
**MANEJO DA SALINIDADE EM IRRIGAÇÃO LOCALIZADA:
ANÁLISE DA ALTERNATIVA DE LIXIVIAÇÃO INCOMPLETA**

DANILO CESAR DE OLIVEIRA BASTOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Agronomia – Ciência do Solo.

RECIFE

Pernambuco – Brasil

Agosto de 2004

**MANEJO DA SALINIDADE EM IRRIGAÇÃO LOCALIZADA:
ANÁLISE DA ALTERNATIVA DE LIXIVIAÇÃO INCOMPLETA**

DANILO CESAR DE OLIVEIRA BASTOS

Engenheiro Agrônomo

Professor orientador: ABELARDO A. A. MONTENEGRO, (DTR/UFPE)

Professor co-orientador: SUZANA M. G. L. MONTENEGRO (DEC/UFPE)

Professor co-orientador: JOSÉ JULIO VILAR (DA/UFRPE)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Agronomia – Ciência do Solo.

RECIFE

Pernambuco – Brasil

Agosto de 2004

**MANEJO DA SALINIDADE EM IRRIGAÇÃO LOCALIZADA:
ANÁLISE DA ALTERNATIVA DE LIXIVIAÇÃO INCOMPLETA**

DANILO CESAR DE OLIVEIRA BASTOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO.

APROVADA POR:

ABELARDO A. A. MONTENEGRO. (UFRPE)
(PRESIDENTE)

JOSÉ JULIO VILLAR (UFRPE).

RONALDO FREIRE MOURA (UFRPE).

HANS RAJ GEHYI. (UFCG)

RECIFE
Pernambuco – Brasil
Agosto de 2004

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a **Deus** por sempre estar ao meu lado nessa caminhada, mesmo quando estava disperso. Por me mostrar os caminhos para que os obstáculos fossem superados e colocar as oportunidades e as pessoas que pudessem proporcionar mais uma etapa vencida.

Aos meus **Pais**, pelo estímulo e educação que representa tudo que sou hoje.

Ao **Prof. Abelardo Montenegro**, meu orientador e amigo, pelo estímulo e confiança desde a graduação até hoje, abrindo as portas para o conhecimento iniciando assim a minha vida profissional. Pelo vasto conhecimento e incentivo diário e a cobrança necessária para conclusão desde trabalho; e a Prof. **Suzana Montenegro** que co-orientou este trabalho, colaborando diretamente na abordagem a modelagem computacional.

A minha companheira de todas as horas, **Cristiane Valéria Maciel Muniz**, pelo seu incentivo, dedicação e imprescindível ajuda, me acompanhando no término deste trabalho, sem ela superar esta etapa seria mais difícil.

Aos meus amigos da sala 03, **Manoel Maciel (Mané)**, **Thais Emanuelle (SuperGuelph)**, **Adriana Figueiredo (TopModel)**, **Albert (O Einstein)**, **Graciliano (Ramos)**, **Antônio Granja Junior(O Granja)**, **Tiago**, **Júlio (Socó)**, **Daniele (Pitbull)**, **Daniela**, **Lenildo (Boinho)**, **Junior**, **Eduardo**, **Tafnes**, **Adriano Normandia**, **Wellington**, **Bruno (Big House)**, **Manoel Costa (Boinho)** que me acompanharam durante esse período, colaborando direta e indiretamente com esse trabalho, tornando a SALA-03 do DTR nossa segunda casa, aos meus companheiros de mestrado **Edilene**, **Josângela**, **Fábio Broggi**, **Francisco Xavier**, **Samuel Belo** e **Benjamim** e vários outros que transformaram a sala de aula em um ambiente mais agradável.

Aos professores **Veronildo**, **Isabel Galindo**, **Fátima** que me incentivaram a seguir a carreira acadêmica, aos professores **José Júlio Villar Rodrigues**, e os tantos outros que me ajudaram direta ou indiretamente para a realização desta dissertação, como também os funcionários **Anacleto**, **Luciano**, **Socorro**, **Nóca**, **Josué**, **Eliane** pela eficiência em seus trabalhos.

