

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**SIMULAÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR INUNDAÇÃO E DA DRENAGEM
NOS SOLOS DE VÁRZEA DO RIO GRANDE DO SUL**

JOSÉ ANTÔNIO SALDANHA LOUZADA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Orientador : Prof. Nelson Luna Caicedo – IPH/UFRGS
Co-orientadores : Prof. Reinder Feddes – WAU
Prof. Jos van Dam – WAU

Banca Examinadora

Prof. Gustavo Merten	IPH/UFRGS
Prof. Adroaldo Dias Robaina	CCR/UFSM
Prof. Antônio Augusto Alves Pereira	CCA/UFSC

Porto Alegre, março de 2004

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e no Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Agrícola de Wageningen (WAU), sob a orientação dos professores Nelson Caicedo (IPH/UFRGS), Reinder Feddes (WAU) e Jos van Dam (WAU).

Agradecimentos especiais aos orientadores, à CAPES, que possibilitou que parte deste trabalho fosse desenvolvido na Universidade Agrícola de Wageningen, Holanda, aos pesquisadores do IRGA, Vera Regina Mussoi Macedo, Élio Marcolin e Nelson Irumé Corrêa, que foram os responsáveis pelos experimentos de irrigação que geraram os dados que deram suporte a uma parte deste trabalho, aos professores Jirka Simunek (George E. Brown Jr. Salinity Laboratory, USDA-ARS) e Nicholas Jarvis (Universidade de Ciências Agrícolas da Suécia), com quem tive longas e esclarecedoras “conversas” através do correio eletrônico, e à FEPAGRO, que disponibilizou gratuitamente os dados climáticos.

Resumo : Os solos de várzea são responsáveis por uma parcela significativa da economia do Rio Grande do Sul. As principais atividades de exploração desses solos são o cultivo do arroz irrigado por inundação e a pecuária. Tendo em vista o método de irrigação adotado, o cultivo do arroz é acompanhado de grandes consumos de água e energia. As más condições de drenagem, associadas à uma série de outros fatores, praticamente limitam a atividade agrícola à essa cultura, e fazem com que a pecuária seja quase uma imposição. Tendo esse quadro como referência foram definidos os objetivos desse trabalho, através dos quais buscaram-se algumas respostas que possam auxiliar na definição de um modelo de exploração mais adequado ao grande potencial que esses solos apresentam. Inicialmente o modelo agrodrológico SWAP foi adaptado às particularidades da irrigação por inundação e dos sistemas de drenagem que têm seus drenos implantados com subsoladores. Criou-se então uma nova versão, denominada SWAP_INU. Na seqüência o modelo foi validado a partir da comparação de seus resultados com observações feitas em áreas da Estação Experimental do Arroz do IRGA. Nessas áreas os perfis de solo têm como característica a presença de horizonte B superficial e impermeável. Uma série de simulações permitiram que fossem confrontadas as lâminas de irrigação e profundidades do lençol freático registradas nos experimentos e calculadas pelo modelo. No caso específico da irrigação, as lâminas observadas e calculadas também foram comparadas com as recomendadas pelo IRGA, quando pode-se constatar que o limite inferior do intervalo recomendado é compatível com as observações e cálculos feitos. Além disso, verificou-se que nesse tipo de perfil as características do horizonte A têm pouca importância sobre os resultados finais. Em outra série de simulações procurou-se relacionar a drenagem com a possibilidade de mecanização. Foram criados cenários com diferentes condições de drenagem superficial e subsuperficial, além da presença de drenos livres. Os resultados mostraram uma dependência muito grande entre os sistemas convencionais, e um desempenho bastante satisfatório da drenagem não convencional. Por fim, os resultados de um modelo simplificado, IRRIGA, foram confrontados com os do modelo SWAP_INU. A proximidade entre os valores calculados indicou um ótimo desempenho do modelo simplificado na estimativa da necessidade total de água para a irrigação por inundação.

Abstract : A significant part of the agricultural production in the State of Rio Grande do Sul is from wetland soils that are used mainly for flood-irrigated rice or cattle production. Because of the irrigation method used, rice cultivation requires a heavy consumption of both water and energy. The poor drainage conditions allied with other factors in practice limits agricultural activity to rice-growing, with cattle-ranching a less attractive alternative. Taking this setting as a reference, the objectives of the present work were defined and answers sought which would help to define a land-use model more appropriate to the high potential of these wetland soils. Initially, the agro-hydrological model SWAP was adapted to the particular aspects of flood irrigation and of drainage systems having drains installed by use of subsoilers. A new version of the SWAP model, SWAP_INU, was constructed and then validated by comparing its results with observations recorded at the Rice Experimental Station of IRGA. Soils in these areas are characterised by an impermeable layer at the surface of the B-horizon. In a series of simulations, observed and calculated depths to the phreatic surface were compared. In the presence of irrigation, observed and calculated irrigation depths were also compared with those recommended by IRGA, showing that the lower limit of the recommended interval is compatible with the results of observation and calculation. In addition, it was also shown that, in this type of soil profile, characteristics of the A-horizon have little effect on final results. Another series of simulations looked at drainage and the possibility of mechanisation. Scenarios were created with different conditions of surface and sub-surface drainage, and with mole drains. Results showed a strong dependence between conventional systems, and a satisfactory performance of non-conventional drainage. Finally, the results of a simplified model, IRRIGA, were compared with those of the SWAP_INU model. The close agreement between calculated values showed that the simplified model performed very well at estimating the total water requirement under flood irrigation.

Sumário

Conteúdo	Página
1 – Introdução	1
1.1 – Justificativa do tema	1
1.2 – Objetivos	4
2 – Revisão bibliográfica	5
2.1 – Meios porosos : conceitos	5
2.2 – Equações de fluxo em meios porosos	6
2.2.1 – Equações de continuidade de massa e de volume	6
2.2.2 – Equação dinâmica	8
2.2.2.1 – Equações fundamentais	8
2.2.2.2 – Equação de Darcy	10
2.3 – O potencial da solução do solo e sua relação com a equação de Darcy	12
2.4 – A constante de proporcionalidade k	15
2.5 – Combinação das equações de continuidade e dinâmica	16
2.5.1 – Equação de Jacob-Richards	16
2.5.2 – Equação de Richards	17
2.5.3 – Equação de Boussinesq	20
2.6 – Aplicação de modelos de simulação em áreas irrigadas e drenadas	23
2.7 – Composição de modelos agrohidrológicos	25
2.7.1 – Manejo da irrigação	25
2.7.2 – Drenagem	26
2.7.3 – Evaporação e Transpiração	27
2.7.4 – Infiltração e redistribuição interna	30
2.7.5 – Fluxo preferencial – Drenos livres	34
2.8 – Modelos aplicados à drenagem	39
2.9 – Modelos aplicados à irrigação por inundação	44
2.10 – Consumo na irrigação por inundação : valores medidos e estimados	46
2.10.1 – Dados de experimentos da Região Sul do Brasil	46
2.10.2 – Dados de experimentos de outros países	48
2.10.3 – Resultados da aplicação de modelos em diferentes regiões do RS	48
3 – Metodologia	52
3.1 – Introdução	52
3.2 – O modelo SWAP – um breve histórico	52

3.3 – O modelo SWAP – versão 2.0	53
3.4 – O modelo SWAP adaptado – versão SWAP_INU	54
3.4.1 – A equação de Richards e sua solução numérica	55
3.4.2 – As relações $\theta = \theta(h)$ e $K = K(\theta)$	60
3.4.3 – Transpiração e evaporação	62
3.4.4 – Irrigação	64
3.4.5 – Drenagem : Fluxo horizontal na zona saturada e escoamento superficial	65
3.4.6 – Fluxo preferencial – Drenos livres	67
3.4.7 – Equação de Richards – versão final utilizada no modelo SWAP_INU	73
3.4.8 – Síntese das adaptações feitas no modelo original (SWAP)	74
3.5 – O modelo IRRIGA – um exemplo de modelo simplificado	75
3.6 – Caracterização das áreas experimentais, parâmetros dos solos e da cultura ...	77
3.6.1 – Área experimental – irrigação por inundação	77
3.6.2 – Área experimental – drenagem	79
3.6.3 – Caracterização dos solos	79
3.6.4 – Parâmetros da cultura	81
3.7 – Dados climáticos	82
3.8 – Síntese das simulações e suas relações com os objetivos	83
3.9 – Caracterização das simulações : parâmetros e demais informações	85
4 – Resultados	90
4.1 – Validação do modelo SWAP_INU : simulações 01 à 05	90
4.1.1 – Condições iniciais, condições de contorno e discretização dos perfis	90
4.1.2 – Simulações com os dados da área experimental de irrigação	91
4.1.2.1 – Simulação 01 – safra 96/97	92
4.1.2.2 – Simulação 02 – safra 97/98	92
4.1.2.3 – Simulação 03 – safra 99/00	93
4.1.2.4 – Simulação 04 – safra 00/01	94
4.1.2.5 – Simulações 01 à 04 : comentários	94
4.1.3 – Simulação com os dados da área experimental de drenagem	96
4.1.3.1 – Simulação 05	96
4.1.3.2 – Simulação 05 : comentários	97
4.1.4 – Síntese do desempenho do modelo nas simulações 01 à 05	98
4.2 – Aplicação do modelo SWAP_INU	99
4.2.1 – Informações gerais : simulações 06 à 09	99
4.2.2 – Simulações 06 à 09 : apresentação dos resultados e comentários	99

4.3 – Aplicação do modelo SWAP_INU com fluxo preferencial	107
4.3.1 – Informações gerais : simulações 10 à 13	107
4.3.2 – Simulações 10 à 13 : apresentação dos resultados e comentários	108
4.4 – Aplicação simultânea dos modelos SWAP_INU e IRRIGA	111
4.4.1 – Cenário 01 (CEN 01) : solo com horizonte B superficial e impermeável	111
4.4.2 – Cenário 02 (CEN 02) : perfil homogêneo com lençol freático profundo	113
4.5 – Simulação contínua com o modelo SWAP_INU	115
5 – Conclusões e recomendações	118
5.1 – Conclusões	118
5.1.1 – Quanto à validação do modelo SWAP_INU	118
5.1.2 – Quanto às alterações introduzidas no modelo original	118
5.1.3 – Quanto às aplicações do modelo SWAP_INU	118
5.1.3.1 – Na irrigação por inundação	118
5.1.3.2 – Na drenagem	119
5.1.4 – Quanto ao modelo IRRIGA	119
5.2 – Recomendações	120
6 – Referências bibliográficas	121
Anexo A1 – Solução numérica da equação de Richards	144
Anexo A2 – Parâmetros físicos dos solos	149
Anexo A3 – Dados climáticos	151
Anexo A4 – Dados observados na área experimental de irrigação	183
Anexo A5 – Dados observados na área experimental de drenagem	187
Anexo A6 – Descrição do perfil modal da Unidade de Mapeamento Vacacaí	189

Lista de figuras

Figura	Página
Figura 1.1 – Histórico da área cultivada com arroz no RS	2
Figura 1.2 – Precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ETref)	3
Figura 2.1 – Representação esquemática dos principais processos simulados	25
Figura 2.2 – Formação de macroporos na matriz do solo	34
Figura 2.3 – Representação dos modelos de dupla porosidade/permeabilidade	35
Figura 3.1a – Condições de contorno na superfície – solo inicialmente saturado	58
Figura 3.1b – Condições de contorno na superfície – solo inicialmente não saturado	58
Figura 3.2 – Histerese no modelo SWAP_INU	62
Figura 3.3 – Implantação de drenos livres com subsolador do tipo torpedo	67
Figura 3.4 – Relação entre os índices v e ε	68
Figura 3.5 – Geometria da superfície do solo com a presença de drenos livres	70
Figura 3.6 – Presença de drenos livres associados ao conceito de fluxo preferencial	72
Figura 3.7 – Simulação contínua em períodos com e sem drenagem	75
Figura 3.8 – Representação esquemática do experimento de irrigação	78
Figura 3.9 – Variáveis do balanço e representação do manejo	79
Figura 3.10a – Planta baixa da área experimental de drenagem	80
Figura 3.10b – Corte transversal junto à área monitorada	80
Figura 4.1 – Lâmina superficial – simulação 01 : valores observados e calculados	92
Figura 4.2 – Lâmina superficial – simulação 02 : valores observados e calculados	93
Figura 4.3 – Lâmina superficial – simulação 03 : valores observados e calculados	93
Figura 4.4 – Lâmina superficial – simulação 04 : valores observados e calculados	94
Figura 4.5 – Profundidade do lençol freático : valores observados e calculados	97
Figura 4.6 – Drenagem + escoamento superficial vs espaçamento – simulações 06 à 09 (armazenamento máximo na superfície = 1 mm)	102
Figura 4.7 – Espaçamento vs drenagem vs escoamento superficial – simulação 09 (armazenamento máximo na superfície = 1 mm)	102
Figura 4.8 – Somatório de dias úteis para mecanização – critério 1	104
Figura 4.9 – Somatório de dias úteis para mecanização – critério 2	105
Figura 4.10 – Dias aptos para mecanização com diferentes condições de drenagem superficial e subsuperficial	106
Figura 4.11 – Drenagem + escoamento superficial vs espaçamento – simulações 07 e 08 (armazenamento máximo na superfície = 20 mm)	106

Figura 4.12 – Espaçamento vs drenagem vs escoamento superficial – simulações 07 e 08 (armazenamento máximo na superfície = 20 mm)	107
Figura 4.13 – Comportamento das variáveis escoamento superficial e drenagem pelas fraturas	110
Figura 4.14 – Simulação do comportamento da lâmina superficial – CEN 01	112
Figura 4.15 – Simulação do comportamento da lâmina superficial – CEN 02	115
Figura 4.16 – Simulação contínua em cenário hipotético	116

Lista de tabelas

Tabela	Página
Tabela 1.1 – Arroz no Brasil : área (1000 ha), produtividade (kg/ha) e % da produção total	2
Tabela 2.1 – Coeficientes da cultura do arroz	29
Tabela 2.2 – Processos simulados pelos modelos selecionados	43
Tabela 2.3 – Características dos modelos revisados	44
Tabela 2.4 – Consumo na irrigação por inundação estimado por balanço hídrico	49
Tabela 2.5 – Resultados da aplicação dos modelos IRRIGA e IRRIGA2	49
Tabela 2.6 – Demandas geradas por balanço hídrico seriado diário (mm)	51
Tabela 3.1 – Parâmetros e métodos de determinação	81
Tabela 3.2 – Parâmetros da cultura utilizados nas simulações	82
Tabela 3.3– Relação entre a profundidade relativa e a densidade relativa do sistema radicular	82
Tabela 3.4 – Parâmetros e informações utilizados na rotina solo-água da equação de Richards	86
Tabela 3.5 – Parâmetros relacionados à evaporação e transpiração	86
Tabela 3.6 – Características dos sistemas de drenagem	87
Tabela 3.7 – Critérios para mecanização	88
Tabela 3.8 – Parâmetros utilizados na rotina de fluxo preferencial	88
Tabela 3.9 – Parâmetros específicos do modelo IRRIGA	89
Tabela 4.1 – Discretização dos perfis	90
Tabela 4.2 – Condições iniciais e de contorno	90
Tabela 4.3 – Datas características de cada simulação	91
Tabela 4.4 – Balanço hídrico – simulação 01	92
Tabela 4.5 – Balanço hídrico – simulação 02	92
Tabela 4.6 – Balanço hídrico – simulação 03	93
Tabela 4.7 – Balanço hídrico – simulação 04	94
Tabela 4.8 – Parcelas do consumo na irrigação por inundação	95
Tabela 4.9 – Relação entre irrigação, precipitação total e efetiva	95
Tabela 4.10 – Balanço hídrico – simulação 05	96
Tabela 4.11 – Profundidade do lençol freático : valores observados e calculados	97
Tabela 4.12 – Índices de desempenho do modelo	98
Tabela 4.13 – Simulação 06 : balanço hídrico	99

Tabela 4.14 – Simulação 07 : balanço hídrico	100
Tabela 4.15 – Simulação 08 : balanço hídrico	100
Tabela 4.16 – Simulação 09 : balanço hídrico	101
Tabela 4.17 – Simulação 06 : número de dias para mecanização	103
Tabela 4.18 – Simulação 07 : número de dias para mecanização	103
Tabela 4.19 – Simulação 08 : número de dias para mecanização	103
Tabela 4.20 – Simulação 09 : número de dias para mecanização	104
Tabela 4.21 – Dias aptos para mecanização com diferentes condições de drenagem superficial e subsuperficial	105
Tabela 4.22 – Balanço hídrico : simulação 10	108
Tabela 4.23 – Balanço hídrico : simulação 11	108
Tabela 4.24 – Balanço hídrico : simulação 12	109
Tabela 4.25 – Balanço hídrico : simulação 13	109
Tabela 4.26 – Número de dias aptos para mecanização	110
Tabela 4.27 – Resultados da aplicação dos modelos IRRIGA e SWAP_INU	111
Tabela 4.28 – Aplicação dos modelos SWAP_INU e IRRIGA : condição inicial (h =- 100 cm)	113
Tabela 4.29 – Aplicação dos modelos SWAP_INU e IRRIGA : condição inicial (h =- 3500 cm)	114
Tabela 4.30 – Caracterização do cenário hipotético	115
Tabela 4.31 – Balanço hídrico : cenário hipotético	116
Tabela A2.1 – Parâmetros físicos do solo da área experimental de irrigação	150
Tabela A2.2 – Parâmetros físicos do solo da área experimental de drenagem	150
Tabela A2.3 – Parâmetros físicos do solo considerado na simulação com gradiente unitário	150
Tabela A3.1 – Precipitação e evaporação no período que compreende a safra 96/97	152
Tabela A3.2 – Precipitação e evaporação no período que compreende a safra 97/98	159
Tabela A3.3 – Precipitação e evaporação no período que compreende a safra 99/00	166
Tabela A3.4 – Precipitação e evaporação no período que compreende a safra 00/01	173

Tabela A3.5 – Precipitação e evaporação referentes às simulações de drenagem (validação do modelo)	180
Tabela A3.6 – Precipitação e evaporação referentes às simulações de drenagem (validação do modelo)	181
Tabela A3.7 – Precipitação e evaporação referentes às simulações de drenagem (validação do modelo)	182
Tabela A4.1– Dados referentes à safra 96/97	184
Tabela A4.2 – Dados referentes à safra 97/98	184
Tabela A4.3 – Dados referentes à safra 98/99	185
Tabela A4.4– Dados referentes à safra 99/00	185
Tabela A4.5– Dados referentes à safra 00/01	186
Tabela A5.1 – Profundidade do lençol freático no ponto médio entre os drenos	188

1 – Introdução

1.1 – Justificativa do tema

Os solos de várzea do Rio Grande do Sul incorporados ao processo produtivo totalizam uma área ao redor de 3.000.000 ha. Seu modelo de exploração está assentado na pecuária extensiva e fundamentalmente no arroz irrigado. Com um rendimento médio próximo de 5.500 kg/ha, contra ao redor de 2.000 kg/ha do restante do país, a produção de arroz do Rio Grande do Sul representa mais de 40% da produção nacional. Isso se deve em grande parte ao fato de que no Rio Grande do Sul predomina a lavoura irrigada (99% em 1995), enquanto na maioria dos demais estados produtores também se encontram lavouras de sequeiro. No período 1980-85, a área média colhida no Estado foi de 653.000 ha, atingindo 890.000 ha no período 1990-95. Em 1995, os números relativos à produção, área plantada e produtividade foram excepcionais, com acréscimos da ordem de 119,68%, 65,09% e 32,90%, respectivamente, se comparados com os de 1980. Na composição percentual do Valor Bruto da Produção (VBP) da agropecuária gaúcha, o arroz lidera o *ranking*, tendo atingido 17% de participação no ano de 1995. Este valor chegou a 25,63% em 1991 (Grando, 1996). Ao final da década de 90, a orizicultura gaúcha chegou muito próxima de 50% da produção nacional de arroz, contribuindo com 23% do produto interno bruto do Estado. (Agrianual, 1999). O arroz representa 33,5% da produção dos cultivos de verão no Rio Grande do Sul, superando a soja que representa 32,0%. Cerca de 85% da colheita gaúcha é exportada para outros estados, o que solidifica a condição do Rio Grande do Sul de Estado fornecedor de alimentos de consumo básico da população brasileira. No contexto internacional, onde o Brasil juntamente com o Japão é o décimo maior produtor, a produtividade do Rio Grande do Sul equipara-se à de alguns dos maiores produtores mundiais (Grando, 1996). Na tabela (1.1), têm-se informações das safras 97/98, 98/99 e 99/00 nas diferentes regiões do Brasil, onde se ratifica o grande predomínio da Região Sul sobre as demais.

A importância do arroz irrigado para o Rio Grande do Sul também pode ser constatada na figura (1.1), na qual se apresenta o histórico de sua área plantada (59/60 à 98/99). Apenas em anos excepcionais, por problemas climáticos ou questões de política agrícola, verificam-se quedas acentuadas na área cultivada. Mais recentemente, na safra 00/01 a área plantada (937.490 ha) foi apenas 1,5% inferior à área verificada na safra 99/00 (952.539 ha). De um modo geral, toda essa situação anteriormente descrita é ratificada pelas informações atuais (Agrianual, 2003).

Tabela 1.1 – Arroz no Brasil : área (1.000 ha), produtividade (kg/ha) e % da produção total

Região	Safr 97/98			Safr 98/99			Safr 99/00		
	Área	P ¹	% P _t ²	Área	P ¹	% P _t ²	Área	P ¹	% P _t ²
Norte	575,0	1685	11,5	611,6	1904	10,2	631,3	1791	9,9
NE	712,4	1310	11,0	781,6	1605	11,0	773,8	1899	12,8
Sul	1075,2	4261	54,1	1194,2	5315	55,8	1161,6	5354	54,4
C.Oeste	617,4	2382	17,4	863,8	2436	18,5	835,4	2606	19,1
Sudeste	269,0	1891	6,0	264,6	1899	4,5	214,1	2024	3,8

¹P = produtividade, ²P_t = produção total

Fonte : CONAB

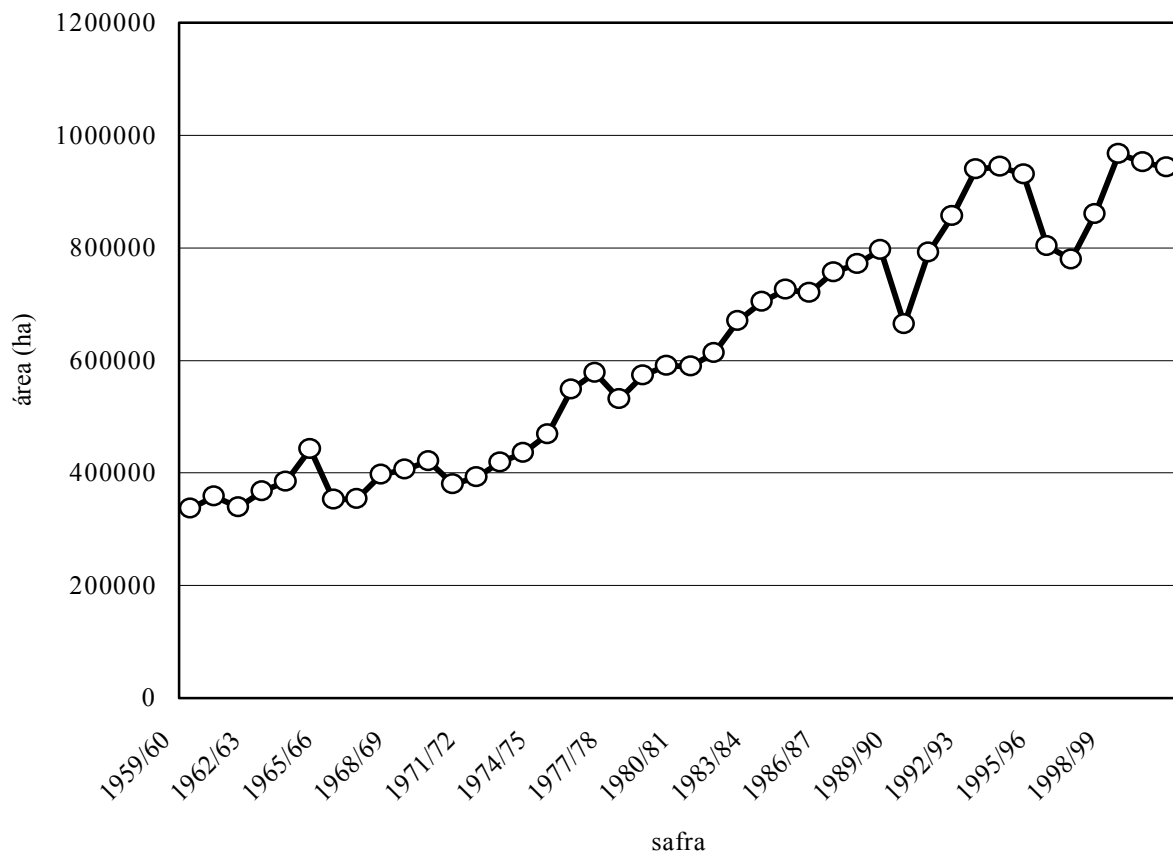


Figura 1.1 – Histórico da área cultivada com arroz irrigado no RS (Fonte : IRGA)

Apesar de os dados apresentados anteriormente constituírem um quadro aceitável para o Rio Grande do Sul, o modelo de exploração restrito ao arroz irrigado e à pecuária apresenta rendimentos inferiores ao potencial existente. Além de questões econômicas e de estrutura fundiária, que são tratadas politicamente de forma precária, também os solos e o clima apresentam barreiras naturais à utilização de um modelo mais adequado. No caso da pecuária, a implantação de pastagens, que possibilitem uma utilização intensiva, é dependente de

melhores condições de drenagem e, eventualmente, também de irrigação suplementar. No caso da agricultura, o mesmo pode ser dito quando se busca viabilizar a introdução de culturas alternativas ao arroz. No caso específico do arroz irrigado, há problemas de drenagem nos períodos de preparo do solo e colheita e uma alta demanda de água para irrigação. Quando do preparo, as precipitações associadas às más condições naturais de drenagem têm retardado o plantio em aproximadamente 50% dos anos. Como conseqüência, em cada um destes anos, ocorre em média uma queda de produtividade ao redor de 20%. Esses são valores que representam observações feitas pelo Instituto Riograndense do Arroz (IRGA) ao longo de vários anos. A colheita ocorre com o solo saturado, o que acarreta sua desestruturação e exige a presença de máquinas que representam um alto custo para o agricultor. A irrigação apresenta uma demanda que varia com o tipo de solo, clima e manejo praticado. Os valores consagrados ao longo do tempo, e que servem como referência para o dimensionamento de reservatórios e estações de recalque, são elevados, o que contribui para um consumo de energia igualmente elevado. Este é um aspecto de grande importância, já que a irrigação representa ao redor de 13% do custo de produção do arroz irrigado por inundação (é o maior percentual entre todos os itens que compõem o custo total). Outra questão intimamente ligada ao consumo de água diz respeito à tendência de que o sistema de plantio pré-germinado passe a ocupar grandes áreas. Este sistema teoricamente não exige do agricultor a rotação de áreas, permitindo assim o crescimento da área irrigada simultaneamente. Este crescimento será dependente da disponibilidade de água. Esta é uma questão que tende a agravar-se, já que o período de irrigação (meses de verão) é coincidente com o período de déficit hídrico. Este cenário é caracterizado na figura (1.2), onde são apresentados dados da região de Porto Alegre no período 1960-96.

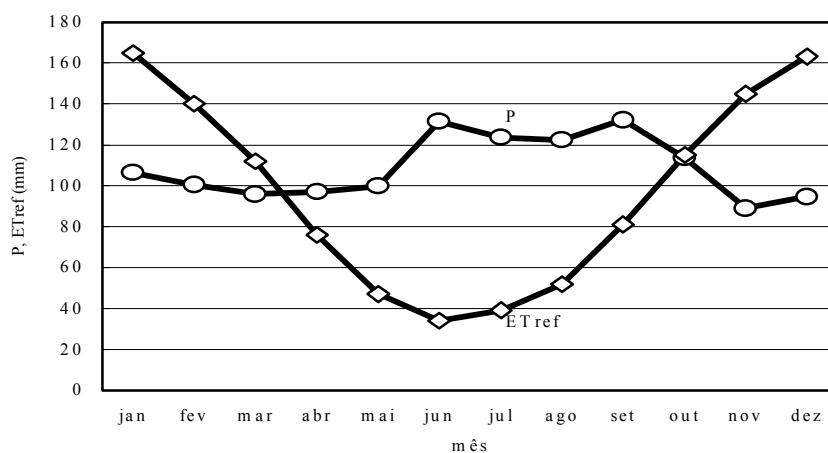


Figura 1.2 – Precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ETref)

O comportamento das variáveis nesta figura pode ser estendido para todas as regiões de cultivo de arroz no Rio Grande do Sul. Em algumas destas regiões, os usos da água para irrigação e abastecimento de centros urbanos já são conflitantes.

Esta síntese permite que se identifique a importância dos solos de várzea na economia do Rio Grande do Sul e que se coloque uma série de interrogações sobre vários aspectos relacionados ao manejo da água nestes solos. A tentativa de respondê-las, pelo menos em parte, é a principal justificativa para a realização deste trabalho.

1.2 – Objetivos

- **Adaptação do modelo SWAP** (Dam et al, 1997) ao manejo da irrigação por inundação e inclusão de alterações em sua rotina de fluxo preferencial para torná-lo mais adequado à simulação em áreas com a presença de drenos livres. Esses procedimentos deverão originar a versão SWAP_INU.
- **Validação do modelo SWAP_INU**. Nesta etapa, os resultados de sua aplicação serão confrontados com os dados observados nas áreas experimentais de irrigação e drenagem, ambas situadas na Estação Experimental do Arroz (EEA/IRGA – Cachoeirinha).
- **Aplicação do modelo SWAP_INU** na simulação das condições de umidade do solo nos períodos de preparo e colheita do arroz. Serão comparadas as condições naturais (condições médias de drenagem que prevalecem nas áreas de várzea) com a resposta teórica de sistemas artificiais de drenagem. Para tanto será suposta a presença de drenos convencionais (tubos enterrados) e de drenos livres (implantados com subsolador). Esses resultados permitirão que se avalie as condições oferecidas por diferentes sistemas de drenagem para o trânsito de máquinas nos períodos de preparo do solo e colheita.
- **Aplicação do modelo IRRIGA** (Fietz, 1986, 1987, Beltrame & Louzada, 1991), que é uma metodologia simplificada dirigida à irrigação por inundação, para definição das condições nas quais seus resultados são satisfatórios. Isso será feito tendo o modelo SWAP_INU anteriormente validado como referência.

2 – Revisão bibliográfica

2.1 – Meios porosos : conceitos

A extrema complexidade encontrada nos meios porosos faz com que todas as tentativas de conceituá-los com rigorismo sejam frustradas. É absolutamente impossível descrever de uma forma exata a geometria das superfícies sólidas que delimitam a região de fluxo no seu interior (Bear, 1972). Apesar desta dificuldade, algumas questões são bem definidas e já consagradas. Por exemplo, um meio poroso caracteriza-se necessariamente pela presença da parte sólida (matriz) e também pela presença dos poros, os quais são ocupados, simultaneamente ou não, pelas fases líquida e gasosa (Koopmans & Molen, 1992).

A produção das culturas é geralmente determinada pelas condições ambientais verificadas, sendo que estas condições decorrem da complexa interação entre a atmosfera e o solo (meio poroso). Assim sendo, para que se possa estimar o comportamento de uma determinada cultura submetida a diferentes condições (déficit hídrico, por exemplo) é necessário que a dinâmica das relações entre as fases sólida, líquida e gasosa encontradas em um meio poroso seja conhecida. Dentre as inúmeras relações existentes, as que mais interessam à agricultura dizem respeito ao armazenamento e ao movimento da fase líquida (solução do solo). A estimativa do comportamento da solução do solo teoricamente pode ser feito com base em três escalas : molecular, microscópica e macroscópica. Do ponto de vista molecular os mecanismos de fluxo e retenção têm como referência o comportamento de um grande número de moléculas, que em última análise constituem o fluido. Esse enfoque tem aplicação nula ou muito restrita em problemas correntes de engenharia agrícola. Isso faz com que a estrutura molecular seja substituída por uma escala microscópica, na qual o fluido passa a ser admitido como contínuo. Esse conceito exige que as propriedades do fluido, como, por exemplo, sua densidade, sejam estimadas em um determinado volume que não permita que seus valores oscilem em consequência do número de moléculas (muito pequeno) ou da não homogeneidade do fluido (muito grande). Este volume é grande se comparado à distância média entre moléculas, e pequeno se comparado ao meio como um todo. Essa aproximação é suficiente para resolver os problemas da mecânica dos fluidos clássica, na qual os contornos sólidos têm definição geométrica. Como isso não acontece nos meios porosos, é necessário que se avance para uma outra escala, essa denominada macroscópica. Seguindo-se o mesmo raciocínio anterior, é necessário que defina-se um volume que permita a estimativa das propriedades do meio poroso sem que seus valores sofram alterações significativas com a sua variação. Tomando-se a porosidade como exemplo e considerando-se um ponto circundado

por um determinado volume, tendo em vista a enorme irregularidade que ocorre na geometria das partículas sólidas e dos espaços vazios, seu valor seria dependente da posição do ponto no interior deste volume. Isso ocorre, já que sendo este volume muito pequeno, ele poderia estar totalmente preenchido por sólidos, por vazios ou por ambos, em proporções que dependeriam da posição do ponto. À medida que este volume aumenta além do volume de poros individuais, esta tendência de alterações abruptas diminui, até que, a partir de um determinado tamanho, a porosidade assumirá um valor único independente da posição do ponto no seu interior. As variações voltariam a ocorrer a partir de um volume maior que incorporasse a não homogeneidade do meio. Assim sendo, dentro de uma visão macroscópica, a quantificação de parâmetros e variáveis, feita de forma contínua, é representada por valores médios que ocorrem em um volume dito elementar representativo. Este volume é grande se comparado ao tamanho dos poros, e pequeno se comparado ao meio como um todo (Bear, 1972).

2.2 – Equações de fluxo em meios porosos

2.2.1 – Equações de continuidade de massa e de volume

A lei de conservação da massa é expressa pela equação de continuidade. Esta equação é uma representação matemática da variação da massa em um determinado volume de controle. Tomando-se a água como referência, a equação de continuidade é apresentada a seguir.

$$-\nabla(\rho q) = \frac{\partial(\rho\phi S)}{\partial t} \quad (2.1)$$

sendo :

$\nabla(\rho q)$: divergente do fluxo de massa [M.L⁻³.T⁻¹]

q : fluxo volumétrico [L³.L⁻².T⁻¹]

ρ : densidade da água [M.L⁻³]

ϕ : porosidade [L³.L⁻³]

S : grau de saturação [L³.L⁻³]

t : tempo [T]

Expandindo-se a derivada do termo do lado direito da equação anterior, tem-se :

$$\frac{\partial(\rho\phi S)}{\partial t} = \phi S \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho S \frac{\partial \phi}{\partial t} + \rho \phi \frac{\partial S}{\partial t} \quad (2.2)$$

Relacionando-se a porosidade e a densidade da água com a pressão, as respectivas derivadas temporais transformam-se para :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \beta \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.3a)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \alpha \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.3b)$$

sendo :

β : coeficiente de compressibilidade da água ; $\beta = \frac{\partial \rho}{\partial h}$

α : coeficiente de compressibilidade do solo ; $\alpha = \frac{\partial \phi}{\partial h}$

h : potencial de pressão [L]

Substituindo-se (2.3a) e (2.3b) em (2.2), resulta para a equação (2.1) :

$$-\nabla(\rho q) = (\rho S \alpha + \phi S \beta) \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \phi \frac{\partial S}{\partial t} \quad (2.4)$$

Em problemas correntes de fluxo na zona não saturada e na zona saturada de aquíferos não confinados é comum que a compressibilidade do solo e a compressibilidade da água sejam desprezadas. A equação de continuidade passa então a ser expressa com base no volume.

$$-\nabla q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.5)$$

sendo :

$\theta (= \phi S)$: umidade volumétrica [$L^3.L^{-3}$]

No caso de considerar-se unicamente a zona saturada de aquíferos freáticos, a equação de continuidade não pode ser expressa em termos da umidade volumétrica (equação 2.5), já que esta é constante nesta zona ($\theta = \phi$).

Utiliza-se então o conceito de porosidade drenável (μ), e a equação (2.5) passa a ter a forma que segue :

$$-\nabla q^* + R = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.6)$$

No termo do lado esquerdo, além do divergente da vazão por unidade de comprimento (q^*), também considera-se um acréscimo vertical (R), com dimensão $[L.T^{-1}]$, que pode ter origem na irrigação ou precipitação. No termo do lado direito a variável h , com dimensão $[L]$, representa a posição do lençol freático, e sua variação temporal associada à porosidade drenável definem a variação do armazenamento. O conceito de porosidade drenável será discutido em outra parte deste capítulo.

2.2.2 – Equação dinâmica

2.2.2.1 – Equações fundamentais

Os problemas gerais de hidrodinâmica podem ser tratados pela equação de Navier-Stokes, que agrega a viscosidade às equações de Euler. A equação de Navier-Stokes é uma aplicação da lei de Newton, segundo a qual a variação da quantidade de movimento em um sistema com massa constante é igual a resultante das forças aplicadas nesse sistema (Liggett, 1994). O somatório de forças compreende as que mobilizam o escoamento (gravitacional e variação da pressão) e a que se opõe ao mesmo (viscosidade). A variação da quantidade de movimento é dada pelo produto da massa pela aceleração. Considerando-se os eixos ortogonais x e z , sendo x a direção do escoamento, a representação matemática dessa igualdade é apresentada a seguir.

$$\rho \left(w \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial t} \right) = -\rho g \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (2.7)$$

sendo :

ρ : densidade [ML^{-3}]

w : componente da velocidade na direção x [LT^{-1}]

t : tempo [T]

g : aceleração [LT^{-2}]

p : pressão [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$]

η : viscosidade dinâmica [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$]

Nos casos onde os termos que representam a inércia, acelerações local e convectiva, podem ser descartados, ou seja, quando a viscosidade é preponderante, a equação (2.7) simplifica-se.

$$\rho g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (2.8)$$

Nessa forma, a equação de Navier-Stokes pode ser aplicada na solução de problemas teóricos relacionados ao fluxo em meios porosos. Um exemplo clássico é o caso dos tubos capilares admitidos como retilíneos (equação de Hagen-Poiseuille). Em condições naturais, tendo em vista a complexidade da geometria de seus poros, os meios porosos não podem ser descritos dessa forma simplificada. Essa situação não permite a determinação da distribuição da velocidade no interior desses poros, o que faz com que a equação de Navier-Stokes não possa ser aplicada (Koopmans & Molen, 1992). É possível, entretanto, reescrevê-la, tornando-a mais específica às situações que caracterizam os meios porosos. Isso é feito redefinindo-se o termo da direita da equação (2.8).

$$\rho g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{F}{\phi \Delta V} \quad (2.9)$$

sendo :

F : somatório das forças de fricção nos poros [MLT^{-2}]

ϕ : porosidade [$\text{L}^3 \text{L}^{-3}$]

ΔV : volume [L^3]

Considerando-se um poro que seja representativo de todo o meio, a força de fricção é diretamente proporcional à velocidade média, à viscosidade, ao seu comprimento e a uma

constante adimensional que depende da sua forma. O volume é estimado pelo produto de seu comprimento por sua seção transversal, sendo essa definida pelo quadrado de uma dimensão característica e por uma outra constante de forma (Koopmans & Molen, 1992). Substituindo-se essas relações no termo do lado direito da equação (2.9), resulta :

$$q = v\phi = -\frac{f}{\eta} \frac{\partial}{\partial x} (\rho g z + p) \quad (2.10)$$

sendo :

q : fluxo volumétrico [$L^3 L^{-2} T^{-1}$]

v : velocidade média [$L T^{-1}$]

f : constante representativa da geometria dos poros [-]

A equação (2.10) é, em última análise, a equação de Darcy, que descreve uma condição de equilíbrio entre as forças que promovem o escoamento e a força de fricção. Esse encaminhamento mostra que pode-se obtê-la partindo-se de fundamentos de mecânica dos fluidos semelhantes aos utilizados para derivação da equação de Navier-Stokes. Para tanto, admite-se que as forças de inércia podem ser desprezadas, que a força de fricção é proporcional à velocidade e que a força devido à viscosidade do líquido é igual à força de fricção entre o líquido e a fase sólida (Koopmans & Molen, 1992).

2.2.2.2 – Equação de Darcy

O reconhecimento do embasamento físico, ressaltado no item anterior, que respalda a equação de Darcy é posterior a sua derivação, que foi feita de forma experimental. Darcy, um pesquisador francês, em 1856, estudando o escoamento em colunas de solo, estabeleceu uma relação entre a vazão, a área da seção transversal, o gradiente de potencial e uma característica física do meio. Esta equação, na forma como foi originalmente proposta, é apresentada a seguir.

$$Q = k.A. \frac{\Delta H}{L} \quad (2.11)$$

sendo :

Q : vazão [$L^3.T$]

k : constante de proporcionalidade [$L.T^{-1}$]

A : área da seção transversal [L^2]

ΔH : diferença de potencial entre dois pontos do meio [L]

L : distância entre dois pontos do meio [L]

A relação entre ΔH e L representa o gradiente médio. Dividindo-se a vazão (Q) pela área (A), obtém-se o fluxo volumétrico, variável já referida anteriormente. Substituindo-se o gradiente médio pelo gradiente em um ponto, a equação de Darcy pode ser escrita como segue:

$$q = -k \cdot \nabla H \quad (2.12)$$

O sinal negativo aparece já que a função que relaciona a variável H com a coordenada (x , y ou z) é decrescente. A equação de Darcy resulta da generalização de vários experimentos, e não se trata de uma lei fundamental da física. A equação, por exemplo, não é válida quando ocorrem gradientes muito pequenos ou muito grandes (Feddes et al, 1997). No caso do limite superior, a equação de Darcy só é válida quando as forças de viscosidade são preponderantes em relação às forças de inércia. Isso já foi identificado anteriormente quando da derivação da equação de Darcy a partir da equação de Navier-Stokes. Para números de Reynolds entre 1 e 10, verifica-se o início de um desvio na relação linear proposta por Darcy. Quanto ao limite inferior, há um gradiente mínimo a partir do qual a equação é válida, ou ainda, um gradiente mínimo abaixo do qual não há fluxo. Os experimentos de Darcy utilizaram colunas de areia e foram todos conduzidos em condições de saturação. Quando o meio é não saturado, a equação modifica-se, já que neste caso a constante de proporcionalidade passa a ser uma função da umidade θ . A equação (2.12) é então escrita como segue:

$$q = -k(\theta) \cdot \nabla H \quad (2.13)$$

A dimensão do parâmetro k depende de como o potencial H é expresso, ou seja, se com base na massa, no volume ou no peso. A situação mais comum é expressá-lo com base no peso, e neste caso k tem dimensão de velocidade.

A equação de Darcy, nas suas diferentes formas, representa o fluxo advectivo, ou seja, o fluxo da solução do solo e não de um de seus componentes isoladamente (por exemplo, a

água). Portanto, quando se faz referência ao fluxo da água, trata-se de um “vício” que deve ser corretamente interpretado.

2.3 – O potencial da solução do solo e sua relação com a equação de Darcy

Quando um determinado corpo de massa m se movimenta numa determinada direção, este corpo está submetido a uma força F^s que atua nesta mesma direção. Para que ocorra este deslocamento entre dois pontos, o sistema despende uma energia igual ao produto desta força pela distância entre os dois pontos considerados. Dividindo-se esta energia pela massa, obtém-se a diferença de potencial correspondente. Supondo-se a distância entre os pontos infinitamente pequena de tal forma que F^s possa ser admitida constante, a equação que segue representa matematicamente o potencial em um ponto (Koorevaar et al, 1994).

$$\varphi = - \int_{s_0}^{s_1} \frac{F^s}{m} ds \quad (2.14)$$

As variáveis F^s e m já foram definidas anteriormente, φ é o potencial no ponto s_1 e s_0 representa o ponto de referência. O sinal negativo é um indicativo de que o potencial diminui à medida que a massa se move na direção da força F^s . Como a determinação dos potenciais em meios porosos não exige valores absolutos mas, sim, a sua diferença entre pontos, o valor do potencial no ponto de referência pode ser estabelecido arbitrariamente (igual a zero na equação 2.14). Assim, define-se o potencial em um ponto como a energia necessária para transferir desde um ponto de potencial nulo até este ponto um corpo de massa unitária. No caso da presença de outras forças no mesmo sistema, cada uma contribuirá com sua parcela para o potencial total, sendo que este corresponderá à soma algébrica destes potenciais parciais. Em meios porosos, estes valores parciais, cujo somatório constitui o potencial total da solução, devem-se fundamentalmente aos potenciais de temperatura, pressão externa, matricial, pressão do ar e gravitacional. O potencial devido à energia cinética é naturalmente desprezado, já que o fluxo da solução em meios porosos se caracteriza por velocidades suficientemente baixas. Considerando os potenciais de temperatura e pressão do ar, pode-se supor que o fluxo da solução seja influenciado pelo fluxo de calor e pelo fluxo de ar. A equação que segue é uma representação matemática desta situação (Onsager, 1931 *apud* Libardi, 1995).

$$q = \sum_{i=1}^3 y_{1,i} x_i \quad (2.15)$$

A variável q representa o fluxo volumétrico da solução, y representa o coeficiente de proporcionalidade e x o gradiente. Considerando-se a variação do índice i , têm-se:

$y_{1,1}$: coeficiente que relaciona o fluxo de 1 com o gradiente de 1 (solução)

$y_{1,2}$: coeficiente que relaciona o fluxo de 1 com o gradiente de 2 (temperatura)

$y_{1,3}$: coeficiente que relaciona o fluxo de 1 com o gradiente de 3 (pressão do ar)

x_1 : gradiente de 1 (solução)

x_2 : gradiente de 2 (temperatura)

x_3 : gradiente de 3 (pressão do ar)

A equação de Darcy só considera os termos para i igual a 1, ou seja, além de uma condição isotérmica também admite que o fluxo da solução não é influenciado pelo fluxo de ar. Assim o potencial representado por H na equação de Darcy é composto pelo somatório dos potenciais gravitacional e de pressão no caso do meio saturado e pelo somatório dos potenciais gravitacional e matricial em condições de não-saturação. Isso implica em que as únicas forças consideradas como as que mobilizam o fluxo devem-se à gravidade e à diferença de pressão. Em ambos os casos o potencial total H é denominado potencial hidráulico. A equação de Darcy trata-se, então, de uma simplificação da equação de Onsager e representa unicamente o fluxo da solução por advecção. Esta condição faz com que a eventual ocorrência de gradientes de potencial decorrentes da presença de solutos não seja relevante (Corey & Klute, 1985). Na seqüência deste texto, por uma questão de simplificação, os termos “solução do solo” e “água do solo” serão admitidos como sinônimos. Quando eventualmente a água for tratada como um componente da solução, uma referência específica será feita.

No caso de meios porosos, o ponto de referência, ou estado padrão, no qual o potencial é nulo, corresponde a uma solução livre da influência da matriz (as forças associadas aos fenômenos de retenção são nulas), submetida a uma pressão igual à pressão atmosférica e situada em um plano de referência onde a cota é igual a zero. Do ponto de vista dimensional, o potencial pode ser expresso por meio de relações entre energia e massa (de acordo com seu conceito), energia e volume, ou ainda, energia e peso. Tendo-se como referência a lei de Newton ($F = m.g$) e a equação (2.14), as equações que representam os potenciais parciais e o potencial total, com base na massa, são apresentadas a seguir.

$$\varphi_g = -\int -g \cdot dz \quad (2.16)$$

$$\varphi_p = -\int -\frac{dp^*}{\rho} \quad (2.17)$$

$$H = \frac{p^*}{\rho} + g z \quad (2.18)$$

sendo :

H : potencial total [L^2T^{-2}]

φ_g : potencial gravitacional [L^2T^{-2}]

φ_p : potencial de pressão [L^2T^{-2}]

p^* : pressão relativa em um ponto do sistema solo-ar-solução [$ML^{-1}T^{-2}$]

g : aceleração da gravidade [LT^{-2}]

ρ : densidade [ML^{-3}]

z : cota de um ponto no sistema solo-ar-solução em relação ao plano de referência [L]

Multiplicando-se a equação (2.18) por ρ , obtém-se a expressão para H com base no volume. Dividindo-se esta por g , obtém-se a expressão para H com base no peso. Nesse caso o potencial H tem dimensão de comprimento e é denominado carga hidráulica. Suas parcelas, também com dimensão de comprimento, são denominadas carga de pressão e carga gravitacional ou de posição.

O mesmo raciocínio utilizado para o potencial de pressão é válido para o potencial matricial, ou seja, este também pode ser expresso por meio de uma carga equivalente à pressão da solução em um ponto da zona não-saturada. No caso da zona saturada, a carga corresponderá à altura da coluna d'água no interior de um piezômetro cuja extremidade inferior seja coincidente com o ponto em questão. No caso da zona não-saturada, a carga equivalente ao potencial matricial é definida com a utilização de tensiômetros. O emprego da equação de Darcy, com base no potencial total H , só é válido enquanto este potencial tiver origem em forças conservativas. Uma determinada força é dita conservativa quando o trabalho entre dois pontos que resulta dessa força independe do caminho entre eles. Só nesse caso a força resultante em um determinado ponto poderá ser representada pelo gradiente de uma única variável (Feddes et al, 1997). Por exemplo, nos casos em que a densidade da solução varia com sua concentração, a pressão deixa de ser uma força desta natureza, ou seja,

passa a ser dependente das coordenadas espaciais (x, y, z). Assim a equação de Darcy deve apresentar de forma explícita as variáveis pressão e densidade, sendo comum utilizá-la com os potenciais expressos com base no volume (Koopmans & Molen, 1992). Essa limitação para aplicação da equação de Darcy com base no potencial total também pode ser constatada quando deriva-se parcialmente os potenciais gravitacional e de pressão, obtendo-se assim as forças correspondentes. Se a densidade ρ for dependente da trajetória, resultam das derivações termos que claramente não são componentes das respectivas forças (Corey, 1977).

