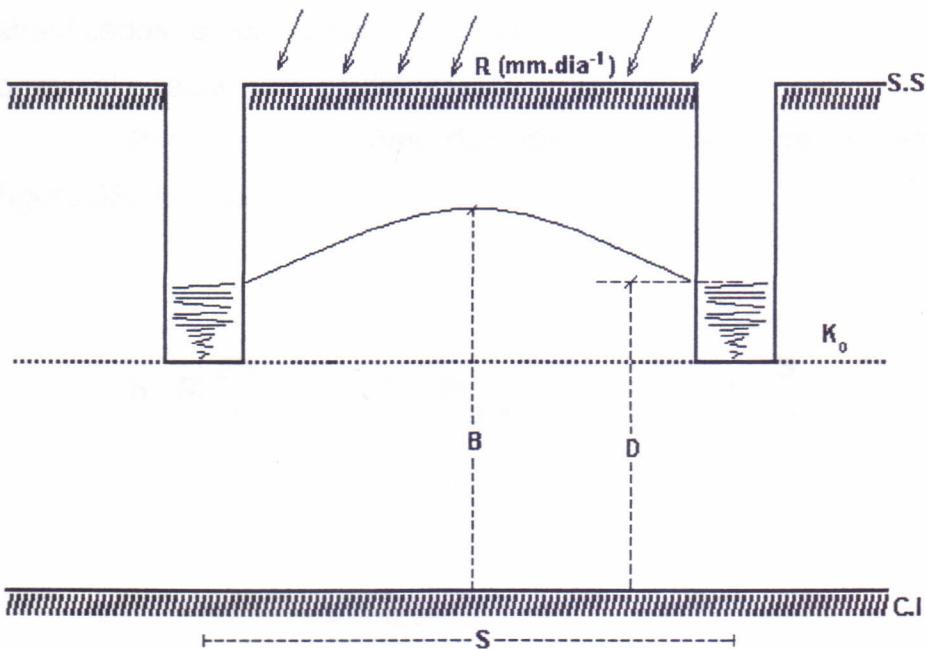


Figura 01 - Ilustração dos termos da equação de DONNAN.

Segundo MILLAR (1988) e CRUCIANI (1989), Hooghoudt em 1936, na Holanda, desenvolveu uma equação, considerando, além do fluxo horizontal, o fluxo radial para os drenos. Considerando-se um solo estratificado em dois horizontes de condutividades hidráulicas K_1 e K_2 , com os drenos na interface dos dois horizontes (Figura 02), expressa-se a equação da seguinte forma:

$$S^2 = \frac{4K_1.H^2}{R} + \frac{8K_2.d.H}{R} \quad (4)$$

A profundidade do "estrato equivalente", d , é função da espessura do estrato, D , do espaçamento entre drenos, S , e do raio dos drenos, r .

De acordo com WESSELING (1973), PIZARRO (1978) e MILLAR (1988), o princípio fundamental da solução dada por Ernst para solos estratificados, é considerar a contribuição dos componentes de fluxo vertical, horizontal e radial para os drenos.

Para as condições dos drenos situarem-se no estrato inferior (Figura 03), têm-se:

$$h = R \left[\frac{2D_1}{K_1} + \frac{h - 2D_1}{K_2} \right] + R \frac{S^2}{8(K_1.D_1 + K_2.D_2)} + R \frac{S}{\pi.K_2} \ln \frac{D_r}{Pm} \quad (5)$$

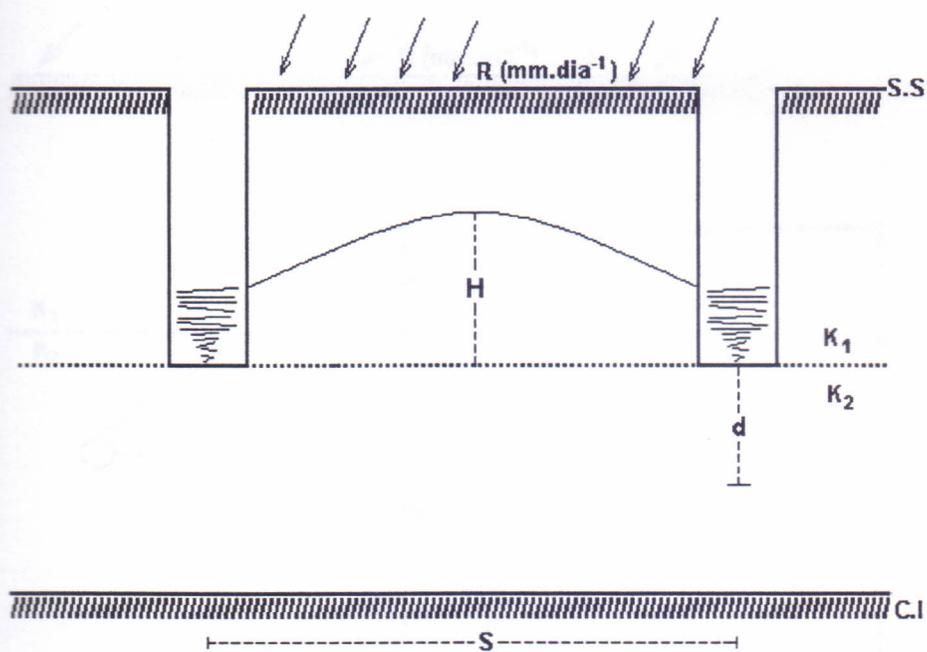


Figura 02 - Ilustração dos termos da equação de HOOGHOUTT.

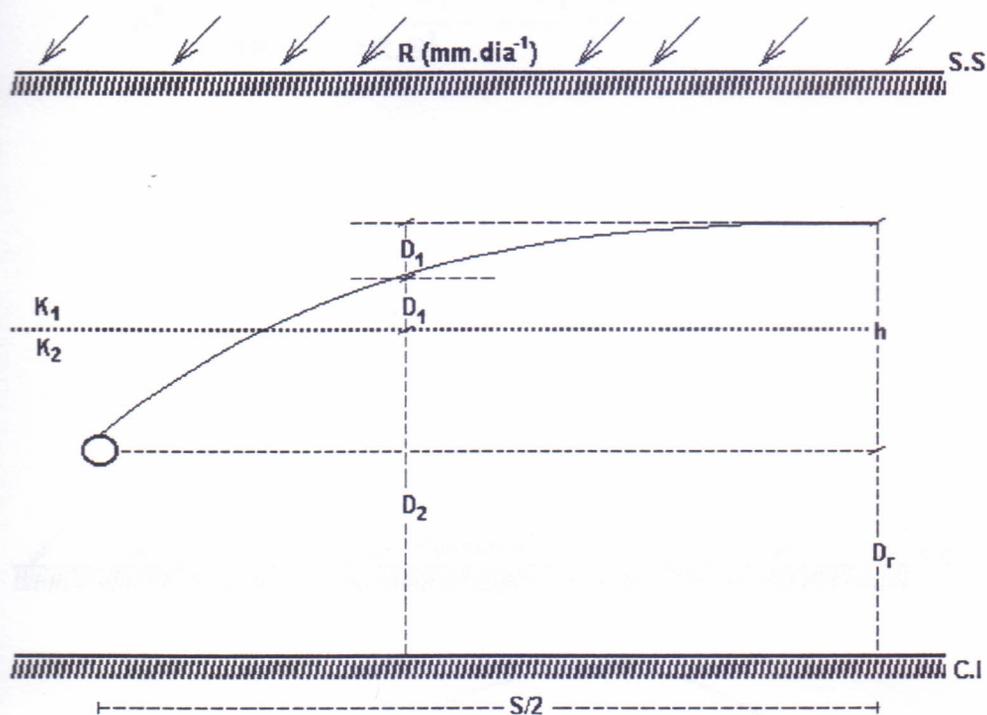


Figura 03 - Ilustração dos termos da equação de ERNST.

DEBOER & CHU (1975), com base nas hipóteses de Dupuit & Forchheimer, desenvolveram uma equação para a condição em que os drenos subterrâneos encontram-se instalados alternadamente em duas profundidades (Figura 04).

$$h^2 = R \frac{S^2}{4K} + \frac{K(D_2^2 - D_1^2)^2}{4R.S^2} + \frac{(D_2^2 + D_1^2)}{2} \quad (6)$$

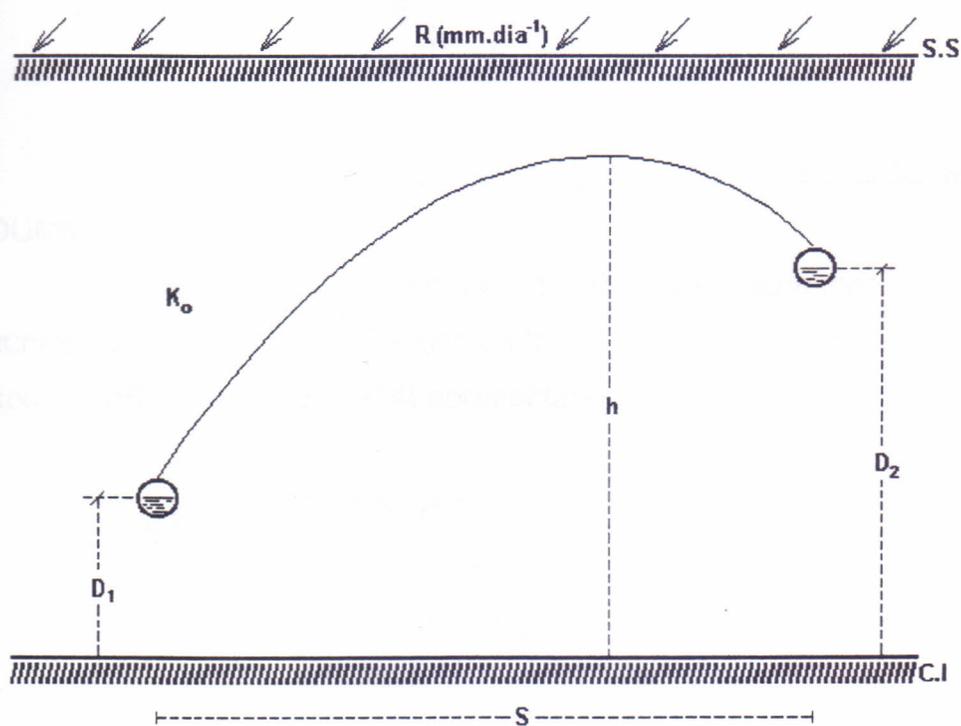


Figura 04 - Geometria de drenos laterais em duplo nível.

2.4.2. Regime de escoamento não permanente

O fluxo de água subterrânea em direção aos drenos é condicionado por diferentes fatores e, nesse processo, as condições de contorno do sistema podem ou não permanecer invariáveis. Quando esses contornos e os potenciais totais mudam com o tempo, como ocorre tipicamente durante o rebaixamento do lençol freático, prevalecem as condições de não equilíbrio entre a recarga do solo e a descarga dos drenos (CRUCIANI & BOTREL, 1986). Conforme CRUCIANI (1989), uma equação que tem sido bastante empregada com sucesso, também em regiões irrigadas, é a equação de Glover-Dumm, a qual é expressa a seguir:

$$s^2 = \frac{\pi^2 \cdot K \cdot d \cdot t}{f \cdot \ln \left(1,16 \frac{h_o}{h_t} \right)} \quad (7)$$

A Figura 05 ilustra os termos geométricos da equação de GLOVER-DUMM.

Com base na hipótese de Dupuit-Forchheimer e admitindo a curvatura inicial do lençol freático de forma elíptica, Boussinesq e Schilfgaarde *apud* SCHILFGAARDE (1974) apresentaram a seguinte equação:

$$s^2 = \frac{9K \cdot d \cdot t}{f \cdot \ln \left[\frac{h_o (2d + h_t)}{h_t (2d + h_o)} \right]} \quad (8)$$

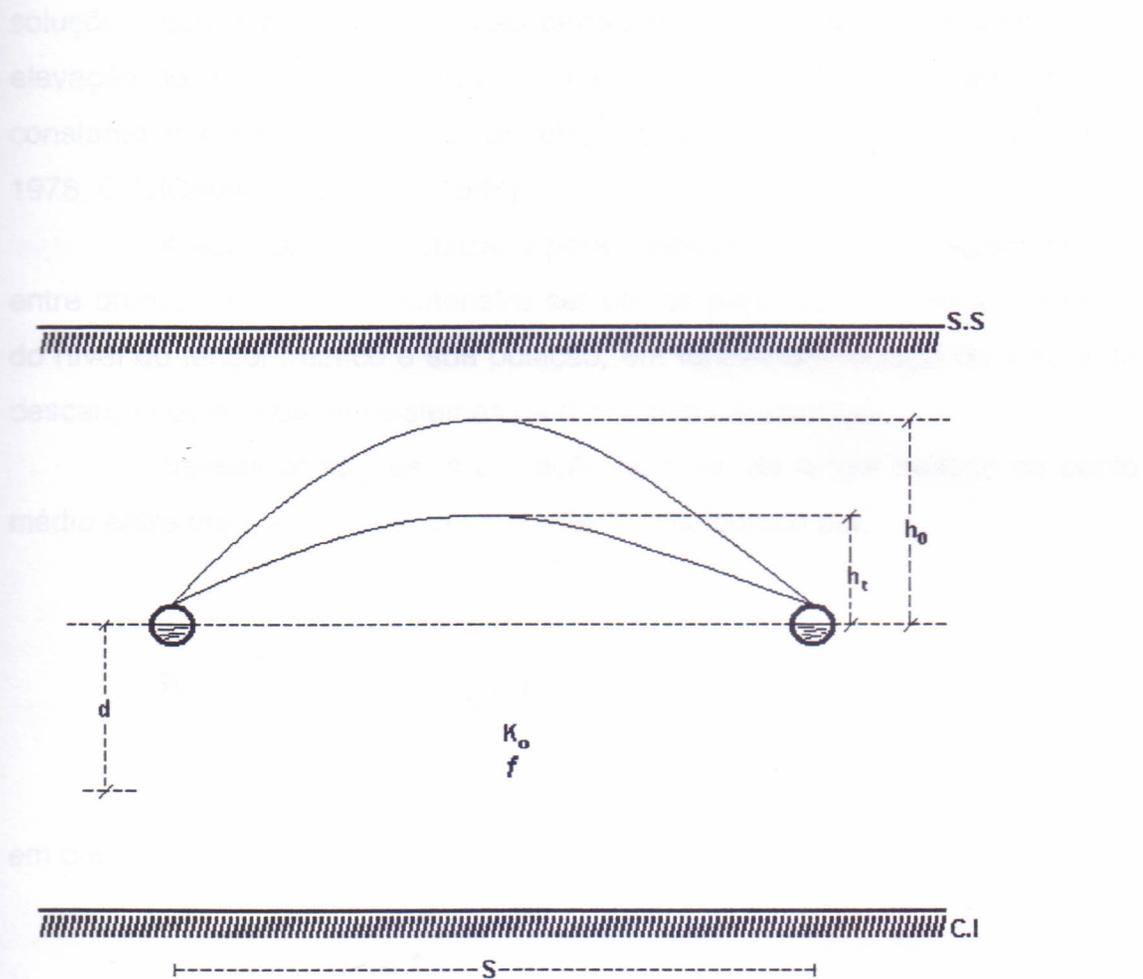


Figura 05 - Ilustração dos termos da equação de GLOVER-DUMM.

Kraijenhoff Van De Leur (1958) e Maasland (1959), deduziram soluções para o caso do fluxo não permanente em direção aos drenos com elevação do nível do lençol freático. Essa solução se baseia numa recarga constante durante um período de tempo t (WESSELING, 1973; PIZARRO, 1978; CRUCIANI & BOTREL, 1986).

A equação não é utilizada para o cálculo rotineiro de espaçamentos entre drenos, entretanto, demonstra ser útil na previsão da máxima elevação do nível do lençol freático e sua posição, em função da recarga do solo e da descarga dos drenos, em sistemas de drenagem implantados.

Nessas condições, a elevação do nível do lençol freático no ponto médio entre drenos em qualquer instante " t " é calculada por:

$$h_t = \frac{4R}{\pi \cdot f} J \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{3} \left(1 - e^{-\frac{n^2 \cdot t}{J}} \right) \quad (9)$$

em que:

$$J = \frac{1}{\alpha} = \frac{f \cdot S^2}{\pi^2 \cdot Kd} \quad (10)$$

sendo:

R - recarga efetiva do solo (percolação), $L \cdot T^{-1}$;

h_t - elevação do lençol freático no fim do tempo t , L ;

J - coeficiente de armazenamento, T ;

S - espaçamento entre os drenos, L ;

t - tempo em que ocorre a recarga, T ;

Kd - transmissividade aparente, $L^2 \cdot T^{-1}$;

f - porosidade drenável, adimensional;

α - fator de reação ou intensidade de drenagem, T^{-1} .

DEBOER & CHU (1975), com base nas hipóteses de Dupuit-Forchheimer e conceitos introduzidos por Bouwer e Schilfgaard para solucionar problemas de rebaixamento do lençol freático, desenvolveram uma equação válida para drenos instalados alternadamente em duas profundidades, que permitisse prever o tempo de rebaixamento do lençol freático para uma dada situação de drenagem.

Dessa maneira, o tempo teoricamente necessário para rebaixar o lençol freático de uma posição h_o para h_t , pode ser estimada por:

$$\frac{1}{\sqrt{AB}} \ln \left[\frac{(1 + \sqrt{A/B \cdot h_o})(1 - \sqrt{A/B \cdot h_t})}{(1 - \sqrt{A/B \cdot h_o})(1 + \sqrt{A/B \cdot h_t})} \right]^{1/2} = -\frac{t}{c.f} \quad (11)$$

sendo:

$$A = \frac{4K}{S^2} \quad (12)$$

e

$$B = \frac{2K}{S^2} (D_1^2 + D_2^2) \quad (13)$$

A Figura 06 mostra os termos da equação de DEBOER & CHU.