Aos agricultores do assentamento da Fazenda Nossa Senhora do Rosário, **Vivaldo** e **Adriana**, pela realização deste trabalho no seu lote e a dedicação no manejo, ao **Biu (Dólar)** † que colaborou com responsabilidade e disposição no árduo trabalho de campo e aos outros moradores da comunidade que colaboraram direta e indiretamente.

Ao apoio financeiro do **CNPq / CT-HIDRO**, pela concessão da bolsa de pesquisa e a obtenção dos equipamentos de campo.

A UFRPE primeiramente pelo ensino a graduação na minha formação como Engenheiro Agrônomo, e pelo apoio no programa de pós-graduação em Ciência do Solo coordenado pelo **Professor Fernando Freire**, pela disponibilidade de seus laboratórios e funcionários que proporcionaram o desenvolvimento desta dissertação.

"Sede o rochedo que me abriga, a casa bem defendida que me salva. Sois minha fortaleza e minha rocha; para honra do vosso nome, vós me conduzis e alimentais"

(Salmo 30, 3s)

"A leitura torna o homem completo; a conversação torna-o ágil; e o escrever dá-lhe precisão."

(Francis Bacon)

"Só crescemos à medida que nos damos a algo mais alto que nós mesmos".

(Antoine de Saint-Exupéry)

MANEJO DA SALINIDADE EM IRRIGAÇÃO LOCALIZADA: ANÁLISE DA ALTERNATIVA DE LIXIVIAÇÃO INCOMPLETA

RESUMO

O presente trabalho foi realizado em vale aluvial (NEOSSOLO FLÚVICO) com lençol freático raso, em um assentamento denominado de Fazenda Nossa Senhora do Rosário, no município de Pesqueira - PE (semi-árido nordestino), onde existe risco de salinização, principalmente com a prática da agricultura irrigada, devido à qualidade das águas subterrâneas disponíveis. Dentro da área experimental foi selecionado para estudo um lote irrigado com sistema de drenagem subterrânea instalado. Nos lotes irrigados do vale, o manejo é usualmente baseado na lixiviação dos solos, que transporta os sais para o aquífero, podendo comprometer a qualidade das águas subterrâneas em locais com circulação insuficiente e nível freático raso. Este trabalho tem como principal objetivo avaliar a eficiência (potencial) do manejo de irrigação baseado na lavagem parcial de sais em um lote irrigado com água salina e caracterizar o comportamento do fluxo de água como também a movimentação de sais quando submetidos ao manejo de irrigação proposto. Estações tensiométricas foram instaladas e monitoradas, permitindo o acompanhamento das tensões matriciais na zona radicular. Procedeu-se ao monitoramento da condutividade elétrica da água de irrigação e da água no solo, através do método da pasta saturada em laboratório. O nível piezométrico do lençol subterrâneo foi acompanhado através de poços de observação, os quais permitiram também monitoramento da qualidade da água subterrânea. Com base nos dados climatológicos, nas características físicas e hidráulicas do solo, e nas características da cultura, foi possível reproduzir aproximadamente com modelo computacional as respostas experimentais de campo, possibilitando assim simulações computacionais, em relação ao estoque de umidade no solo e salinidade da área. Para o perfil 0 -100 cm foi observada uma diminuição da condutividade elétrica após o manejo de irrigação, principalmente na zona radicular, tanto nas leituras de campo quanto nas simuladas. Verificou-se, através de modelagem computacional, que a alternativa de lixiviação completa não conduziu a lavagem mais efetiva do perfil quando comparada com a lixiviação incompleta.