2.4 – A constante de proporcionalidade k

A constante de proporcionalidade k pode ser interpretada confrontando-se a equação de Darcy com a equação de Hagen-Poiseuille, já referida anteriormente. Sua derivação pressupõe que o fluxo é laminar (condição necessária para validade da equação de Darcy) e ocorre em pequenos condutos circulares de raio constante (simplificação da geometria dos tubos capilares em meios porosos). Esta equação é apresentada a seguir.

$$v = - \frac{d^2}{32\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.19)$$

sendo :

v : velocidade [$L.T^{-1}$]

d : diâmetro do conduto [L]

η : viscosidade dinâmica [$ML^{-1}T^{-1}$]

p : pressão [$M L^{-1} T^{-2}$]

x : coordenada horizontal [L]

Sendo o escoamento horizontal, o componente gravitacional deixa de existir, e o potencial total deve-se unicamente ao seu componente de pressão. Transportando-se a equação (2.19) para o fluxo em meios porosos, pode-se escrevê-la como segue.

$$q = - \phi c \frac{d^2}{32\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.20)$$

Como o fluxo volumétrico (q) da equação de Darcy não representa a velocidade, já que a área disponível ao fluxo não corresponde à área total da seção transversal, é necessário que a porosidade (ϕ) seja introduzida na equação (2.19). O parâmetro c agrega a esta equação a tortuosidade dos capilares, já que ela foi derivada para um conduto retilíneo. O parâmetro d representa uma característica geométrica do meio, podendo ser interpretado como o diâmetro médio dos poros (Bos, 1994). Claramente as equações (2.10) e (2.20) são equivalentes, sendo que na primeira os parâmetros ϕ , c e $d^2/32$ estão embutidos na constante f . Comparando-se a equação (2.20) com a equação de Darcy, estando o potencial total expresso com base no volume, pode-se escrever:

$$k = \frac{k^* \rho g}{\eta} \quad (2.21)$$

Em um meio saturado, a constante k é denominada condutividade hidráulica saturada, e resulta da combinação de propriedades do solo e do fluido. A constante k^* , denominada permeabilidade intrínseca, é uma propriedade exclusiva do solo e da geometria de seus poros (Hillel, 1970). Quando k é expresso com dimensão de velocidade, a dimensão de k^* é $[L^2]$.

A relação entre a condutividade hidráulica e parâmetros físicos do solo indica que esta cresce com o crescimento do diâmetro médio dos poros. Por outro lado, como apenas os poros preenchidos com água contribuem para o fluxo, a condutividade também será uma função da umidade do solo, sendo que seu valor será máximo quando o solo estiver saturado. Como a umidade está relacionada ao potencial matricial, a condutividade hidráulica também pode ser expressa em função deste potencial. A obtenção de respostas aos problemas que envolvem o fluxo da solução através de modelos matemáticos exige que estas relações sejam expressas de forma analítica ou tabular.

2.5 – Combinação das equações de continuidade e dinâmica

2.5.1 – Equação de Jacob-Richards

A equação de Jacob-Richards, apresentada a seguir, resulta da combinação da equação de continuidade de massa (equação 2.4) com a equação de Darcy.

$$\begin{aligned}
& (\rho S \alpha + \phi S \beta) \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \phi \frac{\partial S}{\partial t} = \\
& \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho \left(k_x(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho \left(k_y(\theta) \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho \left(k_z(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} + k_z(\theta) \right) \right]
\end{aligned} \quad (2.22)$$

A equação de Jacob-Richards é assim denominada por considerar a compressibilidade do fluido e do meio, conceitos introduzidos por Jacob ao relatar o fluxo em aquíferos confinados, e o fluxo não-saturado considerado inicialmente por Richards (Nieber & Feddes, 1999).

2.5.2 – Equação de Richards

A equação de Richards resulta da combinação da equação de continuidade de volume (equação 2.5) com a equação de Darcy. Considerando-se unicamente a direção vertical, com sua coordenada z crescendo no sentido de baixo para cima, tem-se.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (2.23)$$

A equação (2.23) é válida para um meio isotérmico, rígido e homogêneo no que diz respeito à densidade da solução e à constante de proporcionalidade k . A homogeneidade de k indica que sua variação deve-se unicamente à variação de θ . Além disso, admite que a interferência do fluxo de ar sobre o fluxo da solução é desprezível (Simunek et al, 1994). Tanto à equação de Jacob-Richards como à equação de Richards pode-se agregar um termo que represente uma fonte (+) ou um sumidouro (-). A forma utilizada em (2.23) é denominada mista, já que h e θ aparecem como variáveis dependentes. Considerando-se unicamente θ , a equação modifica-se para:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + k(\theta) \right] \quad (2.24)$$

O termo $D(\theta)$ é denominado difusividade da solução e definido pela equação que segue:

$$D(\theta) = k(\theta) \frac{dh}{d\theta} \quad (2.25)$$

Considerando-se agora h como variável dependente, a equação (2.23) modifica-se para:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial z} + k(h) \right] \quad (2.26)$$

O termo $C(h)$ é denominado capacidade específica da solução e definido pela equação que segue :

$$C(h) = \frac{d\theta}{dh} \quad (2.27)$$

Tendo em vista a não-linearidade das equações (2.23), (2.24) e (2.26), soluções analíticas só são possíveis em situações muito particulares. Haverkamp et al (1977), Vauclin et al (1979) e Celia et al (1990) apresentam e comparam uma série de esquemas numéricos empregados na solução destas equações. Quando se pretendem simular simultaneamente as zonas saturada e não-saturada a equação (2.24) não se aplica, já que na zona saturada θ é constante. A equação (2.26) não tem esta limitação, pois sua variável dependente (pressão) poderá alternar valores positivos e negativos, dependendo da região onde estiver situada a coordenada vertical. Esta equação também apresenta vantagens em meios estratificados, porque, enquanto nestas condições θ apresenta descontinuidades, h terá um comportamento contínuo (Vauclin et al, 1979, Feddes et al, 1997). Por outro lado, uma de suas desvantagens deve-se à acentuada variação da variável h na superfície (por exemplo, de -10^5 para 0). Isso pode ocorrer em curto espaço de tempo, caracterizando a passagem do solo de uma condição de muito seco para saturado. Em um meio completamente não-saturado, a equação (2.24) pode ser vantajosa, já que em geral a variação de $D(\theta)$ com θ é de menor ordem de grandeza do que a variação de $C(h)$ com h , ou seja, a não-linearidade da equação (2.26) é mais acentuada (Feddes et al, 1997). A principal desvantagem da equação que tem h como variável dependente é o erro associado ao seu balanço de massa, que provem do termo que contém a derivada em relação ao tempo. Enquanto $C(h) \frac{\partial h}{\partial t}$ e $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ são equivalentes quando vistos de uma forma contínua, isso não ocorre quando são discretizados. Essa desigualdade é acentuada

pela extrema não linearidade do termo $C(h)$. Essas observações relacionadas às equações (2.24) e (2.26) apontam a forma mista como a mais adequada, já que além de manter a correção do balanço de massa, o que é inerente à formulação com a variável θ , apresenta a solução com base na variável h (Celia, et al, 1990). De uma maneira geral, os esquemas numéricos de diferenças finitas podem ser explícitos, implícitos com linearização explícita dos parâmetros ou, ainda, completamente implícitos. As soluções computacionais dos esquemas explícitos são muito simples, exigindo, entretanto, para que seja assegurada sua estabilidade numérica, o emprego de pequenos intervalos de tempo. Esta exigência pode tornar o tempo de utilização do computador excessivamente elevado. Nos esquemas implícitos com linearização explícita, os parâmetros que aparecem como coeficientes das derivadas são estimados no tempo presente, ou seja, são sempre conhecidos. Já nos esquemas completamente implícitos, estes parâmetros são estimados um intervalo de tempo a frente. Dependendo do esquema numérico empregado, é necessária a linearização desses parâmetros no tempo e/ou no espaço. A linearização no espaço pode ser definida pelas médias aritmética, harmônica, geométrica ou ponderada, o que pode ser feito diretamente sobre o parâmetro ou sobre a variável que o origina (Stroosnijder, 1982). A linearização no tempo pode ser feita por extrapolação, por métodos do tipo “predictor – corrector” ou de forma iterativa (Stroosnijder, 1982). Neste último caso, a utilização da variável θ para avaliação da convergência tem se mostrado um critério mais robusto (Dam et al, 1997). A acentuada não-linearidade das funções que representam as propriedades dos solos é um fator que dificulta a obtenção de soluções acuradas para os problemas na zona não-saturada. A rigor, o melhor esquema é aquele que assegura a estabilidade e a convergência da solução, o que, em geral, não pode ser definido de maneira antecipada. Uma forma de avaliar a qualidade das soluções numéricas é compará-las com soluções exatas (analíticas), as quais, infelizmente, só estão disponíveis para problemas simples e que não representam a complexidade que se verifica na zona não-saturada (Stroosnijder, 1982). Qualquer que seja a forma da equação e o tipo de solução, faz-se necessária a definição das condições iniciais, condições de contorno e das relações entre θ , h e k . Alguns modelos relacionando estas variáveis serão apresentados posteriormente. Em geral, as condições iniciais são definidas tomando-se valores de h (ou θ) em equilíbrio com o lençol freático, informando-se a posição deste em relação à superfície do solo, ou ainda admitindo-se o solo em capacidade de campo. A condição de contorno superior (superfície) é definida ou pela evaporação ou pela infiltração. No limite inferior, a condição de contorno pode ser do tipo Dirichlet (define-se a pressão), do tipo Neumann (define-se o fluxo) ou do tipo Cauchy (o fluxo é uma função da variável dependente) (Feddes et al, 1988).

2.5.3 – Equação de Boussinesq

A equação de Boussinesq diz respeito unicamente ao fluxo na zona saturada de aquíferos não confinados, resultando da combinação das equações de Darcy e continuidade (equação 2.6). A apresentação da equação de Boussinesq é importante, já que em muitos modelos a conexão das zonas saturada e não saturada ocorre por meio de soluções desta equação (fluxo horizontal) e da equação de Richards (fluxo vertical). Na equação de continuidade, admite-se que a variação do armazenamento independe da posição do lençol freático em relação à superfície do solo, ou seja, a porosidade drenável (μ) é uma constante e representa a lâmina drenada por unidade de rebaixamento do lençol freático de uma coluna compreendida entre o lençol freático e a superfície do solo (Bear, 1972). A drenagem é admitida instantânea e μ definido pela equação abaixo.

$$\mu = \theta_{sat} - \theta_{cc} \quad (2.28)$$

sendo :

θ_{sat} : umidade volumétrica correspondente à saturação [L^3L^{-3}]

θ_{cc} : umidade volumétrica correspondente à capacidade de campo [L^3L^{-3}]

Considerando-se somente a direção x , a vazão através de uma seção compreendida entre o limite inferior do aquífero e o lençol freático, por unidade de comprimento perpendicular ao plano x - z , é definida pela equação que segue.

$$q^* = \int_{\beta}^h q(z) dz \quad (2.29)$$

A variável $q(z)$ é dada pela equação de Darcy, e os limites de integração β e h correspondem respectivamente às cotas do fundo e do lençol freático referidas a um plano horizontal arbitrário. Desconsiderando-se a direção perpendicular ao plano x - z (y), o limite inferior é uma função de x enquanto o limite superior é uma função de x e do tempo. Com base na equação de Darcy e na regra de Leibnitz, a equação (2.29) transforma-se para :

$$q^* = -k \left[\frac{\partial}{\partial x} [(h - \beta) H^*] - H(h) \frac{\partial h}{\partial x} + H(\beta) \frac{\partial \beta}{\partial x} \right] \quad (2.30)$$

A variável H^* que aparece na equação (2.30) é definida como segue :

$$H^* = \frac{1}{h - \beta} \int_{\beta}^h H dz \quad (2.31)$$

Admitindo-se que o potencial total H não é uma função de z tem-se $H = H^*$ em qualquer ponto de uma vertical, e sendo $H = h$ junto ao lençol freático (a pressão é igual à pressão atmosférica), a equação (2.30) reduz-se para :

$$q^* = -k (h - \beta) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.32)$$

A equação (2.32) deve-se a Dupuit (Dupuit, 1863 *apud* Bear, 1972), na qual $H(x,z)$ é substituído por $h(x)$. Esta simplificação implica em admitir-se que o fluxo é essencialmente horizontal, ou ainda, que a distribuição de pressões na vertical é hidrostática, ou ainda, que o gradiente em qualquer ponto é igual a declividade do lençol freático acima deste ponto (Bear, 1972). Evidentemente, sua validade está condicionada a uma declividade do lençol freático bastante suave, o que normalmente ocorre em áreas planas. Demonstra-se analiticamente que a equação de Dupuit é válida quando $i^2 \ll 1$, sendo i a declividade de lençol freático (Bear, 1972). A diferença $(h - \beta)$ que aparece na equação (2.32) corresponde à posição do lençol freático agora referida ao limite inferior do aquífero, onde β é dado pela equação que segue :

$$\beta = s (L - x) \quad (2.33)$$

sendo :

L : distância entre os contornos do domínio na direção x [L]

s : declividade do fundo do aquífero [L L⁻¹]

Assim, pode-se escrever :

$$h = h^* + s (L - x) \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial h^*}{\partial x} - s \quad (2.35)$$

sendo :

h^* : posição do lençol freático referida ao limite inferior do aquífero [L]

Substituindo-se a equação (2.35) na equação (2.32) e posteriormente na equação de continuidade (equação 2.6), obtém-se :

$$h^* \frac{\partial^2 h^*}{\partial x^2} + \left[\frac{\partial h^*}{\partial x} \right]^2 - s \frac{\partial h^*}{\partial x} + \frac{R}{k} = \frac{\mu}{k} \frac{\partial h^*}{\partial t} \quad (2.36)$$

A equação (2.36) deve-se a Boussinesq (Boussinesq, 1903, 1904 *apud* Bear, 1972), e representa o comportamento do fluxo na zona saturada de aquíferos não confinados. Há um sem-número de aplicações desta equação, passando pela simulação de grandes áreas heterogêneas, modelos que representam as interações rio-aquífero até questões mais específicas, como, por exemplo, a estimativa do espaçamento entre drenos subsuperficiais. As diferentes soluções são derivadas com base na própria equação (2.36) e em formas mais simplificadas de considerá-la. Tal qual a equação de Richards, sua não-linearidade faz com que soluções analíticas só sejam possíveis mediante hipóteses que a linearizam. Uma forma de linearizá-la consiste em substituir-se a variável h^* , que aparece como coeficiente da derivada de segunda ordem, por uma espessura constante. Outras simplificações desconsideram a declividade de fundo, o termo que aparece elevado ao quadrado ou assumem a recarga instantânea. Todos esses procedimentos foram considerados simultaneamente na derivação de uma equação clássica de drenagem, como é o caso da equação de Glover-Dumm (Dumm, 1954). O mesmo autor, neste mesmo artigo, e Schilfgaarde (1963) apresentam soluções analíticas aproximadas da equação em sua forma não-linear, em que consideram a recarga instantânea e $s=0$. As soluções obtidas com base na hipótese de recarga instantânea normalmente têm aplicação restrita aos casos de dimensionamento (evento isolado), enquanto as simulações contínuas de longos períodos adotam as soluções nas quais a recarga tem duração finita. Um exemplo deste tipo é a equação de Kraijenhoff (Leur, 1958). A questão relativa a declividade de fundo foi avaliada por diversos autores. Entre outros, Schmid & Luthin (1964), Guitjens & Luthin (1965), Luthin & Guitjens (1967), Chauhan et al (1968) e Fipps & Skaggs (1989) mostram que as soluções obtidas para $s=0$ também se aplicam para valores de s entre 10% e 15%. O fato da equação de Boussinesq estar associada às hipóteses de Dupuit faz com que, quando da presença de drenos subsuperficiais, tenha-se que introduzir um fator de correção para ter em conta, além do fluxo horizontal, também o fluxo radial. Isso

pode ser feito de uma forma indireta com o emprego do conceito de espessura equivalente introduzido por Hooghoudt (Hooghoudt, 1940 *apud* Ritzema, 1994). Os valores de espessura equivalente, dependentes da geometria do sistema de drenagem e da profundidade da camada impermeável, foram inicialmente apresentados por Hooghoudt em forma de tabela. Posteriormente, foram definidas expressões analíticas para estimativa deste parâmetro (Beers, 1965, Moody, 1966, Molen & Wesseling, 1991). As condições iniciais normalmente adotadas para situações que envolvem a presença de drenos subsuperficiais consideram o lençol freático horizontal, elíptico ou parabólico. As condições de contorno assumem $(h^*, x=0) = (h^*, x=L) = 0$, sendo L o espaçamento entre os drenos e h^* , neste caso, a posição do lençol freático referida ao plano horizontal que coincide com a cota de instalação dos drenos.

2.6 – Aplicação de modelos de simulação em áreas irrigadas e drenadas

O conceito de simulação é amplo e pode ser sintetizado como a aplicação de modelos para o estudo do comportamento de sistemas reais ou hipotéticos. Talvez a principal justificativa para a aplicação de modelos seja que os resultados das simulações levam a uma melhor compreensão de sistemas extremamente complexos, e esta compreensão é pré-requisito para a solução de qualquer tipo de problema. Atualmente, os computadores digitais são suficientemente rápidos para simular a maioria dos sistemas em tempo real e com alto grau de precisão. Mesmo quando errados, pode-se dizer que os resultados gerados por modelos computacionais são “precisamente errados”.

No caso específico de sistemas de irrigação e drenagem, busca-se oferecer as condições solo – água mais favoráveis para o desenvolvimento das culturas. É praticamente impossível, por questões de tempo e custo, otimizar projetos desta natureza através de procedimentos experimentais no campo. Mediante simulações pode-se, por exemplo, avaliar a resposta de uma determinada cultura a diferentes épocas de plantio e calendários de irrigação, ou ainda, a repercussão de diferentes sistemas de drenagem sobre o balanço de água e sais junto ao sistema radicular das culturas. Os modelos computacionais viabilizam simulações rápidas e de baixo custo de um grande número de cenários, cujos resultados, satisfatoriamente analisados e compreendidos, poderão conduzir a uma solução final otimizada.

Ao longo das últimas décadas, um sem-número de modelos para simulação de sistemas agroidrológicos foram desenvolvidos e disponibilizados. Estes modelos diferem pela abrangência e pela maior ou menor complexidade de seus algoritmos. Teoricamente os modelos mais rigorosos resolvem numericamente a equação de Richards em duas ou até três dimensões (modelos *2D* e *3D*). Inicialmente restritos a eventos de curta duração, passaram

também a ser aplicados em simulações contínuas de longos períodos a partir da existência dos computadores de grande velocidade. As maiores limitações que ainda persistem em relação ao uso rotineiro destes modelos são o grande número de parâmetros de entrada e a necessidade de treinamento e experiência dos usuários. Uma outra categoria de modelos simula a zona não-saturada resolvendo a equação de Richards na direção vertical (modelos $1D$), enquanto a zona saturada é considerada por intermédio de relações funcionais ou, o que é mais comum, por soluções da equação de Boussinesq. As simplificações são maiores em modelos que não envolvem a equação de Richards. Nestes a zona não-saturada é tratada por um balanço macro ou ainda por equações de onda cinemática, nas quais o fluxo é admitido como gravitacional, e a zona saturada é considerada por uma das formas já anteriormente citadas. Por fim, os modelos mais simplificados baseiam-se unicamente na equação de Boussinesq. Em geral, tratam-se de modelos regionais, aplicados em fase de planejamento de áreas que apresentam grande variabilidade na direção horizontal. Nestes casos soluções $2D$ ou $3D$ da equação de Richards tornam-se muito complexas e exigem um número muito grande de parâmetros de entrada, o que praticamente os inviabiliza (Skaggs, 1999).

Addiscott & Wagenet (1985) apresentam uma classificação para os modelos que tratam do transporte de solutos que pode ser estendida aos modelos que consideram unicamente o fluxo da água. Esta classificação os distingue entre determinísticos e estocásticos, mecanísticos e funcionais e, por fim, entre os que adotam parâmetros que se refletem na intensidade de variação de uma determinada variável e os que trabalham somente com volume. A definição de um modelo dentro destas alternativas é ambígua, principalmente quando se trata de classificá-lo como mecanístico ou funcional. Em princípio os modelos mecanísticos são os que incorporam os principais fundamentos físicos que regem o processo a ser simulado. No caso dos modelos solo – água, são tidos como mecanísticos os que utilizam a equação de Richards. Isto é discutível, já que esta equação incorpora uma série de simplificações, tais como desconsiderar o fluxo de ar, a existência de gradientes térmicos, a compressibilidade do meio, etc. Os próprios autores anteriormente citados se referem a uma classificação alternativa, na qual os modelos seriam considerados mais ou menos mecanísticos, e não ou mecanísticos ou funcionais. A escolha do melhor modelo passa necessariamente pela natureza do problema que está sendo enfrentado. Respostas a perguntas como “Há necessidade de modelos $2D$ ou $3D$?” e “A zona não-saturada deve ser tratada por equações específicas ou métodos aproximados são suficientes ?” devem anteceder a decisão. Fatores adicionais como a experiência do usuário, a disponibilidade de dados e a relação entre a complexidade do modelo e os custos para aplicá-lo igualmente devem ser considerados. Por fim, deve-se salientar que a maior abrangência e complexidade dos modelos, bem como o

eventual caráter determinístico, não eliminam suas próprias incertezas e de seus parâmetros (Skaggs, 1999).

2.7 – Composição de modelos agroidrológicos

Um modelo de qualquer natureza constitui-se de um conjunto de rotinas que relacionam e quantificam as variáveis que representam os processos envolvidos nos cenários a serem simulados.

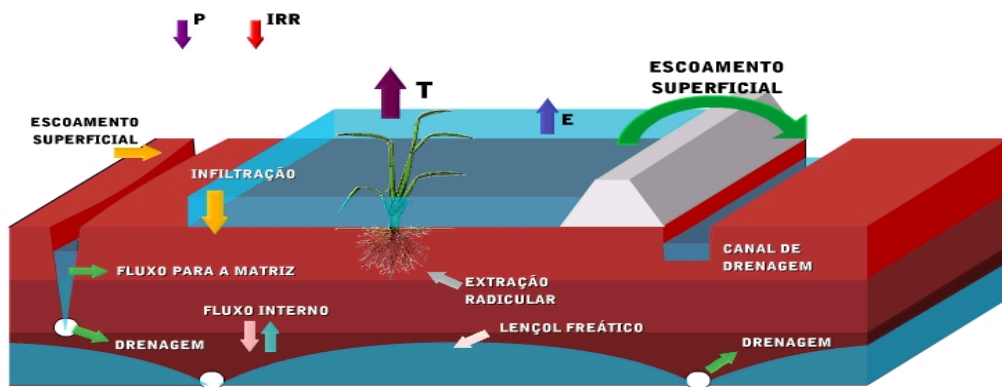


Figura 2.1 – Representação esquemática dos principais processos simulados

Na figura anterior procura-se mostrar de forma esquemática os principais processos que compõem um modelo agroidrológico. Na seqüência são citadas e comentadas algumas formas de tratamento desses processos em diferentes modelos.

2.7.1 – Manejo da irrigação

De uma maneira geral os modelos permitem que se defina “quando irrigar” e “quanto irrigar”. Tendo em vista a marcante diferença entre o manejo da irrigação por inundação e dos outros métodos, é comum que as rotinas que tratam da irrigação tenham que ser adaptadas para que possam simular as condições particulares que caracterizam a inundação. Entre os modelos específicos, o modelo ORIZA2000 (Bouman et al, 2001) oferece duas alternativas para a irrigação por inundação: contínua ou intermitente. Em ambos os casos as lâminas diárias a serem aplicadas são previamente prescritas, sendo, no caso da irrigação intermitente, outro dado de entrada a altura da lâmina superficial a partir da qual se irriga. Também se define a altura máxima da lâmina que pode ser armazenada na superfície, acima da qual se tem escoamento superficial. Procedimento semelhante é adotado no modelo IRRIGA2

(Louzada et al, 1994), enquanto no modelo IRRIGA (Fietz et al, 1986, Fietz, 1987, Beltrame & Louzada, 1991) tem-se somente a possibilidade de irrigação contínua. A quase que totalidade dos modelos desenvolvidos para a irrigação por inundação restringem suas opções de manejo a estas duas alternativas. Em alguns casos a opção por irrigar ou não também pode estar condicionada à lâmina precipitada naquele dia, como é o caso do modelo IRRIGA2 (Louzada et al, 1994).

2.7.2 – Drenagem

A forma como se encara a drenagem nos modelos de simulação é muito dependente do tipo de solução adotada. Nos modelos bidimensionais, em que a equação de Richards é aplicada simultaneamente às zonas saturada e não-saturada, a presença de drenos é identificada pelas condições de contorno. Quando a discretização é feita por elementos finitos, Fipps et al (1986) apresentam quatro alternativas para defini-las. Uma possibilidade consiste em representar o dreno na malha por um elemento com dimensão relacionada ao seu raio. A vazão ao dreno é estimada com uma equação de fluxo radial. A precisão desta estimativa exige que os elementos ao redor do dreno tenham dimensões muito reduzidas, tornando-a bastante exigente em termos computacionais. Outra aproximação consiste em supor-se que o dreno está submetido à pressão atmosférica, sendo, portanto, seu potencial igual à sua cota em relação a um plano de referência. Neste caso, o fluxo aos drenos pode ser estimado integrando-se a equação de Darcy na área que os circunda, ou por um balanço de massa. Na terceira alternativa o dreno é representado por um simples nó e o fluxo definido pela equação de Kirkham. Este fluxo é tratado como um sumidouro, e assim incorporado à equação de Richards. Neste caso, o refinamento da malha não acrescenta qualidade de forma significativa aos resultados. Na última alternativa o fluxo aos drenos é simulado por uma analogia com uma rede de resistência elétrica. Os elementos conectados ao nó que representa o dreno têm sua condutividade hidráulica ajustada. Os modelos HYDRUS_2D (Simunek et al, 1999) e SWMS_2D (Simunek et al, 1994) utilizam esta aproximação para representar a presença de drenos subsuperficiais. Estas mesmas condições de contorno foram usadas para solução da equação de Richards com um esquema numérico de diferenças finitas (Skaggs & Tang, 1976, 1979).

Outro tipo de solução envolve a equação unidimensional de Richards na zona não-saturada e sua conexão com a zona saturada. Neste caso, podem-se ter procedimentos que envolvem soluções numéricas distintas das equações Richards-Laplace (Liggett & Liu, 1983, *apud* Nieber & Feddes, 1999) e Richards-Boussinesq (Pikul et al, 1974, *apud* Nieber &

Feddes, 1999). A presença dos drenos fica caracterizada pelas condições de contorno adotadas na zona saturada. Uma solução deste mesmo tipo, mas mais simples, adota esquema numérico só para a equação de Richards, enquanto a zona saturada é considerada por soluções analíticas ou aproximadas da equação de Boussinesq. Neste caso, a presença dos drenos já é considerada por estas soluções. O termo que caracteriza o fluxo aos drenos é calculado com base na posição do lençol freático no início do intervalo de tempo, o que o torna explícito quando de sua incorporação à equação de Richards (Dam et al, 1997).

Em outro tipo de solução, faz-se um balanço volumétrico na zona não-saturada e por meio dele estima-se, iterativamente ou não, a recarga que alimenta as equações que definem a posição do lençol freático. Este balanço trata a zona não-saturada como um todo, sendo restrito ao ponto médio entre dois drenos consecutivos. Por fim, têm-se as soluções que empregam equações que tratam unicamente da zona saturada. A zona não-saturada é considerada de forma indireta mediante o termo que representa a recarga (Skaggs, 1999, Nieber & Feddes, 1999). Em ambos os casos a presença dos drenos é caracterizada pelas condições de contorno da zona saturada.

2.7.3 – Evaporação e Transpiração

O tratamento da evaporação e transpiração nos modelos de simulação também é dependente da metodologia empregada na zona não-saturada. Nos modelos que realizam um macrobalanço de volume, este ocorre sem que a região de interesse seja dividida em compartimentos, o que se torna obrigatório quando da aplicação da equação de Richards. A quase totalidade dos modelos tem como dados de entrada para este módulo a evapotranspiração de referência, ou as informações necessárias para calculá-la, os coeficientes de cultura, ou os dados para o cálculo direto da evapotranspiração potencial, e as variações da densidade do sistema radicular com a profundidade e desta com o tempo. Nos modelos do primeiro tipo, a evapotranspiração é tratada como uma variável única, sendo a água disponível para atendê-la proveniente da precipitação, irrigação, do fluxo ascendente desde o lençol freático e do armazenamento correspondente à profundidade das raízes. Dependendo desta disponibilidade, a evapotranspiração real será igual ou menor do que seu valor potencial. Procedimentos desta natureza são adotados nos modelos DRAINMOD (Skaggs, 1980), SIMDRENO (Duarte, 1996), SISDRENA (Miranda, 1997) e PRODREN (Borges Júnior, 2000).

Nos modelos que envolvem a equação de Richards, faz-se a partição da evapotranspiração em evaporação e transpiração com base no índice de área foliar (IAF) ou

na fração de cobertura do solo (FCS). A evapotranspiração potencial é a própria transpiração quando o solo se encontra totalmente coberto. Em condições diferentes desta, define-se a evaporação potencial com base em IAF ou FCS, obtendo-se a transpiração potencial por diferença. Esta, por sua vez, é dividida ao longo do sistema radicular com base em relações do tipo densidade-profundidade informadas (Feddes & Lenselink, 1994, Dam, 2000). Aproximações deste tipo são ditas macroscópicas, nas quais não se consideram as raízes isoladamente, mas, sim, o sistema radicular como um todo. Os modelos denominados microscópicos consideram o fluxo às raízes de forma individual. A limitação maior em aplicá-los reside na dificuldade em definir-se os parâmetros de entrada exigidos. Uma extensa revisão bibliográfica sobre estes dois tipos de modelos é apresentada por Homae (1999). Entre os modelos macroscópicos citados, destacam-se Molz & Remson (1970, 1971), Raats (1974), Feddes et al (1976, 1978), Genuchten (1987), Dirksen et al (1993), Schmidhalter et al (1994), entre os microscópicos Gardner (1964), Nimah & Hanks (1973), Feddes et al (1974) Hillel et al (1976) e Herkelrath et al (1977).

Os valores reais de evaporação são obtidos com base em equações empíricas ou diretamente pela equação de Darcy, tendo-se como limite superior o seu valor potencial. A equação de Darcy é aplicada considerando-se a umidade da camada superficial do solo e a umidade relativa do ar imediatamente acima. Exemplos de funções empíricas são as equações de Black (1969) e Boesten & Stroosnijder (1986). A evaporação real incorpora-se ao balanço como uma condição de contorno da equação de Richards. A transpiração real é estimada considerando-se condições quantitativas (conteúdo de umidade ou valor de pressão) e qualitativas (salinidade), este último caso nos modelos que também simulam o transporte de solutos. Exemplos clássicos de modelos que estimam a transpiração real por meio de critérios quantitativos foram derivados por Feddes et al (1976, 1978). De uma forma geral adotam-se os modelos macroscópicos, e a transpiração real é transportada como um termo que representa um sumidouro para a equação de Richards. Exemplos de modelos que adotam procedimentos deste tipo são SWAP (Dam et al, 1997) e MACRO (Jarvis, 1989).

Tratando-se da irrigação por inundação as reduções normalmente não ocorrem, tendo tanto a evaporação como a transpiração valores potenciais. Estes valores podem ser estimados diretamente ou em duas etapas, envolvendo, neste caso, os valores de referência e os coeficientes da cultura. A determinação em um único passo pode ser feita, por exemplo, com a equação de Penman-Monteith. Para tanto faz-se necessária a definição dos termos desta equação que correspondem à resistência aerodinâmica e à resistência oferecida pela copa da cultura. Como esta última é muito complexa e indisponível para a maioria das culturas, é mais comum a determinação em duas etapas (Feddes & Lenselink, 1994). Do produto entre os

valores de referência e os coeficientes que representam diferentes períodos de desenvolvimento das culturas resultam teoricamente valores potenciais. Como a camada superficial do solo em geral se apresenta com pouca umidade, Dam et al (1997) sugerem que os coeficientes combinam os efeitos da cobertura parcial com uma taxa de evaporação inferior à potencial, ou seja, já incorporam um fator de redução. O modelo SWAP (Dam et al, 1997), entre outros, faz esta redução posteriormente, e com o objetivo de não superestimá-la tem como proposta a utilização de um único coeficiente, cujo valor deve corresponder ao período no qual o solo se encontra totalmente coberto. Os coeficientes determinados em experimentos em que há irrigação por inundação não têm este questionamento, já que as características do método fazem com que a evaporação e a transpiração sejam sempre potenciais. Na tabela que segue, mostram-se alguns dos coeficientes apresentados na literatura para a cultura do arroz.

Tabela 2.1 – Coeficientes da cultura do arroz

Autor	ET_{ref}^{***}	Período de desenvolvimento**		
		até dpf*	dpf* à floração	Floração à maturação
Doorenbos & Kassam (1979)	Penman Modificado (FAO)	1,1-1,15	1,1-1,30	0,95-1,05
Tomar & O'Toole (1980)	Tanque	1,2 (média de todo o período)		
Hendrickx et al (1986)	Penman Modificado (FAO)	1,25 (valor máximo)		
Fietz (1987)	Penman-Monteith	1,60	2,10	1,40
Pereira (1989)	Tanque	1,0 (média de todo o período)		
Mohan & Arumugam (1994)	Penman Modificado (FAO)	1,27	1,62	1,15
Shah & Edling (2000)	Penman-Monteith	1,39	1,51	1,43
Tyagi et al (2000)	Penman-Monteith	1,19	1,30	1,08
Marcolin & Macedo (2001a)	Piche	2,5	3,6	2,4

* dpf : diferenciação do primórdio floral

** períodos médios adaptados dos considerados pelos diferentes autores

*** evapotranspiração de referência

A variação observada nos valores da tabela anterior deve-se às diferentes condições climáticas das regiões onde se desenvolveram os experimentos, ao manejo adotado nestes experimentos, ao intervalo de tempo adotado no cálculo da ET_{ref} e às diferentes formas de estimá-la (Mohan & Arumugam, 1994, Shah & Edling, 2000). Doorenbos & Pruitt (1977) apresentam uma síntese destes coeficientes determinados na Ásia, Austrália, América do Sul, Estados Unidos e alguns países da Europa. Tendo o método de Penman Modificado (FAO) como referência, o menor valor encontrado é 0,95 e o maior 1,35. Gomes et al (1999) indicam que a evapotranspiração do arroz, irrigado por inundação em regiões de clima temperado,

pode ser estimada com boa precisão com o uso conjunto de dados do Tanque Classe A e do diagrama de Köhler-Nordenson-Fox-Baker.

2.7.4 – Infiltração e redistribuição interna

A infiltração pode ser considerada nos modelos através de equações específicas, com base física ou puramente empíricas. Exemplos da utilização de metodologia empírica são os modelos de drenagem SIMDRENO (Duarte, 1996), SISDRENA (Miranda, 1997) e PRODREN (Borges Júnior, 2000). Nestes se aplica o método do “Número de Curva”, no qual se calcula o escoamento superficial e por diferença com o total precipitado se obtém a infiltração. No caso do modelo SISDRENA (Miranda, 1997) há uma alteração no método que permite relacionar o escoamento superficial com a profundidade do lençol freático. Exemplo de utilização de uma metodologia com maior embasamento físico é o modelo DRAINMOD (Skaggs, 1980), no qual se estima a lâmina infiltrada com a equação de Green-Ampt.

Outro tipo de solução empregada nos modelos parte de um balanço na superfície envolvendo a evaporação, precipitação, irrigação e lâmina acumulada. Este tipo de metodologia é utilizada no modelo SWAP (Dam et al, 1997). Inicialmente a evaporação deve ser suprida pelas três outras variáveis. Caso isto não ocorra, a infiltração é nula e a evaporação passa a ser atendida pela água disponível no solo. Na outra situação há infiltração, sendo sua taxa limitada pela capacidade máxima do solo. Esta capacidade é estimada com a aplicação direta da equação de Darcy, considerando-se o gradiente entre a superfície e a camada do solo imediatamente abaixo desta.

Os comentários que seguem relacionados à redistribuição da água nas zonas saturada e não-saturada desconsideram a ocorrência de macroporos e, por conseqüência, de fluxo preferencial. Este assunto é tratado de forma específica em outra parte deste capítulo.

O perfil de umidade da zona não-saturada e a posição do lençol freático resultam de um balanço de entradas (infiltração e fluxo ascendente pela base) e saídas (evaporação, transpiração e fluxo aos drenos) e da redistribuição interna. A forma de defini-los varia bastante entre os modelos. No caso da zona não saturada, os que adotam um tratamento mais simplificado consideram um único valor de umidade para toda esta zona, sendo a capacidade de campo seu limite superior. Outros admitem uma condição de equilíbrio com o lençol freático, o que permite a definição da umidade ao longo da profundidade por intermédio de equações que a relacionam com a pressão. O fluxo ascendente interno, quando considerado, é estimado com a equação de Darcy, tendo como referência a posição do lençol freático e a umidade junto ao sistema radicular. O fluxo vertical para a zona saturada (recarga) pode ser

definido de uma forma iterativa, admitindo-se inicialmente seu valor igual à própria infiltração. Posteriormente, calcula-se, com esta recarga hipotética, a posição do lençol freático e faz-se um balanço junto à zona não-saturada envolvendo as variáveis anteriormente citadas. O resultado deste balanço indicará o acerto ou não da hipótese inicial, permitindo assim, se for o caso, corrigi-la. A solução não-iterativa realiza o balanço com as informações do intervalo de tempo anterior, definindo posteriormente a recarga e com esta a nova posição do lençol freático. Procedimentos como os citados acima são empregados em modelos que não usam a equação de Richards e que, como condição de contorno inferior, admitem a presença de camada impermeável a uma determinada profundidade (Skaggs, 1999).

Nos modelos que resolvem a equação de Richards na zona não-saturada, o perfil de umidade é sua própria solução. Além disso, com a equação de Richards também estima-se a recarga que alimenta o lençol freático. Pikul et al, (1974, *apud* Nieber & Feddes, 1999) apresentam este tipo de aproximação combinando soluções numéricas das equações de Richards e Boussinesq. Quando da aplicação simultânea da equação de Richards às zonas saturada e não-saturada, tanto o perfil de umidade como a posição do lençol freático são informações geradas pela solução desta equação. Em modelos desta natureza todas as variáveis que compõem o balanço são, de uma forma ou outra, integradas diretamente à solução (Skaggs, 1999). Em geral, estes modelos oferecem aos usuários várias possibilidades para definição das condições de contorno inferiores. Estas possibilidades interferem diretamente no balanço e diferem bastante entre si, o que pode torná-los muito sensíveis à escolha feita. No caso do modelo SWAP (Dam et al, 1997), Wesseling et al (1998) indicam como de crucial importância a definição das condições de contorno. Entre as opções oferecidas por este modelo estão fluxo zero, fluxo gravitacional, condição de lisímetro, pressão = f (tempo), fluxo = f (tempo), posição do lençol freático = f (tempo), fluxo ascendente de um aquífero semiconfinado e fluxo descendente em solos arenosos profundos. Nestes dois últimos casos são empregadas equações empíricas.

Outra questão que pode assumir grande importância na quantificação do fluxo e armazenamento trata-se do fenômeno de histerese. Apesar disso, seus efeitos são freqüentemente desconsiderados em função da complexidade envolvida e dificuldades para obtenção de dados em número e qualidade adequados (Goldenfum, 1995). A natureza histerética da curva de retenção é atribuída a diferentes fatores, tais como diferença do ângulo de contato durante as fases de embebição e drenagem, presença de ar aprisionado, fenômenos de expansão e contração, gradientes térmicos e a complexidade do diâmetro dos poros (Feddes et al, 1988). Sua inclusão nos modelos pode ser feita mediante a caracterização de diferentes domínios ou de aproximações empíricas. No primeiro caso, tem-se embasamento

físico, exigindo com isso a determinação acurada das relações solo-água e a formulação de algumas hipóteses referentes à geometria dos poros. Os primeiros modelos deste tipo basearam-se no conceito de domínios independentes, no qual o meio poroso é constituído por um conjunto de poros cujas propriedades individuais independem dos poros adjacentes. Além disso, estes domínios apresentam-se em apenas duas condições, totalmente preenchidos com água ou vazios, condições estas que são caracterizadas por dois valores de potenciais de pressão (Feddes et al, 1988). Esta concepção foi inicialmente proposta na década de 30 (Preisach, 1935, *apud* Genuchten & Sudicky, 1999) e desenvolvida na década de 50 (Enderby, 1955, *apud* Genuchten & Sudicky, 1999). Posteriormente vários pesquisadores constataram sua validade em alguns casos, mas também encontraram muitas discrepâncias em outros. Mualem (1974) apresentou um modelo conceitual no qual a relação pressão-umidade é determinada tendo como referência as duas curvas principais, sendo as curvas secundárias expressas por funções explícitas. Uma outra teoria diz respeito ao conceito de domínios dependentes, na qual a influência dos domínios vizinhos passa a ser também considerada. Mualem & Dagan (1975) estenderam o modelo de Mualem anteriormente citado, valendo-se deste conceito. Nesta versão, consideram-se restrições à entrada de ar quando a umidade se encontra próxima à saturação e à entrada de água quando se têm baixos valores de umidade. Simplificações de modelos deste tipo foram apresentadas por Parlange (1976) e Mualem (1984).

A utilização de equações empíricas requer um número limitado de parâmetros, tornando-se, por isso, mais atrativa (Dam et al, 1997). Entre os diversos modelos empíricos desenvolvidos, podem-se referir os métodos identificados por Point, Linear e Slope, citados por Jaynes (1984), e o modelo proposto por Kool & Parker (1987). Este último combina um modelo empírico (Scott et al, 1983, *apud* Kool & Parker, 1987) modificado para ter em conta o aprisionamento de ar com o modelo paramétrico de Genuchten (1980).

Além do comportamento histerético que se verifica na curva de retenção, este também se manifesta nas relações entre a condutividade hidráulica e o potencial de pressão e, de forma menos acentuada, entre a condutividade hidráulica e a umidade (Dam, 2000). A previsão deste comportamento pode ser feita tanto por modelos físicos (Mualem, 1976b) como empíricos (Kool & Parker, 1987).

Nas simulações contínuas de longos períodos fatalmente ocorrerão diversos ciclos de embebição e drenagem, sendo, portanto, recomendável que o modelo utilizado seja apto para simular o fenômeno da histerese (Dam, 2000). No caso específico de simulação de eventos isolados em sistemas de irrigação e drenagem, é comum supor-se a entrada de água (aplicação da dose e recarga) como instantânea, com o que só interessa o ciclo que se caracteriza pela

drenagem. No caso ainda mais particular da irrigação por inundação, tendo em vista as características do método, o interesse restringe-se ao ciclo que se caracteriza pela embebição.

Por fim, tem-se a necessidade de estimar parâmetros, como, por exemplo, condutividade hidráulica saturada e porosidade drenável, e caracterizar as relações solo-água para possibilitar a solução das equações de fluxo. Durante os últimos cinquenta anos, inúmeros métodos de campo e laboratório foram desenvolvidos com estes objetivos. Uma ampla revisão destes métodos encontra-se em Klute (1986), Kool et al, (1987), Kabat & Beekma (1994), Oosterbaan & Nijland (1994), Dirksen (1996), Amoozegar & Wilson (1999), Ahuja et al (1999). No caso da equação de Richards, devem-se definir as relações entre a condutividade hidráulica (k), o potencial de pressão (h) e a umidade (θ) e informá-las como um dado de entrada. Durante muitos anos, isto foi feito de forma tabular e mais recentemente por meio de expressões analíticas que parametrizam estas relações. Nesta forma, têm-se algumas vantagens, como nos casos em que se simula histerese e em que se considera a variabilidade espacial destas relações. Além disso os valores podem ser extrapolados para fora do intervalo de medições (Dam, 2000). As equações que expressam a relação θ - h mais comumente empregadas são as de Brooks-Corey (Brooks & Corey, 1966), Campbell (Campbell, 1974) e Genuchten (Genuchten, 1980). Rawls & Brakensiek (1985, *apud* Ahuja et al, 1999) apresentam uma correspondência entre os parâmetros destas equações e os relacionam com propriedades do solo mais disponíveis, tais como porosidade, granulometria e presença de carbono. Estes parâmetros também podem ser calibrados com base em dados experimentais (Genuchten et al, 1991). As equações mais utilizadas para expressar as relações k - θ ou k - h decorrem da combinação de modelos teóricos, baseados na distribuição do tamanho dos poros, com expressões que relacionam θ e h . Os modelos aplicados com maior frequência são o de Burdine (Burdine, 1953, *apud* Kabat & Beekma, 1994) integrado com a relação θ - h de Brooks & Corey (1966) e o de Mualem (1976a) integrado com a relação θ - h de Genuchten (1980). A primeira combinação preserva os mesmos parâmetros da relação θ - h , enquanto a segunda adiciona um novo parâmetro aos já existentes. Aplicações e comparações de resultados destes e de vários outros modelos encontram-se em Alexander & Skaggs (1986) e Timm (1994). Oliveira et al, (2000) comparam resultados de modelos deste tipo com equações que estabelecem uma relação exponencial entre k e θ . Estas equações foram derivadas com base em dados experimentais obtidos pelo método do perfil instantâneo (Reichardt et al, 1975, *apud* Oliveira et al, 2000).

2.7.5 – Fluxo preferencial – Drenos livres

A ocorrência de fluxo preferencial pode ser causada por diferentes mecanismos, entre os quais se destaca a presença de poros não-capilares (macroporos). Este tipo de macroporosidade pode ser decorrente da expansão e contração do solo, da ação das raízes das plantas, dos animais e das operações de preparo, o que é mostrado de forma esquemática na figura que segue.

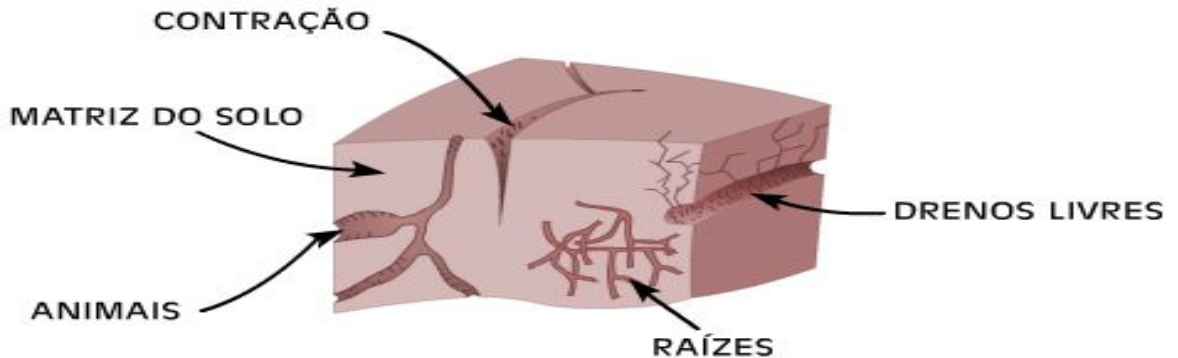


Figura 2.2 – Formação de macroporos na matriz do solo

Situações como esta fazem com que o fluxo se torne heterogêneo, com parte da lâmina infiltrada movimentando-se muito mais rapidamente do que a frente que escoar pela matriz do solo. Associada à heterogeneidade do avanço, tem-se uma condição de não-equilíbrio entre a água que escoar pela matriz e pelas fraturas. Esse conjunto implica em alterações no balanço de água, tanto do ponto de vista quantitativo como qualitativo (Feddes et al, 1988). Constatações deste tipo foram feitas no século XIX (Schumacher, 1864, Lawes et al, 1882, *apud* Feddes et al, 1988), indicando esforços já de longa data na tentativa de incluir o fluxo preferencial nos modelos de simulação. A forma mais consagrada de fazê-lo baseia-se na suposição de que o meio pode ser separado em dois ou mais sistemas distintos de poros, cada um admitido como homogêneo e tendo suas próprias características. De uma forma geral, os modelos podem ser classificados como de dupla porosidade, dupla permeabilidade, multiporosidade e multi-permeabilidade. Os dois primeiros assumem que o meio é formado por duas regiões que interagem, sendo que as hipóteses feitas para o fluxo na matriz os distinguem. Os modelos de dupla permeabilidade consideram a possibilidade de fluxo convectivo nas duas regiões, enquanto os de dupla porosidade admitem que a matriz unicamente armazena e troca água com a outra região. Os modelos “*multi*” baseiam-se nos mesmos conceitos, e consideram um número maior de regiões. A maior diferença entre os modelos de mesma natureza situa-se nas simplificações e no empirismo adotados por cada

um. Há uma outra classe de modelos específicos para solos de textura fina, que têm como característica deformarem-se em função do conteúdo de umidade. Nesses modelos o fluxo nas fraturas é admitido como instantâneo e o fluxo convectivo na matriz é permitido. Assim, são classificados como um sub-grupo dos modelos de dupla permeabilidade (Simunek et al, 2003). O comportamento desses modelos, descritos anteriormente de forma conceitual, é representado de forma esquemática na figura que segue.