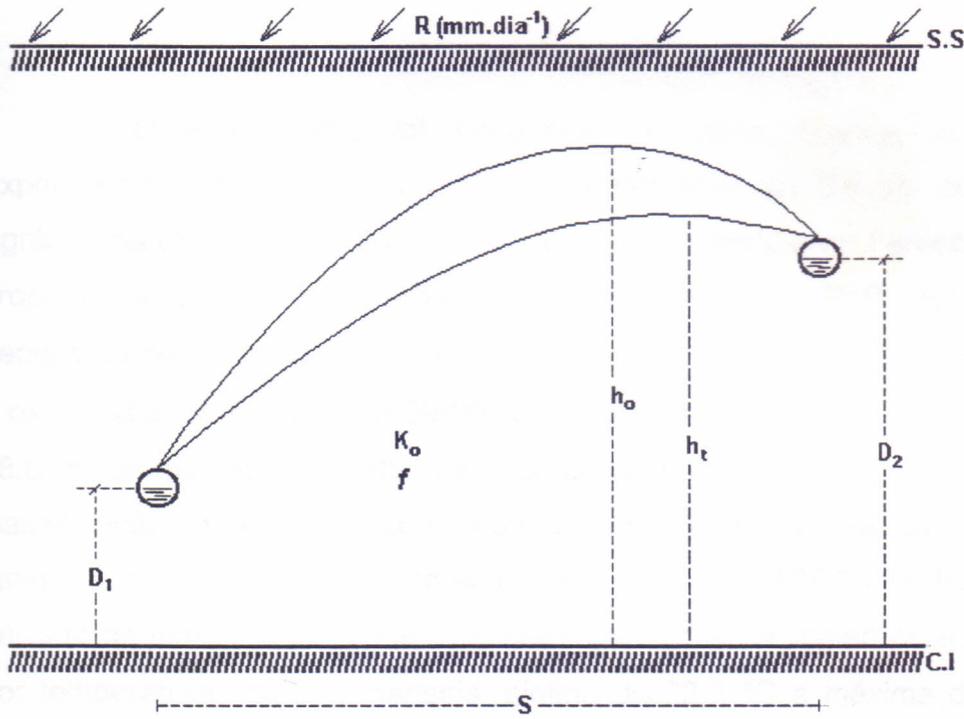


Figura 06 - Ilustração dos termos da equação de DEBOER & CHU.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da Área do Experimento

O experimento foi conduzido na área irrigada da Fazenda Experimental Vale do Curu (FEVC), pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, no município de Pentecoste-CE. A propriedade dista de Fortaleza aproximadamente 98,0 Km, estando geograficamente localizada entre os paralelos 3°35'00" e 4°00'00" latitude sul e os meridianos 39°15'00" e 39°30'00" a oeste de Greenwich, com altitude de 78,0 m acima do nível do mar. O clima da região, de acordo com a classificação de Köeppen, corresponde ao tipo Aw', ou seja, clima quente e úmido, com precipitação pluviométrica média anual de 805,6 mm distribuída no período de janeiro a julho. As condições climáticas da região caracterizam-se por temperaturas médias mensais mínima de 22,3 °C e máxima de 33,0 °C, umidade relativa média mensal de 74,2% e demanda evaporativa média de 120,7 mm.mês⁻¹. O Quadro 01 contém os dados climáticos médios da Estação Agrometeorológica da FEVC para um período de 25 anos (BOLETIM AGROMETEOROLÓGICO).

No planejamento agrícola da fazenda, a área onde foi instalado o experimento, com extensão aproximada de 1,5 ha, recebe a denominação de D-S₂, sendo constituída de sedimentos aluvionais de deposição recente e conforme critérios de classificação adotados pela Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo do Ministério da Agricultura, com modificações posteriores de acordo com o novo sistema americano de classificação - 7ª aproximação (U.S.D.A., 1967; U.S.D.A., 1970), como solo aluvial Vértico (Vertic Torrifluent), com fendas de até 1,0 m de profundidade durante o período seco, horizonte A fraco, textura argilosa (COELHO, 1971).

Quadro 01 - Dados climáticos médios da Estação Agrometeorológica da FEVC no período de 1968 a 1992.

Elementos Meteorológicos	Meses											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura (°C)												
máxima	33,6	32,4	31,1	31,2	31,1	31,6	32,2	33,8	34,6	35,0	34,9	34,6
mínima	23,0	22,8	22,6	22,5	22,0	21,4	21,1	21,7	22,3	22,5	22,5	22,8
média	27,6	27,0	26,3	26,2	26,3	26,1	26,2	27,2	27,7	27,9	28,0	28,0
Umidade relativa (%)	73,1	79,0	86,3	86,4	83,0	77,9	72,6	66,2	64,6	66,1	66,9	68,4
Evaporação Piche (mm)	129,1	87,6	56,0	54,6	72,6	92,9	126,0	168,5	170,1	173,6	163,9	153,5
Insolação (h)	203,8	161,9	142,3	153,8	194,0	207,8	233,9	266,8	260,0	267,3	260,4	243,0
Vento (m.s ⁻¹)	3,9	3,4	2,2	2,2	2,3	2,6	3,2	3,9	4,6	4,6	4,5	4,3

O suprimento de água da fazenda é realizado através de um canal principal que conduz a água do açude General Sampaio, passando por uma barragem de derivação na Serrota, pertencentes ao Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS. A adução da água para o experimento é feita de um canal secundário que se ramifica do canal principal na área sistematizada da fazenda.

3.2. Sistema de drenagem subterrânea

Na área do experimento há um sistema de drenagem subterrânea, instalado em dois níveis de profundidades, constituído por sete linhas de drenos laterais, locadas em direção perpendicular ao canal secundário. O espaçamento entre drenos laterais é de 17,5 m e as profundidades médias de instalação, de 1,20 m e 0,70 m, em relação à superfície do solo. Já o comprimento das linhas de drenos é de 125,0 m e o gradiente de declividade médio de $0,003 \text{ m.m}^{-1}$ no sentido do dreno coletor. Os drenos laterais foram construídos com manilhas de barro, sem acoplamento, com diâmetro interno de 0,10 m, espessura da parede de 0,017 m e comprimento médio igual a 0,30 m, ficando assentados sobre uma camada de 0,10 m de seixo rolado e areia grossa lavada. Esse mesmo tipo de material foi utilizado ao redor da manilha como material filtrante. A Figura 07 mostra o croqui da área do experimento.

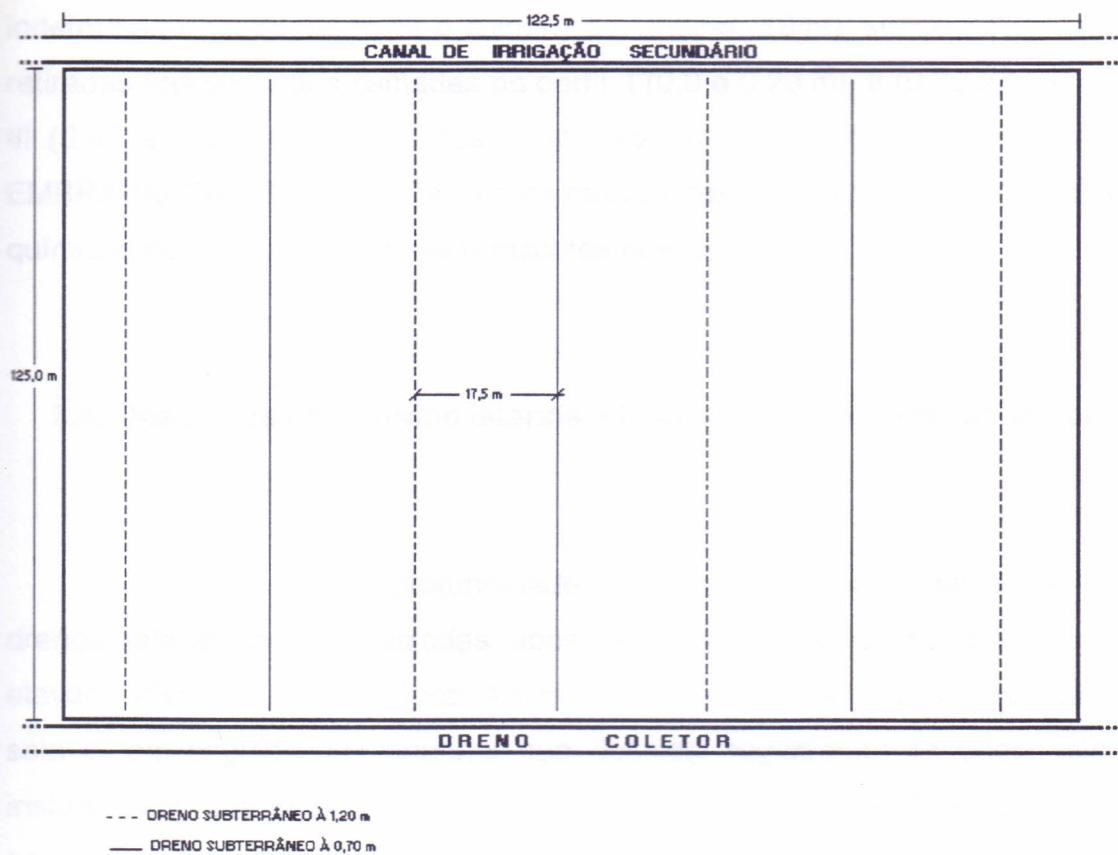


Figura 07 - Croqui da área do experimento.

3.3. Parâmetros físico-hídricos e químicos do solo

Tendo em vista a estimativa dos principais parâmetros físico-hídricos e químicos do solo de interesse para a pesquisa, foram coletadas amostras de solo com estrutura deformada e amostras com estrutura indeformada empregando-se o cilindro de Uhland (1949), sendo as amostras retiradas nas seguintes camadas do perfil: I (0,0 a 0,20 m), II (0,20 a 0,40 m) e III (0,40 a 0,60 m). As análises foram realizadas conforme metodologia da EMBRAPA/SNLCS (1979). Os valores médios dos parâmetros físico-hídricos e químicos do solo encontram-se transcritos nos Quadros 02 e 03.

3.4. Descargas dos drenos laterais e leituras dos poços de observação

As leituras da profundidade do lençol freático e descargas dos drenos laterais eram realizadas após recargas por irrigação. Procurou-se elevar o nível do lençol freático, a partir de sua saturação, até a superfície do solo e, em seguida, acompanhar sua descida, registrando os dados até o instante em que se observou uma estabilização do nível freático, o qual ocorreu após sessenta horas. Inicialmente, mediam-se as descargas dos drenos e, em seguida, efetuavam-se as leituras da profundidade do lençol freático, junto aos poços de observação. Os dados eram registrados e tabulados em formulário próprio, conforme os anexos 01 e 02. As descargas dos drenos laterais eram medidas por meio de cronômetro e recipiente de volume conhecido, ao passo que a profundidade do lençol freático era detectada por meio de uma haste de alumínio flutuante com escala métrica.

Quadro 02. Parâmetros físico-hídricos do solo da área do experimento¹.

Camada	Análise Granulométrica			Classe Textural	Argila Natural	Grau de Floculação
	Areia	Silte	Argila			
(m) (%) (%)		
I(0,00 a 0,20)	21,00	50,50	28,50	Franco siltoso	25,50	10,53
II (0,20 a 0,40)	18,50	49,00	32,50	F. argilo-siltoso	29,00	10,80
III (0,40 a 0,60)	17,50	48,00	34,50	F. argilo-siltoso	32,00	7,25

Massa Específica Global	Massa Específica Real	Porosidade		
		VTP*	PLA*	PLW*
..... (Kg.m ⁻³ .10 ³) (%)		
1,44	2,52	42,86	31,80	11,06
1,59	2,51	36,65	32,40	4,25
1,60	2,51	36,25	32,30	3,95

(*) VTP= volume total de poros; PLA= porosidade livre de ar; PLW= porosidade livre de água ou porosidade drenável.

¹ Análises realizadas no Laboratório de Física de Solos do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas do CCA/UFC.

Quadro 03. Parâmetros químicos do solo da área do experimento².

Camada	pH em água	CE	PST
(m)		(dS.m ⁻¹)	(%)
I (0,00 a 0,20)	7,00	2,17	7,90
II (0,20 a 0,40)	6,90	2,80	8,00
III (0,40 a 0,60)	6,90	3,27	8,30

C	N	C/N	M.O.	P
(%)	(%)		(%)	(ppm)
0,74	0,04	18,50	1,29	6,50
0,45	0,03	15,00	0,78	8,00
0,39	0,03	13,00	0,68	10,50

Complexo sortivo							V*
Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	S*	H ⁺	CTC*	
(mE/100 g de solo)							(%)
13,20	5,00	1,68	0,33	20,21	1,00	21,21	95,29
13,40	5,05	1,68	0,28	20,41	0,70	21,11	96,68
13,30	4,85	1,72	0,28	20,15	0,60	20,75	97,11

(*) S= soma de bases trocáveis; CTC= capacidade de troca de cátions; V= valor de saturação de bases trocáveis.

² Análises realizadas no Laboratório de Física de Solos do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas do CCA/UFC.

3.5. Medida da condutividade hidráulica do solo saturado pelo método do poço

No decorrer do experimento, realizaram-se testes de condutividade hidráulica do solo saturado (K_o), utilizando-se o método do poço ou trado, cuja metodologia descrita por VAN BEERS (1970) e MILLAR (1988), consiste em perfurar um poço com trado até uma profundidade maior que o lençol freático e, tão logo o lençol esteja estabilizado, extrai-se parte da água e cronometra-se o tempo de recuperação do nível freático. A medida de K_o é dada pela velocidade com que a água se recupera dentro do poço. Os testes foram realizados em poços não revestidos, num total de trinta e seis testes, com duas repetições cada, a intervalos de 24 horas. A Figura 08 mostra a distribuição espacial dos locais dos testes na área do experimento.

No cálculo de K_o , utilizou-se a metodologia proposta por Ernst³, citada por CRUCIANI (1989), condição em que o fundo do poço ultrapassa o nível freático mas não atinge a camada de impedimento. Nessa situação, a geometria ideal deve ser tal que a distância entre o fundo do poço e a camada de impedimento é maior que a metade da distância entre o nível freático e o fundo do poço, conforme a expressão:

$$K_o = \frac{4000}{\left(\frac{H}{r} + 20\right)\left(2 - \frac{Y}{H}\right)} \cdot \frac{r \cdot \Delta Y}{Y \cdot \Delta t} \quad (14)$$

³ ERNST, L.F. A new formula for the calculation of the permeability factor with the auger hole method. T.N.O. Groningen (traduzido do holandês por H. Bouwer, Ítaca, New York, Cornell University), 1950.

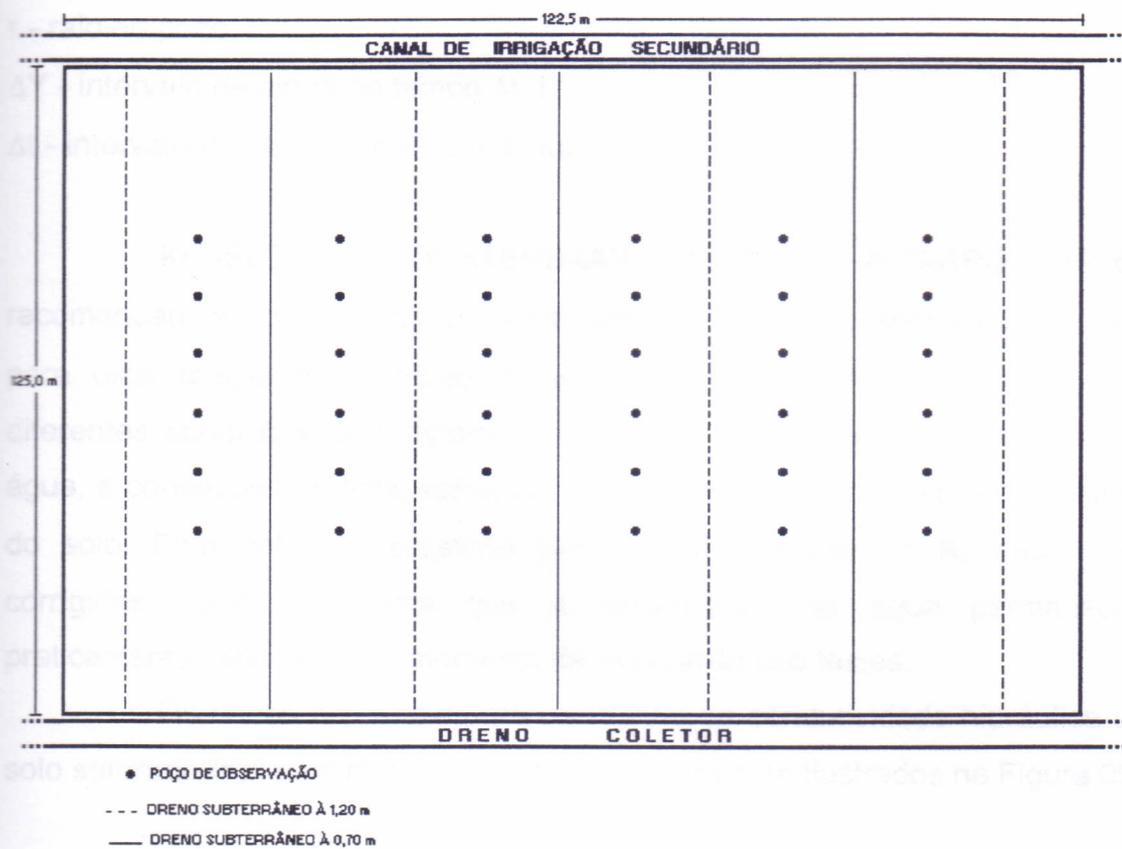


Figura 08 - Croqui da área do experimento ilustrando o local dos testes.

sendo:

K_0 - condutividade hidráulica do solo saturado, $L.T^{-1}$;

H - profundidade do poço, abaixo do nível freático, L;

Y - distância entre o nível freático e o ponto médio dos níveis de água no intervalo de tempo Δt , L;

r - raio do poço, L;

ΔY - intervalo de altura no tempo Δt , L;

Δt - intervalo de tempo entre duas leituras, T.

KESSLER & OOSTERBAAN (1973) e PIZARRO (1978), recomendam a correção da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) para uma temperatura padrão correspondente a 20 °C, visto que, para diferentes condições de temperatura, ocorrem alterações na viscosidade da água, e conseqüentemente, variações nos valores da condutividade hidráulica do solo. Entretanto, na presente pesquisa, os valores de K_0 não foram corrigidos, tendo em vista que a temperatura da água permaneceu praticamente inalterada, no momento da realização dos testes.

Os dados de campo para estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) pelo método do poço, encontram-se ilustrados na Figura 09.

3.6. Análise de parâmetros químicos do solo e da água

Com o propósito de analisar a evolução dos principais parâmetros químicos do solo e da água, foram coletadas amostras no início do experimento. As amostras de água são constituídas por água de irrigação, água dos poços de observação e água proveniente das descargas dos drenos laterais.

O monitoramento para fins desta análise, inicia-se com os resultados obtidos por COSTA (1988), em pesquisa visando a recuperação do solo da presente área experimental.

Na análise qualitativa de água, utilizaram-se os critérios para diagnóstico e classificação recomendadas por RICHARDS (1954).

3.7. Análise de desempenho do sistema de drenagem subterrânea

O procedimento para análise de desempenho do sistema de drenagem subterrânea consistiu no cálculo de parâmetros de drenagem, desempenho hidráulico de drenos laterais, rede de fluxo e comparação entre espaçamento de campo e obtidos por equações de fluxo não permanente.

Os drenos laterais instalados à 1,20 m de profundidade permaneceram submersos no decorrer dos testes, justificando, portanto, a razão da instalação de drenos laterais intercalados à profundidade de 0,70 m. Embora o nível de submersão tenha limitado a coleta de dados, o mesmo não veio a provocar recarga do lençol freático, conforme pôde-se observar através das leituras nos poços de observação. Dentre os drenos laterais instalados a 0,70 m de profundidade, concentrou-se a coleta de dados no dreno intermediário **D₄**, localizado no centro da área do experimento.

3.7.1. Parâmetros de drenagem

O sistema de drenagem subterrânea foi avaliado através de dados correspondentes de medidas simultâneas de cargas hidráulicas e descargas de drenos laterais, em função do tempo, e analisados gráfica e analiticamente para as condições de fluxo permanente e fluxo não permanente. Tais informações, proporcionaram estimativas do fator de intensidade de drenagem, condutividade hidráulica do solo saturado, transmissividade e porosidade drenável, conforme metodologia sugerida por DIELEMAN & TRAFFORD (1976).

3.7.2. Desempenho hidráulico

Na avaliação de desempenho hidráulico de drenos laterais foram utilizados os valores da carga hidráulica de entrada ($h_{ent.}$), carga hidráulica total ($h_{tot.}$) e resistência de entrada ($r_{ent.}$), conforme sugerem DIELEMAN & TRAFFORD (1976). As cargas hidráulicas de entrada e total, foram medidas a partir dos níveis d'água observados nos poços de observação e da profundidade dos drenos em relação ao nível do solo. A resistência de entrada foi calculada através da seguinte relação:

$$r_{ent.} = \frac{h_{ent.}}{Q \cdot C^{-1}} \quad (15)$$

sendo:

r_{ent} - resistência de entrada, $L^{-1}.T$;

h_{ent} - carga hidráulica de entrada, L;

Q - descarga do dreno lateral, $L^3.T^{-1}$;

C - comprimento do dreno lateral, L.