SALINITY MANAGEMENT IN TRICKLE IRRIGATION: ANALYSIS OF INCOMPLETE LEACHING ALTERNATIVE

SUMMARY

The present study was developed in an alluvial valley (NEOSSOLO FLÚVICO) with shallow water table, in the Nossa Senhora do Rosário Farm, in the municipal district of Pesqueira - PE (semi-arid Northeast), where salinization risk exists, specially with the practice of irrigated agriculture, due to the quality of the available groundwater. Within the experimental area it was selected for study an irrigated plot with drainage installed. In the irrigated lots of the valley, the salinity management is usually based on the leaching, which transports salts to the aquifer, which can deteriorate groundwater quality, specially with insufficient circulation and shallow water table exists. The main objective was to evaluate the efficiency (potential) of the irrigation management based on the partial leaching of salts in a plot irrigated with saline water and to characterize the behavior of the flow of water as well as the movement of salts when subject to the irrigation management proposed. Tensiometric Stations were installed and monitored, allowing the recording of the matric tensions in the root zone. Electrical conductivity of the irrigation water and the soil water, were monitored, through the method of the saturated paste in laboratory. The groundwater piezometric level was monitored through observation wells, which also allowed monitoring of the quality of the groundwater. Based upon the climatological data, the physical characteristics, hydraulic behavior of the soil, and in the crop characteristics, it was possible to approximately reproduce with numerical modelling the experimental field results, allowing simulations related to soil salinity. For the 0 -100 cm profile it was observed a decrease in the electrical conductivity after the irrigation applications, specially in the root zone, both in the field observations and in the simulated scenarios. It was verified, through modeling, that the alternative of complete leaching did not improve the effective washing of the profile when compared to the incomplete leaching.

LISTAS DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1. <i>Localização da área em estudo (Pesqueira), mapa de Pernambuco com divisão de bacias hidrográficas (fonte Montenegro et al, 2003).</i> —————	2
2. <i>Modelo esquemático do risco de salinização de solo e aquífero decorrente de irrigação.</i> —————	5
3. <i>Croquis da área em estudo.</i> —————	19
4. <i>Estação Meteorológica completa e Tanque Classe “A”.</i> —————	20
5. <i>Diagrama triangular das classes texturais do solo (EMBRAPA, 1997)</i> —————	24
6. <i>Permeâmetro de Guelph, montado no campo.</i> —————	29
7. <i>Imagem esquemática do modelo do tensiômetro empregado.</i> —————	30
8. <i>Estação Tensiométrica.</i> —————	31
9. <i>Curva de calibração neutrônica para o solo estudado.</i> —————	33
10. <i>Leitura de umidade em reservatório de água para calibração.</i> —————	33
11. <i>Esquema de discretização dos perfis simulados.</i> —————	35
12. <i>Granulometria na estação tensiométrica 01.</i> —————	36
13. <i>Granulometria na estação tensiométrica 02.</i> —————	37
14. <i>Granulometria na estação tensiométrica 03.</i> —————	37
15. <i>Granulometria na estação tensiométrica 04.</i> —————	38
16. <i>Granulometria média da área em estudo.</i> —————	38
17. <i>Gráfico da densidade global encontrada no perfil.</i> —————	40
18. <i>Gráfico da densidade da partícula encontrada no perfil(estação tensiométrica 03).</i> —	40
19. <i>Comportamento da precipitação e das evapotranspirações de referênciae da cultura, estimadas no período em estudo.</i> —————	41
20. <i>Acompanhamento da evapotranspiração obtidos no tanque classe A e medidos através do método de Penman-Monteith.</i> —————	41
21. <i>Lâmina de irrigação aplicada e lamina teórica.</i> —————	42
22. <i>Saldo de lâmina acumulada da área em estudo.</i> —————	42
23. <i>Condutividade hidráulica saturada (Ksat), estimada através do Permeâmetro de Guelph.</i> —————	43