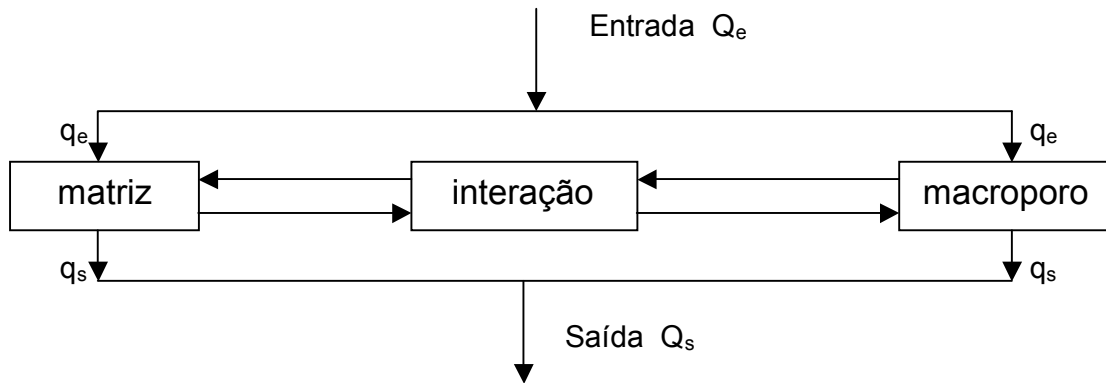


Figura 2.3 – Representação dos modelos de dupla porosidade/permeabilidade

Hoogmoed & Bouma (1980) desenvolveram um dos primeiros modelos de infiltração considerando a ocorrência de fluxo preferencial. Neste modelo a infiltração para a matriz é calculada pela equação de Darcy e o fluxo horizontal dos macroporos para a matriz é simulado por uma equação de difusão.

Beven & Germann (1981) definem a infiltração para a matriz pela equação de Richards, sendo o fluxo nos macroporos uma função da umidade nestes poros. A interação dos domínios é feita pela equação de Darcy.

Germann & Beven (1985) apresentaram outro modelo no qual a infiltração é estimada pela equação de Philip e o fluxo nos macroporos aproximado por equações de onda cinemática.

No modelo de Jarvis & Leeds-Harrison (1987) a infiltração também é simulada pela equação de Philip e o fluxo nos macroporos por uma equação empírica, na qual considera-se fatores como a conexão entre os poros, a rugosidade e a tortuosidade.

Workman & Skaggs (1990) desenvolveram o modelo PREFLO, no qual o fluxo na matriz é simulado pela equação de Richards, o fluxo nos macroporos pela equação de Poiseuille e a interação entre os domínios pela equação de Darcy.

O modelo ADAPT (Chung et al, 1992) dispensa um tratamento bastante simplificado na simulação do fluxo preferencial. Do escoamento superficial que ocorreria sem a presença de macroporos subtrai-se uma parcela em função do conteúdo de argila do solo, do número

consecutivo de dias secos que antecede a precipitação e da demanda evaporativa diária. Esta parcela é suposta como se movimentando diretamente para o lençol freático, não havendo, portanto, fluxo para a matriz do solo.

No modelo proposto por Gerke & Genuchten (1993) ambos os domínios são simulados pela equação de Richards, o que é justificado por um ajuste nas propriedades do solo relacionadas aos macroporos. O fluxo entre domínios depende do gradiente de pressão e de um coeficiente de transferência.

No modelo MACRO (Jarvis, 1994) a infiltração aos microporos é definida pela equação de Richards. No interior dos macroporos o fluxo é admitido como gravitacional e a interação entre os domínios é feita por uma equação que ignora a componente gravitacional.

No modelo SWAP (Dam et al, 1997) a rotina que simula o fluxo preferencial tem como referência as características de contração do solo, sintetizadas pela relação entre os índices de umidade e porosidade. A troca entre os domínios é estabelecida pela equação de Darcy.

Na versão 3.0 do modelo FLOCR (Hendriks et al, 1999) o volume de macro poros é representado por duas parcelas, uma permanente e outra que depende dos processos de expansão e contração do solo. Uma parte do volume armazenado nos macroporos é transferida para a matriz do solo. Na zona não-saturada, este fluxo é estimado pela equação de Philip e na zona saturada pela equação de Darcy. Nesta zona, o fluxo também pode ocorrer da matriz para os macroporos, dependendo dos respectivos potenciais.

Novak et al (2000) descrevem o modelo FRACTURE, que utiliza a equação de Richards para simulação do fluxo na matriz do solo e a equação de infiltração de Green-Ampt para relacionar os dois domínios.

Greco (2002) apresenta o modelo VIMAC, no qual, a exemplo do modelo FLOCR (Hendriks et al, 1999), a região de macro poros é dividida em dois sub-domínios, um permanente e outro que depende do conteúdo de umidade do solo. O fluxo na matriz é estimado pela equação de Darcy, e nos sub-domínios de macroporos por equações de onda cinemática. O modelo também considera que a área que corresponde aos macro poros permanentes é uma função que decresce com a profundidade, de tal forma que as fraturas não estendam-se necessariamente ao longo de todo o perfil.

Di Pietro et al (2003) propõem o modelo KDV, no qual o fluxo nos macro poros é resolvido com a incorporação de um termo de dispersão a um modelo convectivo de onda cinemática. Os autores apresentam dados que mostram um acréscimo na qualidade dos resultados desse modelo quando comparados ao original, no qual só é considerado o fluxo por convecção.

Um exemplo da presença de fluxo preferencial decorrente da mecanização são os solos com a presença de drenos livres (drenos toupeira), já que é inerente a esta prática o surgimento de fissuras criadas pelo equipamento utilizado para implantá-los. À medida que o dreno (orifício) é formado pelo avanço do subsolador, a haste ao qual este é fixado faz com que surjam fissuras verticais que se estendem desde o dreno até a superfície. Ao atingi-la as fissuras tomam a direção na qual o equipamento se desloca, formando um ângulo de aproximadamente 45° com o alinhamento do dreno (Youngs, 1985). As características geométricas destas fissuras foram avaliadas por Godwin et al (1981, *apud* Youngs, 1985) em vários solos e sob diferentes condições de umidade. O comprimento na superfície variou entre 9 e 36 cm, a largura entre 5 e 60 mm e o espaçamento entre 10 e 18 cm. O comprimento na direção vertical, em geral, estendeu-se até a profundidade dos drenos. Além destas fissuras, que são denominadas principais, tem-se a criação de outros caminhos preferenciais no perfil que também concorrem para o incremento da condutividade hidráulica do solo.

Assim se constata uma relação estreita entre a ocorrência de fluxo preferencial e a existência de drenos livres, sendo, portanto, bastante razoável que a simulação em áreas com este tipo de drenagem possa valer-se do conceito de dupla porosidade. As tentativas de desenvolver modelos que possam simular o fluxo a drenos deste tipo são poucas, e nem sempre têm presente o fluxo preferencial. Exemplos são as equações propostas por Unhanand & Kadir (1975) e Hathoot (1998). Na derivação de ambas, admite-se a presença simultânea de drenos livres e convencionais a diferentes profundidades. Os primeiros autores assumem que os dois tipos de drenos apresentam disposição ortogonal entre si, enquanto o segundo assume que esta disposição é paralela. Nos dois casos não é considerado o fluxo preferencial. Esta crítica respalda-se na conceituação já consagrada dos principais objetivos da implantação deste tipo de dreno e das condições necessárias para atingi-los. Contraditoriamente Unhanand & Tuamsangiem (1975) afirmam que uma vida útil prolongada não é por si só uma garantia de sucesso na resposta destes drenos, já que o movimento da água na sua direção é muito dependente do fissuramento criado quando da sua instalação. Leeds-Harrison et al (1982) demonstraram que, na ausência das fissuras, ocorrem longos períodos de recessão, conseqüência da resposta lenta oferecida pelo sistema de drenagem. Youngs (1985) reforça a importância das fissuras ao afirmar que o principal propósito deste tipo de drenagem é a remoção da água superficial através delas, sendo o controle do lençol freático um objetivo secundário. Cavelaars et al (1994) mostram os hidrogramas observados na saída dos drenos em áreas com e sem fissuramento. No primeiro caso, tem-se um hidrograma com pico acentuado (entre 10 e 15 mm/d) e bastante rápido, no segundo caso um hidrograma abatido (pico inferior a 5 mm/d) e lento. Os autores salientam que a época de instalação e a técnica

adotada são decisivas para que os caminhos preferenciais sejam formados. Spoor & Leeds-Harrison (1999) salientam o desenvolvimento deste tipo de drenagem ao longo dos últimos 200 anos, sendo seu principal objetivo o controle do lençol freático “temporário” que se forma em perfis com camada de impedimento superficial. Este controle requer fissuras bem desenvolvidas, permitindo assim a transferência direta da água aos drenos. Modelos específicos para simulação em áreas com a presença de drenos livres e tendo em conta o fissuramento foram apresentados por Jarvis & Leeds-Harrison (1987) e Shopsy et al (1988). O primeiro utiliza o conceito de dupla porosidade e estima a vazão dos drenos com a aproximação para perfis estratificados proposta por Leeds-Harrison et al (1986, *apud* Jarvis & Leeds-Harrison, 1987). O segundo estima o fluxo aos drenos, considerando as características geométricas e hidráulicas das fissuras que os conectam diretamente à superfície.

Entre os modelos que têm em conta o fluxo preferencial, alguns consideram que a lâmina que escoar da superfície para as fissuras, além de infiltrar-se para a matriz, também pode atingir diretamente o sistema de drenagem, o que os aproxima ainda mais da idéia que se tem do comportamento do fluxo em áreas com drenos livres. No modelo SWAP (Dam et al, 1997, Dam, 2000) esta transferência é feita mediante um coeficiente empírico, no modelo FLOCR3.0 (Hendriks et al, 1999) por meio da equação de Ernst. Em ambos não se prioriza um ou outro tipo de escoamento, resguardando-se apenas o balanço de massa. A adaptação feita ao modelo SWAP, tornando-o apto a simular a presença de drenos livres, é detalhada no capítulo 3 (Metodologia).

O grande número de modelos de simulação que têm o fluxo preferencial como uma de suas rotinas é um dos fatores que realça sua grande importância. Tido inicialmente como um caso particular das situações em que a frente de avanço é homogênea, o fluxo preferencial, tendo em vista uma série de estudos sob diferentes condições, já pode ser considerado como regra e não como exceção (Flury et al, 1994).

Há evidentemente outros módulos, como por exemplo, transporte de solutos e desenvolvimento de culturas, que também podem fazer parte da composição de modelos agrohidrológicos, e que não foram comentados por estarem além dos objetivos deste trabalho.

Na seqüência são citados e comentados alguns dos principais modelos desenvolvidos para aplicação em drenagem e irrigação por inundação. Há uma infinidade de outros modelos que permitem o tratamento simultâneo da drenagem e da irrigação, sem contudo contemplar questões específicas do método de inundação. A simulação contínua exige do modelo a possibilidade de simular a drenagem da lâmina superficial de irrigação em uma determinada data e de definir uma nova condição para o escoamento superficial, a partir do intervalo de tempo imediatamente posterior. Além disso, a intensidade de drenagem caracterizada, por

exemplo, pelo espaçamento e profundidade dos drenos deve diferir entre os períodos com e sem irrigação. Adaptações desta natureza foram introduzidas no modelo SWAP e são apresentadas de forma detalhada no capítulo 3 (Metodologia).

2.8 – Modelos aplicados à drenagem

Os modelos dirigidos à drenagem subsuperficial são em geral mais amplos, já que procuram também contemplar outras formas de manejo do lençol freático. Entre estas tem-se, por exemplo, a subirrigação (Skaggs, 1999).

Admitindo-se que o fluxo nas regiões saturada e não-saturada ocorre preferencialmente nas direções horizontal e vertical respectivamente, os modelos que têm rotinas para simular o fluxo aos drenos, a rigor, devem ser do tipo *2D*. Exemplos destes modelos são HYDRUS_2D (Simunek et al, 1999) e SWMS_2D (Simunek et al, 1994), que têm abrangência muito maior do que a simulação do comportamento do controle do lençol freático quando submetido à drenagem e/ou subirrigação. Modelos desse tipo não são predominantes por questões que já foram abordadas anteriormente. Exemplos de modelos *2D* específicos para drenagem foram apresentados por Skaggs & Tang (1976), Martinez (1989) e Ahmad et al (1991, 1993). Em ambos a equação bidimensional de Richards é resolvida numericamente, considerando-se condições de contorno que caracterizam a presença de drenos subsuperficiais. No segundo modelo, a solução é obtida por elementos finitos; nos demais por diferenças finitas. Os inconvenientes da aplicação de modelos com tal refinamento fazem com que seus resultados se tornem referências para avaliação de metodologias mais simplificadas (Skaggs & Tang, 1976). Estas, por sua vez, apresentam diferenças no enfoque dado à zona não saturada e na forma de conectá-la à zona-saturada. Esta última, em geral, é simulada com o emprego de soluções da equação de Boussinesq.

Os modelos que tratam a zona não-saturada por meio de um balanço macroscópico e o fluxo aos drenos na zona saturada por meio de equações baseadas somente no fluxo horizontal são predominantes. Isso se deve às simplificações possíveis tanto do ponto de vista computacional como no que diz respeito aos parâmetros de entrada (Skaggs, 1999). Dentro deste contexto o modelo DRAINMOD (Skaggs, 1980) é o mais difundido. Neste modelo o perfil de umidade na zona não-saturada é definido considerando que a distribuição de pressões é hidrostática, e o fluxo aos drenos é calculado pelas equações de Hooghoudt e/ou Kirkham.

Duarte (1996), Miranda (1997) e Borges Júnior (2000) apresentaram modelos desta mesma natureza, denominados respectivamente de SIMDRENO, SISDRENA e PRODREN. Alternativamente ao DRAINMOD, que utiliza um intervalo de tempo horário em períodos de

drenagem, estes modelos adotam intervalos diários. Segundo Duarte (1996), isso se torna possível com a utilização de equações de regime não-permanente na simulação do fluxo aos drenos. Os modelos oferecem como alternativas as equações de Schilfgaard, Kraijenhoff e De Zeeuw & Hellinga, além de um estudo econômico com base em diferentes cenários criados pelo usuário.

Minderhoud (1982) apresentou um modelo de drenagem no qual a zona não-saturada é considerada como uma seqüência de reservatórios. A vazão, evapotranspiração real, posição do lençol freático e o perfil de umidade são estimados diariamente com base na precipitação, evapotranspiração potencial, vegetação e características do solo.

Madraootoo (1985) apresentou o modelo DRAINSIM, cuja aplicação permite a simulação horária dos escoamentos superficial e subsuperficial em áreas com até 20 ha. O modelo conta com rotinas que propagam estes escoamentos nas calhas dos rios e tubulações de drenagem.

O modelo SISDRA (Lesaffre & Zimmer, 1988) trata a zona não-saturada como um reservatório único, e a zona saturada integrando a equação não-linearizada de Boussinesq. O modelo tem especial atenção com a ocorrência de grandes picos de vazão, que costumam ocorrer durante ou imediatamente após as precipitações.

Armstrong et al (1992) desenvolveram o modelo SWARD, com o qual se estabelece uma relação entre as condições de drenagem, a possibilidade de preparo do solo e a produtividade das pastagens. O submodelo solo-água é conectado a um sub-modelo fisiológico, no qual o desenvolvimento da pastagem é uma função da temperatura, disponibilidade de água e nitrogênio, etc.

Khalik (1992) desenvolveu um modelo de drenagem para utilização em planilha eletrônica. Com o balanço na zona das raízes, define-se o armazenamento e a recarga, esta admitida como instantânea. As flutuações do lençol freático são simuladas pela equação de Schilfgaard.

Bengston et al (1993) sugerem o modelo denominado FWTMOD, cuja simplicidade permite sua utilização pelos próprios agricultores. O modelo trata a zona não-saturada de uma forma bastante simplificada e tem como referência a equação de De Zeeuw & Hellinga acrescida de dois coeficientes, um para estimar a infiltração e outro para estimar o efeito das condições de umidade que antecedem a precipitação.

Todos os modelos até agora citados não envolvem soluções da equação de Richards quando das simulações na zona não-saturada. Conforme já referido anteriormente isso é feito de uma forma mais simplificada, mediante um macrobalanço volumétrico. Essa simplificação faz com que estes modelos tenham suas aplicações dirigidas a regiões úmidas, com a presença

de lençol freático superficial (Skaggs, 1999). Há, entretanto, exemplos com bons resultados que fogem a este padrão, como é o caso do modelo DRAINMOD utilizado em região semi-árida da Índia (Gupta et al, 1993).

Harvard et al (1995) desenvolveram o modelo LINKFLOW, no qual o balanço da zona não-saturada é feito com o emprego da equação unidimensional de Richards. O resultado obtido é incorporado à zona saturada, na qual utiliza-se a equação tridimensional adotada pelo modelo MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988). Este é um modelo no qual as exigências quanto aos parâmetros de entrada e esforço computacional são muito maiores do que em relação aos modelos já referidos.

Os modelos anteriormente citados têm na drenagem sua rotina principal, ou seja, foram desenvolvidos tendo a simulação do comportamento do lençol freático como seu objetivo maior. A tendência natural é que os modelos sejam mais abrangentes e com estrutura modular, de tal forma que o usuário possa selecionar os módulos que interessam a uma questão específica. Alguns desses modelos com tradição em áreas drenadas, mesmo que suas simulações não envolvam necessariamente a presença de sistemas de drenagem, são comentados as seguir.

Belmans et al (1983) apresentaram o modelo SWATRE, no qual a zona não-saturada é tratada pela equação unidimensional de Richards e o fluxo aos drenos na zona saturada pela equação de Ernst.

Kabat et al (1992) agregaram ao modelo SWATRE o modelo CROPR, com o qual se estima a produção das culturas em função do balanço de água. O modelo resultante foi denominado SWACROP.

SALTMOD (Oosterbaan, 1992) trata-se de um modelo cuja concepção o diferencia dos modelos direcionados à simulação do lençol freático em áreas úmidas. Este modelo privilegia o balanço de sais em áreas irrigadas e a remoção destes sais pelo sistema de drenagem.

O modelo ADAPT (Chung et al, 1992) trata-se de uma combinação dos modelos DRAINMOD e GLEAMS. As rotinas do primeiro, que tratam da simulação do lençol freático, foram incorporadas ao segundo, que originalmente é um modelo voltado aos aspectos qualitativos da água do solo.

Reyes et al (1993) estenderam o modelo GLEAMS, de tal forma a permitir a simulação do escoamento superficial, transporte de sedimentos e movimento de nutrientes e pesticidas em áreas com lençol freático próximo à superfície. O novo modelo foi denominado GLEAMS – WT.

Sabbagh et al (1993) comparam os resultados da aplicação dos modelos DRAINMOD e EPIC – WT. Este trata-se de uma ampliação do modelo EPIC, desenvolvido inicialmente com o objetivo de definir as relações entre erosão e produtividade das culturas sem considerar a presença de lençol freático.

O modelo MACRO (Jarvis, 1994) simula o fluxo da água e o transporte de solutos em condições de regime não-permanente. O fluxo aos drenos é quantificado utilizando a teoria dos potenciais (Youngs, 1980, *apud* Jarvis, 1994) e incorporado à equação de Richards como um termo que representa um sumidouro.

Johnsen et al (1995) adaptaram novas rotinas ao modelo de qualidade da água RZWQM, de tal forma a possibilitar a simulação das flutuações do lençol freático em áreas drenadas. Esta nova versão foi denominada RZWFLO. Seus resultados foram comparados com os do modelo WAFLOWM, no qual a solução numérica da equação de Richards é mais rigorosa.

CSUID (Garcia et al, 1995) é um modelo para simular o desenvolvimento das culturas considerando o ambiente criado pelas interações solo-água-ar-soluto em áreas irrigadas e drenadas. Na zona-não saturada, o modelo resolve as equações unidimensionais de Richards e de advecção-dispersão. Na zona saturada, as equações bidimensionais de Boussinesq e de advecção-dispersão.

O modelo SWAP (Dam et al, 1997) tem como referência os modelos SWATRE e SWACROP. Nesta versão se alterou o esquema numérico empregado na solução da equação de Richards e novas rotinas foram introduzidas. O fluxo aos drenos, que aparece na equação de Richards como um termo que representa um sumidouro, é estimado pelas equações de Hooghoudt ou Ernst.

O modelo WAVE (Vanclooster et al, 1994, 1996, *apud* El-Sadek et al, 2001) na sua versão original simula o balanço de energia no solo, o fluxo d'água, o transporte de solutos reativos e não-reativos. El-Sadek et al. (2001) incorporaram ao modelo uma sub-rotina para simular o fluxo a drenos laterais, tornando-o assim apto à simulação de áreas drenadas artificialmente.

Buyuktas & Wallender (2002) apresentam um modelo para simulação do fluxo da água e transporte de solutos em áreas drenadas. O modelo trata simultaneamente as zonas saturada e não-saturada com as equações de Richards e de advecção-difusão. As soluções são obtidas numericamente com o emprego do método de Galerkin.

Outra categoria de modelo corresponde aos que foram desenvolvidos para aplicação em grandes áreas, nas quais se encontra acentuada heterogeneidade horizontal. Dentre estes o MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988) tem seu módulo de drenagem baseado em um

coeficiente de condutância, no qual se concentra toda a perda de carga entre o dreno e a célula que representa uma determinada região.

Parsons et al (1991) desenvolveram o modelo WATRCOM, no qual a zona não saturada é simulada valendo-se de um balanço vertical e a zona saturada resolvendo numericamente a equação bidimensional de Boussinesq. O modelo pode ser aplicado em áreas onde se tem a presença de sistemas de drenagem dispersos e com formas geométricas irregulares.

Ao modelo TOPMODEL (Beven et al, 1995) foi agregada uma rotina para permitir a simulação em áreas com a presença de drenos subsuperficiais (Kim et al, 1999). A metodologia empregada na estimativa do fluxo aos drenos é constituída por dois reservatórios lineares.

O modelo GELGAM (De Laat et al, 1981, *apud* Skaggs, 1999) foi desenvolvido para aplicação no planejamento regional dos recursos hídricos, permitindo a simulação do escoamento superficial e do fluxo nas zonas saturada e não-saturada.

Madramootoo (1992) identificou e analisou alguns modelos que simulam o comportamento do lençol freático. Foram selecionados seis modelos, todos já validados em diferentes situações de campo. Na tabela (2.2) reproduz-se a síntese feita em relação aos processos simulados por cada modelo.

Lorre & Lesaffre (1994) realizaram outro tipo de avaliação sobre treze modelos, todos aptos a simular o comportamento do lençol freático. Na tabela (2.3) apresenta-se a classificação destes modelos quanto ao tipo e formulações empregadas no tratamento das zonas saturada e não-saturada.

Tabela 2.2 – Processos simulados pelos modelos selecionados*

Processo simulado	Modelos					
	SWATRE	DRAINMOD	SOIL-SOILN	MODFLOW	SALTMOD	USBR
Posição do lençol freático	♦	♦	♦	♦	♦	♦
Fluxo aos drenos	♦	♦	♦	♦	♦	♦
Subirrigação	♦	♦				
Drenagem com poços				♦		
Reuso da água de drenagem					♦	
Salinidade do solo	♦	♦			♦	
Salinidade da água					♦	
Lixiviação de nitrato		♦	♦			

• Madramootoo (1992)

Tabela 2.3 – Características dos modelos revisados *

Modelo	Tipo	Zona saturada	Zona não saturada
DRAINMOD	Balanco macroscópico	Hooghoudt – Kirkham	Condição de equilíbrio
RFQSM	Equação de fluxo (1D)	Glover – Dumm	Richards
DSDP	Fluxo saturado	Equação específica	
DRAINET	Equação de fluxo (2D)	Laplace	Richards
OPDRAS	Equação de fluxo (2D)	Richards	Richards
SIWARE	Regional	Ernst	
SCARP 3	Regional	Equação de difusão	
SWACROP	Equação de fluxo (1D)		Richards
FLOCR	Fluxo preferencial		
LINMOD	Fluxo saturado		
ADMOD	Fluxo saturado	Guyon – Schilfgaarde	
GRASSMOD	Balanco macroscópico	Hooghoudt	
SIDRA	Fluxo saturado	Guyon – Schilfgaarde	

• Lorre & Lesaffre (1994)

Além das características apresentadas na tabela anterior, os modelos também foram analisados quanto às condições de contorno adotadas, simulação ou não do escoamento superficial, discretização espacial e temporal, dados de entrada exigidos, resultados oferecidos e objetivos principais.

As referências relativas aos modelos citados nas tabelas (2.2) e (2.3), que não constam no texto, encontram-se em Madramootoo (1992) e Lorre & Lesaffre (1994).

Por fim, ainda podem-se citar alguns pacotes computacionais que não se constituem propriamente em modelos de simulação, mas que auxiliam na definição do *lay-out* dos sistemas de drenagem com base na topografia da área do projeto. Exemplos deste tipo são SUBDRAIN (Bottcher et al, 1984) e LANDRAIN (Sands et al, 1985).

2.9 – Modelos aplicados à irrigação por inundação

O desenvolvimento de modelos específicos para simulação de áreas cultivadas com arroz fortaleceu-se no início da década de 80, sendo os principais responsáveis os países asiáticos que têm grande tradição com esta cultura (Berge et al, 1995). Exemplos de modelos que datam deste período são IRRIMOD (Angus & Zandstra, 1980), PADIWATER (Bolton & Zandstra, 1981) e RICEMOD (McMennamy & O’Toole, 1983 *apud* Berge et al, 1995). A maioria dos modelos desenvolvidos nesses países consideram um tipo de manejo no qual o cultivo do arroz se dá por transplante de mudas ou no sistema pré-germinado. Em ambos os casos o preparo do solo ocorre dentro d’água, o que cria uma condição muito particular para a

camada mais superficial. Essas práticas também são adotadas no Rio Grande do Sul, mas ainda estão muito longe de serem predominantes. Isso, de certa forma, prejudica a aplicação de modelos “importados” nas nossas condições.

De uma maneira geral, os modelos têm como referência uma equação de balanço na qual a variação do armazenamento, incluindo a lâmina na superfície, é definida em função da evapotranspiração, fluxo lateral, percolação, escoamento superficial, irrigação e precipitação.

O modelo IRRIGA (Fietz et al, 1986, Fietz, 1987, Beltrame & Louzada, 1991) estima a evapotranspiração com base em valores de referência e nos coeficientes da cultura do arroz. Tanto o fluxo lateral como a percolação são calculados por meio da equação de Darcy. No caso da percolação, o modelo assume fluxo gravitacional. A precipitação não é considerada, com o que, nesta versão, o modelo define a necessidade total de água. Em versão posterior, denominada IRRIGA2 (Louzada et al., 1994), incluiu-se a precipitação, permitindo assim a estimativa somente da necessidade de irrigação.

O modelo IRRICE (Pereira, 1989) considera a evapotranspiração igual à evaporação do Tanque Classe A, estima a percolação com a equação de Darcy e o fluxo lateral com base nas hipóteses de Dupuit. Paulo et al. (1995) estenderam o modelo IRRICE de tal forma a permitir sua aplicação a um setor no qual a irrigação não é simultânea em toda a área. Essa versão foi denominada IRRICEP. Em ambas as versões a percolação é uma função da profundidade do lençol freático.

O modelo CROPWAT (Smith, 1992), inicialmente concebido para simulação de outras culturas, foi estendido para contemplar a irrigação por inundação do arroz. Neste modelo as perdas por percolação e fluxo lateral são informadas pelo usuário.

O modelo BIRIZ (Raes & Feyen, 1995) desconsidera o fluxo lateral e a percolação constitui-se em um dado de entrada.

O modelo SAWAH (Berge et al, 1995), diferentemente dos citados anteriormente, tem seu módulo solo-água baseado na solução numérica das equações de fluxo para a zona não-saturada. Quando o modelo identifica a saturação parcial ou total do perfil, esta região é tratada diretamente pela equação de Darcy. Uma versão adaptada da equação de Penman-Monteith é utilizada para estimativa da transpiração, considerando que a copa das plantas cobre totalmente a superfície do solo. Singh et al (2001) modificaram o modelo SAWAH de tal forma a simular períodos com diferentes condições de cobertura. A partição da evapotranspiração em transpiração e evaporação é feita com base no índice de área foliar.

Odhambo & Murty (1996) simulam a irrigação por inundação resolvendo numericamente a equação bidimensional de Laplace. A evapotranspiração é definida com

base na evaporação do Tanque Classe A e nos coeficientes da cultura e do próprio tanque. O modelo é apto para simular áreas independentes ou para transferir água entre áreas adjacentes.

Ali et al (2000) apresentam um modelo no qual a frente de avanço da água que infiltra é simulada pelas equações de Green-Ampt. O fluxo lateral é desconsiderado e a evapotranspiração é estimada diretamente pela equação de Penman-Monteith.

Há uma série de versões do modelo ORYZA desenvolvidas pelo “International Rice Research Institute (IRRI)”, sendo ORYZA2000 (Bouman et al, 2001) a mais recente. Trata-se de uma atualização e integração das versões anteriores, ORYZA1 (simula produção potencial), ORYZA-W (simula situações de déficit hídrico) e ORYZA-N (simula a produção com diferentes níveis de nitrogênio no solo). A simulação da dinâmica da água no solo é feita pelas rotinas IRRIG e PADDY. Com a primeira, define-se se há ou não irrigação e, em caso positivo, as lâminas diárias e o manejo. Com a segunda, estima-se a percolação e o fluxo lateral. Pode-se informar um valor constante que deve corresponder ao somatório das duas variáveis, pode-se defini-las em função da profundidade do lençol freático ou calcular a percolação. Neste último caso, o fluxo lateral é desconsiderado. O cálculo da percolação envolve a equação de Darcy e o esquema iterativo de Newton-Raphson. O modelo oferece diferentes alternativas para o cálculo da evapotranspiração de referência, sendo os valores reais estimados com base na umidade do solo definidos pela rotina PADDY.

Siddeek et al (1988) e Azhar et al (1992) apresentam modelos que diferem dos citados anteriormente pelo caráter estocástico que possuem. Tanto o fluxo lateral como a percolação são considerados constantes, enquanto a precipitação e a evapotranspiração são associadas a uma determinada probabilidade. Os modelos oferecem como resultado a necessidade semanal de irrigação, tendo em conta as incertezas que acompanham estas duas variáveis.

Uma série de outros modelos desenvolvidos para a simulação do cultivo do arroz em terras altas também estão disponíveis. Nesses, não havendo irrigação, dá-se prioridade ao módulo que contempla o desenvolvimento da cultura. Modelos desta natureza são quase que totalmente agrônômicos, não tendo sido, por isso, referidos.

2.10 – Consumo na irrigação por inundação : valores medidos e estimados

2.10.1 – Dados de experimentos da Região Sul do Brasil

A preocupação com a definição de parâmetros de consumo na irrigação por inundação no Rio Grande do Sul existe desde meados da década de 50. A partir desta data, o IRGA (Bernardes, 1956) passou a recomendar vazões entre 1,7 e 3,0 L.s⁻¹.ha⁻¹, valores que

persistiram por 40 anos. A partir da década de 90 (IRGA, 1996), as vazões recomendadas estão entre 1,5 e 2,0 L.s⁻¹.ha⁻¹, o que foi possível com o avanço da tecnologia proporcionado pela pesquisa associado a maior conscientização dos agricultores (Corrêa et al, 1997). Durante e após este período, vários experimentos de campo já foram conduzidos com o objetivo de medir o consumo em áreas cultivadas com arroz irrigado por inundação. Estes experimentos se diferenciam pelas características climáticas das regiões onde foram implantados, pelas diferentes formas de preparo do solo e pelo manejo da irrigação.

Sachet (1977) apresenta resultados obtidos na Estação Experimental do Arroz do IRGA, Cachoeirinha/RS. Os experimentos contemplaram a irrigação com permanente circulação da água, água estagnada e saturação do solo com lâmina superficial praticamente nula. Em um período de 104 dias, mediram-se consumos médios de 17972 m³/ha, 8639 m³/ha e 6497 m³/ha respectivamente.

Dotto (1990) conduziu experimentos na Estação Experimental do Arroz do IRGA, Itaquí/RS, empregando a irrigação por inundação contínua, intermitente e por aspersão. As médias dos consumos medidos em um período de 110 dias correspondem a 12172 m³/ha, 10642 m³/ha e 6152 m³/ha respectivamente.

Eberhardt (1994) realizou experimentos na Estação Experimental de Itajaí, Itajaí/SC, ao longo de duas safras utilizando diferentes máquinas e implementos para preparo do solo no sistema pré-germinado. Os nove tratamentos apresentaram um consumo médio de 861,9 mm, com 1035,6 mm sendo o maior valor e 673,1 mm o menor.

Hernandez et al (1997) em área da UFSM, Santa Maria/RS, realizaram experimentos variando a época de início da irrigação, o sistema de preparo do solo e o nível de controle de plantas invasoras. No sistema convencional com inundação contínua, foram medidos consumos de 6512 m³/ha e 6263 m³/ha, com a irrigação iniciando respectivamente 15 e 30 dias após a emergência.

Weber (2000) também em área da UFSM, Santa Maria/RS, avaliou o consumo d'água nos sistemas convencional, mínimo, pré-germinado, mix e transplante de mudas. Nos dois primeiros, o período de irrigação foi de 101 dias; nos demais, 118 dias. Os consumos medidos foram muito próximos, apresentando uma média de 11850 m³/ha.

Marcolin & Macedo (2001b) apresentam resultados médios de cinco safras (96/97 a 00/01) em experimentos realizados na Estação Experimental do Arroz do IRGA, Cachoeirinha/RS. Os consumos medidos foram 7856 m³/ha (convencional), 7145 m³/ha (direto) e 7881 m³/ha (pré-germinado).

Machado (2003) apresenta resultados de experimentos conduzidos na UFSM com os sistemas convencional, cultivo mínimo, pré-germinado, mix e de transplante de mudas. Em

duas safras, 00/01 e 01/02, o menor e o maior consumo medidos foram 5374 m³/ha e 6422 m³/ha, respectivamente.

2.10.2 – Dados de experimentos de outros países

Brown et al (1978) registraram o consumo em várias parcelas de 300 m² situadas em uma região de solos bastante argilosos no Texas. As médias das parcelas em dois períodos foram 963 mm e 1402 mm quando foi utilizada a irrigação intermitente, e 1464 mm e 1858 mm quando a irrigação foi contínua.

Hendrickx et al (1986) mediram o consumo na irrigação por inundação em uma região semi-árida da África. Em quatro unidades, com áreas variando entre 12 e 26 ha, registraram-se lâminas totais de 1415 mm, 1329 mm, 1436 mm e 1581 mm.

Tripathi et al (1986), na Índia, mediram o consumo em pequenas parcelas experimentais com diferentes tipos de solos e manejos da irrigação. No caso do solo com predominância de argila, a média de dois períodos com irrigação contínua foi de 1583 mm e de 951 mm com irrigação intermitente.

Shizhang et al (1994) mediram o consumo em área irrigadas na China com o objetivo de definir manejos diferenciados que possam promover economia de água. Entre os diferentes manejos, o maior consumo, registrado na irrigação contínua, foi de 998,9 mm.

Roel & Blanco (1997) apresentam resultados obtidos em parcelas situadas na Unidade Experimental “Paso de la Laguna–INIA Treinta y Tres”, Uruguai, e em lavouras comerciais deste mesmo país. Nas áreas experimentais, foram adotados os sistemas pré-germinado e convencional. Neste último, a irrigação teve início quinze e quarenta e três dias após a emergência das plantas. Os consumos medidos foram 11490 m³/ha, 9058 m³/ha e 10900 m³/ha, respectivamente. Nas lavouras, com áreas de 118 ha e 139 ha e manejo da irrigação definido pelos próprios agricultores, registraram-se consumos de 18977 m³/ha e 14491 m³/ha.

Islam & Molla (2001), em Bangladesh, mediram consumos de 1672 mm, 1109 mm e 812 mm, em área irrigadas continuamente (lâmina profunda e lâmina rasa) e de forma intermitente.

2.10.3 – Resultados da aplicação de modelos em diferentes regiões do Rio Grande do Sul

A estimativa do consumo em diferentes solos e regiões climáticas oferece informações importantes na fase de planejamento dos projetos. Uma questão sempre presente em projetos de irrigação é a necessidade de adequar-se a área a ser irrigada com a disponibilidade hídrica.

(Beltrame & Louzada, 1991). No caso específico do Rio Grande do Sul há aplicações de modelos com resultados que pecam pela falta de comprovação. Alguns desses resultados são sintetizados a seguir.

Tabela 2.4 – Consumo na irrigação por inundação estimado por balanço hídrico

Fonte	Vazão média (l/s.ha)	Unidade de Solo	Classif. Taxonômica ²
Preussler et al (1982)	1,15	Pelotas	PI Hid ³ eutrófico solódico
	0,77 ¹	Pelotas	PI Hid eutrófico solódico
Beltrame e Gondim (1982)	1,44	Vacacaí – D. Central	PI Hid eutrófico arênico
	1,02 ¹	Vacacaí – D. Central	PI Hid eutrófico arênico
Fietz et al (1986)	1,61	Pelotas	PI Hid eutrófico solódico
Beltrame e Louzada (1991)	1,51	Pelotas	PI Hid eutrófico solódico
Beltrame e Louzada (1991)	1,72	Vacacaí – D. Central	PI Hid eutrófico arênico
Beltrame e Louzada (1991)	1,56	Vacacaí – Litoral	PI Hid eutrófico arênico
Beltrame e Louzada (1991)	1,76	Vacacaí – Campanha	PI Hid eutrófico arênico

¹ considerando a precipitação

² Embrapa (1999)

³ Planossolo Hidromórfico

Os resultados apresentados na tabela anterior foram obtidos com o modelo IRRIGA (Beltrame & Louzada, 1991), tendo-se como condição de contorno inferior fluxo gravitacional. O modelo considera um período inicial para formação da lâmina e saturação do perfil e um segundo período de manutenção. As vazões médias da tabela correspondem às médias ponderadas destes dois períodos. Exceção aos valores de Beltrame & Gondim (1982), que são específicos para a área da Estação Experimental do Arroz – IRGA, os demais foram estimados com base em valores médios de evapotranspiração e de características físicas dos respectivos solos.

Os modelos IRRIGA (sem precipitação) e IRRIGA2 (com precipitação) foram aplicados nos municípios de Eldorado do Sul, Camaquã e Santa Vitória do Palmar. No caso do modelo IRRIGA2, adotou-se um manejo hipotético que permite o aproveitamento pelo menos parcial da precipitação. Os resultados obtidos (Louzada et al, 1994) são apresentados a seguir.

Tabela 2.5 – Resultados da aplicação dos modelos IRRIGA e IRRIGA2

Município	Consumo total (mm)	Necessidade de irrigação (mm)
	(IRRIGA)	(IRRIGA2)
Eldorado do Sul	1321	1039
Camaquã	1280	999
Santa Vitória do Palmar	1316	1036

Admitiu-se a irrigação iniciando em 16 de novembro e com duração de cem dias. No modelo IRRIGA2, foram utilizadas séries históricas de precipitações diárias de cada município. Em Camaquã e Santa Vitória do Palmar, foram adotados os parâmetros médios dos solos da Unidade Pelotas; no município de Eldorado do Sul, os parâmetros médios da Unidade Vacacaí.

Motta et al (1990) estimaram necessidades de irrigação para os municípios de Bagé, Jaguarão, Pelotas, Porto Alegre, Rio Grande, Santa Maria e Santa Vitória do Palmar. O modelo adotado considera que a evapotranspiração corresponde a 70 % do consumo total e que toda a precipitação é efetiva. Para períodos de irrigação de 24/11 à 21/02 e de 25/12 à 24/03, os respectivos valores médios de necessidades de irrigação correspondem a 714,4 mm e 625,7 mm. Os maiores valores de cada período são 801,6 mm e 704,3 mm, e ambos ocorrem em Santa Vitória do Palmar. Os autores ressaltam que os valores obtidos correspondem a apenas 42 % do que historicamente é utilizado pelos agricultores.

Multimpex (199_) realizou estudos para estimativa da demanda na irrigação por inundação com vistas ao projeto da Barragem do Butuí, município de Itaquí. O modelo empregado considerou o consumo igual ao somatório da evapotranspiração, volume para formação da lâmina superficial, volume para saturação do perfil e volume para atender à produção da matéria orgânica da planta. Foram desconsideradas as perdas por percolação e fluxo lateral. O valor que resultou do balanço corresponde a 9997 m³/ha. Por meio de um segundo modelo, identificado como “Método de Blanney & Cliddle – *kf*”, foi obtida uma demanda de 7990 m³/ha. Com base nesses dois resultados, o valor recomendado para dimensionamento do reservatório foi de 9000 m³/ha. Diferentemente dos demais modelos, a inclusão do termo que relaciona a água ofertada com a produção de matéria orgânica permite que se defina uma relação entre a demanda e a produtividade.

Almeida (1998) estimou necessidades de irrigação nos municípios de Santo Antônio da Patrulha, localidades de Entrepelado e Lagoa dos Barros, Osório, Terra de Areia e Palmares do Sul. Na equação de balanço do modelo, toda a precipitação foi considerada como efetiva, o fluxo lateral não foi computado e a percolação assumida como uma entrada. Os resultados médios obtidos nas Unidades Barros e Palmares são apresentados a seguir.

Tabela 2.6 – Demandas geradas por balanço hídrico seriado diário (mm)

Localidade	Planossolo Barros	Planossolo Palmares
Palmares	981,1	1169,2
Lagoa dos Barros	804,8	997,6
Entrepelado	802,9	1005,4
Lagoa dos Quadros	686,0	870,3
Terra de Areia	663,8	848,9

Em geral, como são os casos dos exemplos anteriores, tanto os experimentos como os modelos não incluem em suas medições e simulações as perdas nos canais que ligam o ponto de captação à área irrigada. O IRGA, com base na vasta experiência de seu Departamento de Assistência Técnica e Extensão Rural, sugere que se considere a ordem de grandeza dessas perdas ao redor de 1,5 % da vazão derivada a cada 5 km percorridos.

3 – Metodologia

3.1 – Introdução

Neste capítulo são descritos os métodos empregados para atingir os objetivos inicialmente propostos. Assim sendo, são apresentados de forma detalhada os modelos SWAP, IRRIGA e as alterações introduzidas no modelo SWAP que originaram a nova versão denominada SWAP_INU. Além disso, são caracterizadas as áreas experimentais, identificadas as variáveis medidas nos experimentos, referidos os dados climáticos e enumeradas cada uma das simulações associando-as aos objetivos. Por fim, são listados os parâmetros que compõem as diferentes rotinas dos modelos. A caracterização de cada cenário simulado é complementada posteriormente, juntamente com a apresentação dos resultados.

3.2 – O modelo SWAP (*Soil-Water-Atmosphere-Plant*) – um breve histórico

O modelo SWAP tem sua origem no modelo SWATR (Soil-Water-Actual-Transpiration), desenvolvido por Feddes et al (1978). Nesta versão, tem-se um modelo unidimensional que simula o balanço de água na zona não-saturada de um perfil de solo cultivado. A base teórica do modelo é a equação de Richards. Ao longo do tempo, com base na experiência acumulada com sua aplicação, outros conceitos e rotinas foram sendo agregados, originando o surgimento de novas versões. Belmans et al (1983) introduziram a simulação simultânea das zonas saturada e não-saturada, incrementaram a capacidade do modelo na simulação do balanço em perfis heterogêneos, modificaram o esquema numérico de solução da equação de Richards e utilizaram um novo algoritmo para cálculo da extração de água pelo sistema radicular. Esta versão foi denominada SWATRE (Soil-Water-Actual-Transpiration-Extended). Kabat et al (1992) agregaram à versão anterior o modelo CROPR (Crop-Production), que simula o desenvolvimento da cultura paralelamente ao balanço hídrico. Esta versão foi denominada SWACROP (Soil-Water-Crop-Production). As versões posteriores procuraram aperfeiçoar a solução numérica, introduziram os conceitos de histerese e fluxo preferencial, ofereceram novas opções para as condições de contorno no topo e na base, passaram a simular o transporte de solutos e o fluxo a drenos horizontais e finalmente a interação com a água superficial. Surgiram então as versões SWAP 1993 (ou SWAP 1.0) (Work, 1994) e SWAP 2.0 (Dam et al, 1997).

3.3 – O modelo SWAP – versão 2.0

Em sua versão 2.0, o modelo SWAP compreende os fluxos de água e calor, o transporte de solutos, o desenvolvimento das culturas e a interação com a água superficial, tendo como base os conceitos e técnicas atuais de modelação e simulação (Dam et al, 1997). Sua concepção modular possibilita que sejam definidas as rotinas que serão utilizadas na simulação de cada cenário.

O balanço de água no perfil do solo é a referência para todos os demais módulos, sendo obtido mediante uma solução numérica da equação não-linear de Richards. A precipitação pode ser informada por meio de seus totais diários ou considerando-se sua distribuição temporal dentro de um mesmo dia. Para solução da equação de Richards devem ser definidas as relações armazenamento-pressão (sucção)-condutividade hidráulica. Isto pode ser feito diretamente (forma tabular) ou utilizando o modelo analítico de Mualem – Genuchten (Mualem, 1976, Genuchten, 1980). No caso da relação armazenamento- sucção, pode-se levar em conta a histerese por intermédio de um modelo empírico que requer como entrada unicamente as curvas principais obtidas com o solo inicialmente seco e saturado (Kool & Parker, 1987). A discretização numérica da equação de Richards é feita com o emprego de um esquema implícito de diferenças finitas, de tal forma que possibilita a simulação simultânea das zonas saturada e não-saturada. O erro no balanço de massa é minimizado com a adaptação sugerida por Celia et al (1990). As condições de contorno na superfície são atualizadas pelo modelo em cada iteração. Em situações extremas de alta evaporação (solo muito seco) ou acúmulo d'água na superfície (solo muito úmido), essas condições são definidas pela pressão (sucção). Em condições intermediárias, são definidas pelo fluxo. As condições de contorno na base podem ser do tipo Dirichlet (a pressão é especificada), do tipo Neumann (o fluxo é especificado) ou do tipo Cauchy (o fluxo é uma função da posição do lençol freático).

O transporte de solutos considera os mecanismos de difusão, advecção e dispersão. A equação diferencial resultante é resolvida por um esquema explícito de diferenças finitas.

O modelo apresenta duas alternativas para simulação do fluxo de calor. A primeira, mais simplificada, assume a condutividade térmica e a capacidade de calor do solo como constantes, permitindo assim a derivação de uma solução analítica da equação diferencial linearizada. A segunda, admite-se a dependência destes parâmetros da umidade do solo. Neste caso, a equação que governa o fenômeno é não-linear e sua solução é obtida numericamente.

A heterogeneidade espacial do solo pode originar erros importantes nos balanços de água e solutos. O emprego de valores médios dos parâmetros é pouco recomendado, já que

tanto o fluxo de água como o transporte de solutos na zona não-saturada são processos com acentuada não-linearidade. O modelo procura contornar esta dificuldade nas relações umidade – sucção e condutividade hidráulica – umidade com a utilização de um parâmetro adimensional de escala proposto por Miller & Miller (1956). A heterogeneidade também pode ser considerada pela presença de caminhos preferenciais tanto para o fluxo de água como para o transporte de solutos.

A evapotranspiração potencial correspondente às diferentes culturas pode ser estimada diretamente ou em duas etapas. No primeiro caso, deve-se dispor das informações necessárias para aplicação da equação de Penman – Monteith. No procedimento em duas etapas, são dados de entrada do modelo os valores de evapotranspiração de referência e os coeficientes de cultura. Para obtenção dos valores reais, inicialmente são estimadas separadamente a evaporação potencial direta do solo e a transpiração potencial. Isso é feito com o modelo de Ritchie (Ritchie, 1972). A extração de água ao longo do perfil considera a densidade das raízes e o estresse que pode ser provocado pela água (solo muito seco ou muito úmido) e/ou pela presença de sais. A evaporação da camada superior do solo é calculada pela equação de Darcy, ou alternativamente pelas equações empíricas de Black et al (1969) ou de Boesten e Stroosnijder (1986).

Para simulação do desenvolvimento das culturas o SWAP oferece como principal opção uma rotina que corresponde ao modelo WOFOST (Supit et al, 1994). Como este é um modelo bastante exigente no que diz respeito aos parâmetros de entrada, tem-se um modelo simplificado como alternativa. Neste caso deve-se informar o índice de área foliar, o comprimento das raízes e a altura da cultura ao longo dos seus diferentes períodos de desenvolvimento.

A simulação do manejo da água permite que considere-se a ocorrência de irrigação e a presença de drenos subsuperficiais. No caso da irrigação são oferecidas diferentes alternativas para definição da lâmina de irrigação e do momento de irrigar. O fluxo aos drenos e a posição do lençol freático podem ser estimados a partir das equações de Hooghoudt ou Ernst.

Finalmente o modelo possibilita que as relações solo-água-planta-atmosfera sejam integradas com a água da superfície em uma escala regional.

3.4 – O modelo SWAP adaptado – versão SWAP_INU

No item anterior, foram referidos de forma sintética todos os módulos que compõem a versão atual do modelo SWAP (SWAP 2.0). Agora serão descritos de forma detalhada apenas os que são utilizados neste estudo, ressaltando-se algumas adaptações feitas para torná-lo

adequado às particularidades da irrigação por inundação e à simulação em áreas com drenos livres. A versão resultante foi denominada **SWAP_INU**.

3.4.1 – A equação de Richards e sua solução numérica

O embasamento físico do modelo SWAP_INU é a equação de Richards, que resulta da combinação das equações de continuidade e de Darcy. Em sua versão mista, que é a utilizada no modelo, a equação de Richards tem a forma que segue.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]}{\partial z} - W(h) \quad (3.1)$$

sendo :

h : potencial de pressão [L]

$K(h)$: condutividade hidráulica [L/T]

θ : umidade volumétrica [$L^3.L^{-3}$]

t : tempo [T]

z : coordenada vertical (+ para cima) [L]

$W(h)$: composição de variáveis que representam entradas (+) ou saídas (-) [T^{-1}]

Essa forma da equação garante a correção no balanço de massa e a continuidade da solução em meios heterogêneos, ou seja, agrega as vantagens das formas baseadas isoladamente na variável θ e na variável h (Celia et al, 1990). O termo $W(h)$ é detalhado ao longo deste capítulo, na medida em que as variáveis que o compõem são apresentadas.