Para obtenção dos valores das cargas hidráulicas, instalaram-se 41 poços de observação dispostos em fileira única (Figura 10). Os poços foram perfurados numa profundidade variável, com trado tipo holandês, de 0,102 m de diâmetro. Na instalação utilizaram-se tubos de PVC rígido de 0,075 m de diâmetro, com orifícios de 0,002 m de diâmetro, para facilitar a entrada d'água. Para evitar obstruções nos orifícios, utilizou-se uma tela sintética em volta dos tubos. Após instalados, os poços ficaram com um comprimento uniforme de 0,30 m acima da superfície do solo, ancorados com uma base de cimento, com cota topográfica fixada para servir de referência de nível do lençol freático.

Os poços de observação localizados sobre a linha de drenos, tinham por finalidade medir a carga hidráulica sobre os mesmos; já os poços instalados a 0,30 m da linha de drenos tinham como objetivo medir a carga hidráulica de entrada. Por outro lado, nos poços localizados no espaço médio entre drenos, mediam-se as cargas hidráulicas totais.

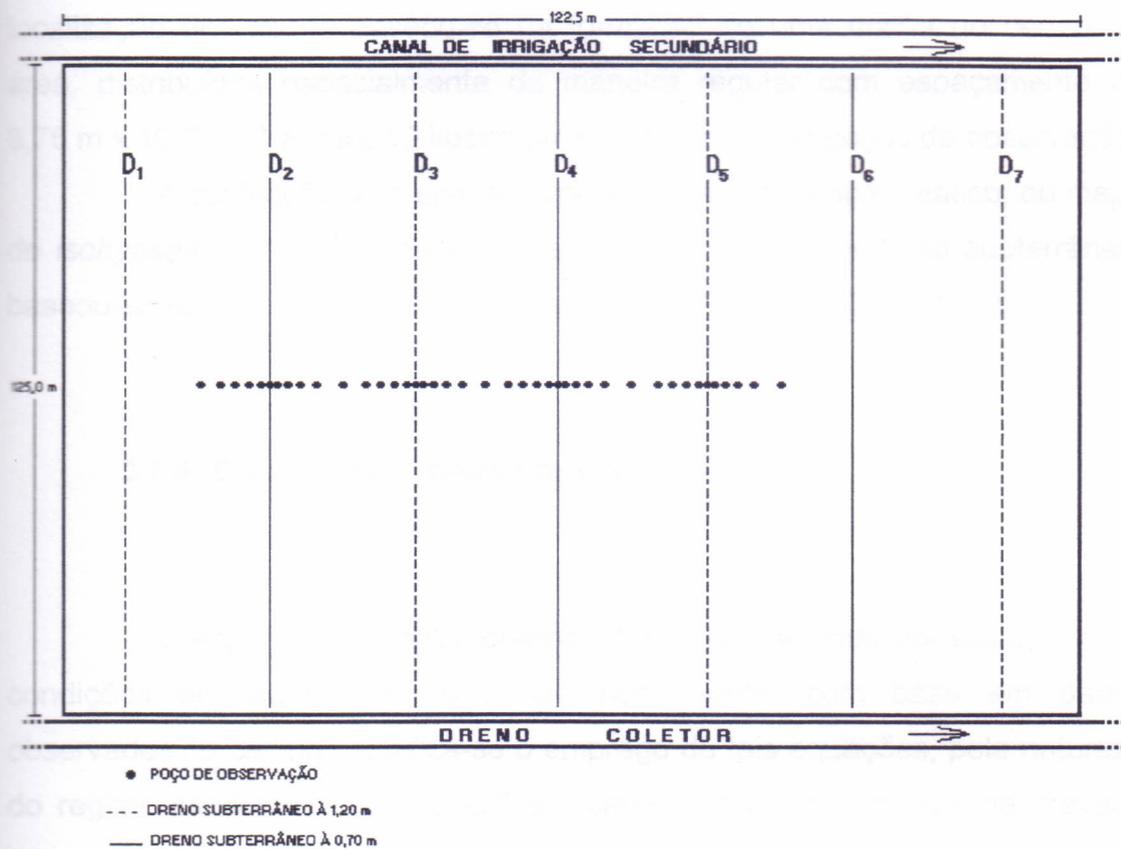


Figura 10 - Croqui da área do experimento ilustrando a distribuição dos poços de observação.

3.7.3. Rede de fluxo subterrânea

Com o objetivo de se obterem dados do lençol freático, para fins de confecção de uma rede de fluxo subterrânea, foram instalados 66 poços de observação na área do experimento, conforme mostra a Figura 11. A localização dos poços baseou-se na formação de uma malha no centro da área, distribuídos espacialmente de maneira regular com espaçamento de 8,75 m x 10,0 m. A Figura 12 ilustra uma visão geral dos poços de observação.

A confecção do mapa de curvas de nível do lençol freático, ou mapa de *isohypsas*, com a finalidade de caracterizar a rede de fluxo subterrânea, baseou-se no procedimento descrito por CRUCIANI & GODOY (1980).

3.7.4. Espaçamento entre drenos laterais

O espaçamento entre drenos laterais foi estimado por equações em condições de regime de fluxo não permanente, com base em dados observados no campo. Justifica-se o emprego de tais equações, pela natureza do regime pluviométrico no Brasil ser caracterizado por chuvas de elevada intensidade, bem como porque, sob regime de irrigação, o lençol freático sofre contínuas oscilações entre irrigações. Na estimativa utilizaram-se dados de cargas hidráulicas totais para um período de 51 horas, correspondente ao intervalo entre o início e final dos testes.

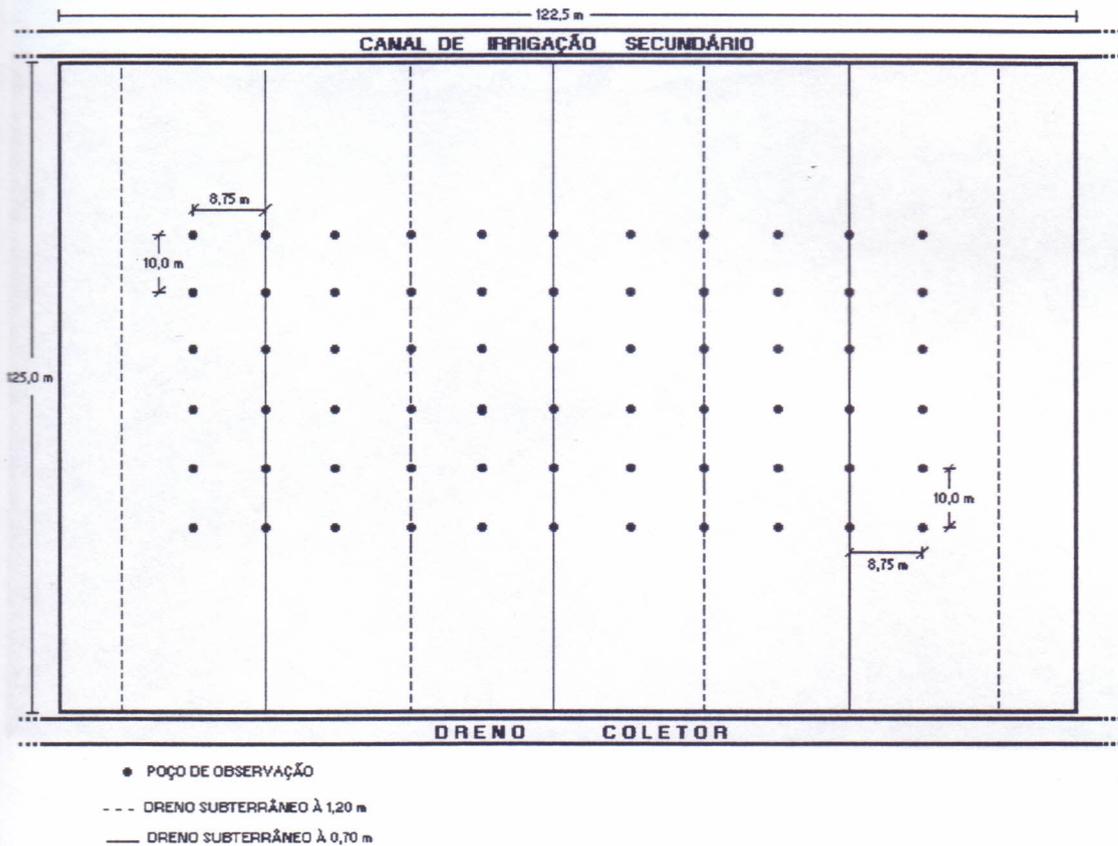


Figura 11 - Croqui da área do experimento ilustrando a distribuição espacial dos poços de observação para confecção da rede de fluxo.



Figura 12 - Vista geral dos poços de observação.

Dentre as diversas equações que expressam a teoria de fluxo não permanente na estimativa do espaçamento entre drenos laterais, utilizaram-se as equações de Glover-Dumm e Boussinesq-Schilfgaard, em razão de seu uso generalizado na literatura, face à boa consistência, além da equação de Deboer-Chu, por sua especificidade à geometria de drenos em duplo nível. Na estimativa do espaçamento entre drenos em condições de duplo nível, utilizou-se de uma rotina de programa computacional codificado em linguagem Pascal, conforme listagem no anexo 03. Os valores de cargas hidráulicas foram obtidos em poços de observação localizados às distâncias de 5,0 m (h_o) e 3,0 m (h_t) do dreno mais superficial. A eficiência das respectivas equações foi estimada por meio da expressão do desvio ou erro relativo, em que:

$$E_r = \frac{S_e - S}{S} \quad (16)$$

sendo:

E_r - erro relativo, adimensional;

S_e - espaçamento estimado pela equação, L;

S - espaçamento real de campo, L.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise evolutiva dos parâmetros do solo e da água

O resultado analítico dos parâmetros físico-hídricos do solo apresentados no Quadro 02, mostram que a textura do solo varia de franco siltoso na camada I (0,00 a 0,20 m) a franco argilo-siltoso nas camadas II (0,20 a 0,40 m) e III (0,40 a 0,60 m). Verifica-se ainda, que a fração silte diminui gradualmente na profundidade do perfil do solo, concomitante ao aumento da fração argila e argila natural. O grau de flocculação das partículas na camada III, apresenta um valor menor do que nas camadas superiores. O aumento da massa específica global, verificada com a profundidade do perfil, é acompanhada com o decréscimo da porosidade total.

Com relação aos parâmetros hídricos, observa-se que a retenção de água nas camadas II e III são aproximadamente iguais, com um pequeno decréscimo na camada superior, o que pode estar relacionado à textura do solo, já que as camadas subsuperficiais apresentam maiores teores de argila. O valor da porosidade drenável decresce na profundidade do perfil do solo, sendo que na camada I apresenta-se 2,5 vezes maior que as camadas subjacentes. Observa-se ainda, que a porosidade drenável nas camadas II e III varia com a massa específica global, pois, para uma mesma classe textural, quanto maior a massa específica global, menor será a quantidade de vazios (KIEHL, 1979).

A análise dos parâmetros químicos do solo, ilustrada no Quadro 03, indicam através dos valores do pH, reação neutra na camada I a ligeiramente ácida nas camadas II e III. A relação C/N decresce na profundidade do perfil do solo, da mesma maneira que o teor de matéria orgânica (M.O). A incorporação da massa vegetal durante o preparo do solo para instalação do

experimento, pode ter levado à esses resultados e, inclusive, influenciado na massa específica global anteriormente analisada.

No complexo sortivo do solo, o cálcio e o magnésio, independentemente da profundidade no perfil do solo, são os cátions trocáveis prevaletentes e principais responsáveis pelo alto valor de saturação de bases trocáveis (V). O íon cálcio constitui aproximadamente 66% do total de bases trocáveis, enquanto o íon potássio encontra-se em concentrações reduzidas, conforme pode-se observar através da Figura 13. A concentração do íon hidrogênio encontra-se baixa e decrescente com a profundidade no perfil; sua presença deve-se provavelmente à dissociação do H^+ da matéria orgânica a ela ligada por covalência (KIEHL, 1979).

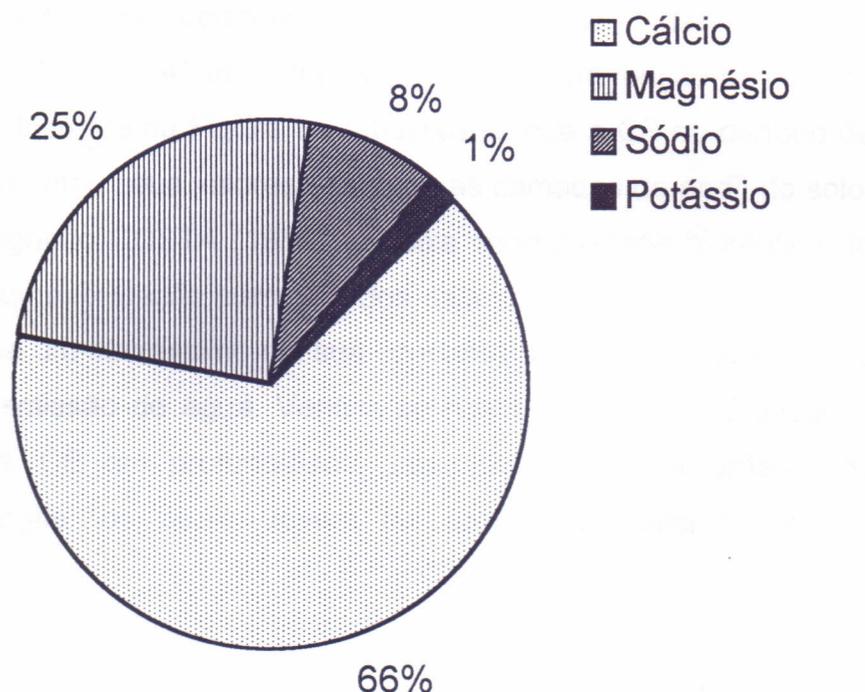


Figura 13 - Proporção de íons no valor de saturação de bases trocáveis.

No Quadro 04 são apresentados, de forma resumida, os valores dos parâmetros químicos e hídricos do solo, obtidos na presente pesquisa, e os resultados experimentais encontrados por COSTA (1988), com a finalidade de avaliar as possíveis mudanças ocorridas no perfil do solo durante o período de 1986 a 1995.

Na condução da pesquisa, COSTA (1988) realizou práticas de rotação de culturas, adubação verde, aplicação de melhoradores químicos (gesso) e tratamentos mecânicos, como técnicas para reduzir os efeitos da sodicidade no solo, para o que realizou amostragens do solo no início (1986) e ao final (1987) do experimento. Após o experimento, a área passou a ser cultivada esporadicamente, recebendo a incorporação dos restos vegetais na ocasião do preparo do solo. As respostas podem ser observadas nas alterações dos parâmetros analisados, como a redução do pH em todas as camadas do perfil do solo, acompanhada da elevação da condutividade elétrica (CE), pois, geralmente, à medida em que aumenta a concentração de sal, decresce o pH (PIZARRO, 1978).

A evolução da condutividade elétrica (CE) nas camadas I (0,00 a 0,20 m), II (0,20 a 0,40 m) e III (0,40 a 0,60 m), em função do período de amostragem, é ilustrada na Figura 14. Observa-se que a CE no período de 1986 a 1987 incrementou seus valores em todas as camadas do perfil do solo. Nesse período, segundo COSTA (1988), a baixa condutividade hidráulica do solo não permitiu uma lixiviação completa dos sais solúveis; já no período de 1987 a 1995, houve um decréscimo em sua concentração, face à melhoria nas condições de transmissão de água. Verifica-se nos três períodos analisados um incremento de CE em profundidade, seguindo a mesma ordem nos percentuais de argila, os quais devem ter contribuído para o referido comportamento.

Quadro 04. Parâmetros químico-hídricos do solo.

Período	Camada	CE	PST	pH	CTC	K _o
	(m)	(dS.m ⁻¹)	(%)		(mE/100 g solo)	(m.dia ⁻¹)
86	I (0,00 a 0,20)	1,12	6,71	7,40	19,07	0,0085
	II (0,20 a 0,40)	1,35	25,76	7,50	24,07	
	III (0,40 a 0,60)	1,84	36,56	7,70	23,14	
87	I (0,00 a 0,20)	2,50	6,60	7,10	22,00	0,28
	II (0,20 a 0,40)	2,90	19,30	7,10	26,90	
	III (0,40 a 0,60)	3,80	29,50	7,10	27,90	
95	I (0,00 a 0,20)	2,17	7,90	7,00	21,21	0,25
	II (0,20 a 0,40)	2,80	8,00	6,90	21,11	
	III (0,40 a 0,60)	3,27	8,30	6,90	20,75	

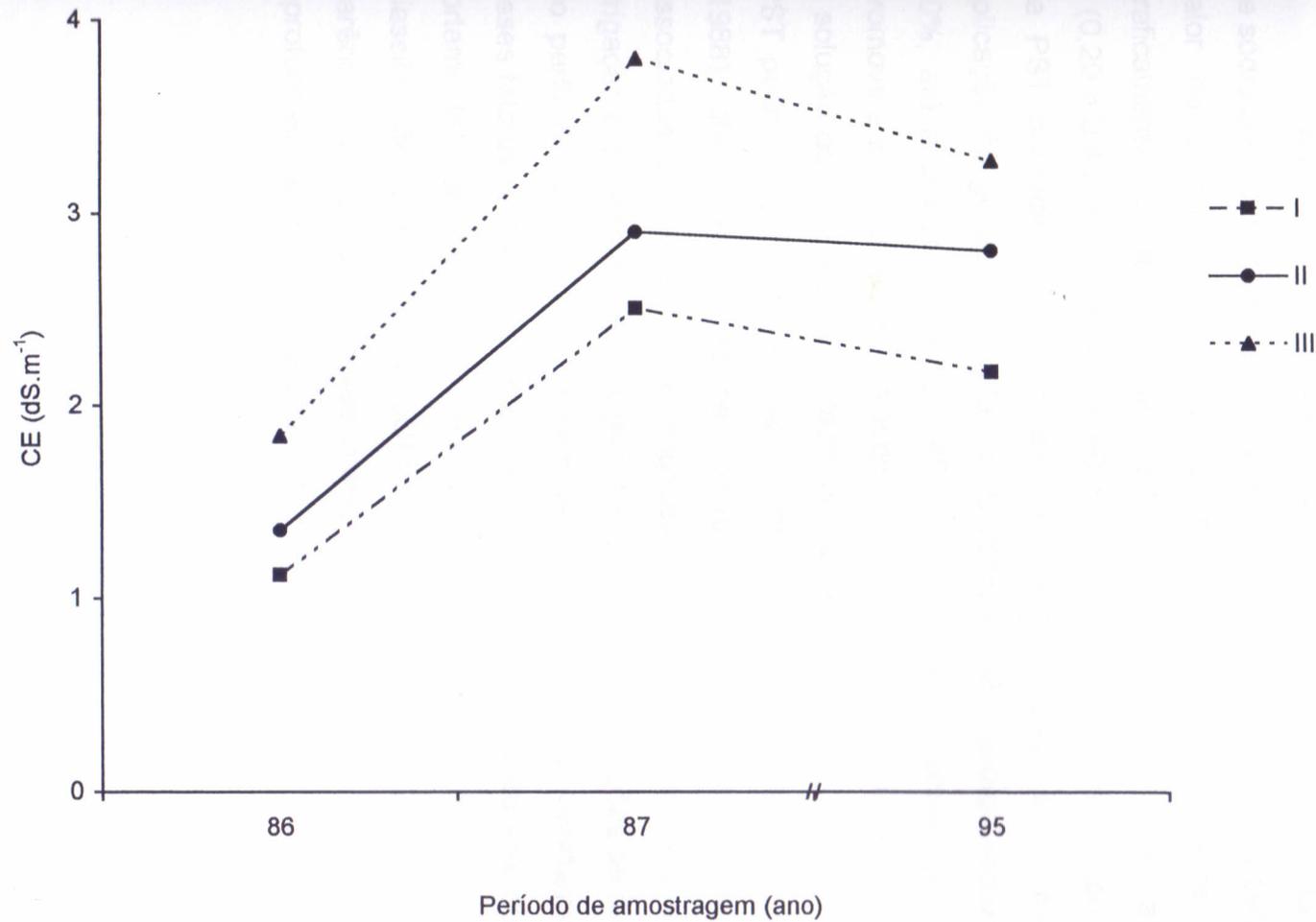


Figura 14 - Variação da CE nas camadas I, II e III do solo em função do período de amostragem.