24. Curvas características de retenção de umidade, nas profundidades de 20, 40, 60 e 80cm.	44
25. Nível do lençol freático ao longo do período de manejo de irrigação.	45
26. Variação do potencial matricial do solo em várias profundidades x precipitação.	46
27. Variação da condutividade hidráulica não saturada (K), encontrada através do método do permeâmetro de Guelph.	46
28. Gradiente entre as camadas 100-120cm, média 60-100cm.	47
29. Umidade, em várias profundidades, obtida com sonda de nêutrons.	48
30. Evolução da condutividade elétrica da água no solo (CEas).	49
31. Evolução da condutividade elétrica (CE) no lençol freático no período de 1/fev. - 19/mar.	49
32. Condutividade elétrica medida no perfil de solo, em três momentos diferentes do experimento.	50
33. Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 1-3 (10-30cm).	51
34. Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 4-6 (40-60cm).	52
35. Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 7-9 (70-90cm).	53
36. Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 10-12 (100-120cm).	53
37. Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 1-3 (10-30cm), em pentadas.	54
38. Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 4-6 (40-60cm), em pentadas.	54
39. Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 7-9 (70-90cm), em pentadas.	55
40. Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 10-12 (100-120cm), em pentadas.	55
41. Evapotranspiração real acumulada e Evapotranspiração potencial acumuladas, ocorridas entre os dias 10/02/2003 e 15/05/2003, simuladas pelo WAVE.	56
42. Evapotranspiração real, potencial acumuladas e transpiração real da planta e evaporação do solo nu, ocorridos entre os dias 10/02/2003 e 15/05/2003, simuladas pelo modelo WAVE..	56

FIGURA

PÁGINA

<i>43. Condutividades elétricas no perfil, medidas e simuladas.</i>	57
<i>44. Série temporal de condutividades elétricas, simulado com modelo WAVE.</i>	58
<i>45. Lixiviação completa de sais, simulado com modelo WAVE.</i>	58
<i>46. Distribuição de frequência acumulada da salinidade.</i>	59

LISTA DE QUADROS

QUADRO

PÁGINA

1. Unidades de mapeamento na área em estudo—(Ribeiro et al., 1999)—————	
16	
2. Valores de coeficiente de cultura para a cenoura.—————	21
3. Valores médios, desvio-padrão e coeficiente de variação de areia, argila e silte; e classe dos perfis de solo.—————	39
4. Estatísticas básicas para as densidades globais, da partícula e porosidade. ———	39
5. Valores de condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e Alfa (α).—————	43
6. Parâmetros encontrados com o Software Soil Water Retention Curve(SWRC, versão 3.0. Piracicaba, SP, 2001). —————	44
7. Condutividade elétrica e pH, retirada através da cápsula de extração—————	50

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	<i>Parâmetro de forma da curva $K(\theta)$</i>
ϕ	<i>Potencial matricial ou tensão da água no solo</i>
α	<i>parâmetro de forma da curva $K(\phi)$</i>
δ	<i>Porosidade</i>
ϕ_m	<i>Potencial de fluxo matricial</i>
θ	<i>Umidade volumétrica em cm^3/cm^3</i>
θ_r	<i>Umidade residual</i>
θ_{ag}	<i>Umidade Volumétrica total do solo</i>
C	<i>Parâmetro de ajuste dimensional (Permeâmetro de Guelph)</i>
D_g	<i>Densidade global</i>
dH/dz	<i>Gradiente hidráulico</i>
D_p	<i>Densidade de Partículas</i>
CE_s	<i>Condutividade elétrica dos sólidos do solo</i>
CE_{es}	<i>Condutividade elétrica do extrato de saturação</i>
G	<i>Parâmetro do cálculo do ϕ_m pelo método do Permeâmetro de Guelph</i>
h	<i>Nível da água</i>
H	<i>Potencial total</i>
J	<i>Parâmetro do cálculo do K_0 pelo método do Permeâmetro de Guelph</i>
K	<i>Condutividade hidráulica</i>
K_0	<i>Condutividade hidráulica na saturação de campo</i>
L	<i>Lâmina de água em mm</i>
Q	<i>Vazão</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	01
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA	04
2.1	Desenvolvimento Sustentável	04
2.2	Salinização do solo	04
2.3	Manejo de irrigação	06
2.4	Qualidade da água de irrigação	07
2.5	Manejo de salinidade	08
2.6	Lixiviação	08
2.7	Lâmina de lixiviação	09
2.8	Culturas tolerantes	10
2.9	Cenoura (<i>Daucus carota L.</i>)	10
2.10	Evapotranspiração	10
2.10.1	Tanque Classe A	11
2.10.2	Equação de Penman-Monteith	11
2.10.3	Evapotranspiração da cultura (ET _c)	12
2.11	Balanço hídrico	12
2.12	Movimento da água no solo	13
2.13	Dispersão hidrodinâmica	15
2.14	Modelagem	15
2.15	Fazenda N.Sra. do Rosário, Pesqueira – PE	16