Tendo em vista sua natureza hiperbólica e acentuada não-linearidade, a equação de Richards só pode ser resolvida numericamente. No modelo SWAP_INU, emprega-se um esquema dito implícito com linearização explícita, ou seja, as derivadas são estimadas no tempo $(t+1)$ e as relações $K(h)$ e $W(h)$ no tempo (t) . A equação discretizada é apresentada a seguir, onde $h_i^{j+1,p}$ é a única incógnita.

$$C_i^{j+1,p-1} (h_i^{j+1,p} - h_i^{j+1,p-1}) + (\theta_i^{j+1,p-1} - \theta_i^j) = \frac{\Delta t^j}{\Delta z_i} \left[K_{i-1/2}^j \left(\frac{h_{i-1}^{j+1,p} - h_i^{j+1,p}}{\Delta z_u} \right) + K_{i-1/2}^j - K_{i+1/2}^j \left(\frac{h_i^{j+1,p} - h_{i+1}^{j+1,p}}{\Delta z_l} \right) - K_{i+1/2}^j \right] - \Delta t^j W_i^j \quad (3.2)$$

sendo :

$$C_i^{j+1,p-1} = \left[\frac{d\theta}{dh} \right]_{j+1,p-1} [L^{-1}]$$

Δt_j : intervalo de tempo [T]

Δz_i : comprimento do compartimento do perfil correspondente ao nó i [L]

Δz_u : distância entre os nós i e $i-1$ [L]

Δz_l : distância entre os nós i e $i+1$

Os símbolos i , j e p utilizados na equação discretizada referem-se respectivamente ao espaço, ao tempo e às iterações. O valor médio de K entre nós ($i-1/2$ e $i+1/2$) é estimado pela média aritmética dos valores de K nos nós $i-1, i$ e $i, i+1$. O intervalo de tempo é otimizado durante a simulação de acordo com o número de iterações necessárias para que ocorra a convergência, sendo os intervalos máximo e mínimo previamente definidos. O critério de convergência baseia-se nas variáveis θ (nó situado em compartimento não saturado) e h (nó situado em compartimento saturado). Como a derivada de θ em relação à h é nula em meio saturado, a discretização posiciona o termo que a representa (C) unicamente no numerador, garantindo assim a aplicação da equação nas zonas não-saturada e saturada.

As condições iniciais, as condições de contorno inferiores e a discretização do perfil para aplicação do modelo nos diferentes cenários são definidas quando da apresentação dos resultados de cada simulação. As condições de contorno na superfície são continuamente atualizadas dependendo do que prevalece em cada iteração, infiltração ou evaporação. As equações e critérios adotados são apresentados na seqüência. Inicialmente a equação formada pelas variáveis que ocorrem na superfície.

$$q_{top} = q_{ev} - q_{pre} - q_{irr} - \frac{h_p}{\Delta t^j} \quad (3.3)$$

sendo :

q_{top} : fluxo resultante na superfície do solo [L/T]

q_{ev} : evaporação [L/T]

q_{pre} : precipitação [L/T]

q_{irr} : irrigação [L/T]

h_p : lâmina armazenada na superfície [L]

Δt^j : intervalo de tempo [T]

A seguir as equações com as variáveis que caracterizam entradas e saídas no perfil do solo.

$$Q = (q_{bot} - q_{top} - q_r - q_d + q_c)\Delta t^j ; q_{top} > -I_{max} \quad (3.4a)$$

$$Q = (q_{bot} + I_{max} - q_r - q_d + q_c)\Delta t^j ; q_{top} \leq -I_{max} \quad (3.4b)$$

sendo :

Q : resultante das entradas e saídas [L]

q_{bot} : fluxo na extremidade inferior do perfil [L/T]

q_{top} : fluxo na superfície [L/T]

q_r : fluxo para as raízes [L/T]

q_d : fluxo para os drenos [L/T]

q_{cm} : fluxo das fissuras para a matriz do solo [L/T]

Δt^j : intervalo de tempo [T]

I_{max} : capacidade de infiltração da camada superior do solo [L/T]

O índice j que aparece nas duas equações indica que seus valores são tomados no início do intervalo de tempo. Entre as variáveis que atuam na vertical, as que se dirigem para cima são consideradas positivas. Os fluxogramas, apresentados nas figuras que seguem, detalham o procedimento adotado pelo modelo para atualização das condições de contorno na superfície. No primeiro caso, tem-se o solo saturado no tempo j . Assim permanecendo no tempo $j+1$, a condição de contorno na superfície é definida pela pressão ($h_{sur} = Q$). Caso contrário, identifica-se se a prevalência de uma situação de infiltração ou de evaporação. Sendo evaporação, tem-se $h_{sur} = h_{atm}$ ou $q_{sur} = q_{top}$. Sendo infiltração, tem-se $h_{sur} = h_p$ ou $q_{sur} = q_{top}$. No segundo caso tem-se o solo inicialmente não saturado. Caso venha a tornar-se saturado ao final do intervalo, a condição de contorno na superfície é definida pela pressão ($h_{sur} = Q - V_{ar}$). Caso contrário, volta-se a identificar a prevalência de uma situação de infiltração ou de evaporação. Sendo evaporação, tem-se $h_{sur} = h_{atm}$ ou $q_{sur} = q_{top}$. Sendo infiltração, tem-se $h_{sur} = h_p$ ou $q_{sur} = q_{top}$.

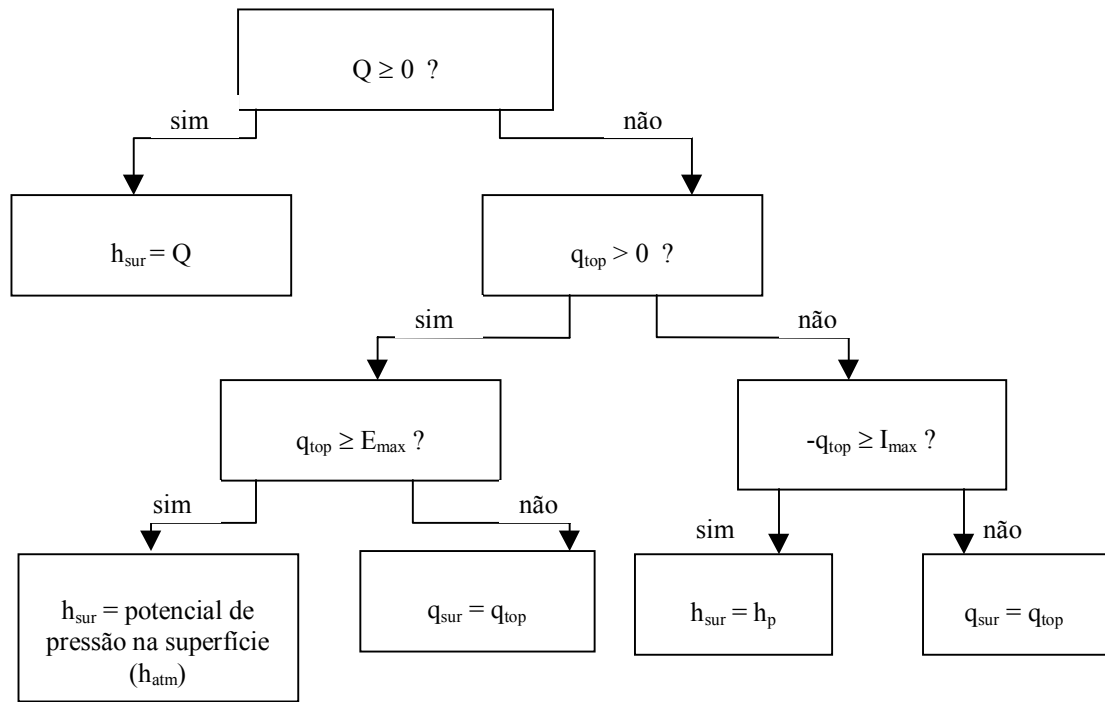


Figura 3.1a – Condições de contorno na superfície – solo inicialmente saturado

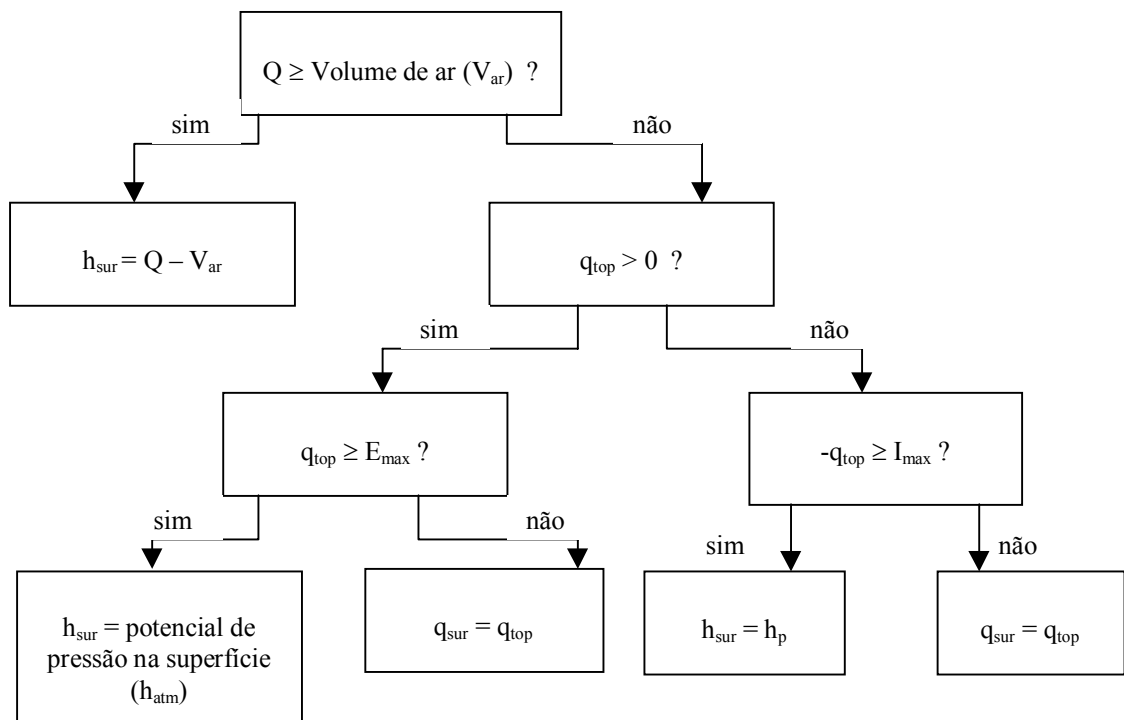


Figura 3.1b – Condições de contorno na superfície – solo inicialmente não saturado

Em síntese, quando ocorrem situações extremas caracterizadas por altos valores de evaporação ou acúmulo d'água na superfície as condições de contorno são definidas pela pressão (h_{sur}). Para as demais situações, pelo fluxo (q_{sur}). As variáveis E_{max} e I_{max} limitam os fluxos de infiltração e evaporação. As equações para estimá-las são apresentadas a seguir.

$$E_{\max} = -2 K_{1/2}^j \left[\frac{h_{atm} - h_1^{j+1,p-1} - z_1}{\Delta z_1} \right] \quad (3.5)$$

sendo :

E_{\max} : fluxo máximo de evaporação [L/T]

$K_{1/2}^j$: condutividade hidráulica no início do Δt [L/T]

h_{atm} : potencial de pressão na atmosfera junto à superfície [L]

$h_1^{j+1,p-1}$: potencial de pressão no nó 1 na iteração p-1 [L]

z_1 : distância da superfície ao nó 1 [L]

Δz_1 : espessura do 1^o compartimento [L]

O valor de h_{atm} é dependente da temperatura e da umidade relativa do ar. Neste estudo, adotou-se em todas as simulações um valor constante igual a $-2,75 * 10^5$ cm. O valor calculado de E_{\max} é limitado pela evaporação potencial. A metodologia empregada para estimá-la é apresentada no item 3.4.3.

$$I_{\max} = 2 K_{1/2}^j \left[\frac{h_p^j - h_1^{j+1,p-1} - z_1}{\Delta z_1} \right] \quad (3.6)$$

sendo :

I_{\max} : fluxo máximo de infiltração [L/T]

$K_{1/2}^j$: condutividade hidráulica no início do Δt [L/T]

h_p^j : lâmina armazenada na superfície no início do Δt [L]

$h_1^{j+1,p-1}$: potencial de pressão no nó 1 na iteração p-1 [L]

z_1 : distância da superfície ao nó 1 [L]

Δz_1 : espessura do 1^o compartimento [L]

A constante atualização das condições de contorno na superfície permite ao modelo simular períodos secos e úmidos que se alternam. As soluções mais convencionais da equação de Richards aplicam-se isoladamente para uma ou outra situação.

A aplicação da equação (3.2) a cada nó da malha numérica resulta em um sistema de equações cuja matriz dos coeficientes é do tipo tri – diagonal. O esquema empregado para sua solução é apresentado no Anexo A1.

3.4.2 – As relações $\theta = \theta(h)$ e $K = K(\theta)$

Para definirem-se as relações entre as variáveis θ , h e K , optou-se pela alternativa do modelo que utiliza as expressões analíticas de Genuchten–Mualem (Mualem, 1976, Genuchten, 1980). Estas equações são apresentadas a seguir.

$$\theta = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m} \quad (3.7)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad (3.8)$$

$$K = K_{sat} S_e^{1/2} \left[1 - \left(1 - S_e^m\right)^m\right]^2 \quad (3.9)$$

sendo :

θ : umidade volumétrica [$L^3 \cdot L^{-3}$]

θ_{sat} : umidade volumétrica correspondente à saturação [$L^3 \cdot L^{-3}$]

h : potencial de pressão [L]

K : condutividade hidráulica [L/T]

K_{sat} : condutividade hidráulica saturada [L/T]

S_e : saturação efetiva [-]

θ_{res} [$L^3 \cdot L^{-3}$], α [L^{-1}], n [-], m [-] : parâmetros

Os parâmetros θ_{res} , α e n foram obtidos com o auxílio do pacote computacional RETC (Genuchten et al, 1991). Os parâmetros m e n têm uma relação definida por $m = 1 - 1/n$. Os parâmetros θ_{sat} e K_{sat} foram estimados por métodos convencionais (tabela 3.1).

Para ter em conta a histerese, o modelo utiliza os conceitos propostos por Kool & Parker (1987), nos quais somente as curvas principais de dessorção e sorção devem ser previamente conhecidas. Admite-se que θ_{sat} e θ_{res} são iguais para as duas curvas e que a relação $K(\theta)$ é única. Para tanto, necessariamente também se tem os valores de m e n iguais para as duas curvas principais. Assim sendo, estas curvas diferem unicamente pelo parâmetro α . A definição das curvas intermediárias é feita pelas equações que seguem.

$$\frac{\theta_{sat}^* - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} = \frac{\theta_{act} - \theta_{res}}{\theta_{md} - \theta_{res}} \quad (3.10)$$

$$\frac{\theta_{sat} - \theta_{res}^*}{\theta_{sat} - \theta_{res}} = \frac{\theta_{sat} - \theta_{act}}{\theta_{sat} - \theta_{mw}} \quad (3.11)$$

sendo :

θ_{sat}^* : valor de θ_{sat} adaptado [$L^3 \cdot L^{-3}$]

θ_{res}^* : valor de θ_{res} adaptado [$L^3 \cdot L^{-3}$]

θ_{act} : valor presente de θ [$L^3 \cdot L^{-3}$]

θ_{md} : valor de θ na curva principal de dessorção relativo ao valor presente de h [$L^3 \cdot L^{-3}$]

θ_{mw} : valor de θ na curva principal de sorção relativo ao valor presente de h [$L^3 \cdot L^{-3}$]

A primeira das duas equações representa a reversão de sorção para dessorção, e a segunda o processo inverso. Os valores de θ correspondentes às curvas intermediárias são obtidos com o emprego das equações que representam as curvas principais, substituindo-se nestas θ_{sat} por θ_{sat}^* (dessorção) e θ_{res} por θ_{res}^* (sorção). O procedimento de reversão de sorção para dessorção é ilustrado na figura que segue.

Os valores de θ e h , utilizados como referência para determinação dos parâmetros das equações de Genuchten–Mualem, foram obtidos em laboratório por um processo de drenagem gradativa das amostras (dessorção). Assim sendo, os valores de α gerados pelo RETC dizem respeito às curvas principais de dessorção (α_d). Os valores correspondentes às curvas principais de sorção (α_w) foram definidos com base na relação empírica $\alpha_w = 2\alpha_d$ (Kroes et al, 1998). Os valores dos parâmetros das equações apresentadas nesse item constam do Anexo A2.

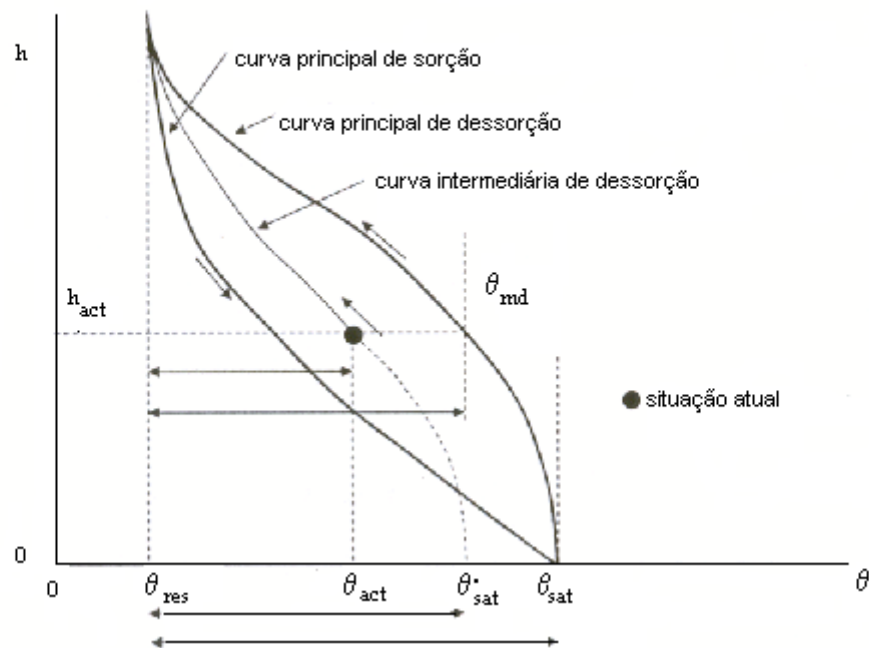


Figura 3.2 – Histerese no modelo SWAP_INU

3.4.3 – Transpiração e evaporação

A transpiração e a evaporação são quantificadas separadamente, partindo-se de que seus valores potenciais são complementares, ou seja :

$$ET_p = E_p + T_p \quad (3.12)$$

sendo :

ET_p : evapotranspiração potencial [L/T]

E_p : evaporação potencial [L/T]

T_p : transpiração potencial [L/T]

Os valores de ET_p em cada subperíodo são obtidos com o produto dos valores de referência (ET_{ref}) pelos respectivos coeficientes da cultura (k_c).

$$ET_p = k_c * ET_{ref} \quad (3.13)$$

O próprio conceito de k_c implica que seus valores sejam dependentes dos valores de ET_{ref} para os quais foram determinados. As simulações em períodos com cultura têm como

referência medições diárias em Evaporímetro Piche. Os respectivos valores de k_c são apresentados no item 3.6.4. As simulações em períodos sem cultura têm como referência medições diárias em Tanque Classe A, tendo-se admitido uma relação evaporação potencial do solo desnudo / evaporação do Tanque igual a 0,50. Essa relação tem respaldo em experimentos com as culturas da soja e do milho (Matzenauer et al, 2002). Os valores de referência são apresentados no Anexo A3.

A partição da evapotranspiração potencial em evaporação e transpiração é definida estimando-se inicialmente a parcela que corresponde à evaporação. Isso é feito pela equação que segue, que é uma adaptação do modelo de Ritchie (Ritchie, 1972).

$$E_p = ET_p \exp(-\beta I_{af}) \quad (3.14)$$

sendo :

E_p : evaporação potencial [L/T]

ET_p : evapotranspiração potencial [L/T]

β : parâmetro [-]

I_{af} : índice de área foliar [L^2/L^2]

Os valores de índice de área foliar são apresentados no item 3.6.4. O parâmetro β tem significado físico, sendo uma função da arquitetura das folhas. A definição de seu valor numérico foi feita após a interpretação da equação (3.14), relatada a seguir. Nesta equação, tem-se que $E_p = ET_p$ quando $I_{af} = 0$. Com o crescimento de I_{af} tem-se que E_p torna-se uma parcela de ET_p . Feddes & Lenselink (1994), entre outros, mostram que para $I_{af} = 3,5$ a evaporação potencial é muito pequena, sendo que aproximadamente 90 % de ET_p deve-se à transpiração potencial. Tendo estes dados como referência definiu-se o valor do parâmetro, obtendo-se $\beta = 0,66$. Este resultado situa-se no intervalo sugerido por Feddes & Lenselink (1994), que varia de 0,30 à 0,83.

Para cada valor de E_p calcula-se, por diferença, com o emprego da equação (3.12) o correspondente valor de T_p . A taxa de transpiração potencial corresponde à taxa máxima de extração de água pelo sistema radicular integrada ao longo da sua profundidade. Esta taxa máxima, numa determinada profundidade z , é estimada pelo modelo pela equação que segue.

$$S(z) = \frac{I_r(z)}{\int_{-D}^0 I_r(z) dz} T_p \quad (3.15)$$

sendo :

$S(z)$: taxa máxima de extração de água pelas raízes na profundidade z [T^{-1}]

$I_r(z)$: densidade do comprimento das raízes [$L \cdot L^{-3}$]

D : comprimento total do sistema radicular [L]

T_p : taxa de transpiração potencial [L/T]

A integral que aparece no denominador da equação anterior é resolvida numericamente. A função $I_r(z)$ discretizada é um dado de entrada. Os valores adotados são apresentados no item 3.6.4.

Tomando-se por base a definição dos valores potenciais de E_p e $S(z)$, estimam-se seus valores reais. Conforme já referido, no caso da transpiração, tendo em vista as condições particulares da irrigação por inundação, adaptou-se o modelo para assumir os valores reais (T_{ac}) iguais aos potenciais. Nos períodos simulados sem cultura, tem-se $S(z) = 0$. O termo $S(z)$ corresponde à extração de água de cada nó da malha numérica, sendo incorporado à equação de Richards mediante o somatório representado por $W(h)$ nesta equação. Da mesma forma, a evaporação real (E_{ac}) é igual à potencial nos períodos de irrigação. Nos períodos sem cultura, estima-se E_{ac} confrontando-se as equações (3.5) e (3.14). Se $E_{max} < E_p$, então $E_{ac} = E_{max}$. Se $E_{max} \geq E_p$, então $E_{ac} = E_p$. O termo E_{ac} é incorporado ao balanço quando se definem as condições de contorno na superfície para solução da equação de Richards.

3.4.4 – Irrigação

No caso da irrigação por inundação, o modelo SWAP_INU possibilita que sejam prescritas lâminas diárias durante todo o período. Além disso, a altura da lâmina superficial desejada, sua altura máxima possível e as condições para as quais há suspensão temporária da irrigação são previamente definidas. Essas condições, que definem o manejo, são apresentadas juntamente com a caracterização da área experimental de irrigação (item 3.6.1), quando do detalhamento de cada cenário simulado e no Anexo A4.

3.4.5 – Drenagem : Fluxo horizontal na zona saturada e escoamento superficial

O fluxo horizontal a drenos paralelos instalados à mesma profundidade é estimado com o emprego da equação de Hooghoudt. Quando aplicada a perfis homogêneos repousando sobre camada impermeável, esta equação tem a forma que segue.

$$L^2 = \frac{8K_{sat}dh_s + 4K_{sat}h_s^2}{q} \quad (3.16)$$

sendo :

L : espaçamento entre drenos [L]

K_{sat} : condutividade hidráulica saturada [L/T]

d : espessura equivalente [L]

h_s : posição do lençol freático no ponto médio entre os drenos [L]

q : vazão específica dos drenos [L/T]

A variável d permite que se incorpore o fluxo radial à equação de Hooghoudt, já que esta originalmente só considera o fluxo horizontal. A estimativa de d é feita com as equações que seguem (Molen & Wesseling, 1991).

$$d = \frac{\pi L}{8 \ln \frac{L}{u} + 8 F(x)} \quad (3.17)$$

$$F(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \exp(-2nx)}{n [1 - \exp(-2nx)]} ; n = 1, 3, 5 \dots \quad (3.18)$$

A equação (3.18) apresenta uma convergência rápida para $x > 0.5$, sendo, neste caso, usada em combinação com a equação (3.17) para estimar a espessura equivalente. O valor de x é dado pela equação que segue.

$$x = \frac{2 \pi D}{L} \quad (3.19)$$

Para $x \leq 0.5$ a convergência da equação (3.18) é muito lenta. Neste caso a equação (3.17) é utilizada juntamente com a que segue.

$$F(x) = \frac{\pi^2}{4x} + \ln \frac{x}{2\pi} \quad (3.20)$$

sendo :

d : espessura equivalente [L]

L : espaçamento entre drenos [L]

u : perímetro molhado do dreno [L]

D : distância dos drenos à camada impermeável [L]

Para definir o termo correspondente à drenagem na equação de Richards, a equação de Hooghoudt assume a forma que segue.

$$\eta = \frac{h_s}{q} = \frac{L^2}{8K_{sat}d + 4K_{sat}h_s} \quad (3.21)$$

A variável η tem dimensão de tempo, sendo interpretada como uma resistência que o meio solo-sistema de drenagem oferece para o fluxo da água aos drenos. Como h_s é um valor tomado no início do Δt , e portanto conhecido, a equação anterior permite o cálculo de η e de q . A lâmina drenada é incorporada à equação de Richards através do termo $D_r = 1/\eta$. Este termo, com dimensão $[T^{-1}]$, faz parte do somatório representado por $W(h)$ nesta equação. A parcela de D_r que é extraída de cada compartimento ($D_r(z)$) é proporcional à relação entre as transmissividades do compartimento em questão e de toda a zona saturada.

A drenagem superficial é admitida instantânea, ou seja, toda a lâmina que excede o armazenamento máximo possível é instantaneamente drenada. Durante os períodos de irrigação, este limite é uma função do manejo adotado. Nas datas especificadas para que ocorra drenagem, também se admite que toda a lâmina superficial ainda armazenada na área irrigada é instantaneamente drenada, assumindo-se a partir daí um novo valor a partir do qual tem-se escoamento superficial. Arbitrariamente, adotou-se como armazenamento máximo em todos os períodos sem cultura uma lâmina igual a 1mm. O procedimento adotado permite simulações contínuas em períodos com e sem irrigação. Os demais parâmetros dessa rotina são apresentados quando do detalhamento de cada simulação.

3.4.6 – Fluxo preferencial – Drenos livres

A presença de drenos livres é considerada em algumas simulações no período de preparo do solo. No modelo, tem-se a opção de supor a existência de caminhos preferenciais que decorrem do fenômeno de contração dos solos argilosos. Para simular a presença de drenos livres, admite-se que, quando da sua instalação, se crie no perfil uma situação análoga à que decorre da contração, e ainda que o fissuramento conecte estes drenos com a superfície. A figura abaixo mostra o procedimento para instalação de drenos livres e sua consequência no perfil do solo.

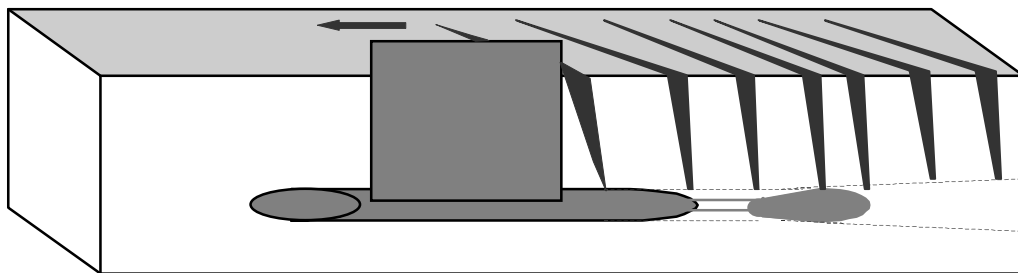


Figura 3.3 – Implantação de drenos livres com subsolador do tipo torpedo

As figuras e equações que seguem ilustram e definem a metodologia empregada nas simulações destas situações.

As características do solo que estabelecem sua relação com a formação de caminhos preferenciais (fissuras) são os índices de vazios e de umidade, definidos a seguir.

$$v = \frac{V_a}{V_s} \quad (3.22)$$

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_s} \quad (3.23)$$

sendo :

v : índice de umidade [$L^3 \cdot L^{-3}$]

ε : índice de vazios [$L^3 \cdot L^{-3}$]

V_a : volume de água [L^3]

V_s : volume da parte sólida [L^3]

V_p : volume de poros [L^3]

Na figura que segue, ilustram-se as diferentes fases da relação entre estes dois índices assumidas pelo modelo.

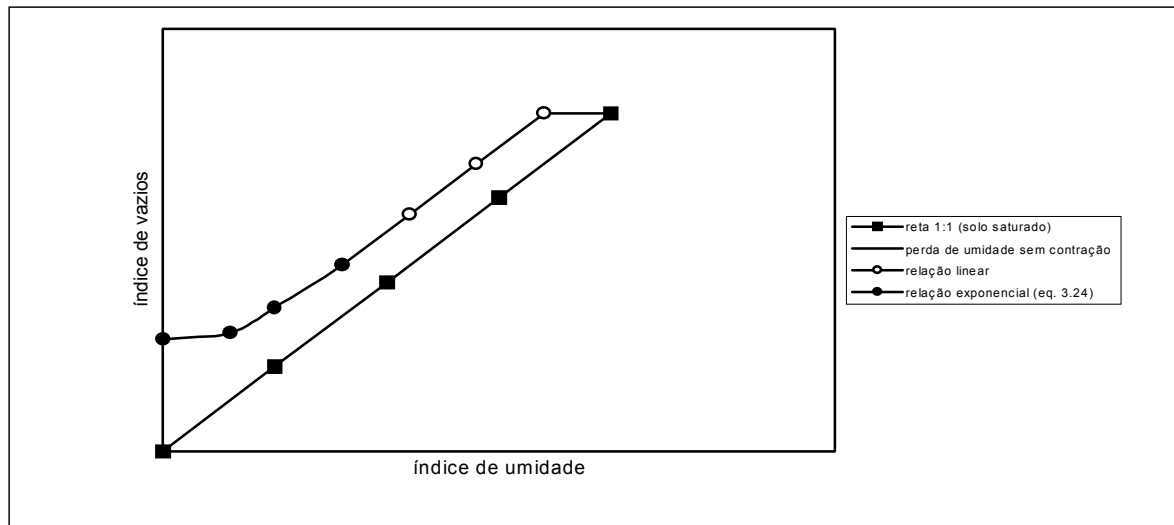


Figura 3.4 – Relação entre os índices v e ε

A reta de 45^0 que parte da origem representa uma condição de solo saturado, na qual $v = \varepsilon$. No trecho em que a função é representada por uma reta horizontal (ε mantém-se constante), admite-se que o decréscimo de umidade não é acompanhado por um decréscimo na porosidade, ou seja, não ocorre contração. A extensão deste trecho é definida pelo parâmetro v_s . A partir do momento em que o fenômeno de contração tem início, a relação entre v e ε é linear (reta paralela à de 45^0) até que v seja igual ao parâmetro v_1 . Neste trecho a redução do volume de água é acompanhada por uma igual redução no volume de poros, ou seja, paralelamente à contração não há entrada de ar. No trecho seguinte, a relação entre v e ε é exponencial. Neste caso, ocorre entrada de ar, com a perda do volume de água sendo maior do que a correspondente perda do volume de poros. No trecho final desta relação exponencial, tem-se ε praticamente constante e igual ao parâmetro ε_0 , ou seja, a perda de água deixa de produzir contração, ou ainda, torna-se igual ao acréscimo do volume de ar. Esta relação exponencial é definida pela equação que segue.

$$\varepsilon = \alpha_s \exp(-\beta_s v) + \gamma_s v \quad (3.24)$$

Os parâmetros v_1 , v_s e ε_0 são informados como dados de entrada. Tendo em vista a inexistência de informações específicas que viessem a auxiliar na definição dos mesmos, seus valores foram obtidos na literatura (Bronswijk & Evers-Vermeer, 1990). A partir da definição

dos pontos ($\nu = 0, \varepsilon = \varepsilon_0$) e ($\nu = \nu_1, \varepsilon = \nu_1 + \nu_s$) da equação (3.24), são determinados seus parâmetros empíricos adimensionais α_s, β_s e γ_s . Com o auxílio da função que relaciona os índices ν e ε , calcula-se o volume e a área relativa das fissuras em cada compartimento. Incluída no volume das fissuras encontra-se a subsidência, representada por Δz_ν na equação que segue.

$$1 - \frac{\Delta V}{V_t} = \left(1 - \frac{\Delta z_\nu}{z}\right)^r \quad (3.25)$$

sendo :

$\Delta V/V_t$: variação relativa do volume devido a contração [$L^3.L^{-3}$]

$\Delta z_\nu/z$: variação relativa na direção vertical [$L.L^{-1}$]

r : parâmetro [-], quando $r=3$ a contração ocorre de forma isotrópica e tri-dimensional

Os cálculos que definem o volume relativo e a área relativa das fissuras em cada nó (compartimento) seguem as etapas relacionadas a seguir.

- $V_s^* = 1 - \theta_{sat}$; $V_s^* = V_s / V_t$
- $\nu = \theta_i / V_s^*$
- conhecido ν , calcula-se ε (relação linear ou exponencial)
- $V_p^* = \varepsilon V_s^*$; $V_p^* = V_p / V_t$
- $\Delta V / V_t = \theta_{sat} - V_p^*$
- conhecido $\Delta V / V_t$, calcula-se $\Delta z_\nu / z$ pela equação (3.25)
- $V_c = \Delta V / V_t - \Delta z_\nu / z$
- $A_c = V_c / (1 - \Delta z_\nu / z)$

Esta seqüência é repetida para cada nó i , determinando-se assim o volume relativo V_c [$L^3.L^{-3}$] e a área relativa A_c [$L^2.L^{-2}$] das fissuras ao longo de sua profundidade. As fissuras estendem-se ao longo do perfil enquanto $\theta_i < \theta_{crit}$, sendo θ_{crit} um dado de entrada. Com o conhecimento da profundidade z_c atingida pelas fissuras e dos valores de V_c e A_c , tem-se a caracterização geométrica das mesmas. Com isso e sabendo-se o armazenamento (w_c) no início do Δt , estima-se a altura do nível d'água nas fissuras (z_{zc}).

A configuração hipotética da superfície do solo após a passagem do equipamento responsável pela instalação dos drenos, com o conseqüente fissuramento, é ilustrada a seguir.

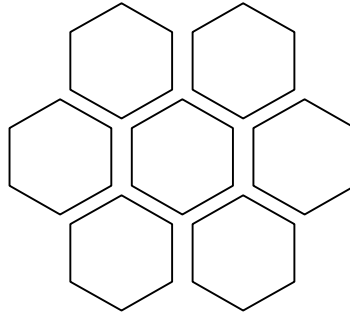


Figura 3.5 – Geometria da superfície do solo com a presença de drenos livres

Com um balanço na superfície, define-se inicialmente o volume de água que aporta às fissuras. Este balanço é representado pelas equações que seguem.

$$I_m = A_m \cdot P \quad e \quad I_c = A_c \cdot P \quad ; \quad P < I_{\max} \quad (3.26)$$

$$I_m = A_m \cdot I_{\max} \quad e \quad I_c = A_m (P - I_{\max}) + A_c \cdot P \quad ; \quad P \geq I_{\max} \quad (3.27)$$

sendo :

I_m : intensidade da infiltração para a matriz do solo [L/T]

I_c : intensidade da infiltração para as fissuras [L/T]

P : intensidade da precipitação [L/T]

A_m : área relativa da matriz do solo [-]

A_c : área relativa das fissuras na superfície [-]

I_{\max} : capacidade de infiltração do solo (equação 3.6) [L/T]

A área disponível para o fluxo do interior das fissuras para um dado compartimento da matriz do solo é uma função do perímetro do polígono e da altura deste compartimento. A relação desta área com a área superficial é definida pela equação que segue.

$$A_{ri} = \frac{4\Delta z_i}{d_p} \quad (3.28)$$

sendo :

A_{ri} : relação entre a área lateral do compartimento que contém o nó i e a área superficial do polígono [$L^2 \cdot L^{-2}$]

Δz_i : altura do compartimento que contém o nó i [L]

d_p : diâmetro da circunferência que circunscribe o polígono [L]

O fluxo que aporta ao nó i é derivado diretamente da equação de Darcy, admitindo-se que a pressão na matriz do solo (polígono) tem uma distribuição simétrica e variação linear na horizontal. Admitindo-se também que o valor de h_i calculado pelo modelo representa uma média dentro deste intervalo de variação, tem-se :

$$q_{ci} = -4K(h_i) \frac{h_i - h_{ci}}{d_p} \quad (3.29)$$

sendo :

q_{ci} : fluxo das fissuras para o nó i [L/T]

$K(h_i)$: condutividade hidráulica função da carga de pressão no nó i [L/T]

h_i : carga de pressão no nó i [L]

h_{ci} : carga de pressão no plano do nó i junto à parede da fissura [L]

d_p : diâmetro da circunferência que circunscribe o polígono [L]

O fluxo total, que ocorre em todo o comprimento $z_c - z_{zc}$, para a matriz do solo é dado por :

$$q_{ct} = \sum_{i=1}^n (q_{ci} A_{ri}) \quad (3.30)$$

sendo :

q_{ct} : fluxo total das fissuras para a matriz do solo [L/T]

n : número de nós compreendidos entre z_c e z_{zc}

Esta transferência de água das fissuras para a matriz do solo é considerada de forma análoga aos termos que correspondem à extração radicular e ao fluxo aos drenos, ou seja, incorporando-se à equação de Richards um outro termo com dimensão [1/T] definido a seguir.

$$q_{cm} = \frac{q_{ci}}{\Delta z_i} \quad (3.31)$$

A outra saída d'água das fissuras dá-se diretamente para os drenos livres, situados na sua extremidade inferior. Esta saída é quantificada pela equação que segue.

$$q_{cd} = \frac{w_c}{f_d} \quad (3.32)$$

sendo :

q_{cd} : fluxo aos drenos pelas fissuras [L/T]

w_c : armazenamento nas fissuras no início do Δt [L]

f_d : parâmetro empírico [T]

Interpreta-se o parâmetro f_d como o tempo de residência da água no interior das fissuras. Na figura que segue, ilustram-se as principais variáveis anteriormente citadas.

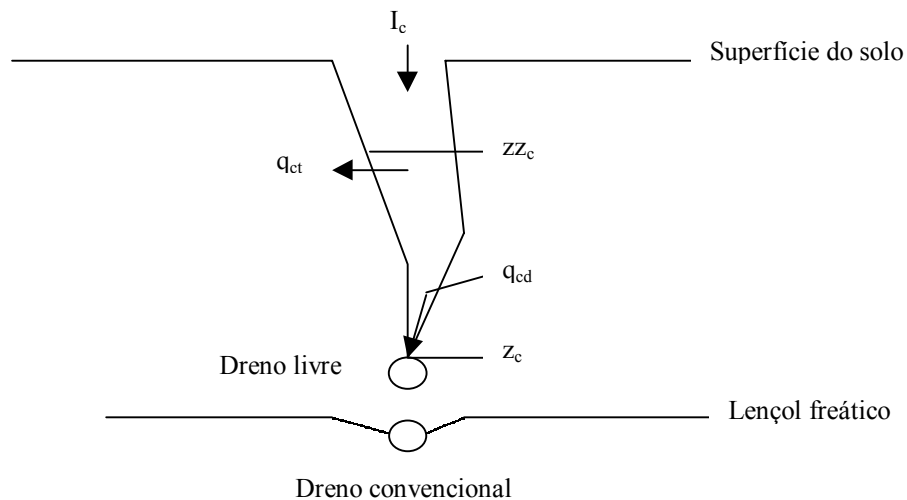


Figura 3.6 – Presença de drenos livres associados ao conceito de fluxo preferencial

O armazenamento nas fissuras ao final de cada Δt é calculado pela equação que segue :

$$w_c^{j+1} = w_c^j + (I_c - q_{ct} - q_{cd})\Delta t \quad (3.33)$$

sendo :

w_c^{j+1} : armazenamento no final do Δt [L]

w_c^j : armazenamento no início do Δt (nulo no 1^o Δt) [L]

De uma forma sintética, a hipótese feita nessa etapa da metodologia é que a operação ilustrada na figura (3.3) resulte em situações semelhantes às ilustradas nas figuras (3.5) e (3.6).

O modelo, em sua versão original, não prioriza o fluxo das fissuras para a matriz em relação ao fluxo das fissuras para os drenos e vice-versa, ou seja, ao final de cada intervalo de cálculo são apenas verificados o armazenamento, de tal forma que seu valor não seja negativo, e o balanço de massa. A distribuição do volume infiltrado depende unicamente dos parâmetros adotados nos diferentes processos que regulam a saída da água das fissuras. Esta situação foi alterada na versão SWAP_INU, com o objetivo de melhor reproduzir as condições que verificam-se em áreas com drenos livres. Assim o modelo passa a ter uma nova opção, na qual a variável q_{cd} é priorizada. No limite, pode-se fazer $q_{cm} = 0$, ou seja, transferir-se toda a lâmina infiltrada diretamente para o sistema de drenagem. Esta é uma hipótese aceitável na medida em que durante o avanço da frente no interior das fissuras ocorrem velocidades altas, o que faz com que a área de contato com as paredes laterais seja reduzida. Como consequência, a transferência de água para a matriz torna-se desprezível (Booltink, 1993, apud Hendriks et al, 1999).

Todos os parâmetros de entrada relacionados a este tópico, e ainda não definidos quanto aos valores adotados, também são apresentados quando da caracterização das simulações e juntamente com seus resultados.

3.4.7 – Equação de Richards – versão final utilizada no modelo SWAP_INU

O termo $W(h)$, já referido quando da apresentação da equação de Richards, engloba as variáveis $S(z)$, $D_r(z)$ e $q_{cm}(z)$. A variável S existe sempre que a simulação ocorre com a presença de cultura. As variáveis D_r e q_{cm} existem nas simulações em que se indica a existência de drenos subsuperficiais paralelos e de drenos livres, respectivamente. A equação de Richards, em sua versão final, tem então a forma que segue.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]}{\partial z} - [S + D_r - q_{cm}] \quad (3.34)$$

O termo do lado esquerdo da equação representa a variação do armazenamento. O primeiro termo do lado direito representa esta variação por meio de um balanço interno, enquanto as variáveis que correspondem ao segundo termo atuam neste balanço como fontes

(q_{cm}) e sumidouros (S e D_r). O embasamento físico da equação de Richards dá-se em uma escala na qual o solo pode ser considerado um sistema contínuo, formado por sólidos, ar e água. Esta condição permite a aplicação do modelo nas diferentes situações, reais ou hipotéticas, que compõem os cenários a serem simulados neste trabalho.

3.4.8 – Síntese das adaptações feitas no modelo original (SWAP)

A seguir são sintetizadas as principais alterações introduzidas no modelo SWAP e que originaram a versão denominada SWAP_INU.

- Os modelos que simulam a relação desenvolvimento da planta - disponibilidade de água reduzem a transpiração sempre que a umidade junto às raízes é maior ou menor que determinadas referências. No caso específico do arroz, durante o período de inundação, a transpiração é sempre potencial. Essa situação é considerada nesta versão.
- A simulação contínua em áreas com sistema de drenagem, e nas quais ocorre irrigação por inundação em determinados períodos, exige que as condições de drenagem possam ser alteradas em datas previamente especificadas. O sistema artificial só deve operar fora do período de irrigação. Essa particularidade é contemplada nesta versão.
- Situação análoga à anterior ocorre com as condições a partir das quais tem-se escoamento superficial. O armazenamento máximo na superfície também deve ser diferente dentro e fora do período de irrigação. Isso é possível nesta versão a partir da definição das respectivas datas.
- A possibilidade de priorizar a transferência direta da água do interior dos macroporos para o sistema de drenagem teoricamente melhora a qualidade da simulação em áreas com drenos livres.

Entre as alterações introduzidas no código original deve-se ressaltar a maior aproximação da nova versão com as condições de campo quando simulam-se cenários com drenos livres, e a possibilidade de simulações contínuas em áreas que alternam períodos nos quais a drenagem é requerida (preparo do solo e colheita) ou não (irrigação por inundação). Essa última, que diferencia a versão denominada SWAP_INU dos modelos atualmente disponíveis, é ilustrada na figura que segue.



Figura 3.7 – Simulação contínua em períodos com e sem drenagem

3.5 – O modelo IRRIGA – um exemplo de modelo simplificado

O modelo IRRIGA (Fietz, 1986, 1987, Beltrame & Louzada, 1991) estima o consumo d'água na irrigação por inundação por intermédio de um balanço de volume. A equação que representa este balanço e a forma como cada um dos seus termos é calculado são apresentadas a seguir.

$$I = P_p + F_l + S + L + ET_r \quad (3.35)$$

sendo :

I : irrigação [L]

ET_r : evapotranspiração real [L]

S : saturação do perfil [L]

L : lâmina superficial [L]

P_p : percolação profunda [L]

F_l : fluxo lateral [L]

$$S = (P - \theta_i) * prof \quad (3.36)$$

sendo :

P : porosidade [-]

θ_i : umidade volumétrica imediatamente anterior ao início da irrigação [-]

prof = profundidade do sistema radicular ou espessura do horizonte A (planossolos) [L]

$$ET_r = \sum_{i=1}^n kc_i * ET_{ref} * p_i \quad (3.37)$$

sendo :

ET_{ref} : evapotranspiração de referência [L/T]

kc_i : coeficiente da cultura do arroz no subperíodo i [-]

p_i : subperíodo i dentro do período de irrigação [T]

n : número de subperíodos [-]

$$F_i = ksat * \left[\frac{L}{2B} * pfl + \frac{L}{B} * (P_{irr} - pfl) \right] \quad (3.38)$$

sendo :

ksat : condutividade hidráulica saturada [L/T]

B : largura da taipa que circunda a área irrigada [L]

pfl : período de formação da lâmina superficial [T]

P_{irr} : período total de irrigação [T]

$$P_p = ksat * \left[\frac{L/2 + L' - h}{L'} * pfl + \frac{L + L' - h}{L'} * (P_{irr} - pfl) \right] \quad (3.39)$$

sendo :

L' : distância entre a superfície do solo e um determinado ponto do perfil [L]

h : potencial de pressão a uma distância L' da superfície [L]

O modelo não considera a precipitação e eventuais perdas na condução entre o ponto de captação e a entrada da área irrigada. Tendo a equação (3.35) como base, mais as definições prévias da lâmina superficial, do período de formação desta lâmina e do período de

irrigação, o modelo estima o volume que deve ser suprido pela irrigação. Seus parâmetros específicos são apresentados ao final desse capítulo, quando do detalhamento dos cenários simulados.

3.6 – Caracterização das áreas experimentais, parâmetros dos solos e da cultura

3.6.1 –Área experimental – irrigação por inundação

Os experimentos para quantificação do consumo d'água na irrigação por inundação da cultura do arroz vêm sendo conduzidos na Estação Experimental do Arroz (EEA) do IRGA, município de Cachoeirinha, desde a safra 96/97. Na figura que segue, tem-se uma representação em planta da área do experimento de irrigação, onde se pode ver o esquema adotado para distribuição da água. A estrutura instalada permitiu a quantificação do consumo de forma independente nas áreas com manejos distintos : preparo convencional, plantio direto e pré-germinado, todas com sistematização da superfície (nível zero). A condução desde o ponto de captação até a entrada da área experimental é feita através de uma tubulação, não havendo, portanto, perdas. Como os consumos medidos ao longo destes anos de pesquisa são muito semelhantes, optou-se por utilizar neste estudo somente os valores que correspondem às parcelas em que se pratica o preparo convencional, já que este ainda é predominante entre os orizicultores do Rio Grande do Sul. As informações gerais dos experimentos em cada safra, com ênfase para a caracterização do manejo da irrigação, constam no Anexo A4. Em todas as safras o manejo se caracterizou pela aplicação de uma vazão inicial para formação da lâmina (fase 1) e de uma segunda vazão com o objetivo de manter a lâmina atingida ao final da fase 1 (fase 2). Quando da ocorrência de precipitações, suspendia-se a irrigação, retomando-a a partir do momento em que a lâmina superficial retornava ao valor obtido ao final da fase 1. A estrutura dos experimentos permitiu o aproveitamento parcial da precipitação (até 10 mm). As perdas por escoamento superficial, quando aconteceram, sempre tiveram como causa as precipitações, ou seja, em nenhum momento decorreram da vazão de irrigação correspondente à fase 2. As vazões, aplicadas de forma independente em cada parcela, foram medidas volumetricamente com a utilização de hidrômetros, o que permitiu o cálculo das lâminas diárias de irrigação. Em todas as safras só houve drenagem após a suspensão da irrigação. As figuras que seguem ilustram a área experimental e o manejo anteriormente descrito.