Quanto ao aspecto do movimento da água no perfil do solo, verifica-se uma nítida variação no valor da condutividade hidráulica do solo saturado, da ordem de $0,0085 \text{ m.dia}^{-1}$ para $0,25 \text{ m.dia}^{-1}$, evidenciando uma melhoria nas características físicas do solo e, portanto, na drenabilidade do perfil do solo.

As análises informam ainda, que houve uma redução da quantidade de sódio adsorvido no complexo de troca do solo, indicado pelo decréscimo no valor da percentagem de sódio trocável (PST). A Figura 15 mostra graficamente a variação da PST nas camadas I (0,00 a 0,20 m), II (0,20 a 0,40 m) e III (0,40 a 0,60 m) do solo, ao longo do tempo. A redução da PST ocorrida no período de 1986 a 1987 pode estar relacionada à aplicação de gesso, realizada por COSTA (1988) visando reduzir a PST à 10%, até a profundidade de 0,45 m, pois o gesso, como fonte de cálcio, promove a substituição do íon sódio do complexo de troca e sua remoção para a solução do solo. Por outro lado, no período de 1987 a 1995 a redução da PST pode ser atribuída ao manejo integrado do solo realizado por COSTA (1988), além de práticas de cultivo efetuadas posteriormente na área, associadas às lavagens por irrigação e/ou chuva, qualidade da água de irrigação e o sistema de drenagem. A melhoria das condições de drenabilidade no perfil do solo, devem também ter favorecido tal comportamento. Todos esses fatores podem ter contribuído para a recuperação do solo que, de muito fortemente sódico passou a não sódico ($\text{PST} < 10\%$), conforme os critérios de classificação adotados por COELHO & FERREYRA (1986). Entretanto, a carência de informações nesse intervalo de tempo, dificulta uma análise mais aprofundada da evolução dos parâmetros.

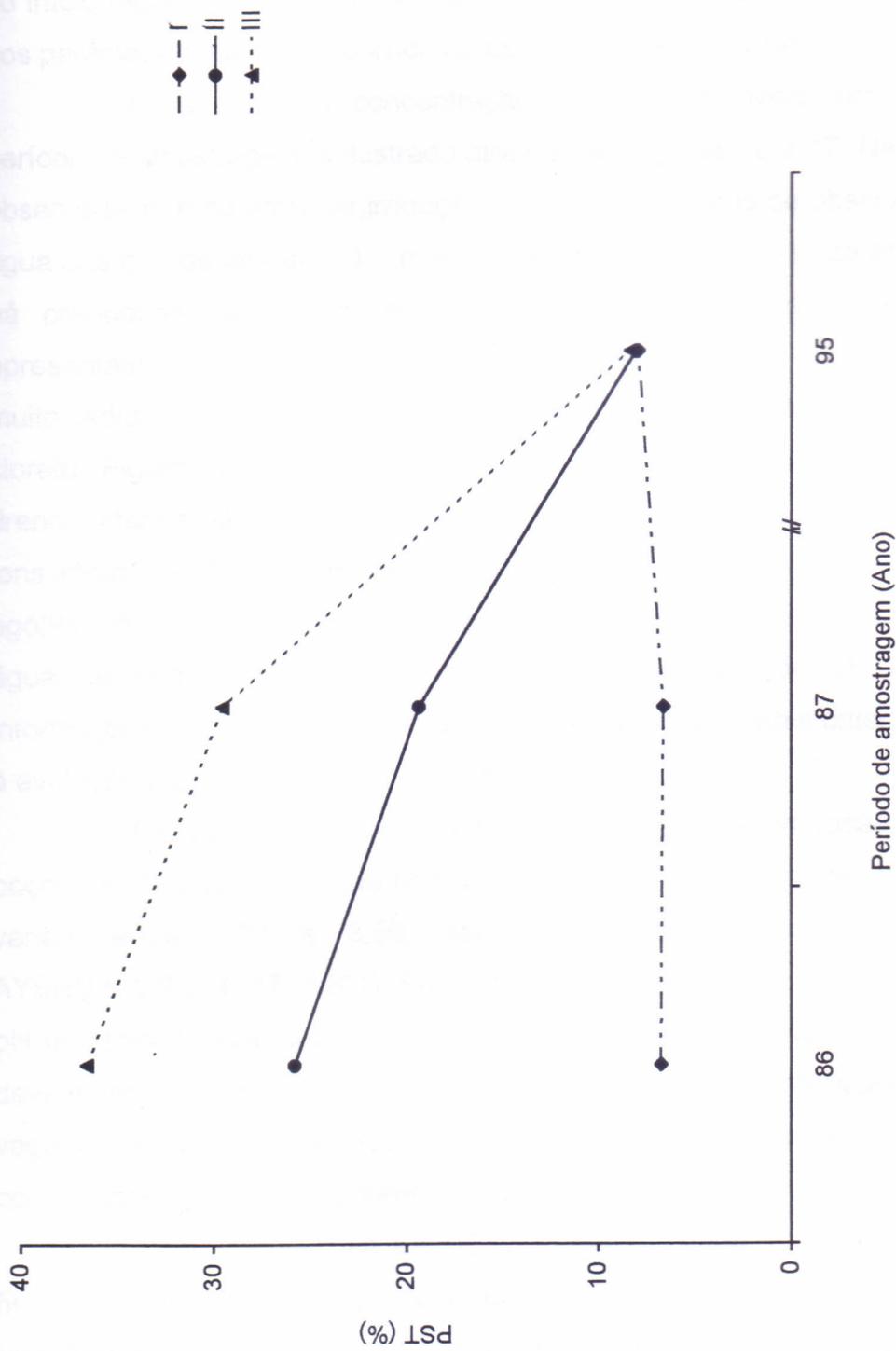


Figura 15 - Variação da PST nas camadas I, II e III do solo em função do período de amostragem.

Os resultados da análise química da água utilizada para irrigação, água dos poços de observação e água dos drenos laterais, provenientes das amostragens realizadas no início do experimento (ago/95), encontram-se no Quadro 05. São apresentados ainda, os resultados obtidos por COSTA (1988) no início (ago/87) e ao final (dez/87) do experimento, para avaliar a evolução dos parâmetros químicos ocorrida no período de 1987 a 1995.

A variação da concentração dos íons solúveis, em função do período de amostragem, é ilustrada através das Figuras 16 e 17. Na Figura 16, observa-se que na água de irrigação (I), água dos poços de observação (P) e água dos drenos laterais (D), independentemente do período de amostragem, há predominância do íon sódio, enquanto os íons cálcio e magnésio apresentam valores aproximados, e o íon potássio aparece em concentrações muito reduzidas em relação às anteriores. Dentre os ânions, predomina o íon cloreto (Figura 17). Constata-se ainda, que nos poços de observação (P) e drenos laterais (D), há uma tendência de incremento nas concentrações dos íons sódio, cálcio, magnésio e cloreto, principalmente no período de dez/87 a ago/95, ocorrido ao longo período de acúmulo desses sais, enquanto que na água de irrigação (I), praticamente não houve variação. A carência de informações no período supra citado limita uma análise mais criteriosa quanto à evolução dos parâmetros no perfil do solo.

Os valores de pH encontrados na água de irrigação, água dos poços de observação e água dos drenos laterais, no período de 1987 a 1995, variam entre 7,20 e 8,50, sendo considerados como normais por AYERS & WESTCOT (1991). Segundo Silva *apud* COSTA & GHEYI (1984), o pH tem importância fundamental, tendo em vista que águas de reação ácida devem ser evitadas, pois atuam diretamente sobre os tecidos mais tenros dos vegetais e também sobre o solo, dissolvendo os elementos nutritivos e contribuindo para seu empobrecimento prematuro.

Conforme COSTA & GHEYI (1984), o critério mais importante, para fins de diagnóstico e classificação da qualidade da água, é a concentração total de sais solúveis, expressos pelos valores da condutividade elétrica (CE).

Quadro 05. Parâmetros químicos da água de irrigação, água dos poços de observação e água dos drenos laterais.

Período	CE (dS.m ⁻¹)	Íons solúveis (meq.litro ⁻¹)						pH	RAS	Classe
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻			
<u>Água de Irrigação</u>										
ago/87	0,76	2,00	1,90	3,92	0,15	4,20	2,40	8,50	2,80	C ₃ S ₁
dez/87	0,83	2,00	2,20	4,00	0,18	5,00	2,00	7,80	2,76	C ₃ S ₁
ago/95	0,74	1,80	2,20	2,86	0,27	4,60	2,44	8,10	2,02	C ₂ S ₁
<u>Poços de observação</u>										
ago/87	0,96	2,40	1,70	5,82	0,10	4,50	2,50	8,00	4,06	C ₃ S ₁
dez/87	1,94	2,30	1,80	15,40	0,12	10,00	6,40	7,20	10,80	C ₃ S ₂
ago/95	3,27	3,10	5,40	23,84	0,05	27,20	4,92	8,10	11,56	C ₄ S ₃
<u>Drenos laterais</u>										
ago/87	1,62	3,00	2,10	11,04	0,12	8,90	4,10	8,00	6,90	C ₃ S ₂
dez/87	1,40	4,10	2,80	6,95	0,13	6,80	2,60	7,40	3,70	C ₃ S ₁
ago/95	4,35	7,10	8,70	27,45	0,11	36,80	6,96	8,20	9,77	C ₄ S ₃

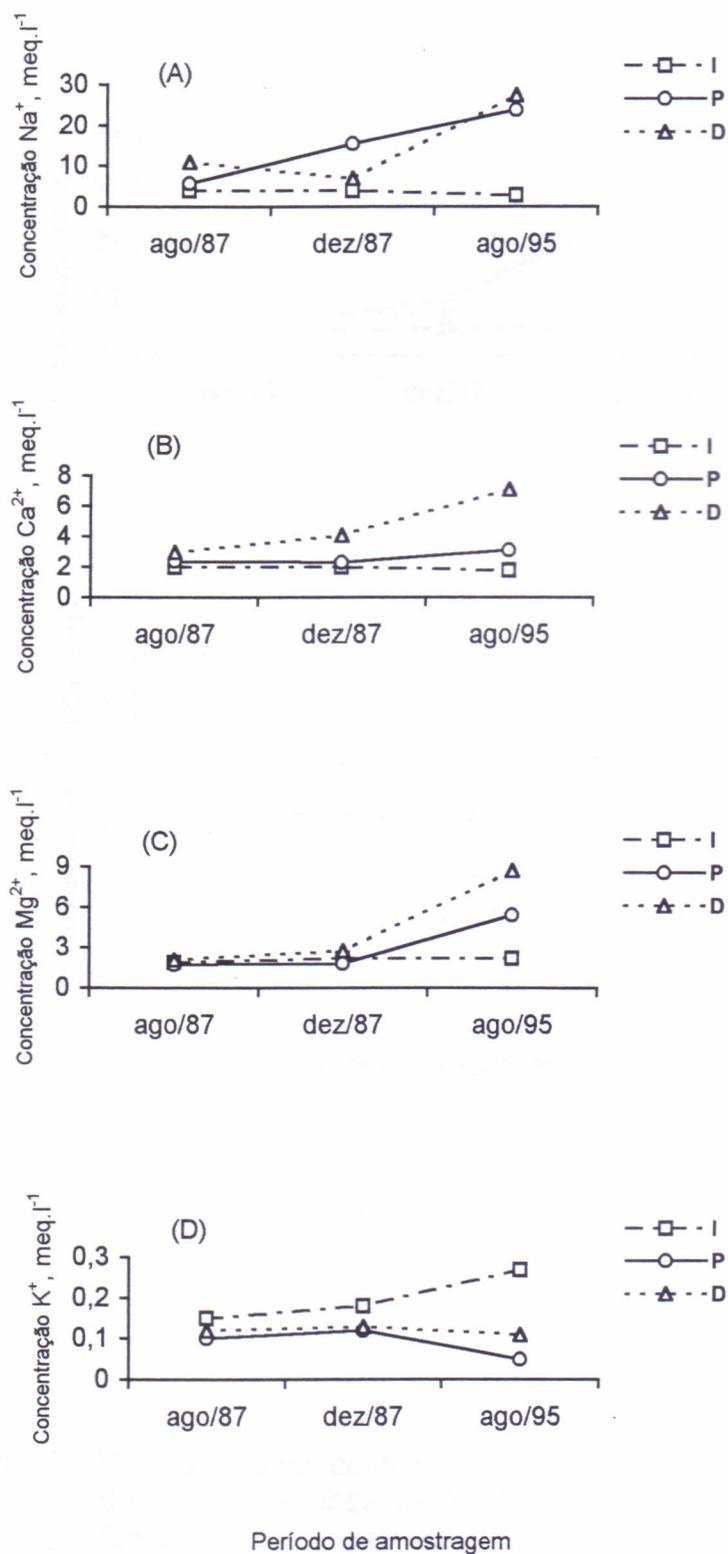


Figura 16 - Variação da concentração de cátions na água de irrigação (I), água dos poços de observação (P) e água dos drenos laterais (D), em função do período de amostragem: (A) sódio, (B) cálcio, (C) magnésio, (D) potássio.

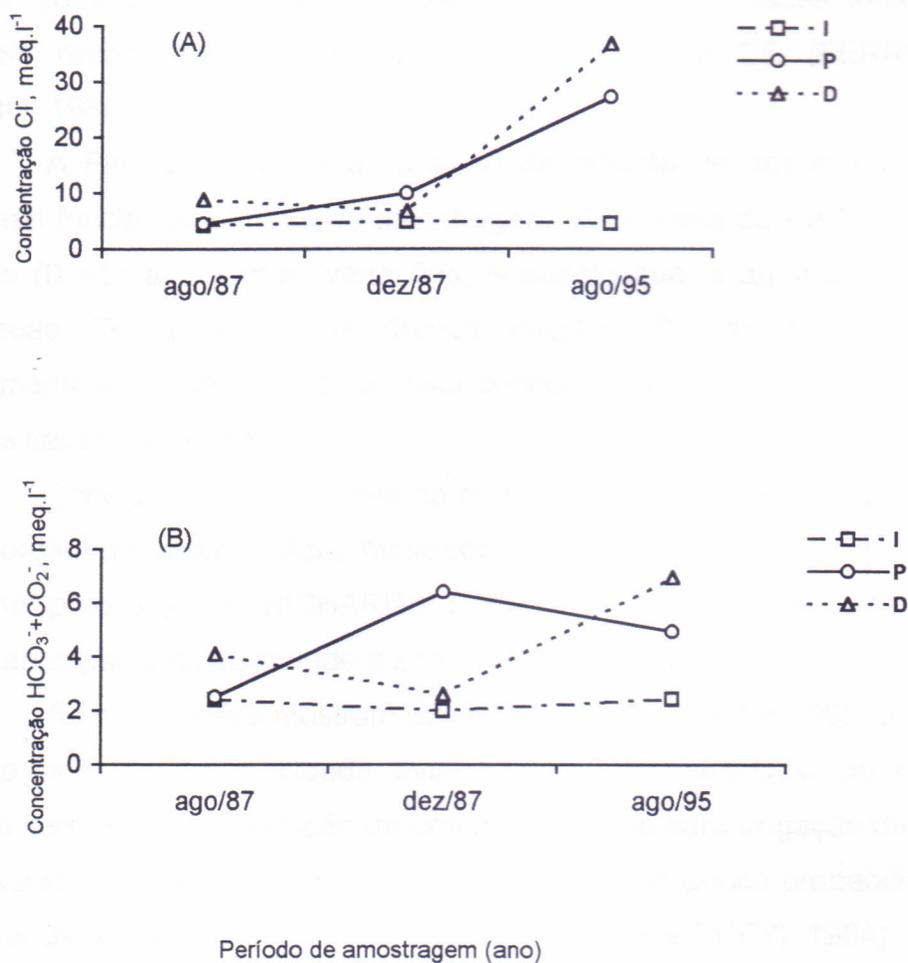


Figura 17 - Variação da concentração de ânions da água de irrigação (I), água dos poços de observação (P) e água dos drenos laterais (D), em função do período de amostragem: (A) cloreto, (B) carbonato + bicarbonato.

A água de irrigação, água dos poços de observação e água dos drenos laterais apresentam uma variação nos valores da CE similar à variação das concentrações dos íons sódio e cloreto, haja visto, que esses íons são os principais responsáveis pelos valores atingidos pela CE (FERREIRA & COELHO, 1984).

A Figura 18 ilustra a variação da relação de adsorção de sódio (RAS), em função do período de amostragem. Os valores da RAS da água de irrigação (I) não apresentam variações, enquanto que, a água dos poços de observação (P) e água dos drenos laterais (D), apresentam valores relativamente altos, em virtude da maior concentração do íon sódio em relação aos íons cálcio e magnésio.

Considerando os valores da condutividade elétrica (CE) e a relação de adsorção de sódio (RAS), mostrados no Quadro 05, e adotando-se o diagrama proposto por RICHARDS (1954), as águas foram classificadas quanto ao aspecto da salinidade e sodicidade.

As informações mostram que no período de 1987 a 1995, a água de irrigação melhorou em qualidade, evoluindo de C_3S_1 para C_2S_1 , podendo ser utilizada sem nenhuma restrição de ordem qualitativa para irrigação da maioria das culturas e em quase todos os tipos de solos, com pouca probabilidade de ocasionar perigo de salinidade e sodicidade (COSTA & GHEYI, 1984).

Nas amostras extraídas dos poços de observação, pode-se observar uma nítida alteração nos índices de salinidade e, principalmente de sodicidade, que passou da classe C_3S_1 à C_4S_3 . Essa concentração pode ser atribuída, em parte, à lixiviação dos sais, como consequência da melhoria da condutividade hidráulica e drenagem interna do solo, permitindo o acúmulo de sais no lençol freático, principalmente dos íons sódio e cloreto, ao longo do tempo. Variação de concentração similar foi encontrada na água dos drenos laterais, sugerindo que os sais acumulados no lençol freático, estão sendo retirados pelo sistema de drenagem.