3 MATERIAL E MÉTODOS **18**

3.1	Descrição da área experimental	18
3.2	Análise do desempenho do sistema de irrigação	21
3.3	Manejo de irrigação	21
3.4	Evapotranspiração	22
3.5	Caracterização física	23
3.6	Condutividade hidráulica (K)	25
3.7	Permeâmetro de Guelph	26
3.8	Tensiometria	30
3.9	Sonda de nêutrons	32
3.10	Condutividade elétrica da água e do solo (CE)	33
3.11	Simulação computacional com o modelo WAVE	34
3.11.1	Discretização dos perfis para simulação	35

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO **36**

4.1	Caracterização Textural	36
4.2	Caracterização da densidade global (DG), densidade das partículas (DP) e porosidade (δ)	39
4.3	Balço hídrico	40
4.4	Distribuição de lâminas	42
4.5	Condutividade hidráulica	43
4.6	Curva característica	44
4.7	Impacto da irrigação no nível do lençol freático	45
4.8	Resultados tensiométricos	45
4.9	Avaliação Hidráulica	46

4.10.	Umidade do solo	47
4.11.	Balço salino e da Magnitude da Lixiviação	49
4.12.	Simulações computacionais	51
5	CONCLUSÕES	60
6	REFERÊNCIAS	61
7	ANEXOS	68

1. INTRODUÇÃO

A região semi-árida Nordestina, embora possua um alto potencial para agricultura, é prejudicada com o regime irregular das chuvas e a elevada taxa de evaporação ocorrendo um grande risco de salinização em perímetros irrigados. Esse risco está relacionado à concentração dos sais que estão no perfil do solo e são transportados pela água do lençol subterrâneo utilizada para irrigação, e pela ascensão capilar para superfície do solo.

Existem aproximadamente 4,1 milhões de famílias, produzindo em regime de agricultura familiar no Brasil, das quais aproximadamente 600 mil em assentamentos da Reforma Agrária, gerando 14 milhões de postos de trabalho em todo o País. Esse grupo é responsável por grande parte dos alimentos que são postos à mesa dos brasileiros (INCRA, 2004). A área em estudo está incluída neste perfil mostrando-se, assim, de grande importância pela dimensão dos benefícios que poderão acontecer desde que, nessas áreas, sejam aplicadas as técnicas de desenvolvimento para agricultura sustentável.

A irrigação funciona como um fator imprescindível para garantia de produção com qualidade e aumento da produtividade, principalmente em regiões onde há uma irregularidade na distribuição das chuvas, como no caso do Município de Pesqueira - PE e todo o resto do sertão nordestino.

É necessário um controle rigoroso na aplicação de água, para não haver desperdícios e falta de água no desenvolver da cultura, como também lixiviação dos sais que estão no perfil do solo. Um manejo correto da irrigação para obtenção de uma produtividade viável economicamente seria aquele em que se aplica água no solo no momento oportuno, e em quantidades suficientes para suprir as necessidades hídricas da cultura e promover lavagem adequada. Para que isto ocorra, há necessidade do uso de métodos de campo que avaliem direta ou indiretamente a disponibilidade de água no solo.

O manejo de irrigação poderá induzir o processo de lixiviação, que arrasta os sais solúveis para profundidades maiores. Se a lixiviação for completa os sais arrastados na solução do solo irão ficar depositados no perfil saturado, acarretando o aumento da condutividade elétrica do lençol freático. Para não ocorrer este aumento da condutividade elétrica pode-se fazer uma lixiviação incompleta, onde a lâmina aplicada irá depositar os sais numa camada intermediária entre a camada da zona radicular e o lençol freático.