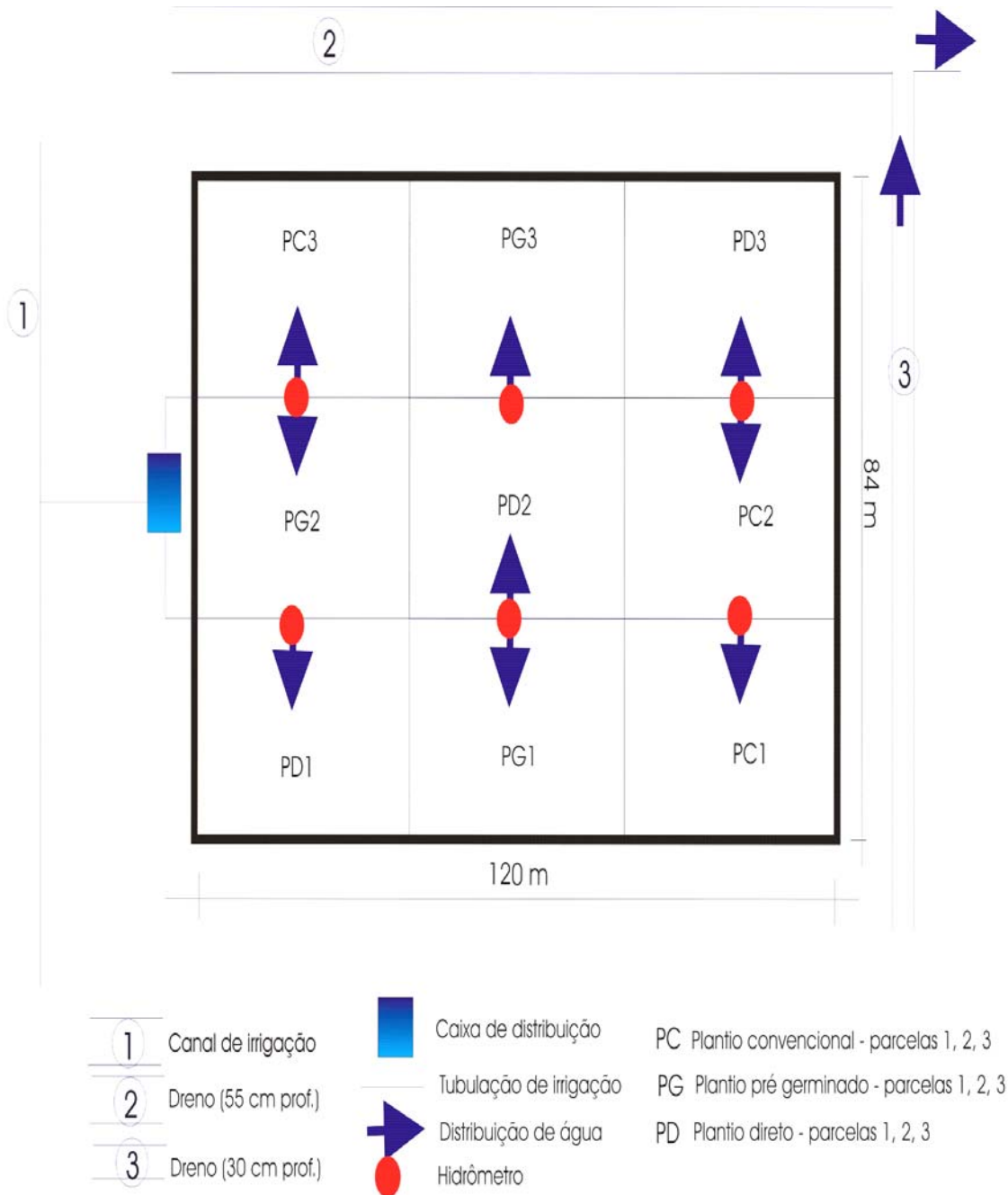


Figura 3.8 - Representação esquemática do experimento de irrigação

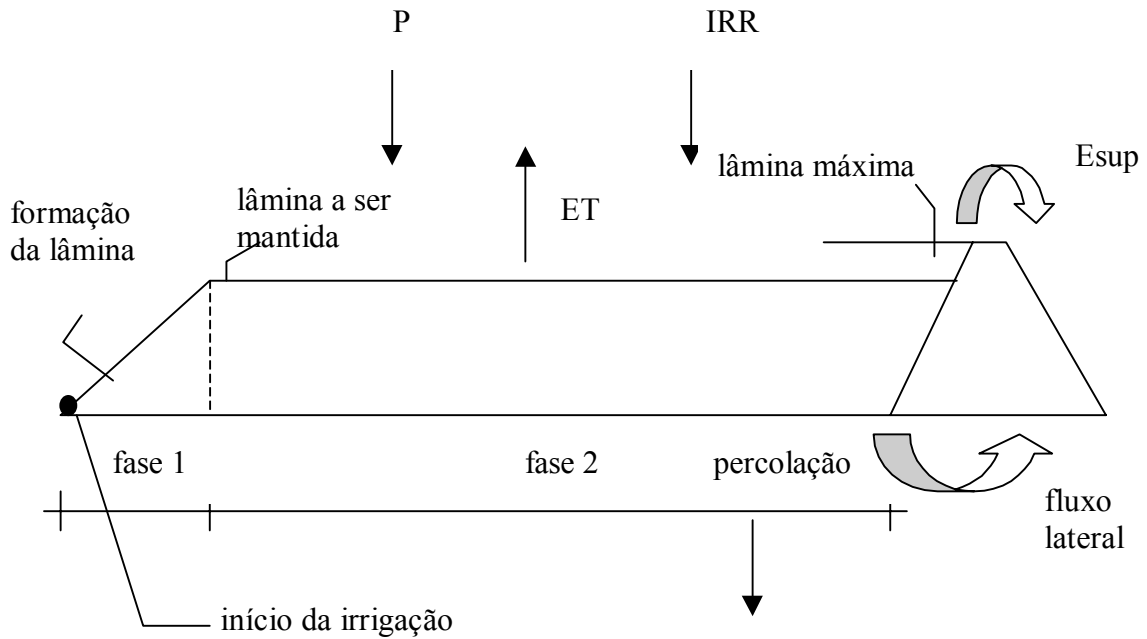


Figura 3.9 – Variáveis do balanço e representação do manejo

3.6.2 – Área experimental – drenagem

A área experimental com drenos subsuperficiais situa-se no mesmo complexo da Estação Experimental do Arroz (EEA) do IRGA. Os dados disponíveis foram observados em alguns eventos isolados, e dizem respeito à posição do lençol freático no ponto médio entre dois drenos. As medições foram feitas com a utilização de sonda (Louzada, 1985). Estas informações se encontram no Anexo A5. Nas figuras (3.10a) e (3.10b), apresentam-se, em planta e em corte, as principais características dessa área.

3.6.3 – Caracterização dos solos

Os solos que ocorrem na Estação Experimental do Arroz (EEA) do IRGA pertencem à Unidade de Mapeamento Vacacaí (Sachet, 1977, Freitas, 1978, Gondim, 1980), cuja classificação taxonômica é Planossolo Hidromórfico eutrófico arênico (Embrapa, 1999). A descrição de seu perfil modal proposta por Brasil (1973, 1988) é apresentada no Anexo A6. A caracterização da área irrigada foi feita paralelamente aos experimentos de medição do consumo d'água, enquanto a caracterização da área drenada deve-se a Beltrame (1984), Louzada (1985) e Tomasella (1992). O acompanhamento de algumas características físicas do solo ao longo dos últimos anos mostrou uma variação que pode ser atribuída à própria metodologia empregada para determiná-las.

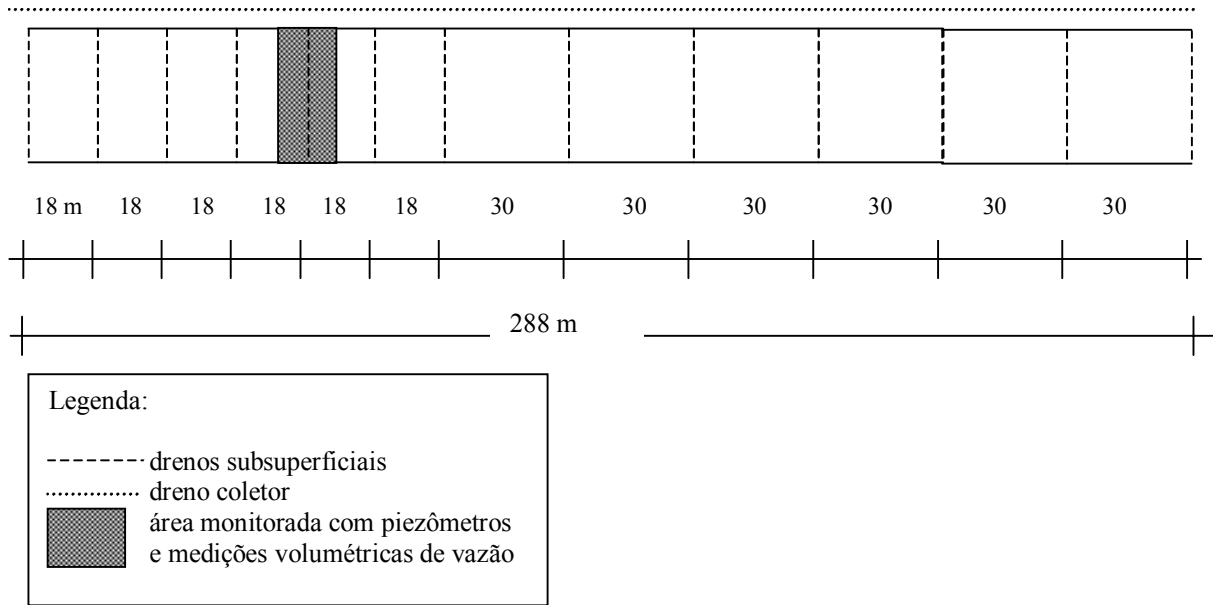


Figura 3.10a – Planta baixa da área experimental de drenagem

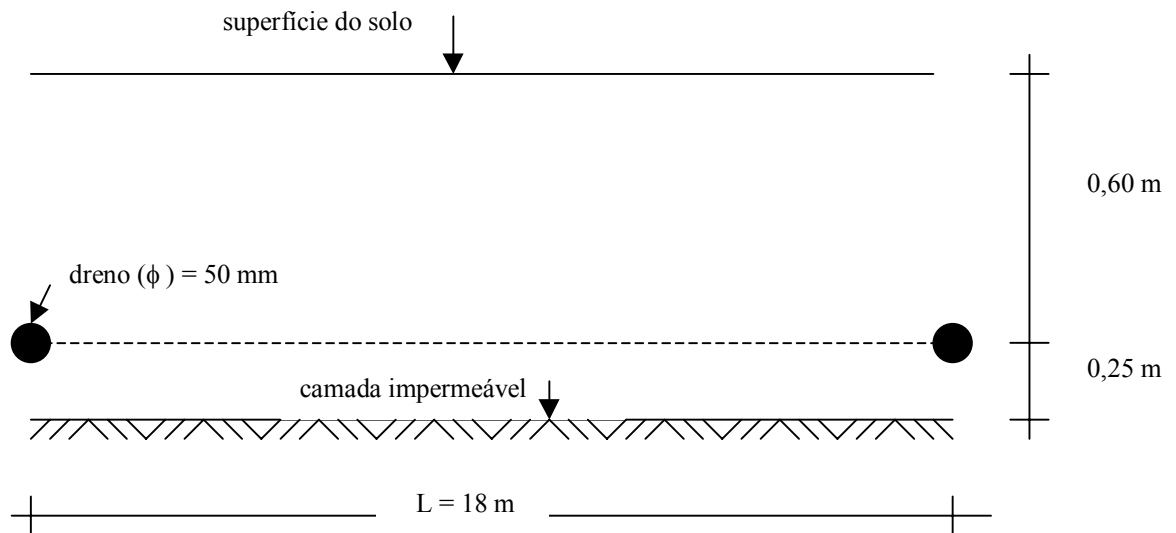


Figura 3.10b – Corte transversal junto à área monitorada

Na tabela que segue, são listados os parâmetros e identificados os métodos empregados na estimativa de cada um deles. Seus valores são apresentados no Anexo A2.

Tabela 3.1 – Parâmetros e métodos de determinação

Parâmetro	Método		
	Campo	Laboratório	Analítico
Porosidade (horizonte A)		$1 - (d_s / d_p)^1$	
Curva de retenção (horizonte A)		Câmara de pressão (dessorção)	
Condutividade hidráulica saturada (horizonte A)	Poço direto		
Condutividade hidráulica saturada (horizonte B) ²		Permeâmetro	
Espessura (horizonte A)	Tradagem		
Espessura (horizonte B) ²	Tradagem		
Parâmetros da equação de Genuchten			RETC ³

¹ d_s = densidade do solo, d_p = densidade de partículas

² somente nas áreas experimentais

³ Genuchten et al (1991)

3.6.4 – Parâmetros da cultura

As informações exigidas pelo modelo SWAP_INU como parâmetros de entrada são a densidade do sistema radicular em função de sua profundidade e o índice de área foliar ao longo dos períodos de simulação com cultura. A necessidade de informações desta natureza trata-se aparentemente de uma contradição, já que o crescimento da cultura é dependente das condições que lhe são oferecidas durante seu ciclo (disponibilidades de água, de nutrientes, etc.). Como os experimentos foram conduzidos otimizando-se todas estas variáveis, justifica-se a expectativa de que os parâmetros tenham valores muito próximos dos apresentados na literatura, já que estes foram obtidos nestas condições. Assim sendo, os valores utilizados foram definidos considerando-se os trabalhos de Paranhos (1989), Lopes (1991), Peña et al (1995) e também as informações da Equipe de Melhoramento da EEA/IRGA. Além desses parâmetros, adotou-se para o coeficiente de cultura, nos diferentes subperíodos dentro dos períodos de simulação, os valores apresentados por Marcolin & Macedo (2001a) e Pereira (1989). Este parâmetro também é utilizado pelo modelo IRRIGA. Todos estes dados são apresentados a seguir.

Tabela 3.2 – Parâmetros da cultura utilizados nas simulações

Parâmetros	Período de irrigação ¹			Após a drenagem ²
	1 ^o terço	2 ^o terço	3 ^o terço	-
Coefficiente de cultura – k_c (-)	2,5	3,6	2,4	1,0
Profundidade das raízes (cm)	25	25	25	25
Índice de área foliar (m^2/m^2)	1,5	2,5	2,0	2,0

¹ valor de referência medido em Evaporímetro de Piche (Marcolin & Macedo, 2001a)

² valor de referência medido em Tanque Classe A (Pereira, 1989)

O sistema radicular do arroz apresenta um crescimento condicionado à forma como é cultivado, ou seja, aprofunda-se rapidamente atingindo seu valor máximo antes da irrigação, mantendo-se praticamente constante após o seu início (Lopes, 1991). Por isso se adotou uma única profundidade ao longo de todos os períodos das simulações com cultura.

Tabela 3.3 – Relação entre a profundidade relativa e a densidade relativa do sistema radicular

Profundidade relativa ¹ (%)	Densidade relativa ² (%)
0	100
20	25
100	0

¹ relação entre a profundidade em um ponto e a profundidade total

² relação entre a densidade em um ponto e a maior densidade

Entre as profundidades relativas de 0 % e 20 % e de 20 % e 100 % admitiu-se que a densidade relativa decresce de forma linear. Os valores desta tabela sugerem que o sistema radicular apresenta forma triangular.

3.7 – Dados climáticos

Os dados climáticos obtidos na estação meteorológica da EEA/IRGA são apresentados no Anexo A3. As séries correspondem aos valores diários de evaporação, medidos em Evaporímetro Piche e Tanque Classe A, e de precipitação.

3.8 – Síntese das simulações e suas relações com os objetivos

A seguir são identificadas todas as simulações feitas com os modelos SWAP_INU e IRRIGA, cujos resultados são apresentados no próximo capítulo. Cada simulação é justificada por sua contribuição para que determinado(s) objetivo(s) seja(m) atingido(s).

- Simulações 01 à 04 – área experimental de irrigação

O modelo SWAP_INU simulará de forma contínua os meses relacionados às safras 96/97, 97/98, 99/00 e 00/01, incluindo-se os períodos anterior (preparo do solo) e posterior (colheita) à irrigação. Os resultados obtidos nos dias com irrigação servirão para validá-lo quando aplicado à irrigação por inundação.

- Simulação 05 – área experimental de drenagem

O modelo SWAP_INU simulará o período dentro do qual dispõe-se de dados observados na área experimental de drenagem. Os resultados obtidos nos dias coincidentes com as datas dos dados servirão para validá-lo quando aplicado à drenagem subsuperficial.

- Simulações 06 à 09

O modelo SWAP_INU simulará os mesmos períodos das simulações 01 à 04. Nessas a rotina de drenagem do modelo será alimentada com dados que farão prevalecer as condições que ocorrem nas áreas cultivadas com arroz irrigado, e que são muito próximas das que se verificam na área experimental de irrigação. Nas simulações agora referidas as condições de drenagem serão alteradas, pressupondo-se a presença de drenos subsuperficiais. O confronto dos resultados (simulações 01 à 04 e 06 à 09), nos períodos de preparo do solo e colheita, permitirão uma avaliação da resposta dos sistemas artificiais de drenagem. Além disso, o modelo poderá ser testado na simulação contínua de períodos com diferentes condições de drenagem.

- Simulações 10 à 13

O modelo SWAP_INU simulará os mesmos períodos de preparo do solo (mês de setembro) correspondentes às simulações 01 à 04 e 06 à 09. Isso será feito acionando-se a rotina de fluxo preferencial adaptada. Assim, será possível que sejam confrontadas as condições naturais de drenagem (simulações 01 à 04), com a presença de drenos subsuperficiais (simulações 06 à 09) e com a presença de drenos livres.

- Simulações com os modelos SWAP_INU e IRRIGA

Com base nas características do solo da área experimental de irrigação os modelos simularão cenários hipotéticos em períodos com irrigação, o que possibilitará, tendo-se o modelo SWAP_INU como referência, a identificação das condições nas quais o modelo IRRIGA é satisfatório. Esses cenários hipotéticos deverão contemplar duas situações, uma primeira apresentando horizonte B superficial e impermeável (CEN 01), e uma segunda correspondendo a um perfil homogêneo com lençol freático profundo (CEN 02). A sistemática das simulações com os dois modelos prevê inicialmente o cálculo do consumo total com o modelo SWAP_INU, em um período de precipitação nula. Serão prescritas lâminas diárias de irrigação que conduzam a uma lâmina superficial aproximadamente constante após atingido seu valor máximo, e escoamento superficial tão próximo de zero quanto possível. Posteriormente, para o mesmo cenário, será calculado o consumo total com o modelo IRRIGA. O confronto dos resultados será feito pela equação abaixo.

$$Err = \frac{|I - S|}{S} \quad (3.40)$$

sendo :

Err : erro relativo

I: valor calculado com o modelo IRRIGA (consumo total)

S: valor calculado com o modelo SWAP_INU (consumo total)

No caso das simulações 01 à 05, a aderência entre valores observados e calculados será verificada com as equações que seguem.

$$Ef_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{O})^2} \quad (3.41)$$

$$Ef_2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2 / n]^{1/2}}{\bar{O}} \quad (3.42)$$

sendo :

o_i : valor observado

p_i : valor calculado

\bar{O} : média dos valores observados

n : número de valores

Os valores observados e calculados correspondem à lâmina superficial diária (caso da irrigação) e posição do lençol freático (caso da drenagem). Na realidade, no caso da irrigação, os valores realmente medidos são as lâminas de irrigação aplicadas, e não as lâminas superficiais. No entanto, pode-se observar que as lâminas superficiais mantiveram-se constantes após atingido o seu valor pré-estabelecido, exceção ao comportamento decorrente da ocorrência de precipitações. Nesses dias a lâmina elevava-se, retornando no(s) dia(s) subsequente(s) à posição original e mantinha-se constante até a ocorrência de nova precipitação. Assim sendo, será possível comparar o valor da lâmina superficial quando não influenciada por precipitações, com os valores calculados nos mesmos dias. Outra variável que também será uma referência para a validação do modelo é o escoamento superficial. As observações mostraram um valor nulo para essa variável nos períodos sem precipitação, o que poderá ser confrontado com os valores calculados pelo modelo nos mesmos dias.

O parâmetro Ef_1 , denominado eficiência do modelo, tem seu valor ótimo igual a 1, e indica se o modelo descreve os dados melhor do que a média das observações. O parâmetro Ef_2 tem seu valor ótimo igual a zero, e mostra a dispersão entorno da média das observações (Janssen & Heuberger, 1995).

3.9 – Caracterização das simulações : parâmetros e demais informações

Nesse item são relacionados os parâmetros e demais informações necessárias às simulações . Quando for o caso, seus valores numéricos são apresentados ou indicado o local do texto onde pode-se encontrá-los. As datas que caracterizam cada simulação (início e fim da irrigação, drenagem, colheita, ...) são apresentadas juntamente com os resultados.

- Rotina relativa à solução numérica da equação de Richards

Essa rotina é o *cérebro* do modelo SWAP_INU, sendo, portanto, acionada em todas as simulações que o envolvem. Na tabela que segue constam todas as informações a ela relacionadas.

Tabela 3.4 – Parâmetros e informações utilizados na rotina solo-água da equação de Richards

Parâmetro/informação	Valor/localização no texto
Δt das simulações (dia)	10^{-5} (mínimo) e 0,2 (máximo)
Critério de convergência ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) ou (cm)	0,001
Condições iniciais	Junto aos resultados de cada simulação
Condição de contorno na base do perfil	Junto aos resultados de cada simulação
Condição de contorno na superfície	Item 3.4.1
Discretização dos perfis de solo na vertical	Junto aos resultados de cada simulação
Caracterização do solo : área de irrigação	Anexo A2
Caracterização do solo : área de drenagem	Anexo A2
Caracterização do solo : cenários hipotéticos	Junto aos resultados de cada simulação
Parâmetros das relações $\theta = \theta(h)$ e $K = K(\theta)$	Anexo A2
Dados de precipitação e evaporação	Anexo A3

- Rotina relativa à histerese

A parametrização das relações $\theta = \theta(h)$ e $K = K(\theta)$, conforme já citado anteriormente, consta do Anexo A2. O critério para reversão adotado em todas as simulações é de $\Delta h \geq 0,2$ cm, ou seja, o modelo só considera que há uma troca de ciclo quando a diferença, para mais ou para menos, entre os valores calculados de h for no mínimo igual a 0,2 cm.

- Rotina para cálculo da evaporação e da transpiração

Os valores medidos de evaporação (Tanque Classe A e Piche), que constituem a referência para estimativa dos valores reais, encontram-se no Anexo A3. Os demais parâmetros são definidos a seguir.

Tabela 3.5 – Parâmetros relacionados à evaporação e transpiração

Parâmetro	Valor/localização no texto
Relação solo sem cobertura e Tanque	0,50 (item 3.4.3)
β (equação 3.14)	0,66 (item 3.4.3)
H_{lim} (cm)	1000

O parâmetro H_{lim} limita a transpiração, ou seja, para valores de potencial de pressão (h) iguais ou maiores do que H_{lim} a transpiração real é menor do que a potencial. O valor adotado garante durante o período de irrigação $T_{ac} = T_p$, o que é compatível com a irrigação por inundação da cultura do arroz.

- Rotina que considera a presença da cultura

Os parâmetros específicos que caracterizam a cultura do arroz irrigado são apresentados nas tabelas (3.2) e (3.3).

- Rotina de irrigação

O manejo adotado em cada experimento, e que serve como base para simulação dos cenários com irrigação, está descrito de forma conceitual juntamente com a caracterização da área experimental (item 3.6.1). Os valores associados a esse manejo em cada safra constam do Anexo A4.

- Rotina de drenagem (drenos convencionais)

Os parâmetros que caracterizam os perfis do solo e que aparecem, direta ou indiretamente, nas equações de drenagem (condutividade hidráulica saturada e profundidade da camada impermeável) constam do Anexo A2. A geometria do sistema de drenagem (espaçamento, diâmetro e profundidade de instalação dos drenos) instalado na área experimental é detalhada nas figuras (3.10a) e 3.10b). A geometria dos sistemas hipotéticos (drenos subsuperficiais e condições naturais de drenagem) é caracterizada na tabela que segue.

Tabela 3.6 – Características dos sistemas de drenagem

	Tipo de drenagem	
	Subsuperficial (drenos enterrados)	Drenagem natural (valas abertas)
Espaçamento (m)	5, 10 e 20	50 e 100
Profundidade (cm)	Junto à camada impermeável	25
Diâmetro (mm)	65	-
Perímetro molhado (cm)	-	100

Conforme já referido anteriormente, a avaliação das diferentes condições de drenagem será feita com base na contabilização, dentro de cada período simulado, do número de dias úteis para atividades de mecanização (preparo e colheita). Os critérios adotados para que um determinado dia seja considerado apto são apresentados a seguir.

Tabela 3.7 – Critérios para mecanização

	Profundidade (cm)	Pot. de pressão (h) (cm)	Umidade (θ) ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
Wijk & Feddes (1982,1986)	5	$h \text{ pontual} \leq -100$	-
Fernandes et al (2002)	15	-	$\theta \text{ médio} \leq 90\% \theta(h=-100)$

Quanto à drenagem superficial, fora dos períodos de irrigação arbitrou-se como armazenamento máximo na superfície uma lâmina de 1 mm (item 3.4.5). Durante os períodos de irrigação, o armazenamento na superfície é definido pela lâmina máxima contida entre as taipas em cada safra. Os valores dessa lâmina em cada safra são apresentados no Anexo A4.

- Rotina de fluxo preferencial (drenos livres)

Os parâmetros específicos da rotina de fluxo preferencial são definidos na tabela que segue.

Tabela 3.8 – Parâmetros utilizados na rotina de fluxo preferencial

Parâmetro	Valor/localização no texto
v_1 (figura 3.4)	0,97
v_s (figura 3.4)	0,04
ε_0 (figura 3.4)	0,54
r (equação 3.25)	100*
d_p (equação 3.29)	Esses dois parâmetros deixam de interessar a partir das alterações introduzidas na rotina.
f_d (equação 3.32)	
θ_{crit}	θ_{sat}

* valor que prioriza o fraturamento horizontal em relação à subsidência

O parâmetro θ_{crit} define a umidade volumétrica abaixo da qual há a formação de fissuras. Assim definido esse parâmetro está vinculado à proposta original do modelo, na qual

a formação de caminhos preferenciais deve-se à contração do solo. A hipótese agora feita atribui a formação desses caminhos à mecanização (implantação de drenos com subsolador), o que a torna menos dependente da umidade do solo. Fazendo-se $\theta_{crit}=\theta_{sat}$ impõe-se uma condição onde só não há fissuras na zona saturada do perfil.

- Simulações com o modelo IRRIGA

Além dos parâmetros e demais condições comuns com o modelo SWAP_INU, o modelo IRRIGA utiliza parâmetros específicos que são relacionados a seguir.

Tabela 3.9 – Parâmetros específicos do modelo IRRIGA

Parâmetro	Valor/localização no texto
B (cm) - (equação 3.38)	80*
pfl (equações 3.38 e 3.39)	Junto aos resultados de cada simulação

*valor existente na área experimental e adotado nas simulações com o modelo IRRIGA

Da mesma forma que para o modelo SWAP_INU, os parâmetros relacionados aos cenários hipotéticos são apresentados juntamente com os resultados de cada simulação.

4 – Resultados

4.1 – Validação do modelo SWAP_INU : simulações 01 a 05

4.1.1 – Condições iniciais, condições de contorno e discretização dos perfis

A seguir são apresentadas informações referentes às simulações 01 a 05 ainda não definidas anteriormente.

Tabela 4.1 – Discretização dos perfis

Compartimento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Espessura (cm)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	10	10	10	10	10	10

A área experimental de irrigação tem o topo do horizonte B a uma profundidade de 75 cm, o que corresponde ao compartimento 18. O compartimento 19 diz respeito somente à área de drenagem, já que nessa o horizonte B se encontra a 85 cm de profundidade. A pequena espessura dos compartimentos superficiais (1 cm) é uma exigência da solução numérica, tendo em vista as abruptas alterações de umidade que se verificam nessa região do perfil. As variáveis, potencial de pressão e umidade volumétrica, são estimadas no centro de cada compartimento.

Tabela 4.2 – Condições iniciais e de contorno

Simulação	Condições iniciais : profundidade do lençol freático (cm)	Condição de contorno inferior
01	75	fluxo zero
02	75	fluxo zero
03	75	fluxo zero
04	75	fluxo zero
05	85	fluxo zero

A hipótese de “fluxo zero” é inicialmente justificada pela presença de horizonte B “impermeável” nas duas áreas experimentais. As condições iniciais foram estabelecidas com base nas precipitações ocorridas nos 5 dias anteriores ao início de cada simulação. O perfil

vertical de umidade é definido supondo-o em equilíbrio com o lençol freático. Outras informações de interesse são apresentadas a seguir.

Tabela 4.3 – Datas características de cada simulação

Atividade	Data				
	Simulação01	Simulação02	Simulação03	Simulação04	Simulação05
Início da simulação	06/09/96	06/09/97	06/09/99	06/09/00	06/08/83
Início da irrigação	20/12/96	15/12/97	18/12/99	15/12/00	-
Fim da irrigação	04/03/97	14/03/98	13/03/00	07/03/01	-
Drenagem	14/03/97	20/03/98	20/03/00	16/03/01	-
Colheita	24/03/97	25/03/98	26/03/00	22/03/01	-
Fim da simulação	31/03/97	31/03/98	31/03/00	31/03/01	31/10/83

4.1.2 – Simulações com os dados da área experimental de irrigação

Os resultados apresentados a seguir dizem respeito às simulações 01 a 04, e compreendem os subperíodos que se estendem do início ao final da irrigação. As datas desses subperíodos constam na tabela anterior. Em todas essas simulações adotou-se o espaçamento entre drenos igual a 75 m, o que corresponde à média dos valores admitidos como representativos das condições naturais de drenagem (50 e 100 m). O padrão adotado para apresentação desses resultados é o mesmo para todas as simulações, ou seja, inicialmente mostra-se o balanço hídrico gerado pelo modelo e posteriormente o confronto entre valores calculados e observados. Na terceira coluna da tabela que discrimina o balanço são mostrados os percentuais de cada parcela do consumo em relação ao seu total. A variável de referência para validação do modelo é a lâmina superficial, desconsiderando-se os dias em que seu comportamento foi influenciado pela precipitação. Nessas simulações o índice que atesta o desempenho do modelo restringe-se à Ef_2 , já que, sendo constantes os valores observados, Ef_1 não se aplica, já que seu denominador é nulo. Os valores de Ef_2 correspondentes a cada simulação são apresentados juntamente com os gráficos. Ainda dentro do processo de validação, também se verificou a simultaneidade ou não da ocorrência de escoamento superficial com a precipitação. Ao final todos os resultados são comentados.

4.1.2.1 – Simulação 01 – safra 96/97

Tabela 4.4 – Balanço hídrico – simulação 01

Variável	Lâmina (mm)	% do consumo total
Precipitação	290,8	-
Irrigação	550,0	-
Escoamento superficial	147,4	-
Evaporação	29,2	4,2
Transpiração	556,1	80,2
Drenagem	3,4	0,50
Variação do armazenamento	104,7	15,1
Consumo total	693,4	100,0

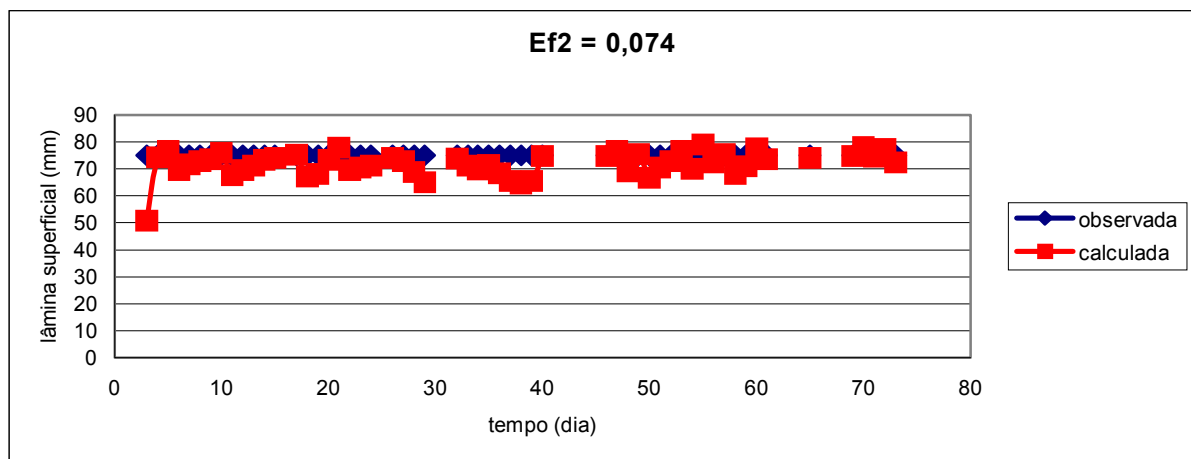


Figura 4.1 – Lâmina superficial – simulação 01 : valores observados e calculados

4.1.2.2 – Simulação 02 – safra 97/98

Tabela 4.5 – Balanço hídrico – simulação 02

Variável	Lâmina (mm)	% do consumo total
Precipitação	738,8	-
Irrigação	430,0	-
Escoamento superficial	543,8	-
Evaporação	41,6	6,7
Transpiração	498,1	79,5
Drenagem	3,8	0,60
Variação do armazenamento	82,2	13,2
Consumo total	627,7	100,0

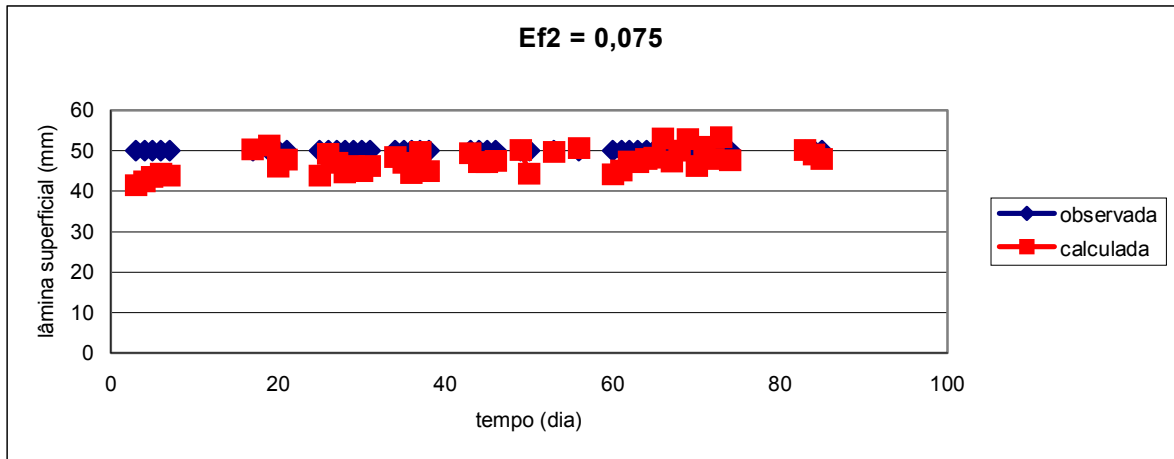


Figura 4.2 – Lâmina superficial – simulação 02 : valores observados e calculados

4.1.2.3 – Simulação 03 – safra 99/00

Tabela 4.6 – Balanço hídrico – simulação 03

Variável	Lâmina (mm)	% do consumo total
Precipitação	211,0	-
Irrigação	654,0	-
Escoamento superficial	99,9	-
Evaporação	44,9	5,9
Transpiração	617,3	80,7
Drenagem	4,0	0,50
Variação do armazenamento	98,9	12,9
Consumo total	765,1	100,0

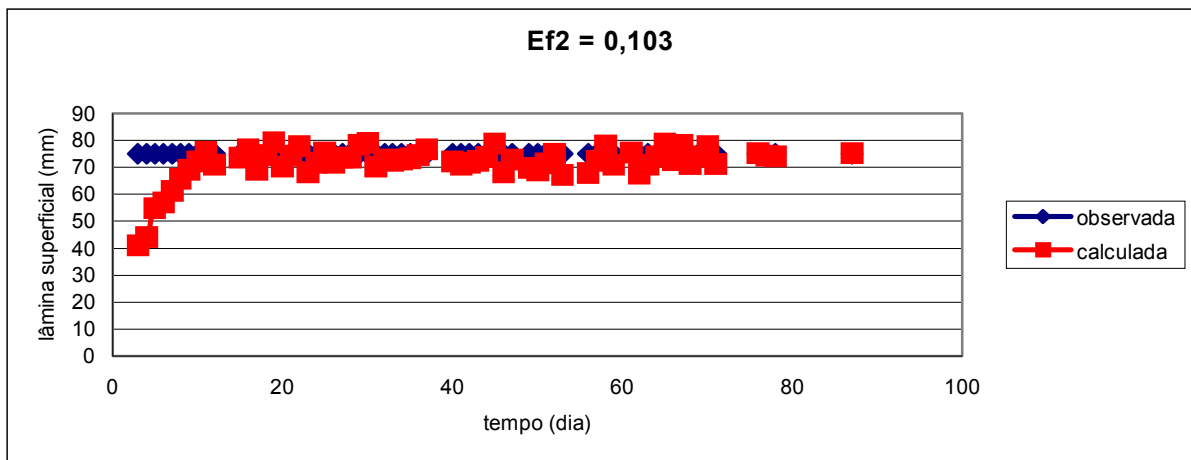


Figura 4.3 – Lâmina superficial – simulação 03 : valores observados e calculados

4.1.2.4 – Simulação 04 – safra 00/01

Tabela 4.7 – Balanço hídrico – simulação 04

Variável	Lâmina (mm)	% do consumo total
Precipitação	411,6	-
Irrigação	470,0	-
Escoamento superficial	217,1	-
Evaporação	39,0	5,9
Transpiração	542,8	81,6
Drenagem	3,8	0,60
Variação do armazenamento	79,4	11,9
Consumo total	665,0	100,0

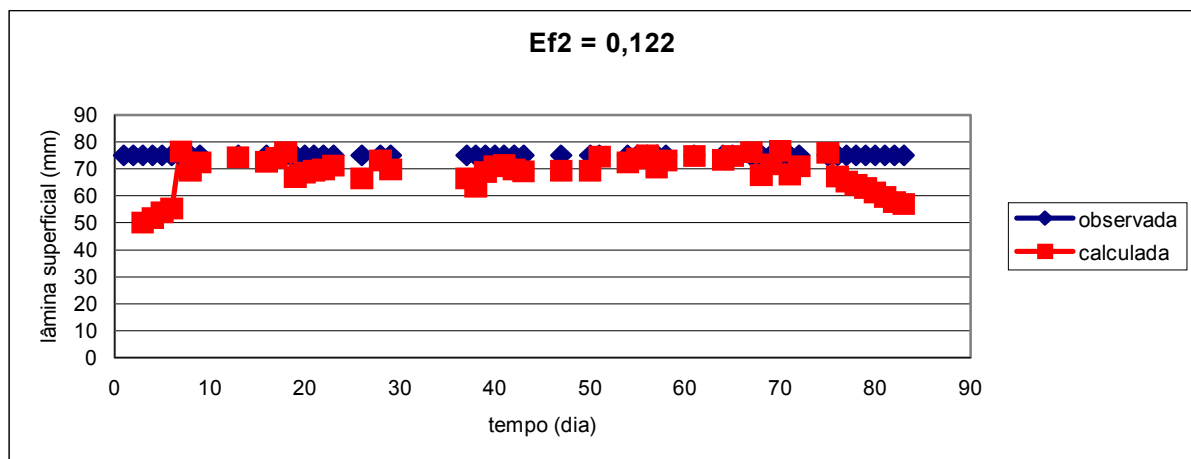


Figura 4.4 – Lâmina superficial – simulação 04 : valores observados e calculados

4.1.2.5 – Simulações 01 à 04 : comentários

No que diz respeito ao escoamento superficial a observação dos resultados diários do modelo atestaram seu ótimo desempenho em todas as simulações, já que sempre se constatou sua simultaneidade com a precipitação. Isso vai ao encontro do que foi observado na área experimental, ou seja, em nenhum momento as lâminas de irrigação provocaram sua ocorrência.

Quanto ao comportamento da lâmina superficial, também se tem um desempenho plenamente satisfatório do modelo nas quatro simulações. O modelo deixou a desejar nos períodos que antecederam a estabilização da lâmina, sempre subestimando o tempo para que isso acontecesse. Na simulação 04 o modelo também não reproduziu de forma adequada os últimos dias do período simulado. Essa situação provavelmente se deva aos valores de

evapotranspiração, que estariam superestimados. De uma maneira geral, tanto pela avaliação visual dos gráficos como pelos valores de Ef_2 , pode-se considerar o modelo plenamente apto para simular a irrigação por inundação em solos pouco profundos. Deve-se ressaltar que todos esses resultados foram obtidos sem que se tenha feito qualquer tentativa de calibração do modelo.

Na tabela que segue são apresentadas cada uma das parcelas que constituem o consumo total e a média de seus percentuais de contribuição em relação a esse total.

Tabela 4.8 – Parcelas do consumo na irrigação por inundação

Parcela do consumo	% de contribuição
Evaporação	5,70
Transpiração	80,5
Drenagem	0,50
Variação do armazenamento	13,3
Total	100

Esses resultados mostram que em solos com horizontes “impermeáveis” pouco profundos, nos quais a percolação é praticamente inexistente, a evapotranspiração é a grande responsável pelo consumo d’água na irrigação por inundação. Por outro lado, como a lâmina drenada contribui com ao redor de 0,5% do total, as características do horizonte A mais diretamente relacionadas ao movimento d’água tornam-se pouco importantes na quantificação do consumo. Pode-se ainda acrescentar que, dependendo das condições iniciais (umidade do solo), a evapotranspiração pode ser responsável por quase sua totalidade. Isso aproxima bastante a irrigação por inundação dos outros métodos, onde o tipo de solo influi muito mais sobre o manejo do que na definição das necessidades de irrigação.

Na tabela que segue são apresentadas para cada simulação a lâmina de irrigação, a precipitação efetiva, a lâmina total precipitada e a relação entre essas duas últimas.

Tabela 4.9 – Relação entre irrigação, precipitação total e efetiva

	Irrigação (mm)	Precipitação – P (mm)	Precipitação efetiva – Pe (mm)	Pe/P
Simulação 01	550,0	290,8	143,4	0,49
Simulação 02	430,0	738,8*	195,0	0,26
Simulação 03	654,0	211,0	111,1	0,53
Simulação 04	470,0	411,6	194,5	0,47

* El Niño

Os valores da tabela anterior mostram que a ocorrência das menores lâminas de irrigação (simulações 02 e 04) coincide com as maiores precipitações efetivas, e essas, por sua vez, com as maiores precipitações totais. Apesar de serem constatações aparentemente óbvias, pode-se notar que as precipitações efetivas não acompanham integralmente o crescimento dos correspondentes valores totais. Isso ratifica a importância da distribuição temporal das precipitações, e não somente de seus valores absolutos. A diferença entre as lâminas de irrigação das simulações 02 e 04 deve-se fundamentalmente à evapotranspiração, o que é uma consequência das condições atmosféricas verificadas em cada período. O menor valor registrado na simulação 04 contrasta com a duração de seu período, que é a maior entre todas (90 dias). A maior lâmina de irrigação verifica-se na simulação 03 e decorre da alta evapotranspiração e baixa precipitação efetiva. Se comparada com a simulação 01, a maior evapotranspiração deve-se à duração de seu período (87 contra 75 dias) e não às condições atmosféricas.

Por fim, também se verifica que os valores da relação P_e/P têm um comportamento inverso ao da precipitação total, o que reforça a importância de sua distribuição temporal.

4.1.3 – Simulação com os dados da área experimental de drenagem

4.1.3.1 – Simulação 05

O balanço hídrico correspondente ao período simulado é apresentado na tabela que segue.

Tabela 4.10 – Balanço hídrico – simulação 05

Variável	Lâmina (mm)
Precipitação	383,6
Escoamento superficial	97,1
Evaporação	120,2
Drenagem	107,8
Variação do armazenamento	58,6

O resultado mais diretamente relacionado à validação do modelo consiste no confronto entre valores observados e calculados, sendo a variável, nesse caso, a profundidade do lençol freático. Esses valores são mostrados na tabela e figura que seguem.

Tabela 4.11 – Profundidade do lençol freático : valores observados e calculados

Data	Profundidade do lençol freático (cm)	
	Observada	Calculada
29/08	40	40
01/09	0	0
02/09	10	11
03/09	24	18
02/10	0	0
03/10	11	14
04/10	25	20
09/10	5	0
10/10	6	9
11/10	15	16
12/10	29	22
17/10	0	0
19/10	13	18
20/10	25	24
21/10	30	25

$Ef_1^* = 0,91 - Ef_2^{**} = 0,24$

* Ef_1 é definido pela equação (3.41), ** Ef_2 é definido pela equação (3.42)

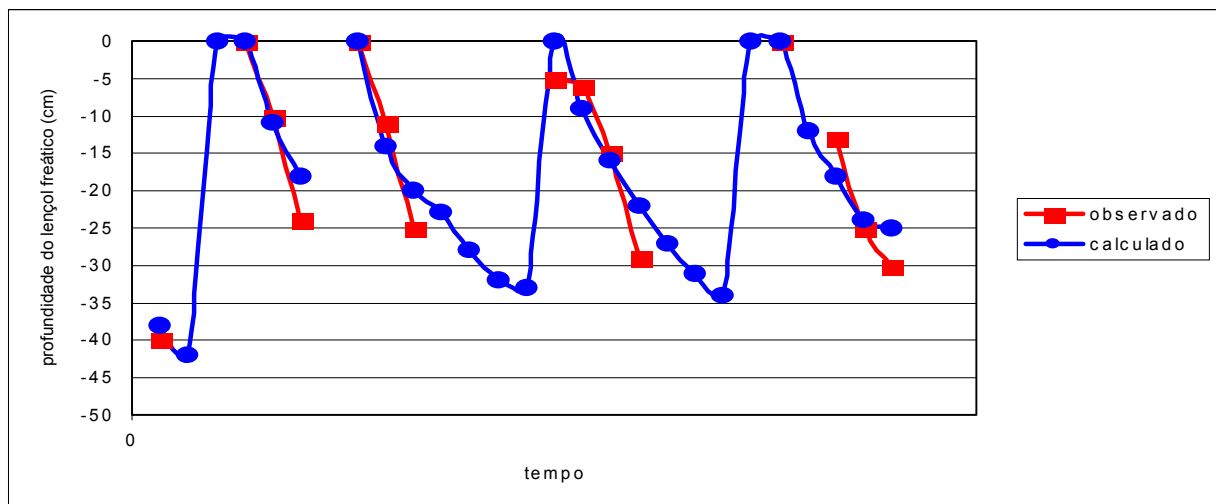


Figura 4.5 – Profundidade do lençol freático : valores observados e calculados

4.1.3.2 – Simulação 05 : comentários

A inspeção da figura anterior mostra que o modelo reproduz melhor os picos do que as recessões, nas quais o rebaixamento do lençol freático é subestimado. Entretanto sua

avaliação global associada aos índices Ef_1 e Ef_2 atestam integralmente a aptidão do modelo para simular cenários que incluem sistemas de drenagem subsuperficial em solos pouco profundos. Assim como nas simulações 01 a 04, os valores de Ef_2 (0,24), e nesse caso também de Ef_1 (0,91), surpreendem positivamente, já que novamente não houve qualquer esforço no sentido de calibrar o modelo.

4.1.4 – Síntese do desempenho do modelo nas simulações 01 a 05

Na tabela que segue são apresentados de forma compacta os valores dos índices estatísticos utilizados para avaliação do desempenho do modelo, e que serviram como referência na sua validação para simulação da irrigação por inundação e da drenagem subsuperficial.

Tabela 4.12 – Índices de desempenho do modelo

Simulação	Ef_1 (valor ótimo = 1)	Ef_2 (valor ótimo = 0)
01	-	0,074
02	-	0,075
03	-	0,103
04	-	0,122
05	0,91	0,24

Esses resultados autorizam então que se avance para as simulações seguintes, nas quais o modelo SWAP_INU, agora já validado, possibilitará que se verifique a relação entre diferentes intensidades de drenagem e as condições oferecidas para o preparo do solo e colheita, e que se avalie o modelo IRRIGA quando aplicado à irrigação por inundação.

Por outro lado, pode-se verificar que as datas de início e fim das simulações (tabela 4.3) não coincidem com as datas nas quais são apresentados os resultados (casos das simulações 01 a 04). Isso se justifica pela necessidade de verificar-se o comportamento do modelo simulando de forma contínua períodos com diferentes condições de drenagem (espaçamento entre drenos, profundidade de instalação e armazenamento máximo na superfície). Isso foi possível fazendo-se as simulações iniciarem em setembro de um ano e terminarem em março do ano seguinte, de tal forma que as condições de drenagem foram distintas nos períodos de irrigação, imediatamente anterior e imediatamente posterior. Um exemplo de resultado com o modelo rodando nessas condições é apresentado ao final desse capítulo.

4.2 – Aplicação do modelo SWAP_INU

4.2.1 – Informações gerais : simulações 06 a 09

As simulações 06 a 09 foram conduzidas considerando-se o solo da área experimental de irrigação. A discretização desse perfil está definida na tabela (4.1). As condições iniciais e as condições de contorno são as mesmas adotadas nas simulações 01 a 04, e já apresentadas na tabela (4.2). Dentro dos períodos completos de cada simulação, os resultados apresentados compreendem os subperíodos de 06/09 à 30/09 dos anos de 1996, 97, 99 e 2000, e os subperíodos que têm início quando da drenagem e estendem-se até alguns dias após a data da colheita nos anos de 1997, 98, 2000 e 2001. Os quatro primeiros subperíodos foram definidos a partir da hipótese de que o preparo do solo ocorre em setembro de cada ano. As datas de drenagem e colheita em cada safra estão definidas na tabela (4.3).

4.2.2 – Simulações 06 à 09 : apresentação dos resultados e comentários

As simulações diferem pelas condições de drenagem (espaçamento entre drenos e profundidade de instalação). Inicialmente são apresentados os balanços gerados pelo modelo em cada simulação.