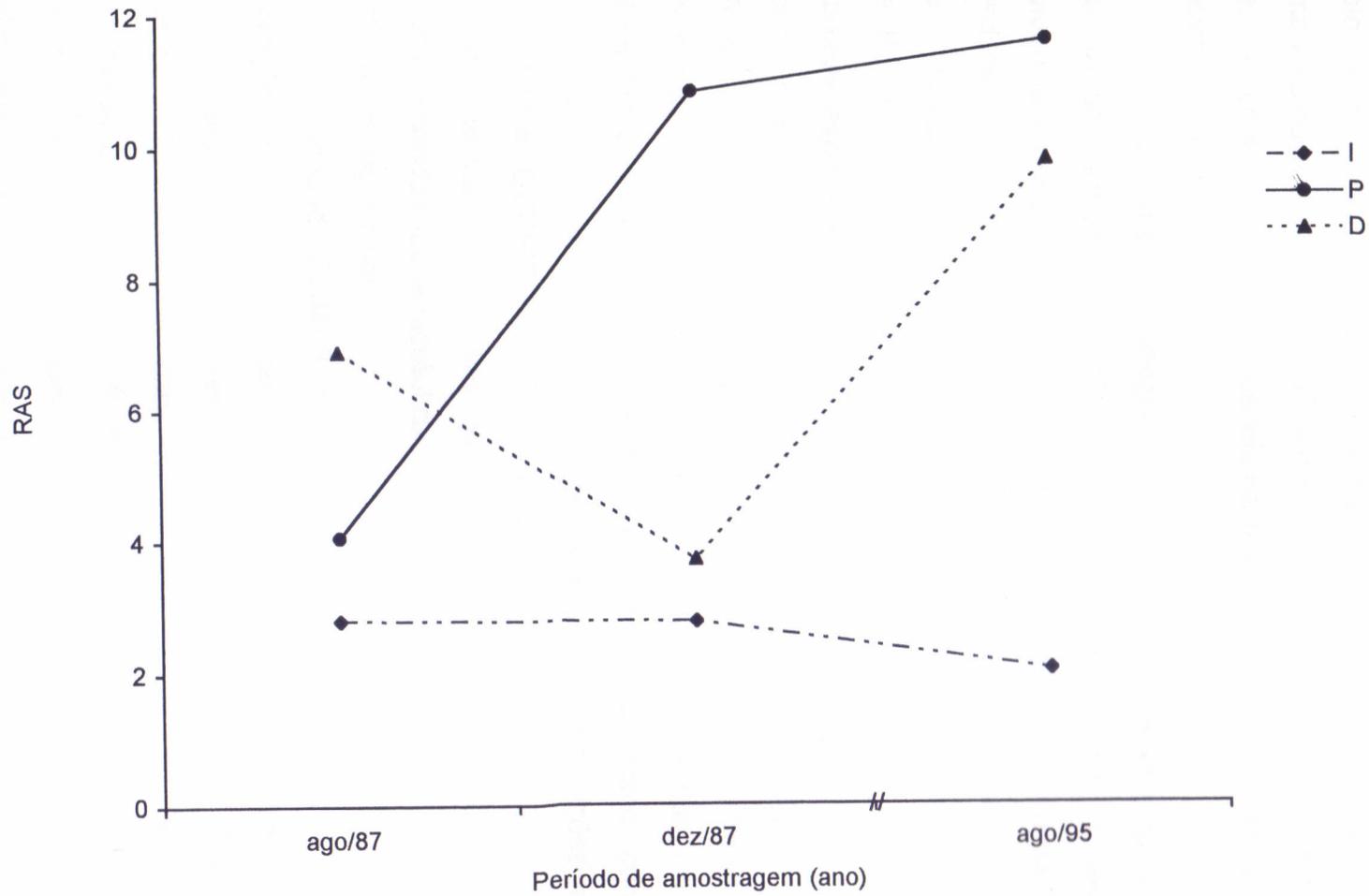


Figura 18 - Variação da RAS da água de irrigação (I), água dos poços de observação (P) e água dos drenos laterais (D), em função do período de amostragem.

4.2. Condutividade hidráulica do solo saturado pelo método do poço

A distribuição espacial dos valores da condutividade hidráulica do solo saturado (K_o) na área do experimento, ilustrada na Figura 19, expressa uma amplitude de 1.180% ($0,05 \text{ m.dia}^{-1}$ a $0,64 \text{ m.dia}^{-1}$). A partir desses dados, calcularam-se medidas de tendência central e medidas de dispersão, conforme mostra o Quadro 06.

Com base no histograma de frequência relativa (Figura 20) e nos valores de medidas de tendência central, verifica-se que os dados de K_o evidenciam ajustar-se a uma função de distribuição normal ou de Gauss. Em verdade, tal evidência pode ser constatada com base no teste não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov, ao nível de significância de 5%. Embora os dados de K_o tenham se mostrado normalmente distribuídos, essa não era uma hipótese esperada, tendo em vista a média aritmética, geralmente, não se constitui a melhor medida para representar o parâmetro. BOUWER & JACKSON (1974) recomendam a utilização do valor da média geométrica como medida representativa do parâmetro. Na maioria das vezes, dados referentes a parâmetros hidrodinâmicos do solo, tais como, condutividade hidráulica e porosidade drenável, se ajustam a distribuições estatísticas assimétricas. QUEIROZ (1995) em estudos de parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea, para fins de drenagem subterrânea, observou que os dados de condutividade hidráulica do solo saturado se ajustaram ao modelo de distribuição log-normal.

Segundo GOMES (1990), tendo em vista os ensaios agrícolas em condições de campo, os coeficientes de variação podem ser considerados como baixos, quando inferiores a 10%; médios, quando de 10 a 20%; altos, quando de 20 a 30%; muito altos, quando superiores a 30%. Dessa maneira, o coeficiente de variação de 48,3% para os dados de K_o indicam elevada variabilidade. Tal variabilidade pode ser explicada em razão da grande heterogeneidade existente na textura e estrutura dos solos aluviais, pela ação

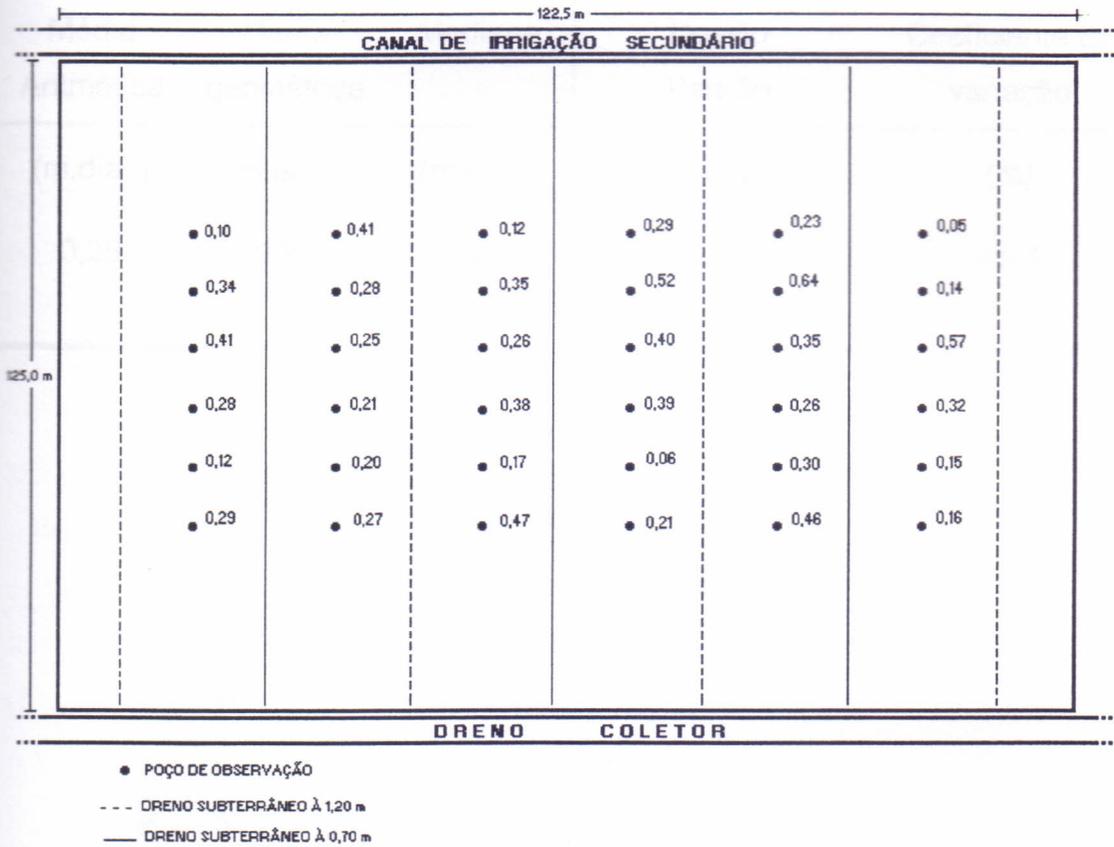


Figura 19 - Distribuição espacial dos valores da condutividade hidráulica do solo saturado (m.dia^{-1}) na área do experimento.

Quadro 06. Medidas de tendência central e de dispersão de K_o na área do experimento.

Medidas de tendência central			Medidas de dispersão	
Média Aritmética	Média geométrica	Mediana	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
(m.dia ⁻¹)	(m.dia ⁻¹)	(m.dia ⁻¹)	(m.dia ⁻¹)	(%)
0,29	0,25	0,28	0,14	48,3

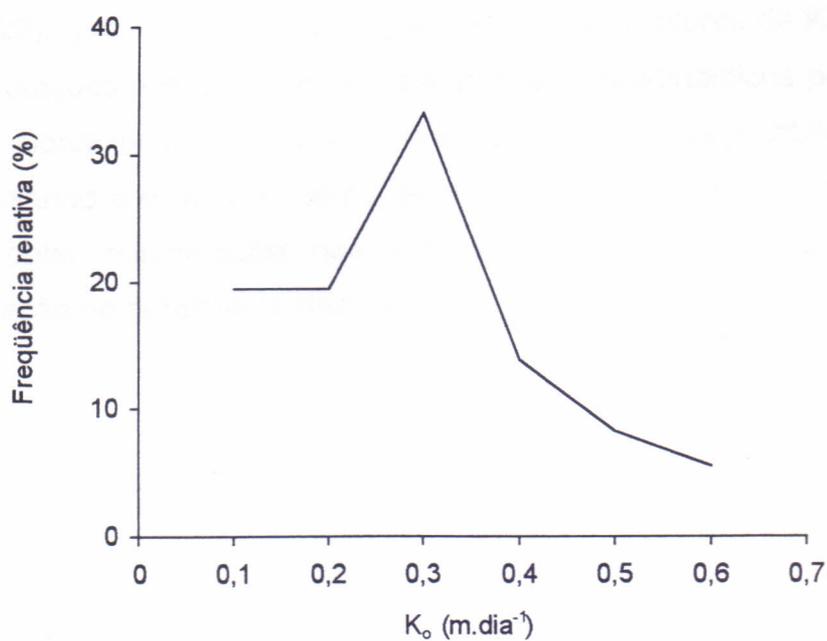


Figura 20 - Histograma de frequência relativa dos valores de K_o .

do sistema radicular de algumas plantas, atividade microbiológica, fluxos preferenciais, dentre outros. Aliada aos fatores acima expostos, possíveis erros podem eventualmente ocorrer quando da condução dos testes a campo, vindo contribuir para aumentar a variação nos resultados.

A dificuldade de se estabelecer um único valor representativo para parâmetros hidrodinâmicos do solo, constitui uma das principais fontes de erro no delineamento de sistemas de drenagem subterrânea. Por outro lado, a utilização da metodologia convencional leva a implicações de ordem técnica e econômica que necessitam ser melhor estudadas, por conduzir a espaçamentos superestimados em algumas sub-regiões e subestimados em outras (QUEIROZ, 1995). Com o intuito de minimizar essas limitações, COSTA (1994) sugere o delineamento com base em metodologia de análise econômica comparativa entre drenos laterais.

O mapa de isolinhas da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) na área do experimento é ilustrado na Figura 21, com intervalo entre as curvas de $0,10 \text{ m.dia}^{-1}$. As curvas mais afastadas indicam menor gradiente de K_0 , e portanto, menor variabilidade espacial do parâmetro. Este aspecto pode ser melhor visualizado através da superfície de resposta (Figura 22), que mostra a distribuição espacial dos valores de K_0 . As análises e interpretações das isolinhas dos parâmetros hidrodinâmicos podem orientar no dimensionamento do sistema de drenagem, através da identificação de sub-áreas, visando o estabelecimento de espaçamentos diferenciados, no sentido de se obter minimização nos custos de investimentos e conseqüente maximização no rendimento das culturas.

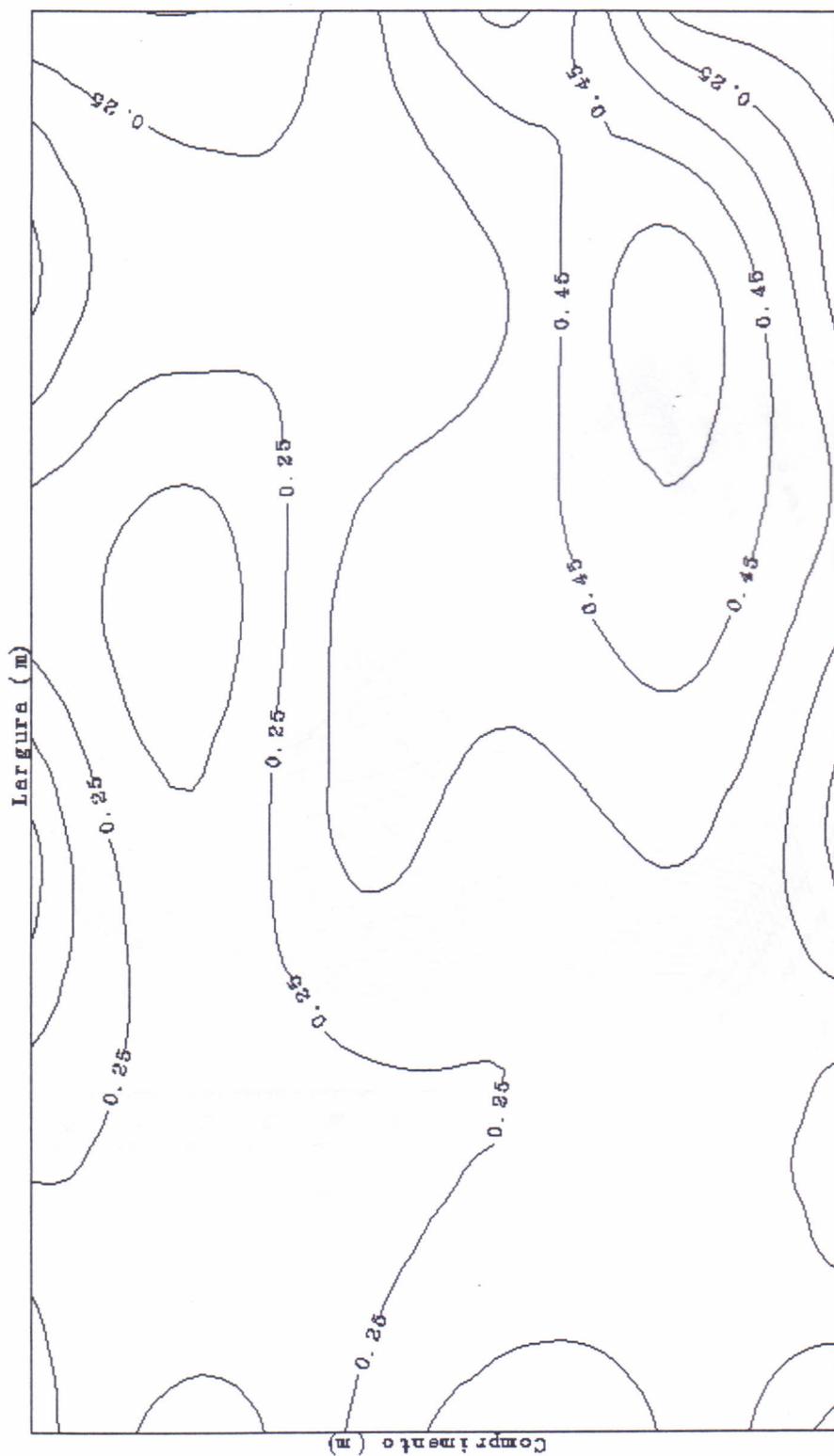


Figura 21 - Mapa de isolinhas da condutividade hidráulica do solo saturado na área do experimento.

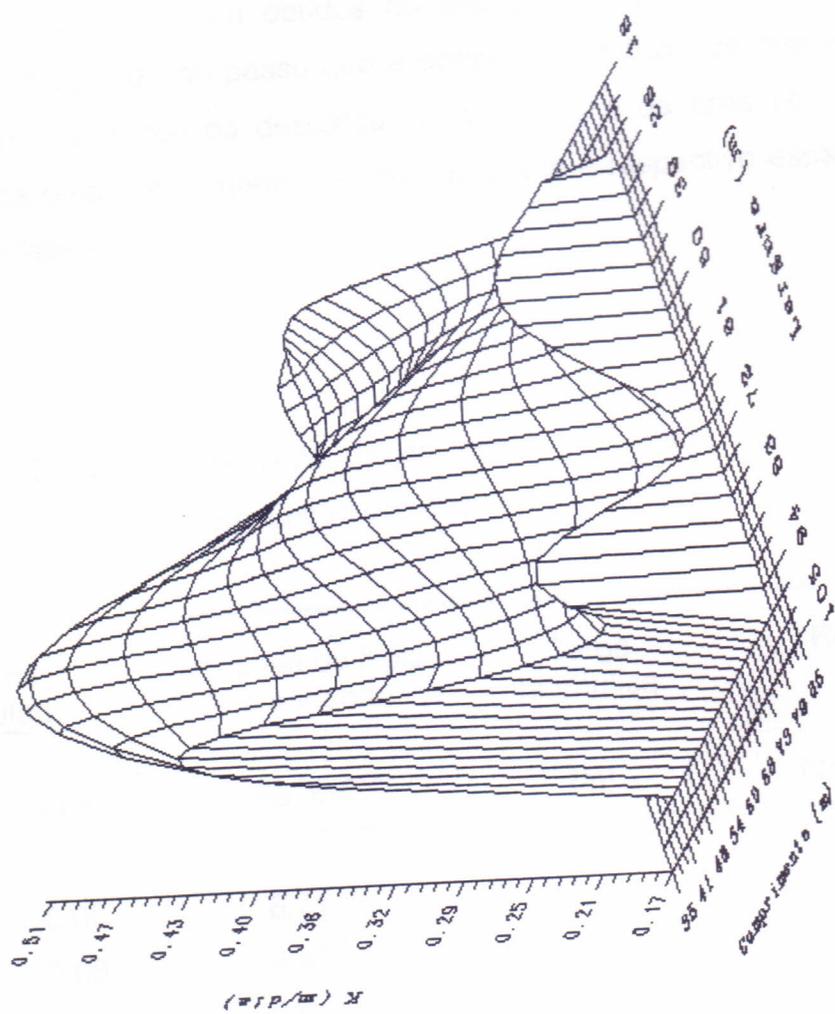


Figura 22 - Superfície de resposta mostrando a variabilidade espacial de K_0 na área do experimento.

4.3. Parâmetros hidrodinâmicos do solo através da descarga de drenos

No Quadro 07 apresentam-se dados de densidade de fluxo de drenagem (R) e de cargas hidráulicas (h), em função do tempo (t). Os valores de cargas hidráulicas foram obtidos no espaço médio entre as linhas de drenos laterais D_3 e D_4 , ao passo que a densidade de fluxo de drenagem, foi obtida a partir de dados de descarga do dreno D_4 e da área útil ao fluxo, compreendida pelo comprimento da linha de dreno e respectivo espaçamento entre drenos laterais.