Os problemas relacionados à salinidade do solo podem causar danos irreversíveis ao meio ambiente, ou de lenta recuperação, e por fim inviabilizar a atividade agrícola no vale.

Para proporcionar um manejo sustentável, devem-se envolver medidas de planejamento que contemplem o uso dos recursos naturais visando a produção de bens e serviços, baseado num contexto ecológico, econômico e social. Nesta dissertação foram propostas alternativas de manejo de água e solo visando o controle da salinização.

O estudo da gestão dos recursos hídricos vem tomando maior importância ao longo dos anos, principalmente com o enfoque atual para o consumo racional e eficiente do uso da água, inclusive no meio rural. Faz-se necessária a investigação de alternativas na gestão dos recursos hídricos em aluvião do semi-árido e de manejo sustentável a fim de se evitar a degradação contínua dos recursos hídricos, assim como do solo.

A atividade do pequeno agricultor é de extrema importância no desenvolvimento sustentável na região do semi-árido nordestino, sendo responsável por uma considerável parte da produção agrícola na região.

Com enfoque no uso racional dos recursos naturais, que assume uma importância relevante, o presente estudo tem o objetivo de avaliar a influência do manejo de irrigação no balanço hídrico e de sais em área com lençol freático raso.

A pesquisa foi desenvolvida em um lote da Fazenda Nossa Senhora do Rosário, município de Pesqueira – PE como mostra a Figura 1. Neste lote foram assentadas cerca de 50 famílias desde dezembro de 1991. O assentamento é situado em um vale aluvial que se desenvolve a partir da Serra do Mimoso, onde as áreas de menor inclinação tendem a acumular sedimentos finos na sub-superfície. O aquífero aluvial é raso, com profundidade média de 10 m, possuindo cerca de 15 km de extensão e 300m de largura (Montenegro et al., 1999).

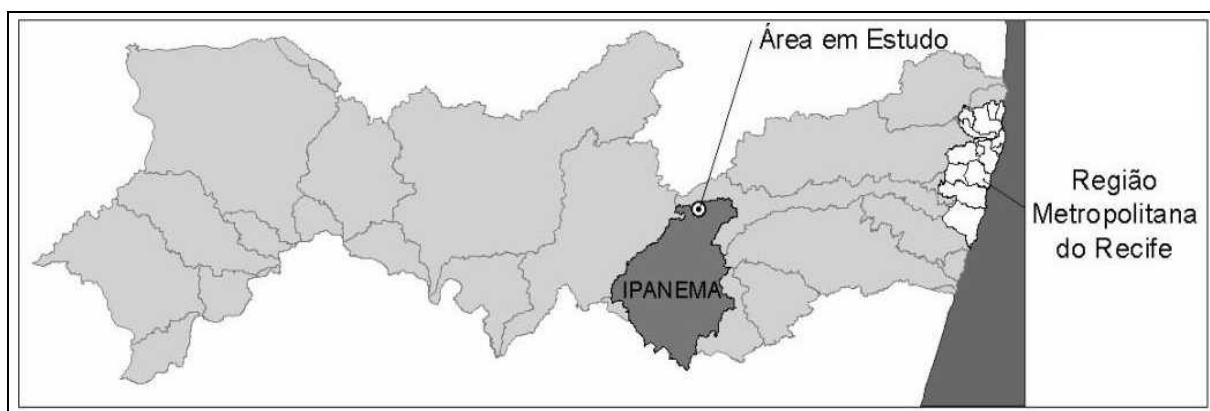


Figura 1 - Localização da área em estudo (Pesqueira), mapa de Pernambuco com divisão de bacias hidrográficas (fonte Montenegro et al., 2003).