Tabela 4.13 – Simulação 06 : balanço hídrico

	Condições de drenagem				
	L ¹ = 100 m P ² = 25 cm	L = 50 m P = 25 cm	L = 20 m P = 75 cm	L = 10 m P = 75 cm	L = 5 m P = 75 cm
Preparo do solo					
Precipitação (mm)	106,3	106,3	106,3	106,3	106,3
Escoamento superficial (mm)	56,5	56,3	53,5	44,7	18,1
Evaporação (mm)	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
Drenagem (mm)	0,1	0,4	4,7	16,0	46,2
Variação do armazenamento (mm)	12,2	12,1	10,7	8,2	4,5
Colheita					
Precipitação (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Escoamento superficial (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Evaporação (mm)	11,4	11,4	11,1	10,7	9,9
Transpiração (mm)	47,4	47,4	47,4	47,2	46,7
Drenagem (mm)	0,0	0,0	0,4	1,4	3,6
Variação do armazenamento (mm)	-58,8	-58,8	-58,9	-59,3	-60,2

¹ espaçamento entre drenos, ² profundidade de instalação dos drenos

Tabela 4.14 – Simulação 07 : balanço hídrico

	Condições de drenagem				
	L ¹ = 100 m	L = 50 m	L = 20 m	L = 10 m	L = 5 m
	P ² = 25 cm	P = 25 cm	P = 75 cm	P = 75 cm	P = 75 cm
Preparo do solo					
Precipitação (mm)	86,7	86,7	86,7	86,7	86,7
Escoamento superficial (mm)	47,1	47,0	44,9	39,0	20,3
Evaporação (mm)	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0
Drenagem (mm)	0,1	0,2	3,6	11,7	33,6
Variação do armazenamento (mm)	-3,5	-3,5	-4,8	-7,0	-10,3
Colheita					
Precipitação (mm)	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Escoamento superficial (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Evaporação (mm)	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9
Transpiração (mm)	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1
Drenagem (mm)	0,0	0,0	0,7	2,2	4,8
Variação do armazenamento (mm)	-21,6	-21,6	-22,3	-23,7	-26,4

¹ espaçamento entre drenos, ² profundidade de instalação dos drenos

Tabela 4.15 – Simulação 08 : balanço hídrico

	Condições de drenagem				
	L ¹ = 100 m	L = 50 m	L = 20 m	L = 10 m	L = 5 m
	P ² = 25 cm	P = 25 cm	P = 75 cm	P = 75 cm	P = 75 cm
Preparo do solo					
Precipitação (mm)	67,7	67,7	67,7	67,7	67,7
Escoamento superficial (mm)	29,9	29,7	26,6	20,5	10,5
Evaporação (mm)	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1
Drenagem (mm)	0,1	0,3	4,7	13,0	26,4
Variação do armazenamento (mm)	-5,4	-5,4	-6,7	-8,9	-12,2
Colheita					
Precipitação (mm)	41,7	41,7	41,7	41,7	41,7
Escoamento superficial (mm)	3,8	3,7	2,0	0,0	0,0
Evaporação (mm)	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3
Transpiração (mm)	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6
Drenagem (mm)	0,0	0,1	1,8	5,0	7,8
Variação do armazenamento (mm)	1,0	1,0	1,0	-0,2	-2,9

¹ espaçamento entre drenos, ² profundidade de instalação dos drenos

Tabela 4.16 – Simulação 09 : balanço hídrico

	Condições de drenagem				
	L ¹ = 100 m P ² = 25 cm	L = 50 m P = 25 cm	L = 20 m P = 75 cm	L = 10 m P = 75 cm	L = 5 m P = 75 cm
Preparo do solo					
Precipitação (mm)	160,8	160,8	160,8	160,8	160,8
Escoamento superficial (mm)	107,5	106,8	96,8	72,7	21,2
Evaporação (mm)	38,9	38,9	38,9	38,9	38,9
Drenagem (mm)	0,2	0,9	10,9	35,0	87,7
Variação do armazenamento (mm)	14,3	14,3	14,3	14,3	13,1
Colheita					
Precipitação (mm)	89,8	89,8	89,8	89,8	89,8
Escoamento superficial (mm)	47,9	47,8	44,7	38,1	22,2
Evaporação (mm)	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3
Transpiração (mm)	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5
Drenagem (mm)	0,0	0,2	3,2	10,2	25,9
Variação do armazenamento (mm)	1,0	1,0	1,0	0,8	1,0

¹ espaçamento entre drenos, ² profundidade de instalação dos drenos

Esses resultados mostram de forma clara que há uma relação estreita entre a drenagem subsuperficial e o escoamento superficial. A redução da lâmina drenada, decorrente do aumento do espaçamento e diminuição da profundidade dos drenos, implica um acréscimo no escoamento superficial, de tal forma que o somatório dessas duas variáveis pouco se altera entre simulações no mesmo período. O aumento do espaçamento entre os drenos faz com que diminua a infiltração, de tal forma que grande parte da lâmina que deixa de ser drenada é transferida para o escoamento superficial, e apenas uma pequena parcela contribui para o aumento da umidade do perfil do solo. Essas simulações foram feitas considerando-se que o armazenamento máximo na superfície é de 1 mm, o que, de certa forma, justifica o comportamento dessas variáveis. Suas relações com o espaçamento estão representadas na figura que segue.

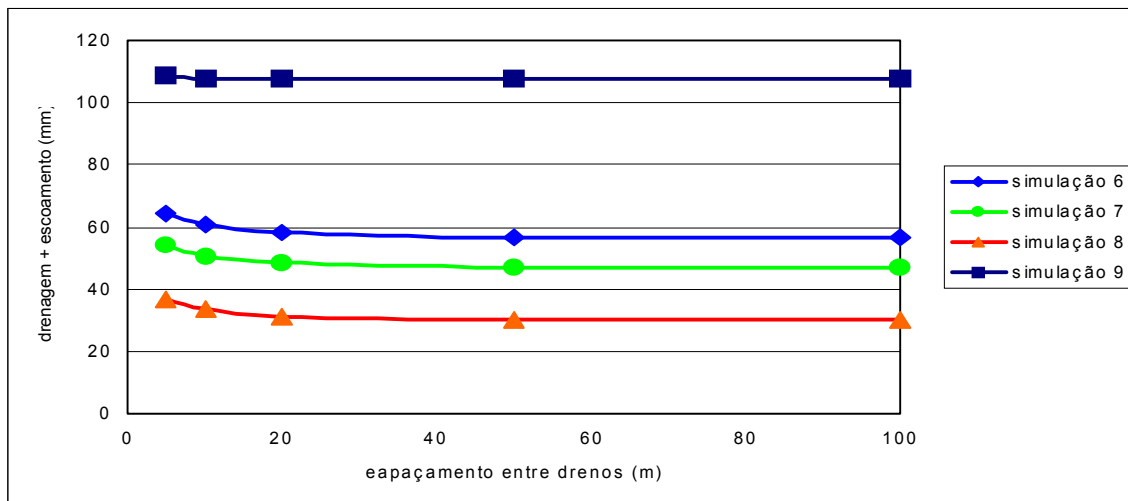


Figura 4.6 – Drenagem + escoamento superficial vs espaçamento – simulações 06 à 09 (armazenamento máximo na superfície = 1 mm)

Os resultados dessa figura dizem respeito às simulações realizadas nos períodos de preparo do solo. O mesmo comportamento verifica-se nos períodos de colheita. Na seqüência apresenta-se unicamente para a simulação 09 (na qual se tem a maior lâmina precipitada) o comportamento isolado das mesmas variáveis.

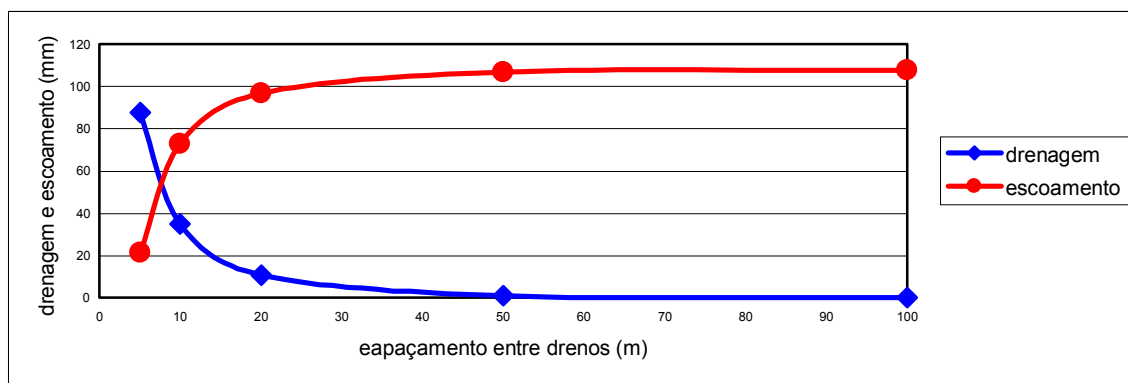


Figura 4.7 – Espaçamento vs drenagem vs escoamento superficial – simulação 09 (armazenamento máximo na superfície = 1 mm)

A forma aproximadamente simétrica das curvas ratifica a transferência na mesma proporção da lâmina de uma para outra, com mais drenagem e menos escoamento nos menores espaçamentos.

Tendo como referência os perfis de umidade gerados pelo modelo, resultados mais específicos, sintetizados pelo número de dias úteis para a mecanização, são apresentados a seguir.

Tabela 4.17 – Simulação 06 : número de dias para mecanização

		Condições de drenagem				
		$L^1 = 100$ m	$L = 50$ m	$L = 20$ m	$L = 10$ m	$L = 5$ m
		$P^2 = 25$ cm	$P = 25$ cm	$P = 75$ cm	$P = 75$ cm	$P = 75$ cm
Critério 1 ³	Preparo	3	3	3	4	5
	Colheita	15	15	15	16	17
Critério 2 ⁴	Preparo	3	3	3	5	6
	Colheita	14	15	15	15	16

¹ espaçamento entre drenos, ² profundidade de instalação dos drenos

³ critério de Wijk & Feddes (1982,1986), ⁴ critério de Fernandes et al (2002)

Tabela 4.18 – Simulação 07 : número de dias para mecanização

		Condições de drenagem				
		$L^1 = 100$ m	$L = 50$ m	$L = 20$ m	$L = 10$ m	$L = 5$ m
		$P^2 = 25$ cm	$P = 25$ cm	$P = 75$ cm	$P = 75$ cm	$P = 75$ cm
Critério 1 ³	Preparo	7	7	8	9	12
	Colheita	2	2	3	6	7
Critério 2 ⁴	Preparo	6	7	7	9	12
	Colheita	2	2	2	6	7

¹ espaçamento entre drenos, ² profundidade de instalação dos drenos

³ critério de Wijk & Feddes (1982,1986), ⁴ critério de Fernandes et al (2002)

Tabela 4.19 – Simulação 08 : número de dias para mecanização

		Condições de drenagem				
		$L^1 = 100$ m	$L = 50$ m	$L = 20$ m	$L = 10$ m	$L = 5$ m
		$P^2 = 25$ cm	$P = 25$ cm	$P = 75$ cm	$P = 75$ cm	$P = 75$ cm
Critério 1 ³	Preparo	5	5	6	6	9
	Colheita	1	1	2	5	5
Critério 2 ⁴	Preparo	5	5	5	6	8
	Colheita	1	1	1	4	5

¹ espaçamento entre drenos, ² profundidade de instalação dos drenos

³ critério de Wijk & Feddes (1982,1986), ⁴ critério de Fernandes et al (2002)

Tabela 4.20 – Simulação 09 : número de dias para mecanização

		Condições de drenagem				
		$L^1 = 100$ m	$L = 50$ m	$L = 20$ m	$L = 10$ m	$L = 5$ m
		$P^2 = 25$ cm	$P = 25$ cm	$P = 75$ cm	$P = 75$ cm	$P = 75$ cm
Critério 1 ³	Preparo	3	3	3	3	5
	Colheita	2	2	2	3	4
Critério 2 ⁴	Preparo	3	3	3	3	4
	Colheita	2	2	2	2	4

¹ espaçamento entre drenos, ² profundidade de instalação dos drenos

³ critério de Wijk & Feddes (1982,1986), ⁴ critério de Fernandes et al (2002)

As considerações anteriores, quanto às variáveis drenagem e escoamento superficial, dão suporte à diferença entre o número total de dias úteis para mecanização oferecido pelos espaçamentos de 20 e 50 m ou 50 e 100 m quando comparados ao número oferecido pelos espaçamentos de 5 e 10 m. Os dias totalizados relacionados aos maiores espaçamentos correspondem a 72% (período de preparo) e 65% (período de colheita) dos dias obtidos com os menores espaçamentos. Esses percentuais mostram que grandes diferenças entre espaçamentos não foram acompanhadas por grandes diferenças nas condições de umidade do solo. Por outro lado, os valores dessas tabelas indicam que a sensibilidade do sistema à presença dos drenos se esgota nos espaçamentos de 5 e 10 m, ou seja, as respostas são praticamente as mesmas para os demais espaçamentos. Os critérios adotados, identificados nas tabelas por critério 1 e critério 2, apontam na mesma direção, já que conduzem a resultados muito próximos. Nas figuras que seguem esses resultados são ilustrados.

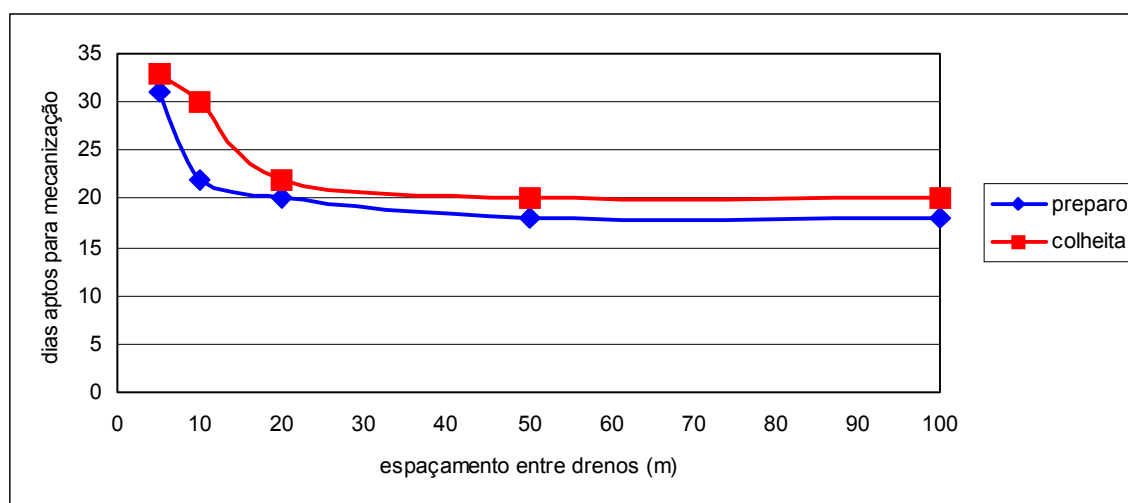


Figura 4.8 – Somatório de dias úteis para mecanização – critério 1

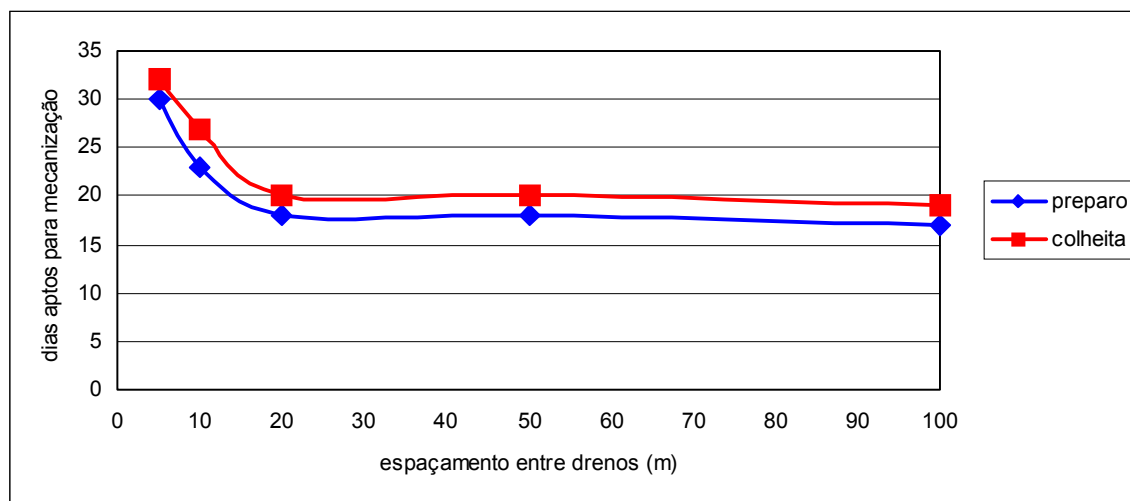


Figura 4.9 – Somatório de dias úteis para mecanização – critério 2

Nas simulações anteriores o armazenamento máximo de 1 mm na superfície pressupõe condições muito boas de drenagem superficial. A seguir novos resultados são comparados aos anteriores, considerando-se agora que esse armazenamento pode atingir até 20 mm. Os resultados restringem-se às simulações 07 e 08 do período de preparo do solo e ao critério 1.

Tabela 4.21 – Dias aptos para mecanização com diferentes condições de drenagem superficial e subsuperficial

L* (m)	Armazenamento na superfície = 1 mm					Armazenamento na superfície = 20 mm				
	5	10	20	50	100	5	10	20	50	100
Simulação 07	12	9	8	7	7	10	5	0	0	0
Simulação 08	9	6	6	5	5	9	5	0	0	0

*espaçamento entre drenos

A tabela anterior mostra alterações significativas com as novas condições de drenagem superficial. Essas alterações podem ser melhor visualizadas na figura que segue.

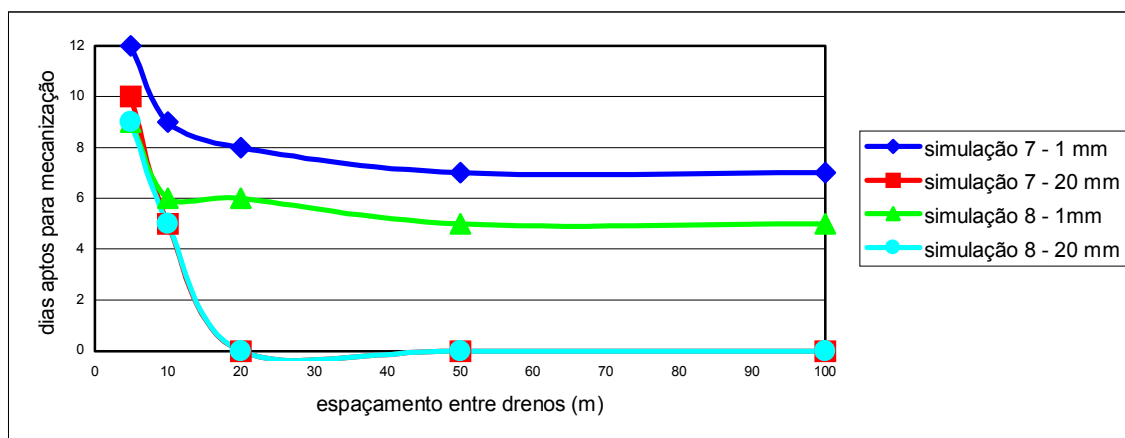


Figura 4.10 – Dias aptos para mecanização com diferentes condições de drenagem superficial e subsuperficial

Novamente o comportamento das variáveis drenagem e escoamento superficial pode ser utilizado para a interpretação dos resultados. No caso dos menores espaçamentos (5 m e 10 m) o decréscimo na drenagem superficial é em grande parte transferido para a drenagem subsuperficial, o que faz com que as reduções no número de dias para mecanização sejam de 28,6% (simulação 07) e 6,7% (simulação 08). Já para os demais espaçamentos isso não acontece, e a lâmina que deixa de ser drenada pela superfície passa a contribuir de forma efetiva para a elevação da umidade do solo. Assim, a redução no número de dias para mecanização atinge 100% nas duas simulações. O comportamento dessas duas variáveis somadas é ilustrado a seguir.

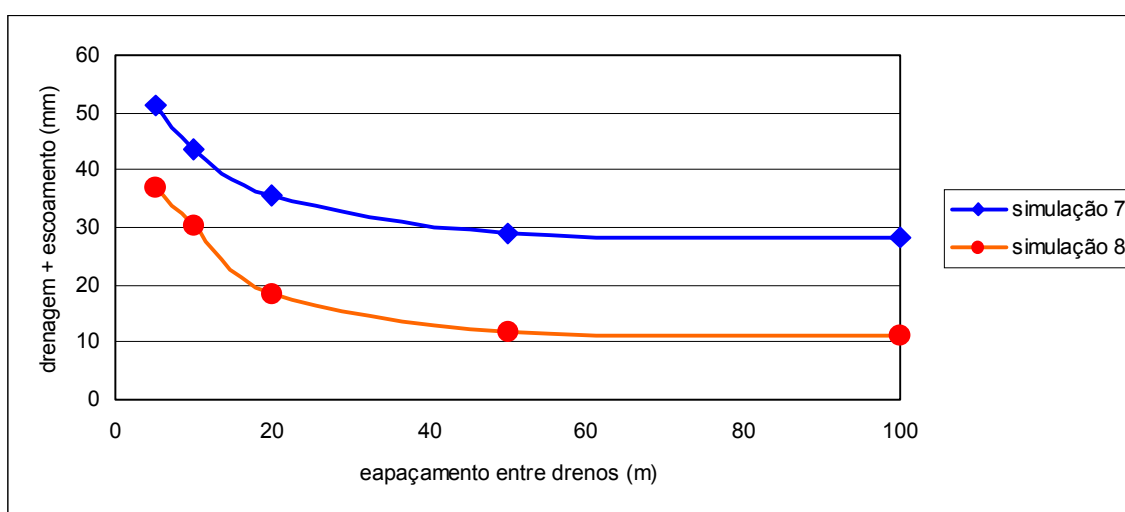


Figura 4.11 – Drenagem + escoamento superficial vs espaçamento – simulações 07 e 08 (armazenamento máximo na superfície = 20 mm)

Na figura (4.11) se tem um comportamento distinto do que se verifica na figura (4.6), onde as mesmas variáveis são relacionadas. A não horizontalidade de suas linhas indica que, no caso dos maiores espaçamentos, só uma pequena parcela da lâmina que deixa de escoar pela superfície transfere-se para a que é drenada pelo sistema subsuperficial. O comportamento isolado dessas variáveis é representado na figura que segue.

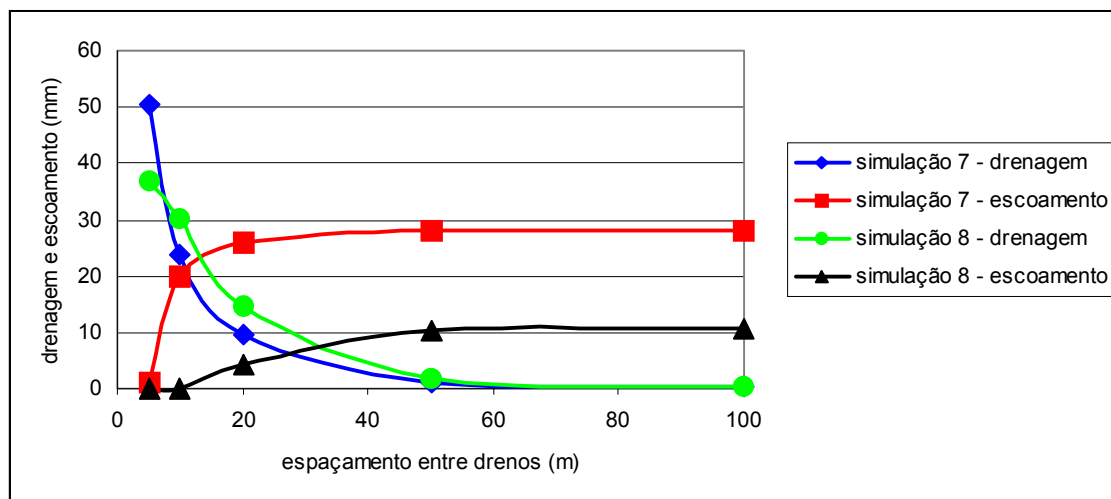


Figura 4.12 – Espaçamento vs drenagem vs escoamento superficial – simulações 07 e 08 (armazenamento máximo na superfície = 20 mm)

A não-simetria das curvas em relação ao eixo vertical ratifica as observações anteriores ao mostrar que a transferência entre as variáveis não é proporcional, ou seja, o crescimento que se verifica em uma não é acompanhado por igual decréscimo na outra.

4.3 – Aplicação do modelo SWAP_INU com fluxo preferencial

4.3.1 – Informações gerais : simulações 10 a 13

Assim como nas simulações 06, 07, 08 e 09, as simulações 10, 11, 12 e 13 foram conduzidas considerando-se o solo da área experimental de irrigação. A discretização do perfil e as condições iniciais e de contorno também se repetem. Nesse caso os resultados se restringem aos subperíodos de 06/09 a 30/09 dos anos de 1996, 97, 99 e 2000, que correspondem aos dias admitidos como disponíveis para o preparo do solo.

A idéia descrita no capítulo 3 (item 3.4.6) não se mostrou totalmente satisfatória para simular a presença de drenos livres com a rotina de fluxo preferencial. Como o modelo propõe que a área das fraturas seja dependente da umidade (solo mais seco, maior

fraturamento), quando da ocorrência de precipitações a área superficial disponível para infiltração é muito pequena. Com isso, mesmo eliminando-se o fluxo das fraturas para a matriz e transferindo-se toda a lâmina infiltrada nas fraturas diretamente para o sistema de drenagem, não se obteve uma alteração significativa nos perfis de umidade. Contornou-se essa dificuldade impondo-se uma relação constante entre a área ocupada pelas fraturas e a área superficial total, ou seja, a umidade do solo deixou de condicionar essa relação. Assim, define-se claramente que nesse caso a formação dos caminhos preferenciais deve-se mais à mecanização (forma de implantação dos drenos) do que às características de expansão e contração do solo. A área relativa das fraturas foi calculada supondo-se $h = -3500$ cm. Essa escolha deve-se à recomendação de que a passagem do implemento (subsolador torpedo) para implantação dos drenos deve acontecer com o solo seco.

4.3.2 – Simulações 10 a 13 : apresentação dos resultados e comentários

Inicialmente são apresentados os balanços gerados pelo modelo em cada simulação.

Tabela 4.22 – Balanço hídrico : simulação 10

Variável	Lâmina (mm)
Precipitação	106,3
Escoamento superficial	0,0
Evaporação	37,5
Drenagem – sistema convencional	0,0
Drenagem – drenos livres	80,1
Varição do armazenamento	-10,9

Tabela 4.23 – Balanço hídrico : simulação 11

Variável	Lâmina (mm)
Precipitação	86,7
Escoamento superficial	2,2
Evaporação	43,0
Drenagem – sistema convencional	0,0
Drenagem – drenos livres	54,2
Varição do armazenamento	-13,4

Tabela 4.24 – Balanço hídrico : simulação 12

Variável	Lâmina (mm)
Precipitação	67,7
Escoamento superficial	0,0
Evaporação	43,1
Drenagem – sistema convencional	0,0
Drenagem – drenos livres	50,9
Varição do armazenamento	-26,0

Tabela 4.25 – Balanço hídrico : simulação 13

Variável	Lâmina (mm)
Precipitação	160,8
Escoamento superficial	10,9
Evaporação	38,8
Drenagem – sistema convencional	0,0
Drenagem – drenos livres	105,5
Varição do armazenamento	6,0

Esses balanços foram obtidos supondo-se a presença de drenos subsuperficiais espaçados de 75 m e instalados a 25 cm de profundidade. O armazenamento máximo na superfície foi admitido igual a 1 mm. Comparando-se esses resultados com os das simulações 06 à 09 (drenos espaçados de 50 m e 100 m), constata-se que o escoamento superficial verificado nas simulações anteriores é agora drenado pelas fraturas. No caso das simulações 07 e 11 e 09 e 13 os resultados são muito próximos, ou seja, o escoamento superficial que ocorre nas simulações 07 e 09 é da mesma ordem de grandeza da soma dos escoamentos superficial e pelas fraturas que se verifica em 11 e 13. Na comparação das simulações 06 com 10 e 08 com 12, verifica-se que a presença dos drenos livres traz uma melhor condição de drenagem, ou seja, o escoamento pelas fraturas em 10 e 12 excede ao escoamento superficial computado em 6 e 8. A semelhança de resultados de 07 e 09 com 11 e 13 se deve à ocorrência de escoamento superficial nas duas últimas, o que atesta que o volume de fraturas não mostrou-se suficiente para drenar toda a água que escoou até elas. Isso não ocorreu em 10 e 12, nas quais o escoamento superficial foi nulo. O bom desempenho mostrado pelos drenos livres também acontece pela drenagem direta de parte da precipitação, o que faz com o volume disponível para infiltração na matriz sofra uma redução. Em todos os casos a lâmina drenada pelo sistema convencional (drenos subsuperficiais) foi desprezível. O comportamento dessas variáveis é ilustrado na figura que segue.

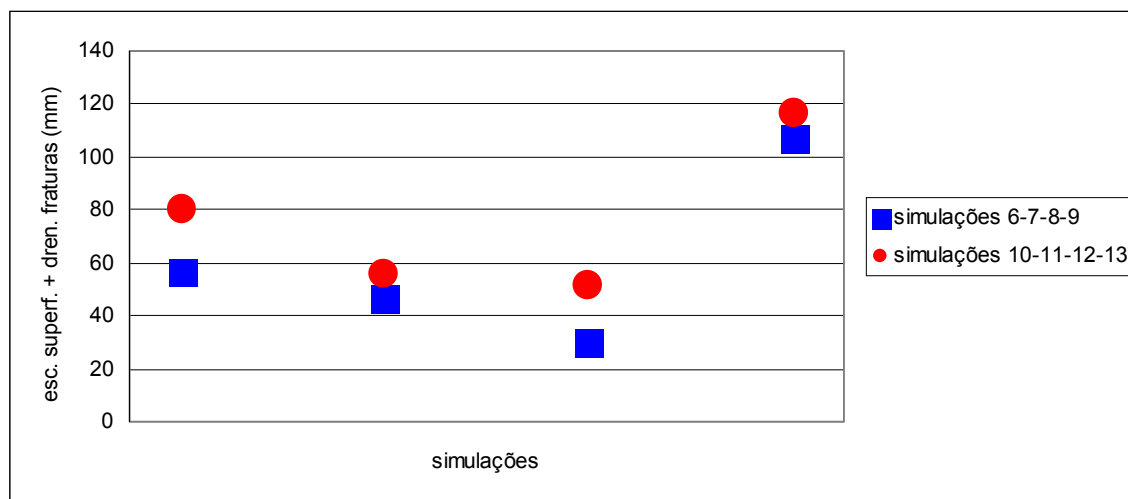


Figura 4.13 – Comportamento das variáveis escoamento superficial e drenagem pelas fraturas

Com base nos perfis de umidade foi possível contabilizar o número de dias úteis para o preparo do solo em cada simulação. Tendo em vista a semelhança dos resultados obtidos nas simulações 06 a 09, quando foram utilizados dois critérios para avaliar a possibilidade de mecanização, optou-se agora por utilizar somente o critério 1. Nesse critério a condição para mecanização é definida pela umidade a 5 cm de profundidade. Esses resultados são apresentados a seguir.

Tabela 4.26 – Números de dias aptos para mecanização

Simulação 10	15
Simulação 11	9
Simulação 12	15
Simulação 13	3

As considerações feitas anteriormente, e ilustradas na figura (4.13), refletem-se nos resultados da tabela acima. Os dias úteis contabilizados nas simulações 11 e 13 são bastante próximos dos que foram obtidos nas simulações 07 e 09. Já esses números, no caso das simulações 10 e 12, são bem superiores aos correspondentes nas simulações 06 e 08. Em todas essas simulações cujos resultados foram confrontados estimou-se o armazenamento superficial máximo igual a 1 mm. Intuitivamente pode-se dizer que essa condição pode ser mais facilmente atingida em áreas que apresentam caminhos preferenciais conectados à superfície do que em áreas onde se busca a melhoria do escoamento superficial através de outros procedimentos (sistematização, por exemplo).

4.4 – Aplicação simultânea dos modelos SWAP_INU e IRRIGA

Para avaliação do modelo simplificado IRRIGA foram simulados dois cenários hipotéticos e comparados seus resultados com os do modelo SWAP_INU. O modelo IRRIGA pressupõe um manejo no qual as doses diárias de irrigação mantêm a lâmina superficial constante após sua formação. Além disso, o escoamento superficial, que ocorreria sempre que essa lâmina fosse excedida, é admitido nulo. Os resultados obtidos são apresentados e comentados a seguir.

4.4.1 – Cenário 01 (CEN 01) : solo com horizonte B superficial e impermeável

A simulação desse cenário foi feita considerando-se as características do solo da área experimental de irrigação. Arbitrariamente, selecionou-se o período correspondente à safra 96/97 (simulação 01, item 4.1.2.1), tornando-se nulas suas precipitações. Os parâmetros específicos do modelo IRRIGA, citados na tabela (3.9), são a largura da base da taipa (B , equação 3.38) e o período de formação da lâmina (pfl , equações 3.38 e 3.39). Esses parâmetros valem 0,80 m e 5 dias, respectivamente. Foram mantidas as mesmas condições iniciais e de contorno adotadas na simulação 01.

No caso desse cenário os modelos diferem somente pela forma como calculam a lâmina drenada. Na tabela que segue são apresentados os balanços gerados por cada modelo.

Tabela 4.27 – Resultados da aplicação dos modelos IRRIGA e SWAP_INU

Variável	IRRIGA	SWAP_INU
Evapotranspiração (mm)	585,75	585,40
Drenagem (mm)	3,9	3,4
Varição do armazenamento (mm)	97,5	98,7
Escoamento superficial (mm)	0,0	48,0
Consumo total (mm)	687,15	735,5
Err (equação 3.40) = 6,6 %		

A diferença entre os valores de evapotranspiração é desprezível e deve-se à precisão empregada no arredondamento em um e outro modelo. A diferença na variação do armazenamento também é desprezível e decorre das condições iniciais que não são absolutamente iguais nos dois modelos. Enquanto no IRRIGA se tem um valor médio de umidade, no SWAP_INU essa variável é discretizada na vertical. Com isso, as diferenças de fato restringem-se à lâmina drenada e ao escoamento superficial. Apesar das diferentes formas de cálculo, as lâminas drenadas são muito próximas e têm um peso muito pequeno no cômputo do consumo total. Já as perdas por escoamento superficial estimadas pelo modelo SWAP_INU indicam que a manutenção da lâmina com escoamento nulo é uma hipótese que só tem validade teórica. Deve-se enfatizar que, quando da prescrição das lâminas diárias de irrigação, procurou-se atender aos picos de demanda, mas não se buscou a minimização do escoamento superficial. Por isso a importância dessa variável na avaliação dos resultados é apenas relativa. Tendo em vista essas considerações, pode-se admitir que a pequena diferença entre os consumos totais estimados pelos dois modelos é uma regra nos perfis que apresentam horizonte B superficial e impermeável, ou seja, esses resultados independem das condições iniciais (solo mais ou menos úmido) e das características do horizonte A. O mesmo pode ser dito nos casos em que o horizonte B e/ou o lençol freático se encontram um pouco mais profundos, desde que se admita uma condição de saturação para o horizonte A ao final da irrigação. Já o emprego do modelo IRRIGA na simulação da dinâmica da irrigação não mostra uma resposta satisfatória. Isso é exemplificado a seguir.

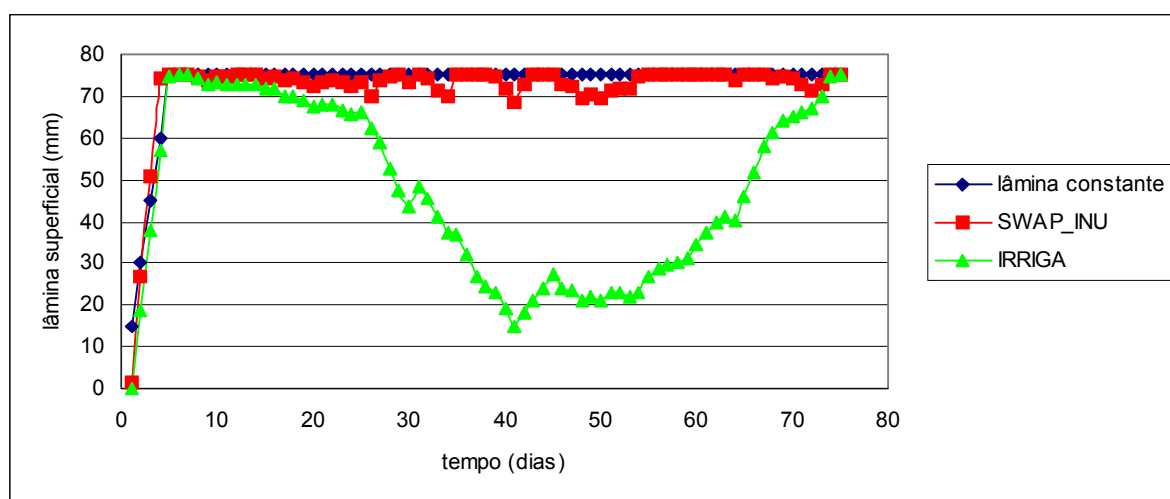


Figura 4.14 – Simulação do comportamento da lâmina superficial – CEN 01

Enquanto o resultado atribuído ao modelo SWAP_INU foi obtido com o emprego de lâminas de irrigação compatíveis com a variação da demanda (diferentes valores de k_c), o

traçado da função identificada com o modelo IRRIGA foi definido com base em valores médios. O consumo nos primeiros cinco dias corresponde a uma lâmina média de 24 mm. No restante do período essa lâmina é de 8 mm. Esses valores serviram como entrada no modelo SWAP_INU, o que permitiu a determinação da variação temporal da lâmina superficial. Na figura anterior se vê claramente a má qualidade do resultado. A lâmina constante de 8 mm, aplicada a partir do 6^o dia, inicialmente subestima as necessidades de irrigação para posteriormente superestimá-la.

4.4.2 – Cenário 02 (CEN 02) : perfil homogêneo com lençol freático profundo

Para simulação desse cenário considerou-se um perfil formado por um solo bastante argiloso e submetido a diferentes condições iniciais. As características desse solo (Dam et al, 1997) são apresentadas no Anexo A2. A condição de contorno inferior foi alterada, com a hipótese de fluxo zero sendo substituída por fluxo gravitacional. Essa alteração justifica-se pela presença de lençol freático bastante profundo. A consideração de um outro solo, que não o do cenário CEN 01, decorre dessa nova condição de contorno suposta para CEN 02. Sendo essa condição caracterizada por um gradiente unitário, solos como o que foi considerado em CEN 01 tornam-se inadequados para a irrigação por inundação devido ao elevado consumo d'água que provocam. Os resultados obtidos são apresentados e comentados a seguir. Os valores de evaporação mais transpiração são iguais em todas as simulações (585,40 mm), sendo por isso foram omitidos das tabelas. O mesmo vale para o fluxo horizontal, cujos valores são praticamente iguais e desprezíveis do ponto de vista quantitativo.

Tabela 4.28 – Aplicação dos modelos SWAP_INU e IRRIGA : condição inicial ($h=-100$ cm)

Variável	SWAP_INU ($z^* = 75$ cm)	SWAP_INU ($z^* = 200$ cm)	IRRIGA
Escoamento superficial (mm)	110,8	118,9	0,0
Varição do armazenamento (mm)	116,8	186,2	89,0
Fluxo vertical (mm)	776,3	682,9	877,5
Irrigação (mm)	1589,5	1573,5	1552,5
Err (equação 3.40) = 1,8 %			

* espessura do perfil

Tabela 4.29 – Aplicação dos modelos SWAP_INU e IRRIGA : condição inicial ($h=-3500$ cm)

Variável	SWAP_INU ($z^* = 75$ cm)	SWAP_INU ($z^* = 200$ cm)	IRRIGA
Escoamento superficial (mm)	115,8	128,2	0,0
Variação do armazenamento (mm)	249,1	538,6	133,0
Fluxo vertical (mm)	681,0	424,8	877,5
Irrigação (mm)	1631,5	1677,0	1596,5
Err (equação 3.40) = 3,5 %			

* espessura do perfil

As considerações feitas anteriormente para o escoamento superficial permanecem válidas, ou seja, sua importância é apenas relativa. Isso fica reforçado nessas simulações, nas quais a diferença entre os valores calculados pelo modelo SWAP_INU é muito pequena.

Para a mesma condição inicial os resultados totalizados (irrigação) são bastante próximos entre si, o que é atestado pelos valores de *Err*. A proximidade desses resultados deve-se ao somatório das três parcelas apresentadas (escoamento superficial, variação do armazenamento e fluxo vertical) ser praticamente constante. No caso do modelo IRRIGA, o maior fluxo vertical é compensado pelos baixos valores de escoamento e variação do armazenamento. No caso do modelo SWAP_INU, tem-se uma situação oposta em que a diminuição do fluxo vertical é compensada pelo aumento na variação do armazenamento. A alteração nos valores das parcelas desse modelo mostra-se lógica, já que a maior espessura do perfil implica menor percolação e maior variação do armazenamento. No caso do modelo IRRIGA, a espessura da região na qual se considera a variação do armazenamento depende unicamente da profundidade do sistema radicular, nesse caso igual a 25 cm. O fluxo vertical é estimado com base na equação de Darcy, com a condutividade hidráulica sendo igual à do solo saturado. Esses procedimentos são simplificações que atuam em direções opostas e que conduzem a resultados parciais equivocados. Enquanto o fluxo vertical é superestimado, a variação do armazenamento é subestimada. Contraditoriamente esses erros ao serem superpostos conduzem a um resultado final (necessidade de irrigação) correto, na medida em que se compensam mutuamente.

Na figura que segue, apresenta-se o comportamento da lâmina superficial obtido nas mesmas condições adotadas para o cenário CEN 01. Novamente os resultados atribuídos ao modelo IRRIGA se mostram insatisfatórios. O exemplo diz respeito à simulação no perfil com espessura de 75 cm e tendo o solo úmido como condição inicial.

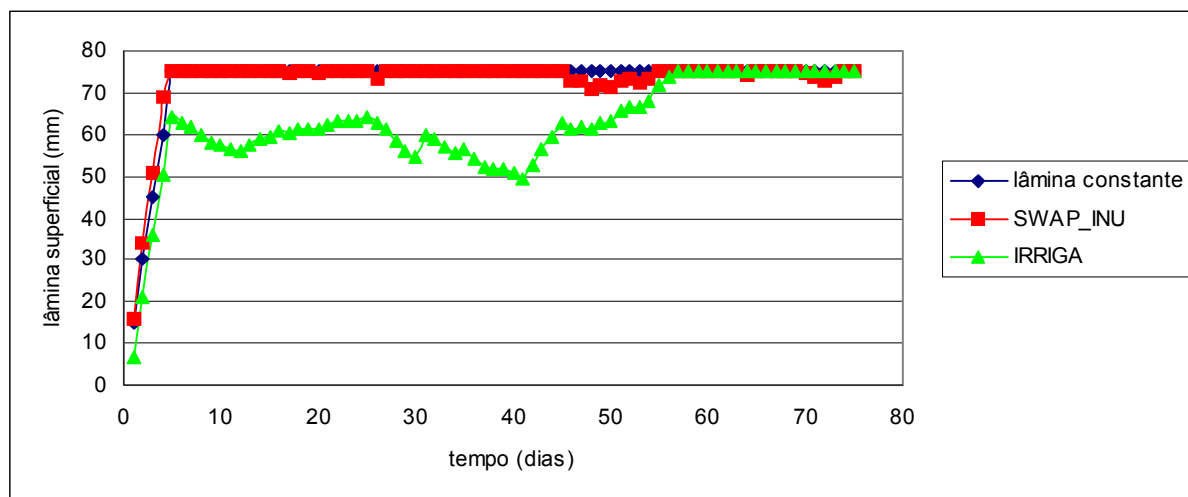


Figura 4.15 – Simulação do comportamento da lâmina superficial – CEN 02

4.5 – Simulação contínua com o modelo SWAP_INU

Para concluir esse capítulo, são apresentados a seguir os resultados de uma simulação em um cenário hipotético. O objetivo é de exemplificar a aplicação do modelo SWAP_INU simulando de forma contínua um período com diferentes condições de drenagem. A caracterização desse cenário é feita a seguir.

Tabela 4.30 – Caracterização do cenário hipotético

Período total simulado	62 dias
Área	Área experimental de irrigação sem cultura
Precipitação e evaporação	Valores arbitrários distribuídos de maneira uniforme ao longo do período simulado
Condições de drenagem	1ª metade do período $L^1 = 10 \text{ m}$, $p^2 = 75 \text{ cm}$, $arm^3 = 1 \text{ mm}$
	2ª metade do período $L = 50 \text{ m}$, $p = 50 \text{ cm}$, $arm = 20 \text{ mm}$

¹ espaçamento entre drenos, ² profundidade de instalação dos drenos, ³ armazenamento máximo na superfície

Na primeira metade do período, têm-se condições de drenagem, tanto superficial como subsuperficial, muito superiores às que se verificam na segunda metade. Essa é uma situação que reproduz o que ocorre em uma área cultivada com arroz irrigado por inundação, onde a primeira metade corresponderia, por exemplo, ao período de preparo do solo e a segunda ao período de irrigação. Os balanços do período total simulado e de cada metade desse período são apresentados a seguir.

Tabela 4.31 – Balanço hídrico : cenário hipotético

Variável	Período total	1ª metade	2ª metade
Precipitação (mm)	120	60	60
Escoamento superficial (mm)	17,5	12,2	5,3
Evaporação (mm)	58,9	29,45	29,45
Drenagem (mm)	20,5	18,7	1,8
Variação do armazenamento (mm)	23,1	-0,3	23,4

Os resultados do balanço são compatíveis com as alterações nas condições de drenagem que ocorrem entre cada metade do período total simulado. A lâmina drenada pelo sistema subsuperficial na primeira metade corresponde a 91% do total, enquanto o escoamento superficial corresponde a 70%. Quanto à variação da umidade no perfil, seu crescimento deve-se integralmente ao comportamento do sistema na segunda metade do período total. Esses valores são lógicos e devem-se às diferenças no espaçamento (10 m e 50 m), na profundidade de instalação (75 cm e 50 cm) e no armazenamento máximo na superfície (1 mm e 20 mm). Os resultados dessa simulação são ilustrados na figura que segue.

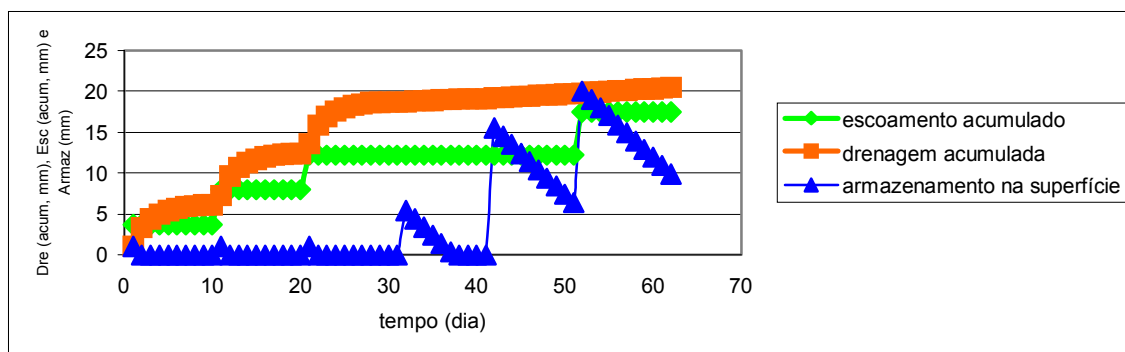


Figura 4.16 – Simulação contínua em cenário hipotético

Nessa figura se vê claramente o comportamento diferenciado das variáveis antes e após o 31^o dia. Antes, a drenagem cresce segundo um gradiente bastante acentuado, o escoamento superficial ocorre nos três dias em que há precipitação e o armazenamento na superfície só aparece nesses mesmos três dias. Após, o gradiente de crescimento da lâmina drenada torna-se pequeno, o escoamento superficial ocorre em um único dia e o armazenamento na superfície perdura por vários dias após a ocorrência de precipitações.

5 – Conclusões e recomendações

5.1 – Conclusões

5.1.1 – Quanto à validação do modelo SWAP_INU

O procedimento de validação do modelo constituiu-se do confronto de seus resultados com as observações feitas nas áreas experimentais de irrigação e drenagem. A aderência entre valores observados e calculados, verificada de forma visual (gráficos) e analítica (índices estatísticos), justifica plenamente seu emprego para simulação do comportamento das variáveis que definem a dinâmica da irrigação por inundação e da drenagem em solos pouco profundos.

5.1.2 – Quanto às alterações introduzidas no modelo original

As alterações no código original buscando adaptá-lo às particularidades da irrigação por inundação mostraram-se totalmente satisfatórias. Em sua nova versão, o modelo permite a prescrição de alterações nas condições de drenagem (armazenamento máximo superficial, espaçamento e profundidade dos drenos subsuperficiais) sem que seja necessária qualquer descontinuidade ao longo do período da simulação. Além disso, a transpiração pode ser sempre mantida em seu nível potencial.

O emprego da rotina de fluxo preferencial para simulação em áreas com drenos livres mostrou-se viável, ou seja, é possível reproduzir o cenário criado pela presença de drenos desse tipo com as alterações introduzidas no código original.

5.1.3 – Quanto às aplicações do modelo SWAP_INU

5.1.3.1 – Na irrigação por inundação

Os resultados da aplicação do modelo, confirmados pelas observações de campo, mostraram um consumo total que teve seu valor máximo nas quatro safras igual a 765 mm. O limite inferior do intervalo recomendado pelo IRGA corresponde a 1037 mm. Considerando-se que tanto as perdas na condução como o escoamento superficial podem tornarem-se inevitáveis, esse valor sugerido pelo IRGA pode ser admitido como satisfatório para solos que apresentam horizonte B “impermeável”.