Quadro 07. Densidade de fluxo de drenagem (R), carga hidráulica (h) e relação R/h em função do tempo.

Tempo acumulado		Densidade de fluxo de drenagem	Carga hidráulica	Relação R/h
(hora)	(dia)	(m.dia ⁻¹ x10 ⁻³)	(m)	(dia ⁻¹ x10 ⁻³)
0	0,00	6,71	0,61	11,00
2	0,08	4,46	0,57	7,82
4	0,17	3,56	0,48	7,42
6	0,25	2,13	0,42	5,07
9	0,38	1,90	0,40	4,75
12	0,50	1,66	0,37	4,49
24	1,00	1,50	0,31	4,84
36	1,50	1,18	0,28	4,21
51	2,13	0,91	0,20	4,55

A Figura 23 mostra o comportamento da densidade de fluxo de drenagem e da carga hidráulica, em função do tempo, para um período de observação de 51 horas após a recarga, utilizando-se irrigação por sulcos. As informações indicam que, tanto a densidade de fluxo de drenagem, como a carga hidráulica, decresceram rapidamente com o tempo. A densidade de fluxo de drenagem diminuiu, em 24 horas, de $6,71 \times 10^{-3}$ m.dia⁻¹ para $1,50 \times 10^{-3}$ m.dia⁻¹, correspondendo a um decréscimo da carga hidráulica de 0,61 m para 0,31 m.

Do ponto de vista do critério agrônomo, a magnitude de variação da carga hidráulica total (h) em função do tempo foi satisfatória, tendo em vista que um rebaixamento do lençol freático em 0,30 m após 24 horas, constitui num critério de drenagem bastante razoável para ser utilizado em solos tropicais, os quais, em virtude de problemas de acidez, fertilidade, presença de camadas de impedimento em áreas irrigadas, não favorecem a um maior aprofundamento do sistema radicular dos cultivos.

Por outro lado, alguns trabalhos de pesquisa sobre o fator **CS** (susceptibilidade da cultura), mostram que, mesmo culturas com alta sensibilidade ao estresse de excesso de água, resistem a uma submergência por 24 horas em estádios críticos. De acordo com CRUCIANI (1989), nos E.U.A. um critério freqüentemente usado é o de rebaixar o lençol freático, a partir da superfície do solo, de pelo menos 0,30 m em 24 horas ou 0,50 m em 48 horas.

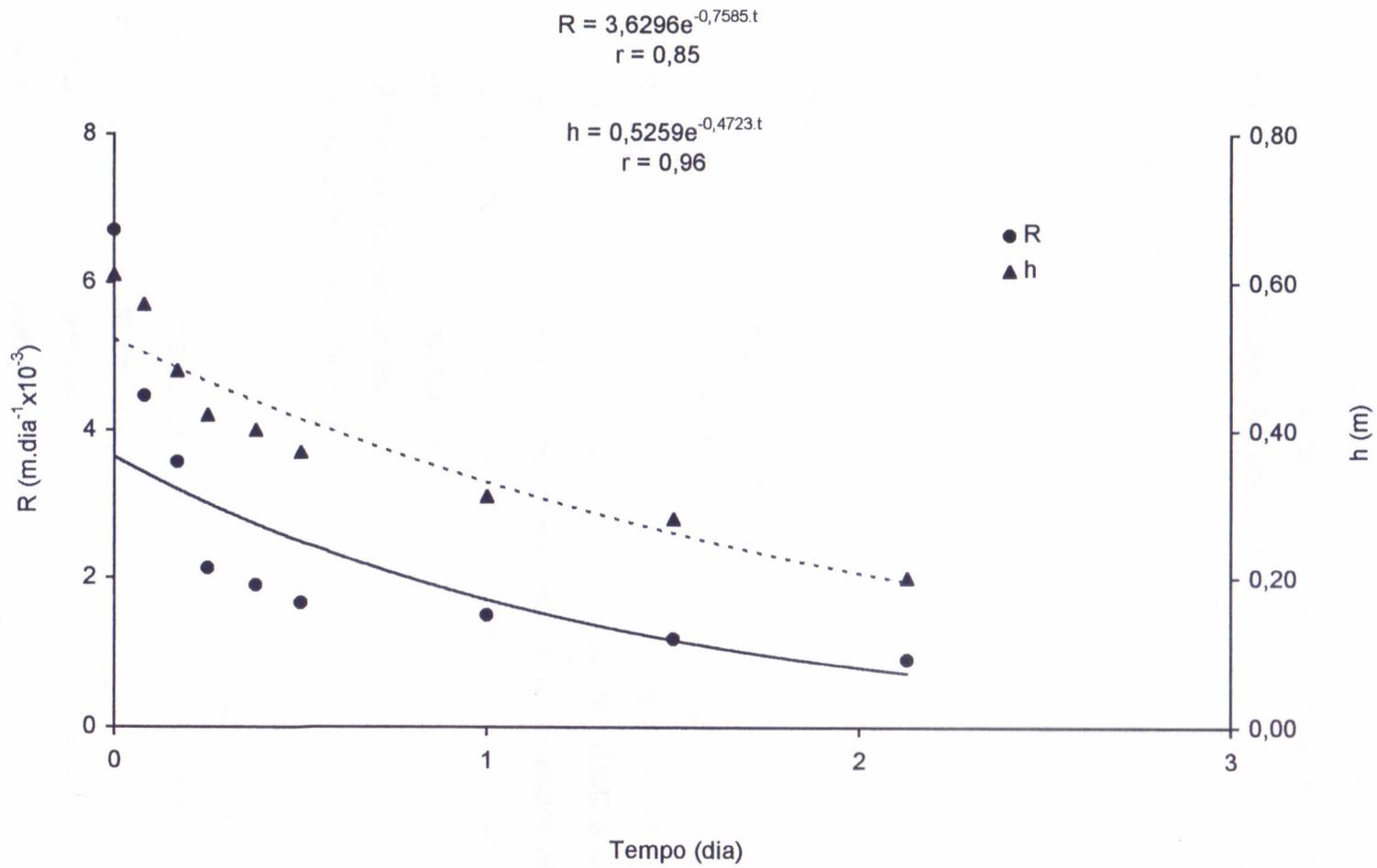


Figura 23 - Densidade de fluxo de drenagem (**R**) e carga hidráulica (**h**) em função do tempo.

4.3.1. Fator de reação ou fator de intensidade de drenagem

O fator de reação ou fator de intensidade de drenagem (α), foi obtido analiticamente através da função de recessão da densidade de fluxo de drenagem (R) ou carga hidráulica (h), como segue:

$$R_t = R_o \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (17)$$

ou

$$h_t = h_o \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (18)$$

Por transformação algébrica têm-se que $\ln R_t = \ln R_o - \alpha \cdot t$ ou $\ln h_t = \ln h_o - \alpha \cdot t$. Em ambos os casos, o fator α é o coeficiente angular da reta.

Utilizando-se os valores da função de recessão da densidade de fluxo de drenagem e da carga hidráulica, descritos na Figura 23, obtém-se que $\alpha = 0,76 \text{ dia}^{-1}$ e $\alpha = 0,47 \text{ dia}^{-1}$, respectivamente. Segundo GOMES & MILLAR (1978), usando os dados de R ou h , os valores de α deveriam ser iguais, implicando em ambas as retas serem paralelas, porém, a falta de concordância dos valores de α deve-se principalmente à grande heterogeneidade dos perfis do solo. Ainda conforme os autores, o valor mais adequado é calculado através dos dados de densidade de fluxo de drenagem, pois os valores de carga hidráulica estão mais sujeitos a erros devido à estratificação do perfil.

O tempo no qual a densidade de fluxo de drenagem e a carga hidráulica tornam-se constantes, foi estimado em 12,6 horas e 20,4 horas, respectivamente, através da relação: $t = 0,4 \cdot \alpha^{-1}$. Esse resultado sugere maior freqüência de observação dos parâmetros em análise, após 12 horas do início do teste, além de maior prolongamento do período de ensaio.

4.3.2. Condutividade hidráulica do solo saturado e transmissividade

A Figura 24 mostra a relação entre a densidade de fluxo de drenagem e a carga hidráulica, que foi utilizada na determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (K_o), na transmissividade aparente do perfil do solo (Kd), assim como, na análise do fluxo de água para os drenos.

O ajuste gráfico resultou em uma curva, indicando portanto a maior contribuição do fluxo através das camadas de solo acima do nível do dreno, conforme análise para condição de fluxo permanente (equação de Hooghoudt). A contribuição de fluxo das camadas abaixo do nível dos drenos evidencia-se somente a partir de valores de carga hidráulica em torno de 0,20 m, correspondendo a um tempo de 51 horas do início dos testes, cuja densidade de fluxo era de $0,91 \times 10^{-3} \text{ m.dia}^{-1}$.

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_o), para uma situação de fluxo não permanente, foi calculada pela equação derivada por Kraijenhoff Van de Leur (DIELEMAN, 1976), como segue:

$$R = \frac{2\alpha \cdot f \cdot h}{\pi} \quad (19)$$

sendo:

α - fator de intensidade de drenagem, T^{-1} ;

f - porosidade drenável, adimensional.

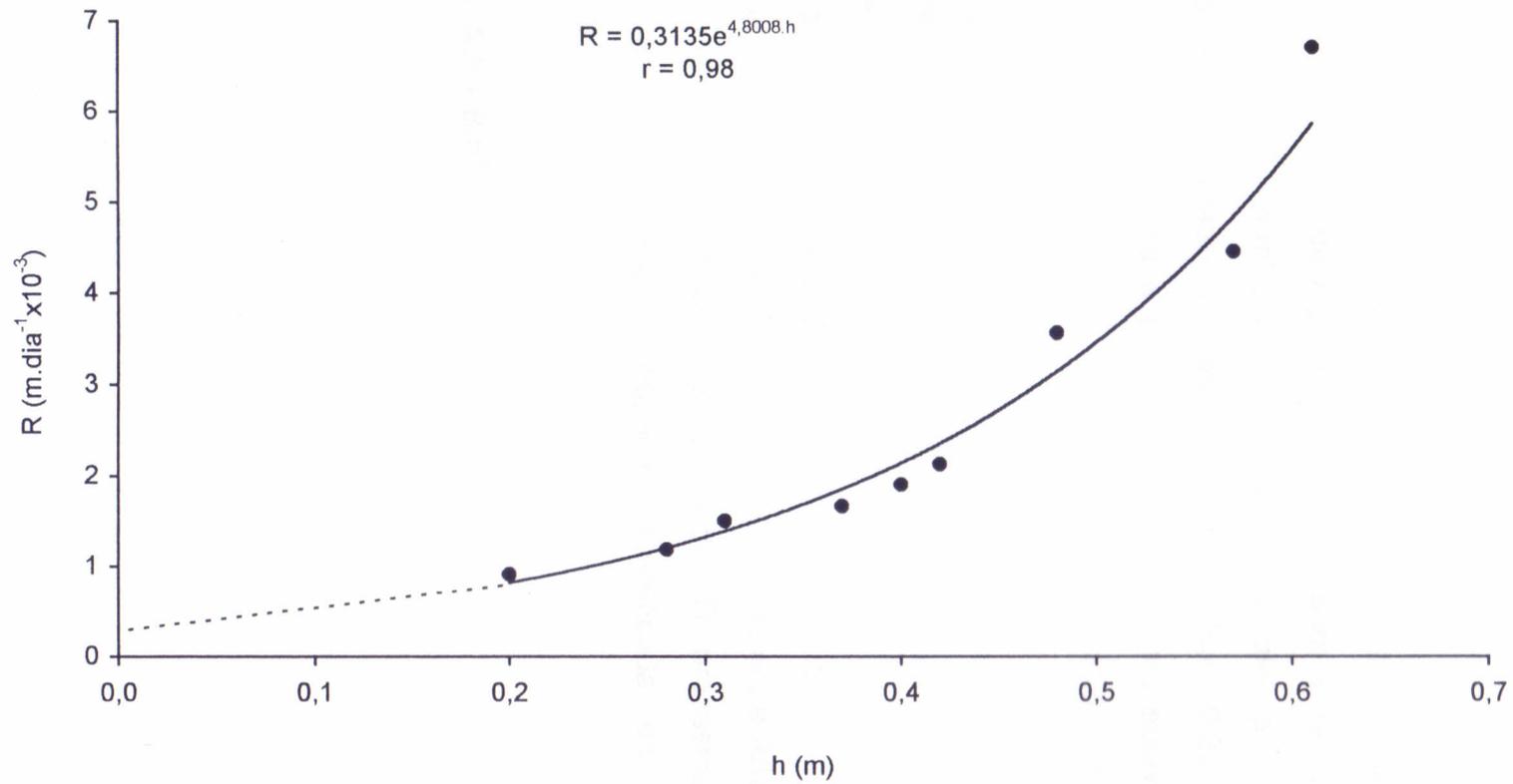


Figura 24 - Densidade de fluxo de drenagem (**R**) em função da carga hidráulica (**h**).

Introduzindo a Equação (10) na Equação (19) e resolvendo para Kd , obtém-se:

$$Kd = \frac{R \cdot S^2}{h \cdot 2\pi} \quad (20)$$

Aplicando-se na Equação (20) o valor da relação $R/h = \text{tg}\theta = 4,8008 \times 10^{-3} \text{ dia}^{-1}$, da Figura 24, obtém-se para a transmissividade aparente do solo, $Kd = 0,234 \text{ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$. Com base nesse valor, a condutividade hidráulica do solo saturado foi estimada entre $K_o = 0,23 \text{ m} \cdot \text{dia}^{-1}$ e $K_o = 0,20 \text{ m} \cdot \text{dia}^{-1}$, admitindo-se a profundidade do "estrato equivalente" (d) encontrar-se entre 1,02 m e 1,16 m, respectivamente. Portanto, os valores de K_o variam de -8% a -20% quando comparado à média geométrica obtida pelo método do poço ($K_o = 0,25 \text{ m} \cdot \text{dia}^{-1}$), comprovando a confiabilidade do método quando se realiza um número significativo de testes, bem distribuídos espacialmente.

Uma análise sob condições de fluxo permanente foi realizada com base no que representa a Figura 25, que ilustra a relação entre R/h e h para a mesma série de dados anteriormente discutida. O processamento das informações teve como base a equação simplificada de Hooghoudt (DIELEMAN, 1976), conforme se segue:

$$R = A \cdot h + B \cdot h^2 \quad (21)$$

ou

$$\frac{R}{h} = A + B \cdot h \quad (22)$$

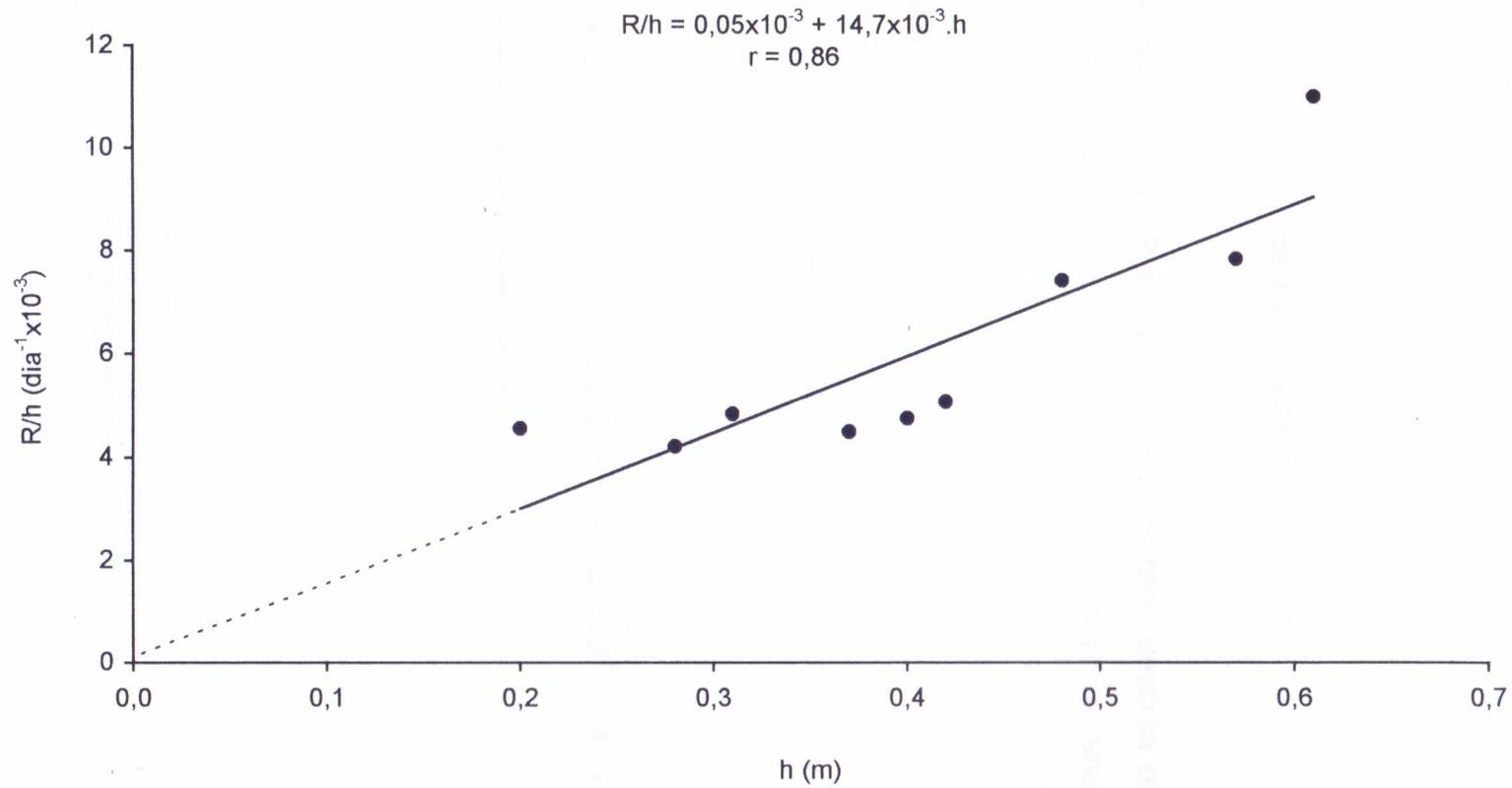


Figura 25 - Relação **R/h** em função da carga hidráulica (**h**).

sendo:

$$A = \frac{8K.d}{S^2} \quad (23)$$

e

$$B = \frac{4K}{S^2} = \text{tg}\theta \quad (\text{declividade da reta}) \quad (24)$$

A relação entre R/h e h é uma linha reta, descrita pela equação $R/h = 0,05 \times 10^{-3} + 14,7 \times 10^{-3} \cdot h$, cuja análise de variância encontra-se no Quadro 08. Usando o valor do coeficiente angular da equação linear na Equação (24), obtém-se o valor da condutividade hidráulica do solo saturado, $K_0 = 1,12 \text{ m.dia}^{-1}$. Esse valor superestima em 348% o valor obtido pelo método do poço ($k_0 = 0,25 \text{ m.dia}^{-1}$), não conferindo, portanto, na presente pesquisa, a análise da condutividade hidráulica sob condições de fluxo permanente.

Quadro 08. Análise estatística da equação $R/h = 0,05 \times 10^{-3} + 14,7 \times 10^{-3} \cdot h$

F.V.	G.L.	S.Q.	S.Q.M.	F
Regressão	1	31,077	31,077	20,50*
Resíduo	7	10,609	1,516	
Total	8	41,686		

* Significativo pelo teste F ao nível de 5%.