O local onde foi desenvolvido o estudo está situado em uma área com a superfície geomórfica aplainada, que constitui o terraço fluvial do rio Ipanema, formado por sedimentos aluviais de textura variada. A planície aluvial é limitada por encostas suaves onduladas ou ondulada, do piemonte de maciços montanhosos que circundam o vale e em alguns pontos o limitam abruptamente. Estas encostas são caracterizadas por solos pouco profundos, desenvolvidos do embasamento geológico referido ao Pré-cambriano indiviso representado, principalmente, por gnaisses e granitos (Ribeiro et al., 1999).

Observando-se o manejo de irrigação exercido pelos agricultores, verificou-se que há uma tendência para aplicação da lâmina de irrigação superior às necessidades da planta por seguirem o princípio de que a produção irá responder melhor à lâmina aplicada em excesso. Isso poderá ocasionar um acúmulo de sais devido à alta condutividade elétrica da água de irrigação, principalmente nos perímetros irrigados do agreste nordestino.

Com o acompanhamento através de análises físicas, químicas e hidráulicas nessas áreas, é possível identificar as mudanças das condições do solo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Desenvolvimento Sustentável

Desenvolvimento sustentável, ou sustentabilidade tem se tornado um termo comum nos mais diversos campos da atividade humana, com inúmeras interpretações. Pelo significado mais simples, de acordo com Mérico (1996), sustentabilidade significa tornar as coisas permanentemente disponíveis ou duráveis. Desenvolvimento sustentável significaria, então, discutir a permanência ou durabilidade da estrutura de funcionamento de todo o processo produtivo.

Para Binswanger (2001), o conceito de desenvolvimento sustentável deve ser aplicado como uma alternativa ao conceito de crescimento econômico, o qual está associado a crescimento material e quantitativo da economia. Segundo suas palavras, desenvolvimento sustentável significa qualificar o crescimento e reconciliar o desenvolvimento econômico com a necessidade de se preservar o meio ambiente.

Para ser aplicado com sucesso, afirma Zhou (1998), o desenvolvimento sustentável deve trazer a perspectiva de que um ambiente saudável é essencial para uma economia próspera. Tal enfoque encara sociedade, economia e meio ambiente como elementos essenciais de um sistema, que se suportam mutuamente. Cada elemento deve ser considerado prioritário na tomada de decisões, fazendo com que as ações sejam baseadas numa estratégia de “antecipar e prevenir”. O desenvolvimento sustentável também implica em que os recursos do meio ambiente devem ser examinados tanto pelo seu valor atual quanto futuro, baseado nos princípios de vida dentro de parâmetros ecológicos globais de longo prazo.

2.2. Salinização do solo

Segundo Ferreira (1998), o processo de salinização do solo pode ser ocasionado por dois processos: o natural e o induzido.

O processo natural pode acontecer de várias formas: através da fragmentação e decomposição das rochas, escoamento superficial e subterrâneo de encostas para as partes baixas carreando os sais que se solubilizam das rochas se acumulando, o aumento da concentração progressivo devido à evaporação da água, deposição de sais transportados pelo

fenômeno de maresia e por intrusão (onde a água do mar através da maré, penetra nos estratos permeáveis na faixa litorânea).

Já o processo induzido ocorre pela ação do homem, provocando a salinização do solo pelo manejo inadequado da irrigação e drenagem em regiões áridas e semi-áridas, fazendo-se muitas vezes do uso da água com salinidade elevada ou aplicação de lâmina excessiva às necessidades da planta e drenagem deficiente, com acúmulo de sais após ascensão capilar e evapotranspiração da zona radicular.

Segundo Ribeiro et al. (2003), a presença de lençol livre próximo à superfície está não só associada a uma drenagem reduzida, mas também à utilização de sistemas de irrigação ineficientes. O acúmulo excessivo de sais na zona não-saturada, devido à ascensão capilar, é denominado salinização secundária (Gui, 1987). As regiões saturadas de um perímetro, onde os fluxos ascendentes predominam, são conhecidas como regiões de descarga (Salama et al., 1993).