Contrariando uma idéia consagrada, o consumo nesse tipo de perfil é praticamente independente das características do solo do horizonte A. A evapotranspiração é a variável preponderante para sua estimativa. Essa afirmação baseia-se no manejo verificado na área experimental, onde não houve perdas na condução e por escoamento superficial.

A boa qualidade dos resultados apresentados pelo modelo indicam a correção na escolha de “fluxo zero” como condição de contorno inferior.

Quando aplicado em solos profundos, com a hipótese de fluxo gravitacional na base, o consumo passa a girar ao redor de 1600 mm. Sem considerar o mérito da hipótese feita, esse valor, comparado ao anterior, mostra a grande sensibilidade do modelo à definição da condição de contorno inferior.

5.1.3.2 – Na drenagem

As simulações que relacionaram drenagem e mecanização mostraram que as formas convencionais de drenagem superficial e subsuperficial não podem ser avaliadas de forma isolada. Quando as condições de escoamento superficial foram admitidas como boas (armazenamento máximo = 1 mm), os perfis de umidade em alguns casos mostraram-se compatíveis com a mecanização mesmo para grandes espaçamentos entre drenos subsuperficiais. Só se verificou alteração significativa nesses perfis quando o espaçamento entre os drenos foi bastante reduzido. Para más condições de escoamento na superfície (armazenamento máximo = 20 mm), os perfis de umidade só se mostraram adequados quando os drenos subsuperficiais foram dispostos muito próximos.

No caso específico das simulações nos períodos de preparo do solo, a implantação de drenos livres se mostrou uma ótima alternativa. Em geral as condições oferecidas à mecanização não foram inferiores às anteriores, mesmo prevalecendo as condições naturais de drenagem subsuperficial (drenos pouco profundos e bastante espaçados). A possibilidade da não-utilização de drenos subsuperficiais próximos é uma grande vantagem, pelo alto custo que essa situação representa. Nos períodos de colheita a situação é distinta, já que os drenos livres se tornam inviáveis pela saturação prolongada do perfil durante a irrigação. A garantia da disponibilidade de um número de dias razoável para a colheita traz junto a necessidade da presença de drenos subsuperficiais. Nesse caso os espaçamentos exigidos podem inviabilizar a implantação do sistema.

5.1.4 – Quanto ao modelo IRRIGA

Tendo o modelo SWAP_INU como referência, os resultados de consumo total gerados pelo modelo simplificado IRRIGA mostraram-se muito satisfatórios em perfis pouco profundos. A má qualidade dos resultados quando foi simulado o comportamento da lâmina superficial não é relevante, já que a proposta do modelo não tem esse tipo de simulação como um de seus objetivos.

Na computação do consumo em perfis profundos, têm-se resultados intermediários equivocados que conduzem a um resultado final “correto”. Isso sugere que nesse tipo de situação o modelo seja usado com cautela. Deve-se considerar que a referência para avaliação desses resultados foi novamente o modelo SWAP_INU, que carece de validação nesse tipo de perfil.

5.2 – Recomendações

Dentre as conclusões apresentadas, as que dizem respeito ao consumo na irrigação por inundação e às condições de drenagem em solos pouco profundos são objetivas, ou seja, decorrem dos resultados que têm como base as informações obtidas em uma pesquisa de campo que se desenvolve desde a safra 96/97. Já as conclusões relacionadas à irrigação por inundação em solos profundos, ao desempenho de drenos livres e à drenagem superficial não contam com esta mesma sustentação. Por isso, recomenda-se que em estudos futuros se tenha a preocupação de gerar informações de campo que venham suprir essas lacunas. Assim, alguns dos resultados aqui apresentados poderão ser confirmados ou contestados. Esses dados de campo deverão permitir que se ratifique a metodologia empregada na simulação de áreas com drenos livres ou o desenvolvimento de uma metodologia mais específica para esses casos. Há uma série de interrogações que se mostraram decisivas nos resultados, entre as quais destacam-se a geometria do fraturamento e suas alterações ao longo do tempo, que precisam ser respondidas. O conhecimento da condição de contorno que melhor representa o fluxo em solos profundos e a relação entre diferentes formas de manejo com as condições de escoamento superficial também carecem de dados experimentais.

A obtenção de bons resultados sem a necessidade de calibração não deve ser tomada como regra. O tamanho das áreas experimentais (≈ 1 ha) foi um fator decisivo para que isso acontecesse. Em grandes áreas, onde a variabilidade espacial do solo ficará realçada, recomenda-se a calibração do modelo.

6 – Referências bibliográficas

ADDISCOTT, T.M.; WAGENET, R. J. 1985. Concepts of solute leaching in soils : a review of modelling approaches. **Journal of Soil Science**, n.36, p. 411 – 424.

AGRIANUAL 99, 1999. **Anuário Estatístico**. Rio de Janeiro:. FNP Consultoria & Comércio. 956 p.

AGRIANUAL 03, 2003. **Anuário Estatístico**. Rio de Janeiro:. FNP Consultoria & Comércio. 956 p.

AHMAD, S.; KASHYAP, D.; MATHUR, B. S. 1991. Numerical modeling of two-dimensional transient flow to ditches. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 117, n. 6, p. 839 – 851.

AHMAD, S.; KASHYAP, D.; MATHUR, B. S. 1993. Mathematical modeling of saturated-unsaturated flow to drains. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 119, n. 1, p. 18 – 33.

AHUJA, L. R.; RAWLS, W. J.; NIELSEN, D. R.; WILLIAMS, R. D. 1999. Determining soil hydraulic properties and their field variability from simpler measurements. In : SKAGGS, R. W. (Ed.); SCHILFGAARD, J. van (Ed.). **Agricultural Drainage**. Madison : American Society of Agronomy. p. 1207 – 1233.

ALEXANDER, L.; SKAGGS, R. W. 1986. Predicting unsaturated hydraulic conductivity from the soil water characteristic. **Transactions of the ASAE**, n. 29, p.176 – 184.

ALI, H. Md; SHUI, L.T.; YAN, K. C.; ELOUBAIDY, A.F.; FOONG, K.C. 2000. Modeling water balance components and irrigation efficiencies in relation to water requirements for double-cropping systems. **Agricultural Water Management**, n. 46, p. 167 – 182.

ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Journal of Agronomy**, n.81, p. 650 – 662.

ALMEIDA, J. P. de. 1998. **Relatório de pesquisa da ULBRA**. Não publicado.

AMATYA, D. M.; SKAGGS, R. W.; GREGORY, J. D. 1995. Comparison of methods for estimating REF – ET. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, n. 121, p. 427 – 435.

AMOOZEGAR, A.; WILSON, G. 1999. Methods for measuring hydraulic conductivity and drainable porosity. In: SKAGGS, R. W. (Ed.); SCHILFGAARD, J. van (Ed.). **Agricultural Drainage**. Madison : American Society of Agronomy. p. 1149 – 1205.

ANGUS, J. F.; ZANDSTRA, H. G. 1980. Climate factors and the modelling of rice growth and yield. **Proceedings of the Symposium on Agrometeorology of the rice crop**. Los Banos: IRRI. p.189 – 190.

ARMSTRONG, A. C.; CASTLE, D. A.; TYSON, K. C. 1992. Economic evaluation of drainage benefits from grassland. **Farm Management**, n. 8, p.186 – 193.

AZHAR, A. H.; MURTY, V. V. N.; PHIEN, H. N. 1992. Modeling irrigation for lowland rice with stochastic rainfall. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.118, n.1, p. 36 – 55.

BALFOUR, A.; MARWICK, D. H., 1989. **Programming in Standard FORTRAN 77**. Oxford: Heinemann Educational Books Ltd. 388 p.

BEAR, Jacob. 1972. **Dynamics of fluids in porous media**. New York: American Elsevier. 764 p.

BEERS, W. F. J. 1969. **Some nomographs for the calculation of drain spacing**. Wageningen: ILRI. 48 p.

BEERS, W. F. J. 1976. **Computing drain spacing**. Wageningen: ILRI. 47 p.

BELMANS, C.; WESSELING, J. G.; FEDDES, R. A. 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil : SWATRE. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n. 63, p. 271 – 286.

BELTRAME, L. S.; GONDIM, L. A. P. 1982. Estudos hidrológicos do consumo de água em lavoura de arroz. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 35, n. 333, p. 22 – 8, jan./fev.

BELTRAME, L. S. 1984. Relações solo-água-plantas envolvidas no manejo, preparo e cultivo de várzea no Rio Grande do Sul. In : 1^o SIMPÓSIO SOBRE ALTERNATIVAS AO SISTEMA TRADICIONAL DE UTILIZAÇÃO DAS VÁRZEAS DO RIO GRANDE DO SUL. **Anais ...** Porto Alegre. p. 157 – 65.

BELTRAME, L. S.; LOUZADA, J. 1991. A water use rationalization in rice irrigation by flooding. In : INTERNATIONAL SEMINAR ON EFFICIENT WATER USE. Cidade do México, 1991. **Anais ...** Cidade do México. p. 337 – 45.

BELTRAME, L. S.; LOUZADA, J.A.; LANNA, A. E.; CAUDURO, F. A.; ROSA, S. M. da; MIRANDA, T. L. G. de. 1994. **Evapotranspiração potencial no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: IPH/UFRGS. 49 p.

BELTRAME, L. S.; LOUZADA, J.A. 1996. **Caracterização físico-hídrica dos solos formadores da várzea arrozeira do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: IPH/UFRGS. 31 p.

BENGSTON, R. L.; GARZON, R. S.; FOUSS, J. L. 1993. A fluctuating water table model for the management of a controlled – drainage / subirrigation system. **Transactions of the ASAE**, v.36, n.2, p. 437 – 443.

BERGE, H. F. M. ten; METSELAAR, K.; JANSEN, M. J. W.; SAN AGUSTIN, E. M. de; WOODHEAD, T. 1995. The SAWAH riceland hydrology model. **Water Resources Research**. v. 31, n. 11, p. 2721 – 2732.

BERNARDES, B. C. 1956. **Melhoramentos da agricultura no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura do RS. p. 123 – 125.

BEVEN, K.; GERMANN, P. 1981. Water flow in soil macropores II. A combined flow model. **Journal of Soil Science**, n₃₂, p.15 – 29.

BEVEN, K. J.; LAMB, R.; QUINN, P.; ROMANAVICZ, R.; FREER, J. 1995. TOPMODEL. In: **Computer models of watershed hydrology**. Ed. V.P. Singh. Water Resources Publication.

BLACK, T. A.; GARDNER, W. R.; THURTELL, G. W. 1969. The prediction of evaporation, drainage and soil water storage for a bare soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.33, p.655 – 660.

BOESTEN, J.J.T.I.; STROOSNIJDER, L. 1986. Simple model for daily evaporation from fallow tilled soil under spring conditions in a temperate climate. **Netherlands J. Agric. Sci.**, n. 34, p.75 – 90.

BOLTON, F. R. ; ZANDSTRA, H. G. 1981. A soil moisture based yield model of wetland rainfed rice. **Research Paper**, Los Baños, IRRI, n. 62, p.10.

BORGES JÚNIOR, J. C. F. 2000. **Modelo computacional para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola**. Viçosa, UFV. 106 p. Dissertação (Mestrado).

BOS, M. G. Basics of groundwater flow. IN : RITZEMA, H. P.1994. **Drainage principles and applications**. 2. ed. Wageningen, ILRI. p: 225 – 61.

BOTTCHEER, R; STEENHUIS, T; WALTER, M. 1984. **SUBDRAIN, an interactive, colorgraphics subsurface tile drainage design program**. NRAES. Cooperative Extension Report. Cornell University.

BOUMAN, B. A. M.; KROPFF, M. J.; TUONG, T. P.; WOPOREIS, M. C. S.; BERGE, H. F. M. ten; LAAR, H. H. van. 2001. **Oryza2000** : modeling lowland rice. Los Baños : IRRI. 235 p.

BRASIL. 1973. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife. 431 p. (DNPEA. Boletim técnico, 30).

BRASIL.1988. **Definição e notação de horizontes e camadas do solo**. Embrapa. Documento SNLCS n^o 3.

BRONSWIJK, J. J. B.; EVERS-VERMEER, J. J. 1990. Shrinkage of Dutch clay soil aggregates. **Netherlands J. of Agric. Sci.**, n. 38, p. 175 – 194.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. 1966. Properties of porous media affecting fluid flow. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, (IR2). P. 61 – 88.

BROWN, K. W.; TURNER, F. T.; THOMAS, J. C.; DEUEL, L. E.; KEENER, M. E. 1978. Water balance of flooded rice paddies. **Agricultural Water Management**. p. 277 – 291.

BUYUKTAS, D.; WALLENDER, W. W. 2002. Numerical simulation of water flow and solute transport to tile drains. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 128. n.1. p. 49 – 56.

CAMPBELL, G. S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. **Soil Science**, v. 117, n. 6, p. 311 – 314.

CANAPARRO, Liliane F.; BELTRAME, Lawson F.S.; LOUZADA, José A. S. 1991. Drenagem Subterrânea : alternativa para aumentar a rentabilidade das várzeas. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.44, n.394, p 3-5, jan./fev.

CAVELAARS, J. C.; VLOTMAN, W. F.; SPOOR, G. Subsurface drainage systems. IN : RITZEMA, H. 1994. **Drainage principles and applications**. 2. ed. Wageningen, ILRI. p. 827 – 929.

CELIA, M. A.; BOULOUTAS, E. T.; ZARBA, L. Z. 1990. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. **Water Resources Research**, n. 26, p. 1483 – 1496.

CHANDRA, P. K.; SINGH, R.P. 1995. **Applied numerical methods for food and agricultural engineers**. Boca Raton: CRC Press. 500 p.

CHAPMAN, T. G. 1980. Modeling groundwater flow over sloping beds. **Water Resources Research**, n. 16, p.1114 – 18.

CHAUHAN, H. S.; SCHWAB, G. O.; HAMDY, M. Y. 1968. Analytical and computer solutions of transient water tables for drainage of sloping land. **Water Resources Research**, n. 4, p. 573 – 579.

CHILDS, E. C. 1960. The nonsteady of the water table in drained land. **Journal of Geophysical Research**, n.65, p. 780 – 82.

CHILDS, E. C. 1971. Drainage of groundwater resting on a sloping bed. **Water Resources Research**, n. 7, p.1256 – 1263.

CHUNG, S. O.; WARD, A. D.; SCHALK, C. W. 1992. Evaluation of the hydrologic component of the ADAPT water table management model. **Transactions of the ASAE**, v.35 , n.2, p. 571 – 579.

COREY, A. T. 1977. **Mechanics of heterogeneous fluids in porous media**.Fort Collins, Water Resources Publications. 259 p.

COREY, A. T.; KLUTE, A. 1985. Application of the potential concept to soil water equilibrium and transport. **Soil Science Society of American Journal**, n. 49, p. 3 – 11.

CORRÊA, N.; CAICEDO, N.; FEDDES, R.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L.F.S. 1997. Consumo de água na irrigação do arroz por inundação. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.50, n. 432. p. 3 – 8.

DAM, J. C. van; HUYGEN, J.; WESSELING, J. G.; FEDDES, R. A.; KABAT, P., WALSUM, P. E. V.; GROENENDIJK, P.; DIEPEN, C. A. van. 1997. **Theory of SWAP version 2.0 ; simulation of water flow, solute transport and plant growth in the soil – water – atmosphere – plant environment**. Wageningen: Wageningen Agricultural University / DLO. 167 p.

DAM, J. C. van. 2000. **Field-scale water flow and solute transport : SWAP model concepts, parameter estimation and case studies**. Wageningen: Wageningen Agricultural University. 167 p. PhD thesis.

DI PIETRO, L.; RUY, S.; CAPOWIEZ, Y. 2003. Predicting preferential water flow in soils by traveling-dispersive waves. **Journal of Hydrology**. n. 278, p. 64 – 75.

DIRKSEN, C. 1996. **Soil physics measurements**. Wageningen, Wageningen Agricultural University. n.p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, Rome. FAO, n.24.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. 1979. Yield response to water. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, Rome, FAO, n.33.

DOTTO, C. R. D. 1990. **Consumo de água e produtividade da cultura do arroz (*Oryza sativa* L.) sob três sistemas de irrigação**. Santa Maria, UFSM. 84 p. Dissertação (Mestrado).

DUARTE, S.N. 1996. **Modelo para avaliação de desempenho de sistemas de drenagem subterrânea e cálculo de espaçamento de drenos**. Viçosa, UFV. 143 p. Tese (Doutorado).

DUKE, H. R. 1972. Capillary properties of soils - influence upon specific yield. **Transactions of ASAE**, p. 688 – 691.

DUKE, H. R. 1973. **Drainage design based upon aeration**. Fort Collins, CSU. Hydrology Paper, n. 61.

DUMM, Lee. 1954. Drain-spacing formula : new formula for determining depth and spacing of subsurface drains in irrigated lands. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 35, n.10, p.726 – 730.

EBERHARDT, D. S. 1994. Consumo de água em lavoura de arroz irrigado sob diversos métodos de preparo do solo. **Agropecuária Catarinense**, v.7, n.1, p. 51 – 53.

EL-SADEK, A.; FEYEN, J.; BERLAMONT, J. 2001. Comparison of models for computing drainage discharge. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 127, n. 6, p. 363 – 369.

EMBRAPA. 1999. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília.

FEDDES, R. A.; KABAT, P.; BAKEL, P. T. van.; BRONSWIJK, J.; HALBERTSMA J. 1988. Modeling soil water dynamics in the unsaturated zone - state of the art. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n.100, p. 69 – 111.

FEDDES, R.A.; KOOPMANS, R.W. R.; DAM, J. C. van. 1997. **Agrohydrology**. Wageningen: Wageningen Agricultural University. v.p.

FEDDES, R.A.; KOWALIK, P.J.; ZARADNY, H. 1978. **Simulation of field water use and crop yield**. Wageningen, PUDOC. 189 p.

FEDDES, R.A.; KOWALIK, P.J.; KOLINSKA-MALINKA, K.; ZARADNY, H. 1976. Simulation of field water uptake plants using a soil water dependent root extraction function. **Journal of Hydrology**, n. 31, p. 13 – 26.

FEDDES, R. A.; LENSELINK, K. J. Evapotranspiration. IN : RITZEMA, H. P. 1994. **Drainage principles and applications**. 2. ed. Wageningen: ILRI. p: 145 – 73.

FERNANDES, H. C.; HAMAKAWA, P. J.; LANÇAS, K. P. 2002. Metodologia e cálculo dos dias trabalháveis com máquinas florestais na região de Botucatu, SP. **Engenharia Agrícola**, v.22, n.1, p. 68 – 74.

FIETZ, C. R.; CAUDURO, F. A.; BELTRAME, L. S. 1986. Modelo de cálculo de demanda hídrica em lavoura de arroz irrigado (*Oriza Sativa, L*). In: CONIRD, 7. Brasília, **Anais...** Brasília: ABID, 1986. v.1. p. 155 – 167.

FIETZ, C. R. 1987. **Demanda hídrica em lavoura de arroz irrigado (*Oryza sativa L.*) em planossolo**. Porto Alegre: IPH/UFRGS. 210 p. Dissertação (Mestrado).

FIPPS, G; SKAGGS, R. W.; NIEBER, J. L. 1986. Drains as a boundary condition in finite elements. **Water Resources Research**, n. 22, p. 1613 – 21.

FIPPS, G.; SKAGGS, R. W. 1989. Influence of slope on subsurface drainage of hillsides. **Water Resources Research**, n. 25, p. 1717 – 26

FLURY, M.; FLÜHLER, H.; JURY, W. A.; LEUENBERGER, J. 1994. Susceptibility of soil to preferential flow of water : a field study. **Water Resources Research**, n. 30, p. 1445 – 54.

FREITAS, P. L. 1978. **Ensaio de drenagem em planossolo do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: IPH/UFRGS. 123 p. Dissertação (Mestrado).

GARCIA, L. A.; MANGUERRA, H. B.; GATES, T. K. 1995. Irrigation-Drainage design and management model : development. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 121. n. 1. p. 71 – 82.

GENUCHTEN, M. Th. van. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.44, p.892 – 898.

GENUCHTEN, M. Th. van; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. 1991. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions for unsaturated soils**. Riverside, California: U. S. Salinity Laboratory. 85 p.

GENUCHTEN, M. Th. van; SUDICKY, E. A. 1999. Recent advances in vadose zone flow and transporting modeling. In : Parlange, M. B.; Hopmans, J. W. (Eds). **Vadose zone hydrology : cutting across disciplines**. New York: Oxford University Press, p.155 – 193.

GERMANN, P. F.; BEVEN, K. 1985. Kinematic wave approximation to infiltration into soils with sorbing macropores. **Water Resources Research**, n. 21, p. 990 – 996.

GERKE, H. H.; GENUCHTEN, M. Th. van. 1993. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. **Water Resources Research**. v. 29, n.2, p. 305 – 319.

GOLDENFUM, J. A. 1995. **Soil water flow processes : a critical evaluation using numerical simulations and lysimeter data**. Londres: Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London. 314 p. PhD thesis.

GOMES, A.; PAULETTO, E.; PETRINI, J. A.; SOUSA, R. 1999. Manejo da água em arroz irrigado : implicações e recomendações técnicas. In: Gomes, A. & Pauletto, E. (Ed.). **Manejo do solo e da água em solos de várzea**. Pelotas: Embrapa. p. 163 – 200.

GONDIM, L. A. P. 1980. **Influência da compactação do solo na condutividade hidráulica saturada de planossolos da Unidade de Mapeamento Vacacaí**. Porto Alegre: IPH/UFRGS. 47 p. Dissertação (Mestrado).

GRANDO, Marinês Zandavali , coord. 1996. **Agropecuária do Rio Grande do Sul 1980 - 1985 : a caminho da eficiência ?** Porto Alegre: Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser. 160 p.

GRECO, R. 2002. Preferential flow in macro porous swelling soil with internal catchment : model development and applications. **Journal of Hydrology**, n. 269, p. 150 – 168.

GROEN, K. P. 1997. **Pesticide leaching in polders : field and model studies on cracked clays and loamy sand**. Wageningen: Wageningen Agricultural University. 296 p. PhD thesis.

GUITJENS, J. C.; LUTHIN, J. N. 1965. Viscous model study of drain spacing on sloping land and comparasion with matematical solution. **Water Resources Research**, n.1, p. 523 – 30.

GUPTA, G. P.; PRASHER, S. O.; CHIENG, S. T.; MATHUR, I. N. 1993. Application of DRAINMOD under semi-arid conditions. **Agricultural Water Management**, n. 24, p. 63 – 80.

HARVARD, P. L.; PRASHER, S. O.; BONNELL, R. B.; MADANI, A. 1995. LINKFLOW, a water flow computermodel for water table management : Part I. model development. **Transactions of the ASAE.**, v.38 , n.2, p. 481 – 88.

HATHOOT, H. M. 1998. Theory of pipe drainage assisted by mole drainage. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 124, n. 2, p. 102 – 107.

HAVERKAMP, R.; VAUCLIN, M.; TOUMA, J.; WIERENGA, P. J.; VACHAUD, G. 1977. A comparasion of numerical simulation models for one-dimensional infiltration. **Journal of American Society of Soil Science**, n. 41, p. 285 – 294.

HEDSTROM, W. E.; COREY, A. T.; DUKE, H. R. 1971. **Models for subsurface drainage**. Hydrology Paper, Fort Collins, CSU, n. 48.

HENDRICKX, J. H. M.; VINK, N. H.; FAYINKE, T., 1986. Water requirement for irrigated rice in semi-arid region in west Africa. **Agricultural Water Management**, p. 75 – 90.

HENDRIKS, R.; OOSTINDIE, K.; HAMMINGA, P. 1999. Simulation of bromide tracer and nitrogen transport in a cracked clay soil with the FLOCR/ANIMO model combination. **Journal of Hydrology**, n. 215, p. 94 – 115.

HILLEL, Daniel. 1970. **Solo e água** : fenômenos e princípios físicos. Porto Alegre: UFRGS/Faculdade de Agronomia / Departamento de Solos.

HOMAEI, Mehdi. 1999. **Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress**. Wageningen: Wageningen Agricultural University. 173 p. PhD thesis.

HOORN, J. W. van.; MOLEN, W. H. van. Drainage of sloping lands. IN: RIDER, N.A. et al. 1979. **Drainage principles and applications**. Wageningen: ILRI. v.4, p.327 – 329.

IRGA. 1996. **Arroz Irrigado** : Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil. 3.ed. Cachoeirinha. 88 p.

ISLAM, M. J.; MOLLA, H.R. 2001. Economic weeding method for irrigated rice production in Bangladesh. **Agricultural Water Management**. p. 267 – 276.

JANSSEN, P. H. M. & HEUBERGER, P. S. C. 1995. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**. n. 83, p. 55 – 66.

JARVIS, N. 1994. **The MACRO model (version 3.1). Technical description and sample simulations**. Uppsala, Sweden : Swedish University of Agricultural Sciences. 51 p.

JARVIS, N. ; LEEDS-HARRISON, P. B. 1987. Modelling water movement in drained clay soil. I. Description of the model, sample output and sensitivity analysis. **Journal of Soil Science**. n. 38, p. 487 – 498.

JAYNES, D. B. 1984. Comparison of soil-water hysteresis models. **Journal of Hydrology**. v. 75, p. 287 – 299.

JENSEN, M.D.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G., ed. 1990. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE. 332 p.

JOHNSEN, K. E.; LIU, H. H.; DANE, J. H.; AHUJA, L. R.; WORKMAN, S. R. 1995. Simulating fluctuating water tables and tile drainage with a modified root zone water quality model and a new model WAFLOWM. **Transactions of the ASAE**. v. 38 , n.1, p. 75 – 83.

KABAT, P.; BEEKMA, J. Water in the unsaturated zone. IN: RITZEMA, H. 1994. **Drainage principles and applications**. 2. ed. Wageningen: ILRI, p: 383 – 434.

KABAT, P.; BROEK , B.J. van den; FEDDES, R.A. 1992. SWACROP: a water management and crop production simulation model. **ICID Bulletin 92**, v. 41, n. 2, p. 61 – 84.

KABAT, P.; MARSHALL, B.; BROEK, B.J. van den; VOS, J.; KEULEN, H. van. 1995. **Modelling and parameterization of the soil-plant-atmosphere system**. Wageningen: Wageningen Pers. 513 p.

KHALIK, M. A. A. 1992. A spreadsheet simulation model for the flow in the unsaturated zone and subsurface drainage system. **Proceedings of the 5th International Drainage Workshop**. Lahore-Pakistan: ICID, p. 1.18 – 1.27.

KIM, S.; DELLEUR, J. W.; MITCHELL, J. K.; ENGEL, B. E.; WALKER, S. E.. 1999. Simulation of runoff in agricultural watersheds with tile drains using na extended TOPMODEL. **Transactions of the ASAE**, v. 42 , n.3, p. 639 – 650.

KLUTE, A. 1986. **Methods of soil analisys**. Part 1. Agronomy Monogr. 9 ASA – SSSA, Madison, WI.

KOOL, J. B.; PARKER, J. C. 1987. Development and evaluation of closed form expressions for hysteretic soil hydraulic properties. **Water Resources Research**, n. 23, p. 105 – 14.

KOOL, J. B.; PARKER, J. C.; GENUCHTEN, M. Th. van. 1987. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models – a review. **Journal of Hydrology**. v.91, p. 255 – 293.

KOOPMANS, R.W.; MOLEN, W. H. van. der. 1992. **Fluid mechanics and groundwaterflow**. Wageningen: Wageningen Agricultural University. v.p.

KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; DIRKSEN, C. 1994. **Elements of soil physics**. 3.ed. Amsterdam: Elsevier. 230 p.

KROES, J.C.; DAM, J. C. van; HUYGEN, J.; VERVOORT, R.W.1998. **User's guide of SWAP version 2.0**. Wageningen: Wageningen Agricultural University / DLO. 105 p.

LEEDES-HARRISON, P. B.; SPOOR, G.; GODWIN, R. J. 1982. Water flow to mole drains. **Journal of Agricultural Engineering Research**, n. 27, p. 81 – 91.

LESAFFRE, B.; ZIMMER, D. 1988. Subsurface drainage peak flows in shallow soil. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 114, n. 3. p. 387 – 406.

LEUR, D. A. Kraijenhoff van de. 1958. A study of non-steady groundwater flow with special reference to a reservoir-coefficient. **De Ingenieur**. Gravenhage, n.19, p. 87 – 94.

LIBARDI, Paulo Leonel. 1995. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: Ed. do Autor. 497 p.

LIGGETT, J. A.,1994. **Fluid Mechanics**. New York : McGraw-Hill. 495 p.

LOPES, S. I. G. 1991. **Eficiência da adubação potássica e distribuição radicular do arroz irrigado**. Porto Alegre: UFRGS. 96 p. Dissertação (Mestrado).

LORRE, E.; LESAFFRE, B. 1994. Subsurface drainage simulation models : a world – wide survey. **ICID Bulletin**, v. 43, n. 1, p. 53 – 78.

LOUZADA, J. A. 1985. **Modelos matemáticos aplicados à drenagem subsuperficial de solos agrícolas**. Porto Alegre: IPH/UFRGS. 160 p. Dissertação (Mestrado).

LOUZADA, J. A.; CAICEDO, N.; CAUDURO, F. 1985. **Modelos matemáticos aplicados à drenagem subsuperficial das várzeas do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS/IPH. 160 p. Recursos Hídricos, 15.

LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L.F.S.; LANNA, A.E. 1994. La lluvia efectiva com um factor para disminuir el consumo de agua em áreas em áreas de riego por inundación. **Ingengería Hidráulica en México**, vol. IX, n. 3, p. 35 – 39.

LUDWIG, R.; GERKE, H.; WENDROTH, O. 1999. Describing water flow in macroporous field soils using the modified macro model. **Journal of Hydrology**, n. 215, p.135 – 152.

LUTHIN, J. N.; GUITJENS, J. C. 1967. Transient solutions for drainage of sloping land. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, (IR3), p. 43 – 51.

MACHADO, S. L. de O. 2003. **Sistemas de estabelecimento do arroz irrigado, consumo de água e perdas de nutrientes na água de drenagem inicial, monitoramento de herbicidas na água da lavoura e efeitos no jundiá**. Santa Maria : UFSM. Tese (Doutorado).

MADRAMOOTOO, C. A. 1985. **An agricultural land drainage simulation model**. Montreal: McGill University. Tese (Doutorado).

MADRAMOOTOO, C. A., 1992. **Identification and analysis of drainage simulation models**. Washington, D.C.: World Bank. 22 p.

MARCOLIN, E.; MACEDO, V. R. M. 2001a. Evapotranspiração e coeficiente da cultura (Kc) de arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 2., Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: IRGA, p. 154-156.

MARCOLIN, E; MACEDO, V. R. M. 2001b. **Consumo de água em três sistemas de cultivo de arroz irrigado (Oryza sativa L)**. (não publicado).

MARTINEZ, M.A., 1989. **Modeling subsurface drainage in Clermont silt loam using the finite element technique**. West Lafayette: Purdue University. 173 p. PhD thesis.

MATZENAUER, R. et al. 2002. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para para milho e soja, no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO, 105 p. (BOLETIM FEPAGRO 10).

McDONALD, M.G.; HARBAUGH, A. W. 1988. **A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model**. USGS Techniques of Water Resources Investigations Report, Book 6, Chapter A1.

MILLER, E. E.; MILLER, R. D. 1956. Physical theory for capillary flow phenomena. **Journal Appl. Phys.**, n. 27, p.324 – 32.

MINDERHOUD, p. 1982. A model for the design of drainage in flat agricultural lands. **Agricultural Water Management**, n. 5, p. 95 – 125.

MIRANDA, J.H. 1997. **Modelo para simulação da dinâmica da água em sistemas de drenagem subterrânea e cálculo do espaçamento econômico entre drenos**. Piracicaba: ESALQ. 89 p. Tese (Mestrado).

MOHAN, S; ARUMUGAM, N. 1994. Irrigation crop coefficients to lowland rice. **Irrigation and Drainage Systems**, n.8, p.159 – 176.

MOLEN, W. H. van der; WESSELING, J. 1991. A solution in closed form and a series solution to replace the tables for the thickness of the equivalent layer in Hooghoudt's drain spacing formula. **Agricultural Water Management**, Amsterdam. v. 19, p.1 – 16.

MOODY, W. T. 1966. Nonlinear differential equation of drain spacing. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, (IR2), p.1 – 9.

MUALEM, Y. 1974. A conceptual model of hysteresis. **Water Resources Research**, n.10, p.514 – 520.

MUALEM, Y. 1976a. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**. v. 12, n.3, 513 – 522.

MUALEM, Y. 1976b. Hysteretical models for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**. v.12, n.6, 1248 – 1254.

MUALEM, Y. 1984. A modified dependent-domain theory of hysteresis. **Soil Science**. v. 137, n. 5, 283 – 291.

MUALEM, Y.; DAGAN, G. 1975. A dependent domain model of capillary hysteresis. **Water Resources Research**, n. 1, p. 452 – 460.

MULTIMPEX. (199_). **Dotação e uso dos solos, pedologia e dotação hídrica para o arroz irrigado**. Porto Alegre : SPO, CRH, FRH. Anexo 5. Não publicado.

NIEBER, J. L.; FEDDES, R. A. 1999. Solutions for combined saturated and unsaturated flow. In : Skaggs, R. W. (Ed.); Schilfgaard, J. van (Ed.). **Agricultural drainage**. Madison: American Society of Agronomy. p. 145 – 212.

NOVAK, V.; SIMUNEK, J.; GENUCHTEN, M. Th. van. 2000. Infiltration of water into soil with cracks. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 126, n.1, p. 41 – 47.

ODHIAMBO, L. O.; MURTY, V.V.N. 1996. Modeling water balance components in relation to field layout in lowland paddy fields. I. Model development. **Agricultural Water Management**, n. 30, p. 185 – 199.

OLIVEIRA, L. F. C. et al. 2000. Estimativa da condutividade hidráulica do solo não-saturado de um podzólico vermelho-amarelo por diferentes metodologias. **Engenharia Rural**, v.11, n.2, p. 1 – 13.

OOSTERBAAN, R. J. 1992. **SALTMOD User's Manual** (draft). Wageningen: ILRI.

OOSTERBAAN, R. J. ; NIJLAND, H. J. Determining saturated hydraulic conductivity. IN: RITZEMA, H. 1994. **Drainage principles and applications**. 2. ed. Wageningen: ILRI. p: 435 – 476.

ORTIZ, N. V.; DUKE, H. R.; SUNADA, D. K.; McWHORTER, D. B. 1978. Artificial ground-water recharge with capillarity. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, (IR1), p. 79 – 93.

PANDEY, R. S.; BHATTACHARYA, A. K.; SINGH, O. P.; GUPTA, S. K. 1992. Drawdown solutions with variable drainable porosity. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, n.118, p. 382 – 396.

PARANHOS, J. T. 1989. **Parâmetros morfofisiológicos de três cultivares de arroz (*Oryza Sativa L.*)**. Santa Maria: UFSM. 123 p. Dissertação (Mestrado).

PARLANGE, J. -Y. 1976. Capillary hysteresis and relationship between drying and wetting curves. **Water Resources Research**, v.12, n.2, p. 224 – 228.

PAULO, A. M.; PEREIRA, L. A.; TEIXEIRA, J.L.; PEREIRA, L.S. 1995. Modelling paddy rice irrigation. In : Pereira, L.S. (Ed.); Broek, B.J. van den. (Ed.); Kabat, P. (Ed.); Allen , R.G. (Ed.). **Crop-Water-Simulation Models in Practice**. Wageningen. p. 287 – 302.

PEÑA, Y. A., GOMES, A., DIAS, A. D., 1995. **Avaliação preliminar do comportamento do sistema radicular de cultivares de arroz irrigado testadas sob diferentes sistemas de cultivo**. In: Reunião da cultura do arroz irrigado, 21, Porto Alegre: IRGA. p. 143 – 46.

PEREIRA, L.A., 1989. **Gestão da rega do arroz**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa / Instituto Superior de Agronomia. 201 p. Tese (Doutorado).

PREUSSLER G. S.; CAUDURO, F. A.; BELTRAME, L. F. S. 1982. Balanço hídrico da cultura do arroz em Planossolo da Unidade Pelotas. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 6. Belo Horizonte, 1982. **Anais...** Belo Horizonte: ABID.

PREVEDELLO, Celso Luiz. 1996. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Ed. do Autor. 446 p.

RAM, Sewa; CHAUHAN, H. S. 1987. Analytical and experimental solutions for drainage of sloping lands with time-varying recharge. **Water Resources Research**, n. 23, p.1090 – 1096.

RAES, D.; FEYEN, J. 1995. Water use in rice schemes in the Senegal river Delta and Valley. **Irrigation and Drainage Systems**, n. 9, p. 117 – 128.

REICHARDT, Klaus. 1996. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2. ed. Piracicaba: USP/ESALQ. 513 p.

REMSON, I.; HORNBERGER, G.; MOLZ, F. 1971. **Numerical methods in subsurface hydrology**. New York; Wiley – Interscience. 389 p.

REYES, M. R. et al. 1993. GLEAMS hydrology submodel modified for shallow water table conditions. **Transaction of the ASAE**. v. 36 , n.6, p. 1771 – 1778.

RIGATTO, Paulo. 1992. **Viabilidade econômica de sistemas de produção para regiões de várzeas**. Porto Alegre: UFRGS - Curso de Pós-Graduação em Economia Rural. 218 f. Dissertação (Mestrado).

RITCHIE, J.T., 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, n.8, p. 1204 – 1213.

RITZEMA, H. Subsurface flow to drains. IN : RITZEMA, H. 1994. **Drainage principles and applications**. 2. ed. Wageningen: ILRI. p: 263 – 304.

ROBAINA, A. D. 1992. **Estudo experimental e de simulação numérica da aplicação da água na produção das culturas**. São Carlos: USP. 144 p. Tese (Doutorado).

ROEL, A.; BLANCO, F. 1997. **Consumo de agua en diferentes manejos del riego**. INIA Treinta y Tres – Estación Experimental del Este. ARROZ – Resultados Experimentales, 1996 – 97. 23 p.

SABBAGH, G. J.; FOUSS, J. L.; BENGSTON, R. L. 1993. Comparison of EPIC – WT and DRAINMOD simulated performance of land drainage systems. **Transactions of the ASAE**. v. 36, n.1, p. 73 – 79.

SACHET, Z. P. 1977. **Consumo de água de duas variedades de arroz (*Oryza Sativa L*) em três tratamentos de irrigação**. Porto Alegre: IPH/UFRGS. 99 p. Dissertação (Mestrado).

- SANDS, G. R.; GADDIS, R. J. 1985. LANDRAIN: a computer-aided-design (CAD) program for subsurface drainage systems. **ASAE paper**, St. Joseph, MI., n. 85, p.25 – 56.
- SANTOS JÚNIOR, A. G. dos ; YOUNGS, E. G. 1969. A study of the specific yield in land-drainage situations. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n.8, p.59 – 81.
- SCHILFGAARDE, J. van. 1963. Design of tile drainage for falling water tables. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, (IR2), p. 1 – 11.
- SCHMID, Paul; LUTHIN, James. 1964. The drainage of sloping lands. **Journal of Geophysical Research**, n. 69, p. 1525 –1529.
- SCHUKLA, K. N.; CHAUHAN, H. S.; SRIVASTAV, V. K. 1990. Finite difference solution of Boussinesq unsteady-state equation for highly sloping lands. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, n. 116, p. 107 – 113.
- SCORZA JÚNIOR, R. P. 2002. **Pesticide leaching in macroporous clay soils** : field experiment and modeling. Wageningen: Wageningen Agricultural University. 234 p. PhD thesis.
- SCOTTER, D. R., HENG, L. K., HORNE, D. J., WHITE, R. E. 1990. A simplified analysis of soil water flow to a mole drain. **Journal of Soil Science**, n. 41, p.189 – 198.
- SHAH, S. B.; EDLING, R. J. 2000. Daily evapotranspiration prediction from Louisiana flooded rice field. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, n.126, p.8 – 13.
- SHIZHANG, PENG; SHOUSHENG, LI; GOULANG, XU; ZIJING, WU. 1994. New water consumption pattern of rice under water-saving irrigation. **Irrigation and Drainage Systems**, p. 97 – 108.
- SHOPSKY, N. DONEVA; E. NIKOLOV, I. 1988. Characteristics of mole drainage as a major ameliorative technique for subsurface-waterlogged soils. **Agricultural Water Management**, n.13, p. 307 – 315.

SIDDEEK, F. Z.; DILLAHA, T. A.; LOGANATHAN, G. V. 1988. Water management for lowland rice irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.14, n.3, p. 407 – 423.

SIMUNEK, J.; VOGEL, T.; GENUCHTEN, M. Th. van. 1994. **The SWMS_2D code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media**. Res. Rep. n. 132. U.S. Salinity Lab., USDA-ARS, Riverside, CA.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; GENUCHTEN, M. Th. van. 1999. **The HYDRUS_2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat and multiple solute in two-dimensional variably saturated media**. Riverside, CA :U.S. Salinity Lab., USDA-ARS.

SIMUNEK, J.; JARVIS, N.; GENUCHTEN, M. Th. van.; GÄRDENÄS, A. 2003. Review and comparison of models for describing non equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. **Journal of Hydrology**. (272) p. 14 – 35.

SINGH, K.B.; GAJRI, P.R.; ARORA, V.K. 2001. Modelling the effects of soil and water management practices on the water balance and performance of rice. **Agricultural Water Management**, n. 49, p.77 – 95.

SKAGGS, R. W. 1975. Drawdown solutions for simultaneous drainage and ET. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, (IR4), p. 279 – 291.

SKAGGS, R. W.; TANG, Yau-K. 1976. Saturated and unsaturated flow to parallel drains. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, (IR2), p. 221 – 238.

SKAGGS, R. W.; TANG, Yau-K. 1979. Effect of drain diameter, openings and envelopes on water table drawdown. **Transactions of the ASAE**, v. 22, n.2, p.326 – 333.

SKAGGS, R. W. 1980. **A water management model for artificially drained soils**. Tech. Bull. n. 267. North Carolina Agricultural Research Service, NCSU. 54 p.

SKAGGS, R. W. 1999. Drainage simulation models. In : Skaggs, R. W. (Ed.); Schilfgaard, J. van (Ed.). **Agricultural Drainage**. Madison: American Society of Agronomy. p. 469 – 500.

SMETS, S.M.P. 1997. **The effects of management on soil salinity and crop transpiration at the field level by using the agro-hydrological model SWAP93**. Wageningen: Wageningen Agricultural University. 101 p. PhD thesis.

SMITH, M. 1991. **Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO. 60 p.

SMITH, M. 1992. CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management. **Irrigation and Drainage Paper 46**. FAO. Rome. 126 p.

STROOSNIJDER, L. 1982. **Computer solutions of mathematical models describing unsaturated soil water flow**. Wageningen: Wageningen Agricultural University. 26 p.

SPOOR, G.; LEEDS-HARRISON, P. B. 1999. Nature of heavy soils and potential drainage problems. In : Skaggs, R. W. (Ed.); Schilfgaard, J. van (Ed.). **Agricultural Drainage**. Madison : American Society of Agronomy. p.1051 – 1081.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C. do; SCHNEIDER, P. 2002. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre : UFRGS. 107 p. ilustr.

SUPIT, I., HOOYER; A. A., DIEPEN, C.A. van (Eds), 1994. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Vol. 1 : Theory and algorithms. **EUR publication 15956**, Luxembourg. 146 p. Agricultural series.

TERZIDIS, George. 1968. Computational schemes for the Boussinesq equation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, (IR4), p.381 – 389.

TIMM, Luís Carlos. 1994. **Avaliação de alguns modelos matemáticos para a determinação da condutividade hidráulica de solos não-saturados**. Viçosa: UFV.143 p. Dissertação (Mestrado).

TOMAR, V. S.; O'TOOLE, J. C. 1980. Water use in lowland rice cultivation in Asia : review of evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, p. 83 – 106.

TOMASELLA, J. 1992. **Determinação da recarga natural de aquíferos através de um modelo de fluxo da zona não-saturada**. Porto Alegre: IPH/UFRGS. 87 p. Dissertação (Mestrado).

TOWNER, G.D. 1975. Drainage of groundwater resting on a sloping bed with uniform rainfall. **Water Resources Research**, n.11, p.144 – 147.

TRIPATHI, R. P.; KUSHWAHA, H. S.; MISHRA, R. K. 1986. Irrigation requirements of rice under shallow water table conditions. **Agricultural Water Management**, p.127 – 136.

TYAGI, N. K.; SHARMA, D. K.; LUTHRA, S. K. 2000. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter. **Agricultural Water Management**, p.41 – 54.

UNHANAND, K; KADIR, T. N. 1975. A theory of the combined mole-tile drain system. **Water Resources Research**, v. 11, n.1, p.111 – 119.

VAUCLIN, M; HAVERKAMP, R.; VACHAUD, G. 1979. **Resolution numerique d'une equation de diffusion non lineaire**. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.183 p.

VOS, J. A. de. 1997. **Water flow and nutrient transport in a layered silt loam soil**. Wageningen: Wageningen Agricultural University. 287 p. PhD thesis.

WATSON, K.; SARDANA, V.; CURTIS, A.; JONES, M. 1992. **Numerical analysis of one dimensional soil water systems**. Manly Vale N.S.W: The University of New South Wales. 70 p.

WEBER, L. 2000. **Consumo e qualidade da água e cultivares de arroz irrigado em diferentes sistemas de cultivo**. Santa Maria: UFSM. 52 p. Dissertação (Mestrado).

WESSELING, J. G.; KROES, J. G. METSELAAR, K. 1998. **Global sensitivity of the soil-water-atmosphere-plant (SWAP) model**. Wageningen: SC – DLO, Report 160. 70 p.

WIJK, A. L. M. van & FEDDES, R. A. 1982. A model approach to the evaluation of drainage effects. In: Land Drainage Seminar, Cambridge. **Proceedings...**, p. 131-149.

WIJK, A. L. M. van & FEDDES, R. A. 1986. Simulating effects of soil type and drainage on arable crop yield. In: Agricultural Water Management Symposium, Arnhem. **Proceedings...**, p. 97-112.

WOODING, R. A.; CHAPMAN, T. G. 1966. Groundwater flow over a sloping impermeable layer. **Journal of Geophysical Research**, n. 71, p. 2895 – 2902.

WOPOREIS, M.C.S. 1993. **Quantifying the impact of soil and climate variability on rainfed rice production**. Wageningen: Wageningen Agricultural University. 188 p. PhD thesis.

WORK GROUP SWAP. 1994. **SWAP 1993** : input instructions manual. Wageningen: Vakgroep Waterhuishouding. 66 p.

WORKMAN, S. R.; SKAGGS, R. W. 1989. Comparison of two drainage simulation models using field data. **Transactions of ASAE**, v.32 , n.6, p. 1933 – 1938.

WORKMAN, S. R.; SKAGGS, R. W. 1990. PREFLO: a water management model capable of simulating preferential flow. **Transactions of ASAE**, v.33, n.6, p.1939 – 1948.

YOUNGS, E. G. 1983. The contribution of physics to land drainage. **Journal of Soil Science**. n. 34, p. 1 – 21.

YOUNGS, E. G. 1985. An analysis of the effect of the vertical furring in mole-drained soils on drain performances. **Agricultural Water Management**, n. 9, p. 301 – 311.

YOUNGS, E. G.; LEEDES-HARRISON, P. B.; CHAPMAN, J. M. 1989. Modelling water-table movement in flat low-lying lands. **Hydrological Processes**. v.3, 301 – 315.

ZARADNY, Henryk. 1993. **Groundwater flow in saturated and unsaturated soil**. Rotterdam: Balkema. 279 p.

Anexo A1 – Solução numérica da equação de Richards

Aplicando-se a equação de Richards discretizada (equação 3.2) para cada nó, resulta no sistema de equações apresentado a seguir em notação matricial.

$$\begin{bmatrix} \beta_1 & \gamma_1 & & & & \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & & & \\ & \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & & \\ & & & & \alpha_{n-1} & \beta_{n-1} & \gamma_{n-1} \\ & & & & \alpha_n & \beta_n & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1^{j+1,p} \\ h_2^{j+1,p} \\ h_3^{j+1,p} \\ \\ h_{n-1}^{j+1,p} \\ h_n^{j+1,p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \\ f_{n-1} \\ f_n \end{bmatrix} \quad (\text{A1.1})$$

□ Aplicação da equação aos nós internos ($2 \leq i \leq n-1$)

Os coeficientes (α_i , β_i e γ_i) e os termos independentes (f_i) são dados pelas equações que seguem.

$$\alpha_i = -\frac{\Delta t^j}{\Delta z_i \Delta z_u} K_{i-1/2}^j \quad (\text{A1.2})$$

$$\beta_i = C_i^{j+1,p-1} + \frac{\Delta t^j}{\Delta z_i \Delta z_u} K_{i-1/2}^j + \frac{\Delta t^j}{\Delta z_i \Delta z_l} K_{i+1/2}^j \quad (\text{A1.3})$$

$$\gamma_i = -\frac{\Delta t^j}{\Delta z_i \Delta z_l} K_{i+1/2}^j \quad (\text{A1.4})$$

$$f_i = C_i^{j+1,p-1} h_i^{j+1,p-1} + \theta_i^j - \theta_i^{j+1,p-1} + \frac{\Delta t^j}{\Delta z_i} (K_{i-1/2}^j - K_{i+1/2}^j) - \Delta t^j W_i^j \quad (\text{A1.5})$$

□ Aplicação da equação ao nó superior ($i = 1$)

Neste caso o nó $i-1$ passa a ser considerado na superfície do solo.