4.3.3. Porosidade efetiva ou espaço poroso drenável

A porosidade drenável (f) foi calculada por rearranjo da Equação(10), obtendo-se:

$$f = \frac{\pi^2 \cdot Kd}{\alpha \cdot S^2} \quad (25)$$

Tomando-se o valor do fator de intensidade de drenagem (α) estimado com base em dados de densidade de fluxo de drenagem, por considerar-se mais representativo, têm-se uma porosidade efetiva ou drenável estimada em 0,99%. Esse valor é subestimado entre 299% e 1.017% quando comparado aos valores obtidos por análises físico-hídricas do solo (Quadro 02). Conforme TAYLOR (1960), BOUWER & JACKSON (1974) e CRUCIANI (1989), o valor da porosidade drenável não é constante, sendo dependente da proximidade do lençol freático da superfície do solo, da sua flutuação no perfil e direção de deslocamento.

Para fins de dimensionamento hidráulico do sistema de drenagem subterrânea, devem-se utilizar sempre que possível, valores de porosidade drenável, obtidos em campos experimentais, com base em dados do lençol freático e descarga dos drenos (TAYLOR, 1960). Como vantagem, a referida metodologia oferece uma possibilidade de estimativa da porosidade drenável para diferentes níveis de profundidade do lençol freático.

4.4. Desempenho hidráulico de drenos laterais

No Quadro 09 encontram-se os dados de carga hidráulica de entrada ($h_{ent.}$), carga hidráulica total ($h_{tot.}$), descarga por unidade de comprimento (q_u) e resistência de entrada ($r_{ent.}$) referentes à linha de dreno lateral D_4 , utilizada para fins de análise de desempenho.

Medidas da carga hidráulica de entrada ($h_{ent.}$) em função da descarga por unidade de comprimento (q_u), encontram-se plotadas na Figura 26. A relação entre $h_{ent.}$ e q_u é uma linha reta, descrita pela equação de regressão linear $h_{ent.} = 0,011 + 4,3.q_u$, cuja análise da variância encontra-se no Quadro 10. A declividade da reta ou coeficiente angular, no valor de 4,3, representa a resistência de entrada ($r_{ent.}$), em dias.m⁻¹. Com base nesse valor, o desempenho da linha de dreno é classificado como "muito ruim", conforme os critérios propostos por DIELEMAN & TRAFFORD (1976). Entretanto, segundo referidos autores, na avaliação de desempenho de um sistema de drenagem, devem-se considerar os diversos fatores intervenientes. Desse modo, o resultado encontrado para a resistência de entrada pode estar relacionado com as especificidades dos solos aluviais e/ou, com algum defeito no funcionamento dos drenos laterais.

Conforme o monitoramento dos parâmetros físico-hídricos e químicos do solo analisado, há de se considerar a capacidade de transmissão de água do solo da área do experimento, classificada segundo MILLAR (1988) como moderadamente lenta. Quanto às linhas de drenos laterais, seu funcionamento pode estar comprometido pelo tempo de instalação (10 anos), a vulnerabilidade quanto à obstrução dada as características do material (manilhas de barro com entrada de água nas junções) e a dificuldade de uniformizar o envoltório (seixo rolado e areia grossa), além de possível desalinhamento das manilhas.

A estimativa de resistência de entrada do fluxo d'água aos drenos, pode também ser utilizada com sucesso, em pesquisas sobre o desempenho de envoltórios em drenos tubulares.

Queiroz (1987) investigou o desempenho das linhas de drenos laterais através da resistência de entrada, utilizando uma função de distribuição de probabilidade e equação de regressão linear.

Quadro 09. Carga hidráulica de entrada ($h_{ent.}$), carga hidráulica total ($h_{tot.}$), descarga por unidade de comprimento (q_u) e resistência de entrada ($r_{ent.}$).

Tempo acumulado		$h_{ent.}$	$h_{tot.}$	q_u	$r_{ent.} = \frac{h_{ent.}}{Q \cdot C^{-1}}$
(hora)	(dia)	(m)	(m)	($m^3 \cdot dia^{-1} \cdot m^{-1}$)	($dia \cdot m^{-1}$)
0	0,00	0,470	0,610	0,1175	4,00
2	0,08	0,391	0,570	0,0781	5,00
4	0,17	0,320	0,480	0,0622	5,14
6	0,25	0,201	0,424	0,0373	5,39
9	0,38	0,140	0,400	0,0332	4,22
12	0,50	0,118	0,370	0,0290	4,07
24	1,00	0,100	0,312	0,0263	3,80
36	1,50	0,087	0,277	0,0207	4,20
51	2,13	0,074	0,198	0,0159	4,65

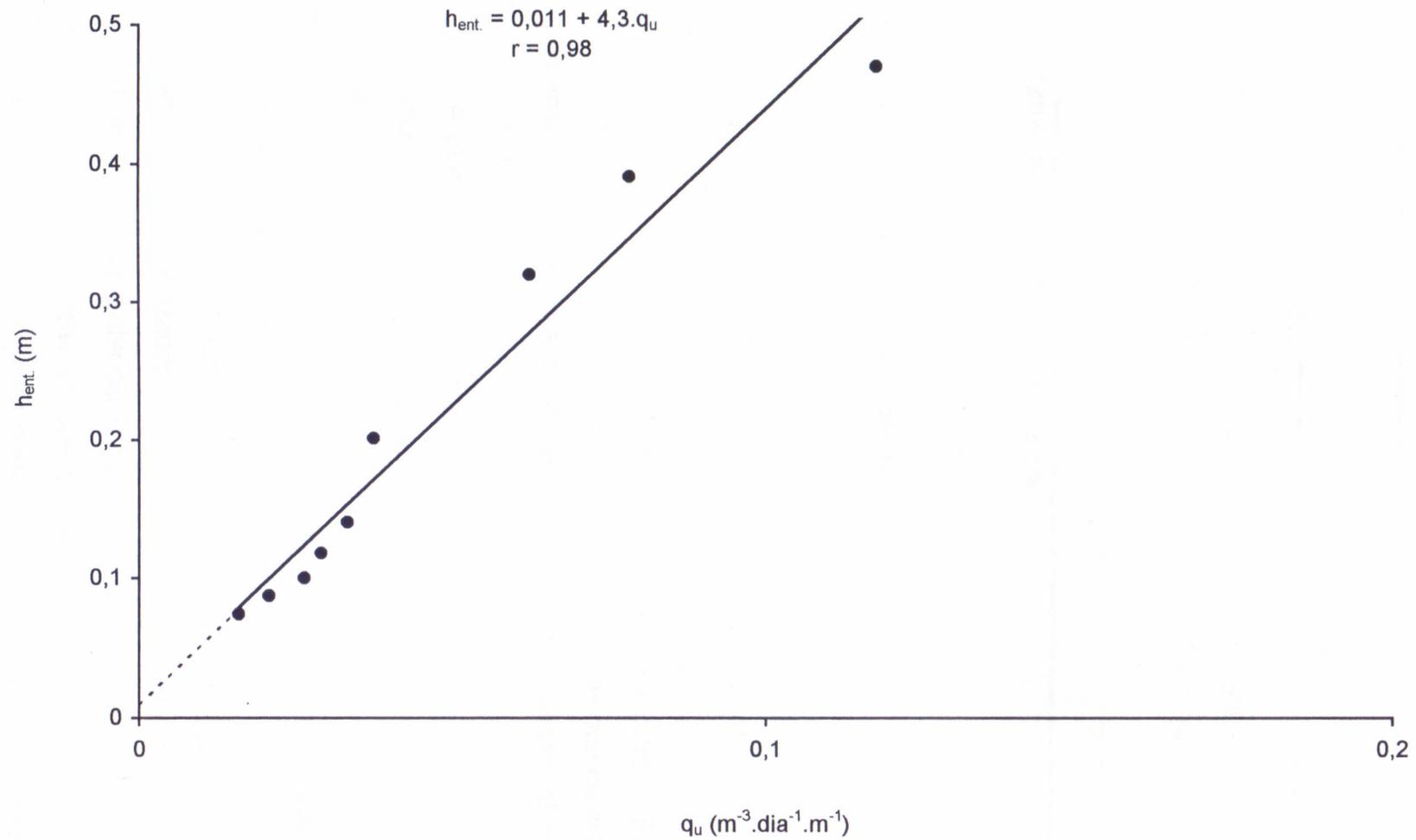


Figura 26 - Relação entre carga hidráulica de entrada ($h_{ent.}$) e descarga por unidade de comprimento (q_u).

Quadro 10. Análise estatística da equação $h_{ent.} = 0,011 + 4,3.q_u$.

F.V.	G.L.	S.Q.	S.Q.M.	F
Regressão	1	0,16365	0,16365	143,7*
Resíduo	7	0,00797	0,00114	
Total	8	0,17162		

* Significativo pelo teste F ao nível de 5%.

4.4.1. Caracterização da rede de fluxo

O estudo do comportamento do lençol freático com a finalidade de investigar as condições de direcionamento do fluxo subterrâneo, foi realizado através da planta de suas curvas de nível, conforme mostra a Figura 27. De acordo com CRUCIANI & GODOY (1980), metodologias que caracterizam o comportamento do lençol freático são as únicas que apresentam eficiência em estudos para áreas com problemas de drenagem.

A planta foi confeccionada através da interpolação das cotas do lençol freático em cada poço de observação, para o dia 28 de setembro de 1995, com equidistância vertical entre as curvas de 0,10 m. As cotas foram calculadas a partir de medidas de profundidade do lençol freático e do nivelamento geométrico da área do experimento.

A direção do fluxo subterrâneo mostra uma descarga no sentido dos drenos laterais, caracterizadas pelas linhas de fluxo aproximadamente ortogonais às linhas equipotenciais, supondo-se o solo isotrópico. Tal fato mostra a importância da presença dos drenos laterais como determinante do sentido do fluxo subterrâneo, bem como uma evidência de locação correta quanto à direção de instalação.

Na Figura 28 é ilustrada uma superfície de resposta mostrando o comportamento do lençol freático, correspondente aos dados utilizados para a rede de fluxo. Observa-se a dificuldade de se estabelecer um sistema conjugado de irrigação subterrânea/drenagem, face à baixa uniformidade de distribuição da água que, embora não quantificada, é fácil de se presumir com base na análise gráfica. Em solos aluviais, a variabilidade espacial das características físicas do solo, compromete um manejo adequado de um sistema conjugado de irrigação subterrânea/drenagem.

4.4.2. Espaçamento entre drenos laterais

No Quadro 11 apresentam-se os resultados dos espaçamentos médios entre drenos laterais, calculados por equações para as condições em regime de fluxo não permanente. Tomando-se como referência o espaçamento de campo, de 17,5 m, calcularam-se os respectivos desvios percentuais, em relação ao espaçamento obtido por equações.

Analisando os valores dos espaçamentos calculados, as equações de Deboer-Chu e Boussinesq-Schilfgaard, não apresentam diferenças significativas entre si. Por outro lado, quando se comparam essas equações com a equação de Glover-Dumm, a diferença em média é da ordem de 17%.

Com base nesses resultados, constata-se que a equação de Glover-Dumm foi a que melhor estimou o espaçamento entre drenos laterais.

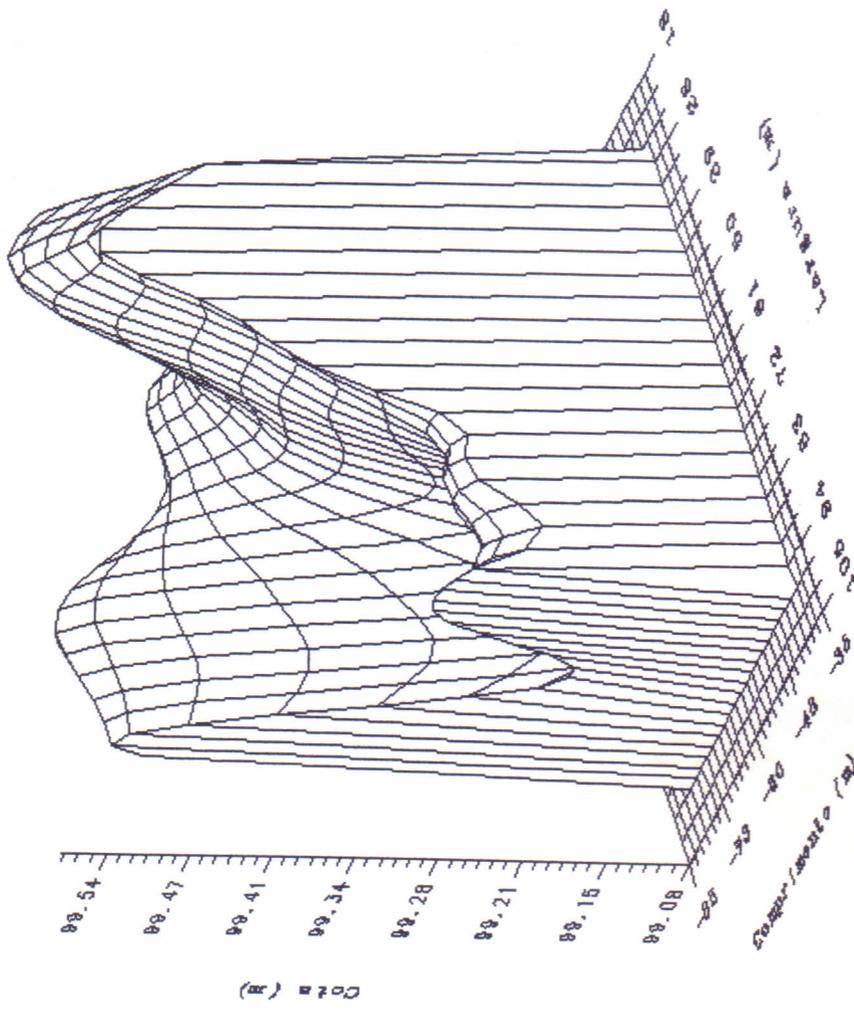


Figura 28 - Superfície de resposta mostrando o comportamento do lençol freático na área do experimento, no dia 28/09/95.

Quadro 11. Espaçamentos médios entre drenos laterais e desvios percentuais obtidos pelas equações em regime de fluxo não permanente.

Equação	Espaçamento calculado (m)	Desvio (%)
Glover-Dumm	18,32	+ 4,67
Deboer-Chu	21,40	+ 22,28
Boussinesq-Schilfgaarde	21,52	+ 22,97

5. CONCLUSÕES

Nas condições em que o presente trabalho foi conduzido, a análise e interpretação dos resultados obtidos permitem evidenciar as seguintes conclusões:

1. A análise dos parâmetros do solo e da água, revelam modificações no solo, quanto ao aspecto da salinidade e sodicidade, que na condição inicial de muito fortemente sódico passou a não sódico;
2. O valor médio da condutividade hidráulica do solo saturado obteve um incremento da ordem de 3.000%, de 0,0085 para 0,25 m.dia⁻¹, evidenciando uma melhoria acentuada na transmissão de água;
3. A água de descarga dos drenos laterais e água dos poços de observação, apresentaram alterações nos índices de salinidade (C₃ para C₄) e sodicidade (S₁ para S₃), inferindo-se que os sais acumulados no lençol freático estão sendo retirados pelo sistema de drenagem;
4. A resistência de entrada, $r_{ent.} = 4,3 \text{ dias.m}^{-1}$, permite classificar o desempenho hidráulico da linha de dreno lateral avaliada como "muito ruim", conforme metodologia proposta pela FAO;
5. As linhas de fluxo do lençol freático evidenciam a importância da presença dos drenos laterais, como determinante do sentido do fluxo subterrâneo;
6. O espaçamento entre drenos laterais, calculado pela equação de Glover-Dumm (18,32 m), apresentou o melhor resultado, superestimando o espaçamento de campo em 4,67%.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista algumas limitações encontradas no trabalho e a continuidade da presente linha de pesquisa, tem-se a considerar:

- A carência de informações para o período considerado, não permitiu uma análise mais criteriosa quanto à evolução dos parâmetros físico-hídricos e químicos no perfil do solo. Estudos mais intensificados quanto ao efeito da profundidade do lençol freático, lavagem de sais, uso de melhoradores químicos, práticas de cultivo, manejo da água e do solo, dentre outros, são necessários para melhor monitoramento do processo de recuperação de solos afetados por sais;

- A necessidade de avaliação do processo de recuperação em solos afetados por sais, visando sua viabilidade econômica;

- A falta de manutenção dos drenos coletores, constatada pela presença de ervas daninhas, erosão nos taludes dos drenos e conseqüente assoreamento, provocou submersão dos drenos laterais mais profundos e com isso compromete a eficiência do sistema de drenagem;

- O critério de classificação do desempenho hidráulico de drenos laterais, baseado na resistência ao fluxo de entrada, proposto pela FAO, embora concebido para condições de fluxo permanente, têm sido bastante utilizado com sucesso em condições de regime não permanente, na detectação de trechos obstruídos em linhas de drenos laterais. Não obstante, sugere-se que a metodologia seja comparada com outros critérios concebidos para fluxo não permanente, além de estudos nessa linha de pesquisa, que melhor representem as condições de campo em áreas irrigadas;

- A metodologia utilizada na estimativa de parâmetros hidrodinâmicos do solo, considerando a variabilidade espacial, é recomendada ao dimensionamento de sistemas de drenagem subterrânea.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTONINI, J.C.A. Desempenho dos drenos sem envelope e com envelope sintético em relação ao dos drenos com envelope de material mineral, submetidos ao regime de escoamento não-permanente. Viçosa, 1989. 58p. (Mestrado - Universidade Federal de Viçosa).
- AYERS, R.S., WESTCOT, D.W. A qualidade da água na agricultura. **Estudos FAO: Irrigação e Drenagem**, 29 Revisado 1. Campina Grande, UFPB, 1991. 218p.
- BERNARDO, S.; LOUREIRO, B.T.; FERREIRA, P.A.; ALBUQUERQUE, P.E.P. Validade de algumas equações de drenagem para espaçamento de drenos cobertos: II. Regime de escoamento não permanente. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 27(6): 949-62, 1992.
- BOLETIM AGROMETEOROLÓGICO. Fortaleza: UFC, 1968-1992. A partir de 1973 passou a ser semestral.
- BOUWER, H.; JACKSON, R.D. Determining soil properties. In: Van SCHILFGAARDE, J. **Drainage for agriculture**. Wisconsin, American Society of Agronomy, 1974. Cap. X. p.611-66.
- CAIXETA, T.J.; COELHO, E.F.; FERREIRA, P.A.; PEREIRA, P.M.; OLIVEIRA, C.S.G. Desempenho de sistemas de drenagem e análise da eficiência de equações de dimensionamento de drenos abertos em condições de campo. **Anais do VII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem**, Brasília. p. 662-85, 1986.

- CARTER, C.E.; WRATTEN, F.T.; McDNIEL, V.; HALVERSON, B. Hydraulic conductivity measured electronically in an auger hole. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, **27**: 1400-4. 1984.
- COELHO, M.A. Características de umidade de alguns solos de aluvião: Normais, sódico e sódico-salino. Rio de Janeiro, 1971. 113p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
- COELHO, M.A.; FERREYRA, H.F.F. Characterization of salt-affected soil in the semi-arid region of northeastern Brazil. **Turrialba**, Costa Rica, **36(2)**: 171-78, 1986.
- CORDEIRO, G.G. Aspectos gerais sobre salinidade em áreas irrigadas: origem, diagnóstico e recuperação. **EMBRAPA-CPATSA**, Petrolina, **50**: 1-16. 1988.
- COSTA, R.N.T. Avaliação de um sistema de drenagem e tratamentos mecânicos na recuperação de um solo sódico no Vale do Curu-Ce. Fortaleza, 1988. 75p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará.
- COSTA, R.N.T. Espaçamento econômico de drenos laterais e a dinâmica do lençol freático sobre o rendimento da cultura de milho (*Zea mays* L.). Piracicaba, 1994. 88p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- COSTA, R.G.; GHEYI, H.R. Variação da qualidade da água de irrigação da microrregião homogênea de Catolé do Rocha-PB. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, **19(8)**: 1021-25, 1984.