- Condição de contorno definida pelo fluxo (q_{sur})

O lado direito da equação discretizada é reescrito a seguir.

$$\frac{\Delta t^j}{\Delta z_1} \left[-q_{sur} - K_{1/2}^j \left(\frac{h_1^{j+1,p} - h_2^{j+1,p}}{\Delta z_l} \right) - K_{1/2}^j \right] - \Delta t^j W_1^j \quad (\text{A1.6})$$

Os coeficientes (β_1 e γ_1) e o termo independente (f_1) são dados pelas equações que seguem.

$$\beta_1 = C_1^{j+1,p-1} + \frac{\Delta t^j}{\Delta z_1 \Delta z_l} K_{1/2}^j \quad (\text{A1.7})$$

$$\gamma_1 = -\frac{\Delta t^j}{\Delta z_1 \Delta z_l} K_{1/2}^j \quad (\text{A1.8})$$

$$f_1 = C_1^{j+1,p-1} h_1^{j+1,p-1} + \theta_1^j - \theta_1^{j+1,p-1} - \frac{\Delta t^j}{\Delta z_1} (q_{sur} + K_{1/2}^j) - \Delta t^j W_1^j \quad (\text{A1.9})$$

- Condição de contorno definida pela pressão (h_{sur})

O lado direito da equação discretizada é reescrito a seguir.

$$\frac{\Delta t^j}{\Delta z_1} \left[K_{1/2}^j \left(\frac{h_{sur} - h_1^{j+1,p}}{\Delta z_u} \right) + K_{1/2}^j - K_{1/2}^j \left(\frac{h_1^{j+1,p} - h_2^{j+1,p}}{\Delta z_l} \right) - K_{1/2}^j \right] - \Delta t^j W_1^j \quad (\text{A1.10})$$

Os coeficientes (β_1 e γ_1) e o termo independente (f_1) são dados pelas equações que seguem.

$$\beta_1 = C_1^{j+1,p-1} + \frac{\Delta t^j}{\Delta z_1 \Delta z_l} K_{1/2}^j + \frac{\Delta t^j}{\Delta z_1 \Delta z_u} K_{1/2}^j \quad (\text{A1.11})$$

$$\gamma_1 = -\frac{\Delta t^j}{\Delta z_1 \Delta z_l} K_{1/2}^j \quad (\text{A1.12})$$

$$f_1 = C_1^{j+1,p-1} h_1^{j+1,p-1} + \theta_1^j - \theta_1^{j+1,p-1} + \frac{\Delta t^j}{\Delta z_1} (K_{1/2}^j - K_{1/2}^j) +$$

$$\frac{\Delta t^j}{\Delta z_1 \Delta z_u} K_{1/2}^j h_{sur} - \Delta t^j - W_1^j \quad (\text{A1.13})$$

- Aplicação da equação ao nó inferior ($i = n$)

Neste caso o nó $i+1$ passa a ser considerado na base do último compartimento.

- Condição de contorno definida pelo fluxo (q_{bot})

O lado direito da equação discretizada é reescrito a seguir.

$$\frac{\Delta t^j}{\Delta z_n} \left[K_{n-1/2}^j \left(\frac{h_{n-1}^{j+1,p} - h_n^{j+1,p}}{\Delta z_u} \right) + K_{n-1/2}^j + q_{bot} \right] - \Delta t^j W_n^j \quad (\text{A1.14})$$

Os coeficientes (α_n e β_n) e o termo independente (f_n) são dados pelas equações que seguem.

$$\alpha_n = -\frac{\Delta t^j}{\Delta z_n \Delta z_u} K_{n-1/2}^j \quad (\text{A1.15})$$

$$\beta_n = C_n^{j+1,p-1} + \frac{\Delta t^j}{\Delta z_n \Delta z_u} K_{n-1/2}^j \quad (\text{A1.16})$$

$$f_n = C_n^{j+1,p-1} h_n^{j+1,p-1} + \theta_n^j - \theta_n^{j+1,p-1} + \frac{\Delta t^j}{\Delta z_n} (K_{n-1/2}^j + q_{bot}) - \Delta t^j W_n^j \quad (\text{A1.17})$$

- Condição de contorno definida pela pressão (h_{bot})

O lado direito da equação discretizada é reescrito a seguir.

$$\frac{\Delta t^j}{\Delta z_n} \left[K_{n-1/2}^j \left(\frac{h_n^{j+1,p} - h_n^{j+1,p}}{\Delta z_u} \right) + K_{n-1/2}^j - K_{n+1/2}^j \left(\frac{h_n^{j+1,p} - h_{bot}}{\Delta z_l} \right) - K_{n+1/2}^j \right] - \Delta t^j W_n^j \quad (A1.18)$$

Os coeficientes (α_n e β_n) e o termo independente (f_n) são dados pelas equações que seguem.

$$\alpha_n = -\frac{\Delta t^j}{\Delta z_n \Delta z_u} K_{n-1/2}^j \quad (A1.19)$$

$$\beta_n = C_n^{j+1,p-1} + \frac{\Delta t^j}{\Delta z_n \Delta z_u} K_{n-1/2}^j + \frac{\Delta t^j}{\Delta z_n \Delta z_l} K_{n+1/2}^j \quad (A1.20)$$

$$f_n = C_n^{j+1,p-1} h_n^{j+1,p-1} + \theta_n^j - \theta_n^{j+1,p-1} + \frac{\Delta t^j}{\Delta z_n} (K_{n-1/2}^j - K_{n+1/2}^j) +$$

$$\frac{\Delta t^j}{\Delta z_n \Delta z_l} K_{n+1/2}^j h_{bot} - \Delta t^j W_n^j \quad (A1.21)$$

Anexo A2 – Parâmetros físicos dos solos

Tabela A2.1 – Parâmetros físicos do solo da área experimental de irrigação

Porosidade (%)	39,0									
Condutividade hidráulica saturada de A (m/d)	0,153									
Espessura do horizonte A (m)	0,75									
Condutividade hidráulica saturada de B (m/d)	Impermeável*									
Espessura do horizonte B (m)	> 2									
Curva de retenção [h (cm) * θ (cm ³ .cm ⁻³)]	60	100	200	300	500	700	1000	2000	3000	
	0,38	0,36	0,34	0,33	0,31	0,29	0,26	0,25	0,24	
Parâmetros da equação de van Genuchten	θ_r		n	α_d		α_w		m		
	(cm ³ .cm ⁻³)		(-)	(cm ⁻¹)		(cm ⁻¹)		(-)		
	0,05049		1,1794	0,01326		0,02652		0,1521		

* não ocorreu fluxo através da amostra após 72 h no permeâmetro

Tabela A2.2 – Parâmetros físicos do solo da área experimental de drenagem

Porosidade (%)	36,0									
Condutividade hidráulica saturada de A (m/d)	0,334									
Espessura do horizonte A (m)	0,85									
Condutividade hidráulica saturada de B (m/d)	0,0027									
Espessura do horizonte B (m)	\cong 2									
Curva de retenção [h (cm) * θ (cm ³ .cm ⁻³)]	100		300		1000		3000			
	0,29		0,25		0,22		0,20			
Parâmetros da equação de van Genuchten	θ_r		n	α_d		α_w		m		
	(cm ³ .cm ⁻³)		(-)	(cm ⁻¹)		(cm ⁻¹)		(-)		
	0,15498		1,32557	0,08540		0,1708		0,2456		

Tabela A2.3 – Parâmetros físicos do solo considerado na simulação com gradiente unitário

Porosidade (%)	42,0									
Condutividade hidráulica saturada (m/d)	0,0117									
Parâmetros da equação de van Genuchten	θ_r		n	α_d		α_w		m		
	(cm ³ .cm ⁻³)		(-)	(cm ⁻¹)		(cm ⁻¹)		(-)		
	0,010		1,224	0,0118		0,0236		0,183		

Anexo A3 – Datos climáticos

Tabela A3.1 – Precipitação e evaporação no período que compreende a safra 96/97

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Setembro 1996	1	0,0	2,0	1,7
	2	0,0	3,8	2,3
	3	13,0	1,5	0,8
	4	0,0	3,8	3,1
	5	0,0	4,6	3,3
	6	0,0	3,5	2,6
	7	7,8	2,6	2,4
	8	6,1	2,5	1,0
	9	0,0	3,9	2,6
	10	0,0	3,9	2,8
	11	0,0	4,0	3,0
	12	0,0	3,6	2,5
	13	0,0	3,9	2,1
	14	0,0	4,8	2,7
	15	6,5	2,8	2,6
	16	1,8	1,5	1,4
	17	0,0	3,8	3,2
	18	0,0	4,7	3,4
	19	0,0	3,7	2,9
	20	0,0	4,1	2,9
	21	0,0	4,2	2,7
	22	11,7	1,1	1,1
	23	1,0	1,2	1,1
	24	10,9	2,0	1,7
	25	10,3	1,9	1,1
	26	30,2	2,4	0,8
	27	18,0	0,8	0,4
	28	0,0	1,6	0,7
	29	0,0	2,5	1,6
	30	2,0	4,0	1,7

Cont. Tabela A3.1

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Outubro 1996	1	0,0	4,0	2,5
	2	3,3	1,9	0,6
	3	0,0	3,5	1,4
	4	0,0	5,2	2,1
	5	0,0	3,4	3,0
	6	0,0	4,7	2,8
	7	0,0	4,5	3,6
	8	0,0	6,4	3,2
	9	4,0	2,8	2,7
	10	19,7	1,4	0,4
	11	0,0	5,0	2,6
	12	0,0	3,9	2,1
	13	53,5	2,6	1,4
	14	2,5	3,4	0,7
	15	0,0	3,4	2,2
	16	0,0	5,0	2,9
	17	0,0	5,3	3,0
	18	23,3	4,9	1,5
	19	3,8	2,4	1,8
	20	0,0	2,1	2,1
	21	25,8	4,4	3,3
	22	6,3	1,8	1,4
	23	1,6	4,4	2,7
	24	24,2	3,2	1,9
	25	0,0	3,8	2,1
	26	0,0	4,0	1,8
	27	0,0	5,8	3,1
	28	0,0	4,8	3,4
	29	0,0	5,7	2,4
	30	0,0	4,3	2,9
	31	2,0	3,9	2,3

Cont. Tabela A3.1

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Novembro 1996	1	2,3	2,9	1,8
	2	2,5	2,8	1,4
	3	0,5	1,7	1,8
	4	0,0	5,9	3,9
	5	0,0	5,4	3,9
	6	0,0	5,9	3,4
	7	16,6	5,3	2,8
	8	0,0	5,2	2,2
	9	34,0	4,8	2,3
	10	0,7	2,8	1,9
	11	0,0	5,8	3,1
	12	0,0	4,7	3,1
	13	0,2	4,0	2,0
	14	0,0	4,6	3,2
	15	31,0	4,3	2,0
	16	2,4	2,2	0,9
	17	0,0	4,9	2,7
	18	0,0	5,7	3,9
	19	0,0	4,8	3,1
	20	0,0	5,2	3,0
	21	0,0	5,8	3,8
	22	0,0	4,8	3,1
	23	0,5	4,5	3,7
	24	0,0	4,8	3,2
	25	0,7	4,6	3,4
	26	0,0	5,4	3,0
	27	0,0	5,5	3,7
	28	0,0	5,6	3,6
	29	0,0	5,9	3,2
	30	4,0	5,5	3,1

Cont. Tabela A3.1

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Dezembro 1996	1	0,0	5,6	3,0
	2	0,0	4,8	3,4
	3	0,0	5,4	3,6
	4	0,0	5,8	3,1
	5	1,3	2,0	1,9
	6	35,9	3,5	1,2
	7	0,0	5,8	3,2
	8	0,0	5,4	3,4
	9	0,0	5,2	3,9
	10	6,1	2,4	1,0
	11	1,8	1,4	1,0
	12	19,0	3,7	1,7
	13	4,7	1,8	1,6
	14	0,0	5,0	3,1
	15	0,0	4,8	3,0
	16	10,5	5,7	3,0
	17	0,0	4,7	3,0
	18	0,0	5,8	3,9
	19	13,0	4,7	2,0
	20	0,0	3,0	2,0
	21	0,0	3,3	1,8
	22	0,0	5,4	2,4
	23	0,0	4,9	2,5
	24	0,0	4,5	3,0
	25	0,0	4,8	2,9
	26	0,0	6,0	3,1
	27	0,0	5,8	3,5
	28	0,0	5,7	3,7
	29	0,0	5,9	3,0
	30	0,0	6,4	3,4
	31	0,0	5,9	3,2

Cont. Tabela A3.1

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Janeiro 1997	1	0,0	5,9	3,3
	2	0,0	5,6	3,1
	3	0,0	5,9	3,7
	4	14,5	5,9	3,1
	5	0,0	5,2	3,9
	6	0,0	5,8	3,2
	7	0,0	5,5	3,6
	8	4,8	5,8	3,8
	9	2,0	4,2	3,0
	10	0,0	5,9	3,3
	11	0,0	5,5	3,6
	12	0,0	5,8	3,7
	13	43,6	5,8	3,0
	14	1,0	5,8	3,3
	15	0,0	5,8	3,1
	16	0,0	6,0	3,9
	17	0,0	5,7	3,8
	18	27,0	5,9	3,3
	19	2,7	2,9	0,8
	20	0,0	6,8	3,0
	21	0,0	6,4	3,5
	22	0,0	6,3	3,2
	23	0,5	3,4	2,4
	24	0,0	5,3	3,6
	25	0,0	5,5	3,6
	26	0,0	5,6	3,0
	27	0,3	4,0	2,6
	28	10,7	5,3	3,2
	29	18,3	5,4	3,4
	30	18,6	2,0	1,4
	31	0,3	3,0	1,3

Cont. Tabela A3.1

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Fevereiro 1997	1	2,6	2,6	1,5
	2	38,0	2,8	1,3
	3	1,0	4,8	3,1
	4	0,6	4,3	2,4
	5	3,0	4,8	2,9
	6	3,5	2,9	2,0
	7	0,0	3,8	2,4
	8	0,0	4,2	2,6
	9	0,0	5,0	3,2
	10	3,2	4,9	3,9
	11	0,3	4,7	2,8
	12	3,0	2,8	1,7
	13	0,0	4,8	2,7
	14	0,0	3,9	2,9
	15	0,0	4,7	3,0
	16	0,0	5,0	3,0
	17	1,3	3,0	1,9
	18	1,0	3,7	2,1
	19	13,4	4,3	2,4
	20	0,0	4,2	2,7
	21	6,7	4,8	3,7
	22	0,4	2,8	1,1
	23	12,0	1,8	0,9
	24	21,0	1,3	0,6
	25	0,0	4,8	2,0
	26	0,0	4,5	2,2
	27	0,0	4,4	2,8
	28	3,7	5,1	3,0

Cont. Tabela A3.1

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Março 1997	1	0,0	2,4	3,0
	2	0,0	3,7	2,0
	3	30,5	3,4	1,4
	4	1,3	3,4	2,2
	5	24,9	2,3	1,1
	6	0,0	4,7	2,5
	7	0,0	4,7	2,9
	8	0,0	5,1	3,7
	9	0,0	5,8	3,2
	10	0,0	5,0	3,4
	11	2,7	5,5	3,5
	12	0,0	5,8	3,0
	13	7,8	2,4	1,8
	14	0,0	5,5	3,1
	15	0,0	4,9	3,3
	16	0,0	2,9	2,6
	17	0,0	4,8	3,7
	18	0,0	5,4	3,4
	19	0,0	5,9	3,4
	20	0,0	5,5	3,2
	21	0,0	5,6	3,3
	22	0,0	5,5	3,4
	23	0,0	4,4	3,4
	24	0,0	5,7	3,9
	25	0,0	4,1	2,9
	26	0,0	4,1	3,4
	27	0,0	4,8	3,8
	28	0,0	5,0	3,0
	29	0,0	4,5	3,3
	30	0,0	4,6	3,1
	31	0,0	4,9	3,1

Tabela A3.2 – Precipitação e evaporação no período que compreende a safra 97/98

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Setembro 1997	1	0,0	4,8	3,3
	2	2,7	1,8	1,5
	3	0,0	3,0	1,2
	4	0,0	2,7	1,9
	5	1,2	1,4	1,3
	6	0,0	2,0	1,5
	7	0,0	2,3	2,2
	8	6,3	1,9	1,6
	9	11,4	3,5	1,5
	10	0,0	3,0	3,0
	11	0,0	4,3	2,1
	12	22,1	2,2	1,2
	13	33,7	4,9	0,3
	14	0,0	3,6	2,1
	15	0,0	4,5	3,5
	16	0,0	3,9	2,2
	17	0,0	5,7	3,0
	18	0,0	4,3	2,2
	19	0,0	2,7	1,9
	20	0,0	1,8	1,7
	21	0,0	3,6	2,2
	22	0,0	3,7	2,2
	23	0,0	4,1	2,4
	24	0,0	4,3	3,0
	25	0,0	4,6	2,5
	26	0,0	3,3	3,0
	27	0,0	4,5	2,8
	28	0,8	1,4	1,1
	29	1,9	2,2	1,2
	30	10,5	3,7	2,3

Cont. Tabela A3.2

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Outubro 1997	1	30,8	2,6	0,7
	2	2,5	1,8	1,3
	3	0,0	4,5	2,7
	4	71,5	1,8	1,6
	5	0,0	1,1	0,7
	6	0,0	5,0	2,9
	7	0,0	5,7	3,0
	8	6,2	5,5	3,2
	9	6,7	1,3	0,8
	10	0,0	1,4	1,3
	11	0,0	4,3	2,3
	12	18,4	1,5	0,5
	13	6,2	1,0	0,7
	14	56,0	1,6	1,2
	15	0,7	1,8	1,5
	16	0,0	3,4	3,0
	17	0,0	3,4	2,7
	18	0,0	4,7	3,1
	19	0,0	4,8	3,2
	20	2,4	5,0	3,3
	21	3,6	1,4	1,4
	22	0,0	3,9	2,6
	23	0,6	4,7	2,7
	24	0,7	1,0	0,5
	25	0,0	3,6	2,0
	26	0,0	4,7	2,8
	27	3,3	5,0	3,8
	28	25,3	2,5	0,4
	29	3,2	1,9	1,8
	30	17,2	4,5	2,9
	31	6,1	1,3	0,5

Cont. Tabela A3.2

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Novembro 1997	1	0,6	3,6	1,8
	2	26,0	1,3	1,0
	3	1,0	2,3	2,0
	4	0,5	1,6	1,5
	5	2,2	3,4	1,5
	6	0,0	2,1	1,2
	7	0,0	3,2	1,6
	8	11,7	4,3	2,3
	9	1,8	2,9	1,1
	10	1,2	3,1	1,3
	11	22,7	1,8	1,6
	12	15,3	3,0	1,2
	13	1,6	2,8	1,6
	14	0,0	5,8	2,6
	15	0,0	6,3	3,1
	16	0,0	5,7	3,0
	17	0,0	5,0	3,7
	18	0,0	5,7	3,1
	19	0,0	5,8	3,5
	20	3,0	4,2	1,8
	21	0,7	3,2	3,1
	22	0,0	6,0	3,3
	23	1,7	5,2	3,1
	24	0,0	4,6	3,0
	25	15,2	5,3	3,7
	26	0,8	2,8	1,2
	27	0,0	5,4	3,8
	28	0,0	4,8	3,9
	29	0,0	4,6	3,0
	30	0,0	4,7	3,6

Cont. Tabela A3.2

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Dezembro 1997	1	0,0	3,8	2,1
	2	0,0	4,5	3,4
	3	0,0	6,3	3,8
	4	0,0	6,7	3,5
	5	0,0	6,7	3,4
	6	0,0	5,9	3,6
	7	17,2	4,2	2,8
	8	0,0	4,2	3,0
	9	0,0	4,8	3,9
	10	0,0	5,0	3,6
	11	0,0	5,7	3,3
	12	0,0	4,8	3,2
	13	4,0	4,3	2,3
	14	6,0	5,4	3,3
	15	0,0	4,8	3,2
	16	0,0	6,1	3,9
	17	0,0	4,6	3,7
	18	0,0	5,8	3,2
	19	0,0	6,4	3,1
	20	0,0	5,2	3,3
	21	0,0	4,7	3,8
	22	40,5	5,3	3,5
	23	0,5	4,0	2,7
	24	149,0	3,9	2,5
	25	0,6	4,3	2,3
	26	47,0	4,1	2,2
	27	44,2	2,4	0,8
	28	0,0	1,9	1,3
	29	9,2	4,8	2,9
	30	0,0	4,4	1,9
	31	5,3	5,6	3,5

Cont. Tabela A3.2

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Janeiro 1998	1	8,1	2,3	0,9
	2	0,0	2,9	1,9
	3	0,0	5,1	2,1
	4	0,0	5,6	2,9
	5	56,0	3,8	2,4
	6	26,6	3,0	1,1
	7	0,0	3,6	2,6
	8	0,0	5,7	3,8
	9	0,0	5,5	3,8
	10	0,0	5,6	3,1
	11	1,2	5,8	3,5
	12	9,3	5,4	1,8
	13	0,0	4,8	2,9
	14	0,4	4,0	2,2
	15	29,3	3,9	1,4
	16	3,8	2,2	1,5
	17	3,5	5,7	3,7
	18	0,0	5,0	2,9
	19	0,0	5,4	3,2
	20	0,0	5,8	3,8
	21	0,0	5,5	3,8
	22	24,5	5,7	2,0
	23	13,7	1,8	0,4
	24	4,8	2,5	1,1
	25	1,0	3,2	2,1
	26	0,0	3,8	1,1
	27	0,0	4,0	3,1
	28	2,5	5,8	3,2
	29	0,0	3,0	2,4
	30	3,0	2,8	0,9
	31	3,3	3,4	1,8

Cont. Tabela A3.2

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Fevereiro 1998	1	1,2	2,3	1,1
	2	0,3	3,7	1,7
	3	15,6	4,2	1,4
	4	0,3	3,6	2,9
	5	1,5	4,4	2,1
	6	24,4	4,7	2,2
	7	1,0	2,3	1,6
	8	0,0	4,2	2,7
	9	43,7	3,7	1,4
	10	2,0	2,7	1,5
	11	0,7	5,9	3,3
	12	0,0	4,2	2,9
	13	0,0	5,8	3,3
	14	0,0	3,4	2,8
	15	0,0	5,8	3,8
	16	0,0	5,9	3,4
	17	0,0	5,7	3,6
	18	1,3	4,5	2,3
	19	0,0	3,6	2,4
	20	0,0	3,8	2,6
	21	2,4	4,8	3,5
	22	0,0	3,7	2,8
	23	2,6	4,2	2,8
	24	0,3	2,2	1,4
	25	0,0	3,0	1,5
	26	0,8	2,9	2,7
	27	7,8	2,8	0,6
	28	42,2	3,6	1,0

Cont. Tabela A3.2

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Março 1998	1	0,0	4,3	1,7
	2	0,0	3,4	2,2
	3	0,0	5,8	2,7
	4	0,0	5,9	2,7
	5	0,0	5,0	3,5
	6	0,0	5,6	3,9
	7	0,0	5,0	2,3
	8	0,0	2,7	2,1
	9	0,0	3,5	2,4
	10	27,2	3,0	1,8
	11	4,2	3,9	2,8
	12	8,0	1,8	0,6
	13	62,4	2,8	0,6
	14	1,6	2,6	1,7
	15	0,0	3,6	2,4
	16	0,0	4,9	2,7
	17	14,8	3,7	1,3
	18	2,5	2,8	0,5
	19	0,0	2,0	0,9
	20	0,0	2,8	0,7
	21	0,0	2,6	0,6
	22	0,0	3,0	0,6
	23	0,0	3,2	1,3
	24	5,1	2,8	1,0
	25	0,0	4,2	2,6
	26	0,0	3,8	1,5
	27	2,4	1,4	1,2
	28	0,0	4,7	1,8
	29	0,0	1,4	1,6
	30	0,0	4,7	2,8
	31	0,0	4,9	2,8

Tabela A3.3 – Precipitação e evaporação no período que compreende a safra 99/00

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Setembro 1999	1	16,5	1,8	1,7
	2	11,0	1,2	2,2
	3	0,0	1,4	2,7
	4	19,0	1,0	2,7
	5	3,0	1,3	3,5
	6	0,0	2,8	3,9
	7	37,0	5,8	2,3
	8	2,1	0,9	2,1
	9	0,0	2,7	2,4
	10	0,0	3,7	1,8
	11	0,0	4,8	2,8
	12	0,0	4,0	0,6
	13	5,2	4,3	0,6
	14	15,1	1,3	1,7
	15	0,0	4,0	2,4
	16	0,0	4,6	2,7
	17	0,0	3,0	1,3
	18	0,0	4,6	0,5
	19	0,0	2,4	0,9
	20	0,0	3,8	0,7
	21	0,0	1,9	0,6
	22	0,0	5,7	0,6
	23	0,0	4,6	1,3
	24	0,0	4,2	1,0
	25	0,0	3,9	2,6
	26	0,0	2,1	1,5
	27	0,7	2,9	1,2
	28	6,8	2,8	1,8
	29	0,0	2,9	1,6
	30	0,8	2,5	2,8

Cont. Tabela A3.3

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Outubro 1999	1	41,7	2,9	1,0
	2	0,0	3,9	3,5
	3	0,0	3,5	2,9
	4	0,0	4,2	2,3
	5	0,8	3,6	3,3
	6	1,4	4,1	2,3
	7	10,5	1,2	0,7
	8	4,4	2,7	2,6
	9	0,0	2,6	2,0
	10	0,0	4,9	3,4
	11	0,0	4,9	3,5
	12	12,3	2,1	1,2
	13	55,2	2,8	0,6
	14	0,0	1,7	1,1
	15	6,6	2,5	1,7
	16	0,0	1,9	0,8
	17	0,0	4,9	2,3
	18	0,0	5,1	3,7
	19	0,0	5,0	3,9
	20	0,0	5,2	3,8
	21	0,0	5,4	3,2
	22	0,7	4,2	3,3
	23	0,0	5,5	3,9
	24	0,0	5,4	3,0
	25	1,1	3,5	2,6
	26	0,0	3,8	2,5
	27	0,0	4,8	3,5
	28	0,0	4,7	3,1
	29	0,0	4,9	3,5
	30	0,0	5,9	3,1
	31	0,0	5,8	3,7

Cont. Tabela A3.3

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Novembro 1999	1	0,0	5,5	3,9
	2	14,1	1,1	0,6
	3	32,2	2,8	2,6
	4	58,5	0,9	0,4
	5	0,0	2,2	1,3
	6	0,0	5,6	3,2
	7	0,0	5,4	3,6
	8	1,5	3,3	2,7
	9	0,5	5,3	3,5
	10	0,0	4,1	3,1
	11	0,0	5,3	3,3
	12	0,0	5,2	3,7
	13	0,0	4,8	3,7
	14	0,0	5,3	3,0
	15	0,0	5,5	3,8
	16	0,0	5,8	3,6
	17	0,0	5,5	3,7
	18	0,0	5,8	3,2
	19	0,0	4,3	3,8
	20	0,0	4,8	3,2
	21	0,0	4,7	3,5
	22	0,0	4,9	3,0
	23	0,0	4,8	3,6
	24	0,0	4,9	3,7
	25	0,0	5,6	3,4
	26	13,0	4,0	2,3
	27	1,2	3,8	2,5
	28	0,0	4,6	3,7
	29	0,0	5,8	3,9
	30	0,0	6,5	3,0

Cont. Tabela A3.3

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Dezembro 1999	1	0,0	5,5	3,0
	2	35,0	4,8	3,9
	3	6,8	2,9	1,4
	4	0,0	5,5	3,3
	5	1,6	5,8	3,2
	6	0,4	3,8	2,5
	7	13,4	4,3	3,8
	8	1,7	3,8	2,4
	9	0,0	4,7	3,5
	10	0,0	4,9	3,7
	11	0,0	5,2	3,3
	12	0,0	4,7	3,5
	13	13,5	4,2	2,3
	14	5,0	3,8	2,8
	15	2,6	4,5	3,0
	16	0,8	4,0	2,4
	17	0,0	4,3	3,0
	18	0,0	5,3	3,1
	19	0,0	5,7	3,4
	20	0,0	5,5	3,5
	21	0,0	4,7	3,6
	22	7,5	5,8	3,5
	23	0,0	5,4	3,9
	24	0,0	5,8	3,1
	25	0,0	5,0	3,0
	26	0,0	5,8	3,4
	27	0,0	6,8	3,6
	28	0,0	4,8	3,3
	29	0,8	3,9	2,2
	30	7,0	2,4	1,5
	31	0,6	2,5	1,7

Cont. Tabela A3.3

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Janeiro 2000	1	0,0	5,2	3,1
	2	0,0	5,4	3,5
	3	0,4	4,8	3,2
	4	0,0	3,9	2,6
	5	0,7	5,4	3,1
	6	0,0	4,8	3,6
	7	0,0	5,8	3,2
	8	0,0	5,9	3,3
	9	0,0	5,7	3,9
	10	0,0	5,4	3,4
	11	0,0	5,8	3,3
	12	0,0	4,9	3,8
	13	0,0	3,9	2,8
	14	1,7	4,7	3,8
	15	0,0	3,8	2,0
	16	6,8	3,9	2,2
	17	2,7	4,7	3,2
	18	0,7	4,1	2,8
	19	0,0	5,6	3,4
	20	0,0	5,0	3,2
	21	0,0	5,8	3,2
	22	0,0	5,7	3,0
	23	0,0	3,9	2,7
	24	24,2	4,7	3,8
	25	4,7	2,8	1,5
	26	0,0	5,6	3,3
	27	0,0	4,8	3,7
	28	0,0	5,6	3,1
	29	0,0	4,8	3,1
	30	3,0	4,7	3,8
	31	0,0	2,8	1,9

Cont. Tabela A3.3

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Fevereiro 2000	1	0,0	4,2	3,0
	2	0,0	3,8	2,0
	3	3,0	2,8	1,5
	4	0,5	4,8	3,6
	5	0,0	5,0	3,6
	6	0,0	4,8	3,9
	7	0,0	5,5	3,5
	8	0,0	5,7	3,2
	9	27,0	4,6	3,5
	10	0,0	4,8	3,3
	11	0,0	5,0	3,8
	12	0,0	5,4	3,1
	13	1,0	5,0	3,0
	14	0,0	3,9	2,9
	15	3,5	2,8	1,9
	16	2,0	5,6	3,5
	17	0,0	5,4	3,3
	18	0,0	5,8	3,6
	19	0,0	5,4	3,6
	20	0,0	5,5	3,1
	21	0,0	4,0	2,5
	22	0,0	3,9	2,6
	23	0,0	4,7	3,0
	24	0,0	5,7	3,8
	25	0,0	5,5	3,3
	26	0,0	2,9	2,8
	27	64,4	5,4	3,0
	28	1,2	3,8	2,1
	29	7,0	2,9	1,0

Cont. Tabela A3.3

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Março 2000	1	0,0	2,4	1,0
	2	0,0	3,8	3,0
	3	0,0	2,3	1,8
	4	0,0	1,4	0,6
	5	35,0	3,8	2,0
	6	4,9	2,0	0,8
	7	0,7	4,6	3,1
	8	0,0	4,6	3,0
	9	0,0	4,2	3,5
	10	0,0	4,6	3,0
	11	0,0	5,4	3,2
	12	0,0	2,8	1,4
	13	0,0	4,7	3,2
	14	0,0	3,7	2,8
	15	0,0	3,8	2,6
	16	1,2	3,9	3,4
	17	0,0	3,8	3,4
	18	0,0	3,8	3,1
	19	0,0	4,2	3,0
	20	0,0	4,7	3,9
	21	0,0	3,8	2,6
	22	0,0	3,8	2,3
	23	16,4	4,8	3,3
	24	0,0	2,8	1,5
	25	0,0	4,7	3,5
	26	0,0	3,8	2,7
	27	0,0	2,8	1,3
	28	0,0	2,9	1,3
	29	0,0	4,7	3,8
	30	20,0	3,8	2,1
	31	5,3	2,8	1,1

Tabela A3.4 – Precipitação e evaporação no período que compreende a safra 00/01

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Setembro 2000	1	0,0	2,9	2,0
	2	0,0	3,3	2,3
	3	0,0	3,9	2,7
	4	0,0	3,6	2,5
	5	0,0	4,3	3,0
	6	0,0	4,2	2,9
	7	0,0	4,9	3,4
	8	0,0	4,2	2,9
	9	0,0	3,9	2,7
	10	29,0	3,5	2,4
	11	19,8	1,7	1,2
	12	0,9	2,2	1,5
	13	19,7	1,3	0,9
	14	4,2	0,6	0,4
	15	0,0	1,6	1,1
	16	0,0	3,3	2,3
	17	0,0	3,5	2,4
	18	18,8	2,5	1,7
	19	0,0	1,6	1,1
	20	0,9	3,8	2,6
	21	29,8	1,4	1,0
	22	0,0	4,2	2,9
	23	19,0	3,5	2,4
	24	0,0	4,2	2,9
	25	0,0	3,6	2,5
	26	0,0	3,6	2,5
	27	0,0	3,3	2,3
	28	0,0	5,1	3,5
	29	0,0	3,8	2,6
	30	18,7	2,2	1,5

Cont. Tabela A3.4

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Outubro 2000	1	1,0	1,6	0,8
	2	0,0	1,9	1,3
	3	19,2	1,0	0,9
	4	10,0	1,1	0,9
	5	0,0	3,8	3,4
	6	0,0	5,6	3,6
	7	0,0	4,0	2,8
	8	0,5	5,7	3,7
	9	0,0	2,8	1,5
	10	0,0	2,9	2,3
	11	29,8	1,6	1,4
	12	0,0	1,4	1,1
	13	0,0	1,7	0,9
	14	2,5	2,6	1,8
	15	0,0	3,0	2,6
	16	2,8	3,2	1,8
	17	8,9	2,3	1,9
	18	0,0	2,3	2,0
	19	18,8	2,7	1,8
	20	0,0	2,4	1,7
	21	0,0	4,4	2,7
	22	0,0	3,7	2,7
	23	5,3	3,5	1,4
	24	0,0	2,8	1,6
	25	0,0	3,8	2,2
	26	1,5	2,1	1,4
	27	0,0	5,3	3,5
	28	0,0	5,6	3,3
	29	0,0	3,6	2,9
	30	0,0	4,0	3,3
	31	0,0	5,3	3,1

Cont. Tabela A3.4

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Novembro 2000	1	0,0	5,7	3,1
	2	28,5	3,0	2,6
	3	0,0	4,6	3,5
	4	0,0	4,2	3,4
	5	0,0	5,3	3,8
	6	0,0	5,7	3,0
	7	19,0	3,8	3,3
	8	0,0	4,3	2,8
	9	1,4	4,6	2,4
	10	0,0	3,5	2,9
	11	4,3	3,8	2,2
	12	19,2	1,8	0,7
	13	0,0	4,5	2,5
	14	0,0	3,4	3,2
	15	0,0	4,3	2,7
	16	0,0	5,5	3,4
	17	0,0	5,2	3,1
	18	0,0	4,1	3,2
	19	0,0	5,8	3,5
	20	0,0	4,3	3,8
	21	0,0	3,8	2,4
	22	0,0	4,8	3,3
	23	19,0	5,8	3,2
	24	1,6	2,9	1,8
	25	0,0	4,5	3,9
	26	0,0	3,6	3,0
	27	8,7	4,5	3,8
	28	59,0	3,9	2,8
	29	10,6	3,0	1,9
	30	0,0	4,6	3,7

Cont. Tabela A3.4

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Dezembro 2000	1	0,0	5,1	3,2
	2	0,0	5,5	3,4
	3	15,6	3,8	2,9
	4	6,8	2,6	1,1
	5	0,0	2,8	1,3
	6	0,0	4,7	3,3
	7	0,0	5,5	3,1
	8	0,0	5,3	3,8
	9	0,0	5,4	3,9
	10	0,0	4,3	3,7
	11	10,2	4,7	3,2
	12	0,0	4,8	3,2
	13	2,8	4,5	3,3
	14	13,5	1,4	0,9
	15	4,2	3,4	2,7
	16	1,0	3,9	3,1
	17	0,0	4,0	3,4
	18	0,0	4,9	3,3
	19	0,0	4,5	3,2
	20	0,0	5,8	3,4
	21	18,0	3,6	2,7
	22	0,0	3,4	2,8
	23	0,0	3,4	2,8
	24	13,8	3,2	2,4
	25	9,0	2,6	1,8
	26	0,0	6,5	3,1
	27	0,0	2,8	1,1
	28	2,5	3,8	2,2
	29	5,1	3,8	2,5
	30	0,0	3,9	3,0
	31	0,0	4,0	3,4

Cont. Tabela A3.4

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Janeiro 2001	1	0,0	4,5	3,1
	2	0,0	4,6	3,7
	3	0,0	4,7	3,3
	4	0,0	4,6	3,7
	5	0,0	4,7	3,8
	6	0,0	5,6	3,4
	7	23,3	2,6	1,8
	8	0,0	3,7	2,8
	9	0,0	4,5	3,2
	10	39,0	3,4	2,8
	11	0,5	4,1	3,4
	12	0,0	4,9	3,7
	13	19,2	3,8	2,9
	14	2,2	2,8	1,4
	15	75,0	2,6	1,3
	16	1,4	2,6	1,5
	17	37,0	3,7	2,5
	18	9,2	3,4	2,7
	19	3,4	3,3	2,7
	20	0,0	4,0	3,2
	21	0,0	4,2	3,6
	22	4,3	3,7	2,5
	23	0,0	3,8	2,1
	24	0,0	3,6	2,7
	25	0,0	4,0	3,2
	26	0,0	4,2	3,0
	27	24,5	3,8	2,0
	28	19,2	2,7	1,9
	29	0,0	2,8	1,4
	30	0,7	3,5	3,1
	31	40,0	2,6	1,0

Cont. Tabela A3.4

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Fevereiro 2001	1	1,0	2,6	1,8
	2	0,0	3,8	2,8
	3	0,0	3,4	2,0
	4	2,5	2,6	1,9
	5	0,0	2,8	1,4
	6	0,0	3,9	2,7
	7	0,0	4,8	3,6
	8	0,0	4,5	3,6
	9	0,0	2,9	1,9
	10	0,0	4,3	3,0
	11	27,0	3,7	2,6
	12	1,0	2,8	1,3
	13	0,0	4,3	3,3
	14	6,4	4,0	3,2
	15	0,0	2,0	1,2
	16	0,0	3,8	3,0
	17	0,0	4,0	3,5
	18	0,0	2,7	1,6
	19	0,0	2,8	2,0
	20	0,0	4,1	3,5
	21	2,0	3,8	3,3
	22	0,0	3,0	2,1
	23	0,0	5,0	3,6
	24	0,0	3,7	2,9
	25	11,6	2,8	1,9
	26	7,2	3,2	2,5
	27	0,0	4,4	3,7
	28	0,0	4,6	3,7

Cont. Tabela A3.4

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque (mm)	Piche (mm)
Março 2001	1	0,0	4,1	3,5
	2	0,4	3,8	3,2
	3	0,0	3,2	2,3
	4	0,0	3,8	3,2
	5	0,0	3,8	3,1
	6	0,0	4,0	3,6
	7	0,0	2,0	1,7
	8	0,7	3,4	2,8
	9	0,0	3,5	2,2
	10	0,0	3,7	2,6
	11	0,0	4,3	3,6
	12	0,0	3,7	2,6
	13	0,0	3,4	2,6
	14	0,0	3,9	2,4
	15	39,2	1,3	0,5
	16	0,0	2,1	1,5
	17	0,8	3,8	2,0
	18	0,0	3,9	2,2
	19	5,7	3,8	2,0
	20	0,0	4,0	3,6
	21	1,2	3,7	2,9
	22	0,0	4,7	3,3
	23	1,4	3,8	2,4
	24	3,7	2,9	1,4
	25	49,0	2,8	1,7
	26	0,0	3,7	2,4
	27	0,0	3,8	2,8
	28	0,0	3,7	2,1
	29	0,0	3,4	2,4
	30	0,0	3,6	2,5
	31	28,0	2,0	1,7

Tabela A3.5 – Precipitação e evaporação referentes às simulações de drenagem
(validação do modelo)

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque Classe A (mm)
Agosto/1983	1	26,0	0,9
	2	0,2	2,2
	3	2,5	1,4
	4	0,0	1,6
	5	0,0	2,3
	6	0,0	2,8
	7	0,0	2,5
	8	25,0	0,7
	9	0,0	1,6
	10	0,0	2,3
	11	0,0	2,6
	12	7,9	3,2
	13	0,0	2,9
	14	31,0	1,7
	15	24,5	1,2
	16	0,0	2,5
	17	11,0	0,6
	18	0,0	1,2
	19	0,0	3,9
	20	0,0	2,7
	21	0,0	2,2
	22	0,0	2,7
	23	0,8	2,7
	24	6,7	0,9
	25	0,0	2,2
	26	0,0	2,2
	27	0,0	2,9
	28	0,0	4,3
	29	0,0	4,6
	30	0,0	1,3
	31	39,9	2,3

Tabela A3.6 – Precipitação e evaporação referentes às simulações de drenagem
(validação do modelo)

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque Classe A (mm)
Setembro/1983	1	9,4	3,9
	2	0,0	2,6
	3	0,0	2,6
	4	0,0	2,2
	5	0,0	2,7
	6	0,0	2,2
	7	0,0	1,6
	8	0,0	2,9
	9	0,0	2,7
	10	0,0	3,0
	11	0,0	2,2
	12	0,0	1,7
	13	0,0	1,4
	14	0,0	2,3
	15	0,9	1,4
	16	0,0	2,5
	17	0,0	3,0
	18	6,6	3,2
	19	0,0	5,5
	20	0,0	3,5
	21	0,0	3,9
	22	12,0	1,9
	23	0,0	1,6
	24	0,0	2,9
	25	0,0	3,3
	26	0,0	4,6
	27	0,0	5,1
	28	8,2	4,6
	29	19,5	1,2
	30	0,0	1,6

Tabela A3.7 – Precipitação e evaporação referentes às simulações de drenagem
(validação do modelo)

Mês/Ano	Dia	Precipitação (mm)	Tanque Classe A (mm)
Outubro/1983	1	26,4	0,4
	2	5,1	2,3
	3	0,0	2,3
	4	0,0	3,6
	5	0,0	3,5
	6	0,0	3,5
	7	0,0	5,2
	8	13,5	7,1
	9	13,2	2,0
	10	0,5	1,4
	11	0,0	3,0
	12	0,0	2,9
	13	0,0	3,6
	14	0,0	5,2
	15	0,0	2,7
	16	39,9	1,3
	17	3,7	2,9
	18	0,0	2,0
	19	0,0	3,2
	20	0,0	3,5
	21	8,8	1,6
	22	0,0	8,8
	23	0,0	5,9
	24	0,0	3,2
	25	0,0	5,4
	26	0,0	5,4
	27	0,0	5,2
	28	0,0	4,5
	29	6,9	4,9
	30	51,2	0,7
	31	11,0	1,0

Anexo A4 – Dados observados na área experimental de irrigação

Tabela A4.1– Informações gerais referentes à safra 96/97

Data de início da irrigação	20/12/1996
Data do final da irrigação	04/03/1997
Lâmina superficial a ser formada e mantida pela irrigação (mm)	75
Lâmina superficial máxima (mm)	85
Precipitação nos 5 dias anteriores ao início da irrigação (mm)	23,5
Total precipitado no período de irrigação (mm)	290,8
Total evaporado (Piche) no período de irrigação (mm)	206,6

Tabela A4.2 – Períodos e lâminas de irrigação (safra 96/97)

Período total de irrigação (d)	75
Período de formação da lâmina – fase 1 (d)	3
Lâmina diária aplicada nos dias com irrigação – fase 1 (mm)	30
Lâmina diária aplicada nos dias com irrigação – fase 2 (mm)	10

Tabela A4.3 – Informações gerais referentes à safra 97/98

Data de início da irrigação	15/12/1997
Data do final da irrigação	14/03/1998
Lâmina superficial a ser formada e mantida pela irrigação (mm)	50
Lâmina superficial máxima (mm)	60
Precipitação nos 5 dias anteriores ao início da irrigação (mm)	10,0
Total precipitado no período de irrigação (mm)	738,8*
Total evaporado (Piche) no período de irrigação (mm)	217,5

* Ocorrência do fenômeno El Niño

Tabela A4.4 – Períodos e lâminas de irrigação (safra 97/98)

Período total de irrigação (d)	90
Período de formação da lâmina – fase 1 (d)	2
Lâmina diária aplicada nos dias com irrigação – fase 1 (mm)	30
Lâmina diária aplicada nos dias com irrigação – fase 2 (mm)	10

Tabela A4.5 – Informações gerais referentes à safra 98/99

Data de início da irrigação	17/12/1998
Data do final da irrigação	28/03/1999
Lâmina superficial a ser formada e mantida pela irrigação (mm)	100
Lâmina superficial máxima (mm)	110
Precipitação nos 5 dias anteriores ao início da irrigação (mm)	7,5
Total precipitado no período de irrigação (mm)	208,2
Total evaporado (Piche) no período de irrigação (mm)	315,5

Tabela A4.6 – Períodos e lâminas de irrigação (safra 98/99)*

Período total de irrigação (d)	102
Período de formação da lâmina – fase 1 (d)	-
Lâmina diária aplicada nos dias com irrigação – fase 1 (mm)	-
Lâmina diária aplicada nos dias com irrigação – fase 2 (mm)	-

* As medições de consumo referentes à esta safra mostraram-se inconsistentes com os dados climáticos registrados no mesmo período. Por isso, sua utilização foi descartada.

Tabela A4.7 – Informações gerais referentes à safra 99/00

Data de início da irrigação	18/12/1999
Data do final da irrigação	13/03/2000
Lâmina superficial a ser formada e mantida pela irrigação (mm)	75
Lâmina superficial máxima (mm)	85
Precipitação nos 5 dias anteriores ao início da irrigação (mm)	21,9
Total precipitado no período de irrigação (mm)	211,0
Total evaporado (Piche) no período de irrigação (mm)	255,9

Tabela A4.8 – Períodos e lâminas de irrigação (safra 99/00)

Período total de irrigação (d)	87
Período de formação da lâmina – fase 1 (d)	3
Lâmina diária aplicada nos dias com irrigação – fase 1 (mm)	30
Lâmina diária aplicada nos dias com irrigação – fase 2 (mm)	12

Tabela A4.9 – Informações gerais referentes à safra 00/01

Data de início da irrigação	15/12/2000
Data do final da irrigação	07/03/2001
Lâmina superficial a ser formada e mantida pela irrigação (mm)	75
Lâmina superficial máxima (mm)	85
Precipitação nos 5 dias anteriores ao início da irrigação (mm)	26,5
Total precipitado no período de irrigação (mm)	411,6
Total evaporado (Piche) no período de irrigação (mm)	224,5

Tabela A4.10 – Períodos e lâminas de irrigação (safra 00/01)

Período total de irrigação (d)	83
Período de formação da lâmina – fase 1 (d)	3
Lâmina diária aplicada nos dias com irrigação – fase 1 (mm)	30
Lâmina diária aplicada nos dias com irrigação – fase 2 (mm)	10

Anexo A5 – Dados observados na área experimental de drenagem

Tabela A5.1 – Profundidade do lençol freático no ponto médio entre os drenos

Profundidade do lençol freático (cm)						
29/08	30/08	31/08	01/09	02/09	03/09	04/09
40	-	-	0	10	24	-
02/10	03/10	04/10	05/10	06/10	07/10	08/10
0	11	25	-	-	-	-
09/10	10/10	11/10	12/10	13/10	14/10	15/10
5	6	15	29	-	-	-
16/10	17/10	18/10	19/10	20/10	21/10	22/10
-	0	-	13	25	30	-

Anexo A6 – Descrição do perfil modal da Unidade de Mapeamento Vacacai

Localização : Município de São Gabriel, a 26 km da sede na estrada São Gabriel – Rosário.

Situação : Corte de estrada no terço superior da várzea.

Altitude : 120 m.

Relevo : Plano a suavemente ondulado.

Material de origem : Sedimentos.

Cobertura vegetal : Campo modificado pelo uso agrícola.

Drenagem : Imperfeitamente drenado.

- A 0-30 cm; bruno escuro (10YR 3/3, úmido); franco arenoso; fraca média granular e fraca média blocos subangulares; poroso; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara; raízes abundantes.
- AE 30-45 cm; bruno amarelado escuro (10YR 4/4, úmido); franco arenoso; fraca média blocos subangulares e fraca média granular; poroso; friável, não plástico e não pegajoso; transição clara e plana; raízes abundantes.
- E₁ 45-60 cm; bruno (10YR 5/3, úmido); mosqueado pequeno distinto e bastante; bruno forte (7.5YR 5/8, úmido); franco arenoso; fraca media blocos subangulares; poroso; friável, não plástico e não pegajoso; transição clara e plana; raízes comuns.
- E₂ 60-70 cm; cinzento claro (10YR 2/2, úmido); mosqueado pequeno distinto e bastante; franco arenoso; sem estrutura; grãos simples e fraca pequena granular; poroso com alguns poros grandes; solto, não plástico e não pegajoso; transição abrupta e plana; raízes poucas.
- Btg 70-120 cm; cinzento (10YR 5/1, úmido), devido aos “coatings”, bruno amarelado (10YR 5/4, úmido amassado); mosqueado grande abundante e proeminente, vermelho (10YR 4/8, úmido) e mosqueado grande comum e distinto, bruno amarelado claro (10YR 6/4, úmido); franco argiloso; forte grande prismática que se quebra em grandes blocos subangulares; cerosidade forte e abundante; “coatings”; pouco poroso; extremamente duro, muito firme, muito plástico e muito pegajoso; transição gradual e plana; raízes poucas.
- Cg 120-200 cm+; cinza oliváceo claro (5YR 6/2, úmido); mosqueado preto (N 1/, úmido) devido a manganês amarelado; franco argiloso; forte média e grande prismática; pouco poroso; firme, muito plástico e muito pegajoso; raízes ausentes.