- CRUCIANI, D.E. Caracterização de coeficientes de drenagem com base nos parâmetros de produção das culturas. Piracicaba, 1981. 99p. (Livredocência - Escola Superior de Agricultura "Luíz de Queiroz"/USP).
- CRUCIANI, D.E.; GODOY, R. Estudos do lençol freático em problemas de drenagem. **Revista de Agricultura**, USP-Piracicaba, 115-26, 1980.
- CRUCIANI, D.E.; BOTREL, T.A. Solução da equação de Kraijenhoff Van De Leur para previsão da elevação máxima do nível freático em problemas de drenagem subterrânea. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, **25**: 2-6, 1986.
- CRUCIANI, D.E. **A drenagem na agricultura**. 4 ed. São Paulo, Nobel, 1989. 337p.
- DEBOER, D.W.; CHU, S.T. Bi-level subsurface drainage theory. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, **18**(4): 664-7, 1975.
- DIELEMAN, P.J. Deducción de constantes hidrológicas del suelo a partir de pruebas de drenaje en e campo. In: IILRI, ed. Principios y Aplicaciones del Drenaje. **International Institute for Land Reclamation and Improvement**, Wageningen, **3**: 355-379, 1973.
- DIELEMAN, P.J.; RIDDER, N. A. Hidráulica elemental del água en la zona saturada. In: IILRI, ed. Principios y Aplicaciones del Drenaje. **International Institute for Land Reclamation and Improvement**, Wageningen, **1**: 166-216, 1973.
- DIELEMAN, P.J.; TRAFFORD, B.D. **Drainage testing**. Rome, FAO, 1976. (FAO. Irrigation and Drainage, Paper n. 28)

- DOERING, E.J.; REEVE, R.C. Engineering aspects of the reclamation of sodic soils with high-salt waters. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, **91**(IR4): 59-72. 1965.
- EL-HUSNY, E.C. Estudo comparativo de dois métodos de determinação da condutividade hidráulica sob condições de campo. Fortaleza, 1979. 75p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará.
- EL-MORSY, E.A.; MALIK, M.; LETEY, J. Polymer effects on the hydraulic conductivity of saline and sodic soil conditions. **Soil Science**, **151**(6): 430-5, 1991.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de Análise de solo**. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo, 1979.
- FAO. **Drainage design factors**; 28 questions and answers. Rome, FAO, 1986. 52p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 38).
- FERNANDES, B.; CECON, P.R.; FERREIRA, P.A.; LOUREIRO, B.T.; OTTO, S.R.L. Estimativa da porosidade drenável em função da condutividade hidráulica saturada, em um solo orgânico. **Revista Ceres**, Viçosa, **36**(207): 399-405. 1989.
- FERREYRA, H.F.F.; COELHO, M.A. Variação da concentração de sais na solução de um solo aluvial vértico cultivado com arroz sob inundação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, **8**: 69-76, 1984.
- FERREYRA, H.F.F.; COELHO, M.A. Efeito de doses de gesso e subsolagem na produtividade de arroz em solo sódico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, **10**: 157-61, 1986.

- GALDINO, S. Estimativa da macroporosidade em função de algumas características de solo de várzea. Viçosa, 1988. 61p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
- GOMES, P.C.F.; MILLAR, A.A. Problemática da caracterização de solos aluviais para fins de drenagem subterrânea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, **2**: 84-9, 1978.
- GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. 13. ed. São Paulo, Nobel, 1990. 468p.
- GUPTA, R.K.; BHATTACHARYA, A.K.; CHANDRA, P. Unsteady drainage with variable drainage porosity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, **120**(4): 703-15. 1994.
- HAMDY, A.; ABDEL-DAYEM, S.; ABU-ZEID, M. Saline water management for optimum crop production. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, **24**: 189-203, 1993.
- HELALIA, A.M.; EL-AMIR, S.; WAHDAN, A.A.; SHAWKY, M.E. Effect of low salinity water on salt displacement in two soils. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, **19**: 43-50, 1991.
- ILRI. Drainage principles and application. Pub. 16 Vol. I-IV. **International Institute for Land Reclamation and Improvement**, Wageningen. 1980.
- KATERJI, N.; Van HOORN, J.W.; HAMDY, A.; BOUZID, N.; MAHROUS, S.E.; MASTRORILLI, M. Effect of salinity on water stress, growth and yield of broadbeans. **Agricultural Water Management**, Amsterdam **21**: 107-17, 1992.

- KESSLER, J.; OOSTERBAAN, R.J. Determinacion de la conductividad hidráulica de los suelos. In: IILRI, ed. Principios y Aplicaciones del Drenaje. **International Institute for Land Reclamation and Improvement**, Wageningen, **3**: 275-320, 1973.
- KESSLER, J.; RAAD, S.J. Análisis de datos pluviométricos. In: IILRI, ed. Principios y Aplicaciones del Drenaje. **International Institute for Land Reclamation and Improvement**, Wageningen, **3**: 15-57, 1973.
- KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. 1. ed. São Paulo, Ceres, 1979, 262 p.
- KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2. ed. São Paulo, Nobel, 1988, 408p.
- LETEY, J. Relationship between salinity and efficient water use. **Irrigation Science**, **14**: 75-84, 1993.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 1. ed. Piracicaba, 1995, 497p.
- LOUREIRO, B.T.; BERNARDO, S.; CAIXETA, T.J.; FERREIRA, A.F.; COELHO, E.F. Eficiência de algumas equações de drenagem no dimensionamento de drenos abertos e cobertos em condições de campo. **Revista Ceres**, Viçosa, **32**(179): 43-62. 1985.
- LUTHIN, J.N. **Drainage Engineering**. 3 ed. New York, 1973, 250p.
- MAAS, E.V.; HOFFMAN, G.J. Crop salt tolerance - Current assessment. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, **103**(IR2): 115-34, 1977.

- MELO, F.B.; COELHO, M.A.; FERREYRA, H.F.F. Efeitos do gesso e da concentração salina da água na condutibilidade hidráulica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, **12**: 89-92, 1988.
- MILLAR, A.A.; GOMES, P.C.F. Determinação das propriedades hidráulicas de solos aluviais através da descarga de drenos subterrâneos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, **2**: 90-4, 1978.
- MILLAR, A.A. **Drenagem de terras agrícolas: bases agronômicas**. 2. ed. São Paulo, Editerra Editorial, 1988, 306p.
- MOURA, R.F. Lixiviação em material de solo salinizado do Perímetro Irrigado do Projeto Gorotuba-MG. Viçosa, 1989. 57p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
- OLIVEIRA, F.P. Lavagem e aplicação de gesso na recuperação de solo sódico, cultivado com feijão-de-corda (*Vigna unguiculata* L., Walp.). Fortaleza, 1986. 65p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará.
- OTTO, S.R.L. Estimativa da porosidade drenável em função de propriedades de um solo orgânico. Viçosa, 1988. 89p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
- PANDEY, R.S.; BHATTACHARYA, A.K; SING, O.P.; GUPTA, S.K. Drawdown solutions with variable drainable porosity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, **118**(3): 382-96, 1992.
- PILLSBURY, A.F. Observations on tile drainage performance. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, **93**(IR3): 233-41, 1967.

- PIRES, E.T. Redes de fluxo de água e dimensionamento de sistemas de drenagem, usando três tipos de solos. Viçosa, 1980. 73p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
- PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperacion de suelos salinos**. Madrid, Editorial Agrícola Española, 1978, 521p.
- PONTES, P.D.; SALAZAR, C.R.V.; CORDEIRO, G.G. Drenagem subterrânea no Perímetro Irrigado Bebedouro II: Estudo das características hidrodinâmicas dos solos. **EMBRAPA-CPATSA**, Petrolina, **73**: 1-22. 1992.
- PRISCO, J.T. Alguns aspectos da fisiologia do "stress" salino. **Revista Brasileira de Botânica**, Fortaleza, **3**: 85-94, 1980.
- QUEIROZ, J.E. Avaliação do desempenho hidráulico de dois sistemas pilotos de drenagem subterrânea usando manilhas de barro, no Perímetro Irrigado de Sumé-Paraíba. Campina Grande, 1987. 98p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba.
- QUEIROZ, J.E. Parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea. Piracicaba, 1995. 167p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, **12**: 211-6, 1988.
- RICHARDS, L.A. **Diagnóstico y rehabilitacion de suelos salinos y sódicos**. México, Editorial Limusa, 1954. 172p.

- RIDDER, N.A. Estudos del agua subsuperficial. In: IILRI, ed. Principios y Aplicaciones del Drenaje. **International Institute for Land Reclamation and Improvement**, Wageningen, **3**: 165-210, 1973.
- RODRIGUES, B.H.N.; CAIXETA, T.J.; SEDIYAMA, G.C.; FERREIRA, P.A. Variação das propriedades hidrodinâmicas do solo e do desempenho de um sistema de drenagem, em condições de campo. **Revista Ceres**, Viçosa, **35**(198): 113-29. 1988.
- ROGERS, J.S.; McDANIEL, V.; CARTER, C.E. Determination of saturated hydraulic conductivity of a commerce silt loam soil. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, **28**(4): 1141-4, 1985.
- ROGERS, J.S.; CARTER, C.E. Auger hole hydraulic conductivity determination in layered soils. **Transactios of the ASAE**, St. Joseph, **30**(2): 374-8, 1987.
- ROGERS, J.S.; SELIM, H.M.; CARTER, C.E.; FOUSS, J.L. Variability of auger hole hydraulic conductivity values for a commerce silt loam. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, **34**(3): 876-82, 1991.
- SALAZAR, C.R.V.; FELIX, S.G.; CORDEIRO, G.G. Avaliação econômica da recuperação de solos salinos no Perímetro Irrigado de Vaza-Barris-Cocorobó-BA. **EMBRAPA-CPATSA**, Petrolina, **48**: 1-16. 1988.
- SALAZAR, C.R.V.; CORDEIRO, G.G.; PONTES, P.D. Drenagem subterrânea no Perímetro Irrigado de Bebedouro I: Estudo do lençol freático. **EMBRAPA-CPATSA**, Petrolina, **62**: 1-16. 1989.
- SAUNDERS, L.C.U.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Condutividade hidráulica da terra roxa estruturada em condições de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, **2**: 164-7, 1978.

- SCHILFGAARDE, J. Van Nonsteady flow to drains. In: VAN SCHILFGAARDE, J., ed. **Drainage for Agriculture**. Madison, American Society of Agronomy, 1974. p.245-70. (Monographs, 17).
- SEDIYAMA, G.C.; FERREIRA, P.A.; BACK, A.J.; VIEIRA, M. Sistemas de drenagem em regime variável. **Revista Ceres**, Viçosa, **37**(209): 36-49. 1990.
- SELASSIE, T.G.; JURINAK, J.J.; DUDLEY, L.M. Saline and sodic-saline soil reclamation: First order kinetic model. **Soil Science**, Utah, **154**(1): 1-7, 1992.
- SEMANAPALLI, S.V.K.; OLIVEIRA, G.R.; QUEIROZ, J.E. Avaliação do desempenho hidráulico de dois sistemas pilotos de drenagem subterrânea no Perímetro de Sumé-PB. **Anais do VII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem**, Brasília, p. 545-565. 1986.
- SKAGGS, R.W. Determination of the hydraulic conductivity - drainable porosity ratio from water table measurements. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, **19**(1): 73-80. 1976.
- SOMMERFELDT, T.G.; PAZIUK, N. Use of shallow drains to reclaim a saline soil. **Canadian Agricultural Engineering**, Canada, **17**(2): 110-3. 1975.
- SOUZA, J.B. Avaliação e eficiência do sistema de drenos subsuperficiais e tratamentos mecânicos na melhoria das condições de drenabilidade dos solos do perímetro Maniçoba-Ba. Fortaleza, 1991. 112p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará.

- SUGUINO, H.H.; VALDIVIESO, C.R.; CORDEIRO, G.G; JÚNIOR, W.C.
Drenagem subterrânea no Perímetro Irrigado de Maniçoba-BA: critérios de dimensionamento e avaliação de performance. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 23(4): 405-13. 1988.
- TALSMA, T. Leaching of tile-drained saline soils. **Journal Soil Research**, Canberra, 5: 37-46. 1967.
- TAYLOR, G. S. Drainable porosity evaluation from outflow measurements and its use in drawdown equations. **Soil Science**, Ohio, 90(6): 338-43, 1960.
- UHLAND, R.E. Physical properties of soils as modified by crops and management. **Soil Science Society of America Proceedings**, 14: 361-6, 1949.
- VAN BEERS, W.F.J. The Auger Hole Method: A field measurement of the hydraulic conductivity of soil below the water table. **International Institute for Land Reclamation and Improvement** , Wageningen, 1: 1-35, 1970.
- VERHOEVEN, B. Suelos salinos. In: IILRI, ed. Principios y Aplicaciones del Drenaje. **International Institute for Land Reclamation and Improvement**, Wageningen , 1: 83-97, 1973.
- WESSELING, J. Flujo subsuperficial de água a los drenes. In: IILRI, ed. Principios y Aplicaciones del Drenaje. **International Institute for Land Reclamation and Improvement**, Wageningen, 2: 1-61, 1973.

ANEXOS

ANEXO 01. Registro das medidas de descargas dos drenos laterais.

DESCARGA DOS DRENOS LATERAIS

Local: FEVC - Pentecoste/CEÁrea: D-S₂ (1,5 ha)

Data	Hora	Descarga ($10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)						
		DL 01	DL 02	DL 03	DL 04	DL 05	DL 06	DL 07
10/01/96	05:30	0,096	0,053	*	0,17	*	0,182	*
	07:30	0,048	0,052	*	0,113	*	0,191	*
	09:30	0,054	0,339	*	0,090	*	0,205	*
	11:30	0,062	0,230	*	0,054	*	0,189	*
	14:30	0,055	0,143	*	0,048	*	0,129	*
	17:30	0,037	0,128	*	0,042	*	0,108	*
11/01/96	05:30	0,025	0,060	*	0,038	*	0,063	*
	17:30	0,021	0,023	0,061	0,030	*	0,006	*
12/01/96	08:30	0,020	0,012	*	0,023	*	0,009	*

DL - Dreno lateral.

* Submerso.

ANEXO 02. Registro das leituras da profundidade do lençol freático.

LEITURA NOS POÇOS DE OBSERVAÇÃO

Local: FEVC - Pentecoste/CEData: 10/01/96Hora: 05:30

Poço	Cota do poço (m)		Leit. L Freático	Dados Calculados (m)			Observação
	REF.	Sup.		Topo	Topo poço (m)	Cota L.F	
01	99,700	100,00	0,406	99,594	0,106	0,594	
02	99,680	99,980	0,440	99,540	0,140		
03	99,685	99,985	0,420	99,565	0,120		
04	99,610	99,910	0,596	99,314	0,296		
05	99,635	99,935	0,338	99,597	0,038		
06	99,650	99,950	0,812	99,138	0,512		DL0,7
07	99,655	99,955	0,530	99,425	0,230		
08	99,640	99,940	0,599	99,341	0,299		
09	99,630	99,930	0,596	99,334	0,296		
10	99,645	99,945	0,539	99,406	0,239		
11	99,625	99,925	0,635	99,290	0,335	0,365	
12	99,675	99,975	0,610	99,365	0,310		
13	99,640	99,940	0,598	99,342	0,298		
14	99,620	99,920	0,550	99,370	0,250		
15	99,650	99,950	0,329	99,621	0,029		
16	99,625	99,925	0,400	99,525	0,100		DL1,2
17	99,685	99,985	0,445	99,540	0,145		
18	99,660	99,960	0,577	99,383	0,277		
19	99,680	99,980	0,665	99,315	0,365		
20	99,630	99,930	0,630	99,300	0,330		
21	99,665	99,965	0,390	99,575	0,090	0,610	

PLFNS - Profundidade do lençol freático ao nível do solo.

CHPMD - Carga hidráulica no ponto médio entre drenos.

DL - Dreno lateral.

ANEXO 03. Rotina de programa computacional da equação de Deboer & Chu.

```

Program drenos;
Uses Crt;

Var
S, K, H, p1, p2, d, q, u, w, d1, d2, Y1, Y2, t, h1, h2, v, f, L, U1, U2, A, B: Real;

Const
    c= 0.9;
    j= 2.55;
    PI= 3.1415927;
    inc= 0.1;

Begin
    Clrscr;
    WriteLn('          DADOS DE ENTRADA          ');
    WriteLn;
    Write('Profundidade do dreno profundo (p1): ');
    ReadLn(p1);
    Write('Profundidade do dreno raso (p2): ');
    ReadLn(p2);
    Write('Profundidade da camada de impedimento (H): ');
    ReadLn(H);
    Write('Condutividade hidráulica (K): ');
    ReadLn(K);
    Write('Porosidade drenável (f): ');
    ReadLn(f);
    Write('Carga hidráulica inicial (h1): ');
    ReadLn(h1);
    Write('Carga hidráulica final (h2): ');
    ReadLn(h2);
    Write('Tempo de drenagem (t): ');
    ReadLn(t);
    Write('Diâmetro do dreno (u): ');
    ReadLn(u);
    Write('Espaçamento de campo (L): ');
    ReadLn(L);
    S:= 10;
    q:= PI*u/2;
    D1:= H-p1;
    D2:= H-p2;
    d1:= D1/((j*D1/L)*ln(D1/q)+1);
    d2:= D2/((j*D2/L)*ln(D2/q)+1);
    d:= (d1+d2)/2;
    Y1:= h1+d;
    Y2:= h2+d;

```

ANEXO 03. Rotina de programa computacional da equação de Deboer & Chu.

(Continuação)

Repeat

S:= S+inc;

A:= 4*K/sqr(S);

B:= (2*K/sqr(S))*(sqr(d1)+sqr(d2));

U1:= -sqr(A*B);

U2:= c*f/t*ln(sqrt(((1+sqrt(A/B)*Y1)*(1-sqrt(A/B)*Y2))/((1-sqrt(A/B)*Y1)*
*(1+sqrt(A/B)*Y2))));

Until(U1>=U2);

Clrscr;

Writeln(' RESULTADOS ');

Writeln;

v:= ((S-L)/L)*100;

Writeln("Espaçamento de campo: ", L:10:2);

Writeln("Espaçamento calculado (S): ", S:10:2);

Writeln("Variação (%): ", v:10:2);

Writeln("A: ", A:10:5);

Writeln("B: ", B:10:5);

Writeln("Estrato equivalente (d): ", d:10:2);

Repeat until Keypressed;

END.

DADOS DE ENTRADA

Profundidade do dreno profundo (p1):	1,20 m
Profundidade do dreno raso (p2):	0,70 m
Profundidade da camada de impedimento (H):	2,75 m*
Condutividade hidráulica (K):	0,25 m.dia ⁻¹
Porosidade drenável (f):	0,0099
Carga hidráulica inicial (h1):	0,68 m
Carga hidráulica final (h2):	0,18 m
Tempo de drenagem (t):	2,125 dias
Diâmetro do dreno (u):	0,10 m
Espaçamento de campo (L):	17,50 m

(*) Valor médio