A Figura 2 mostra o modelo esquemático do fluxo e transporte de sais em aluviões irrigados, com lençol freático raso. Pode-se notar que o ciclo progressivo pode causar o acúmulo de sais, constituído pelos componentes, irrigação-lixiviação-bombeamento-irrigação e, nas áreas propensas a descargas, irrigação-lixiviação-ascensão.

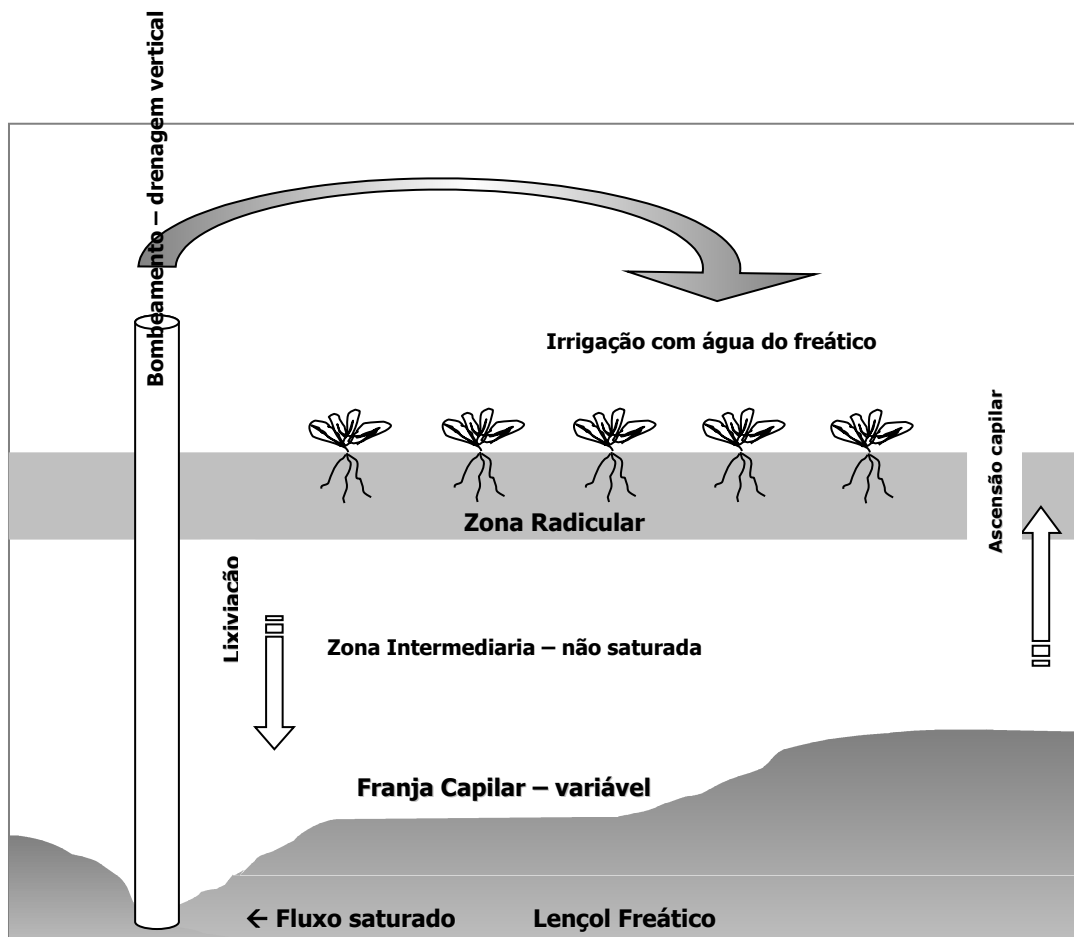


Figura 2 - Modelo esquemático do risco de salinização de solo e aquífero decorrente de irrigação.

Um adequado entendimento dos mecanismos de recarga e descarga em perímetros irrigados é essencial para o desenvolvimento sustentável da agricultura, particularmente em regiões semi-áridas. Para isso é necessário o estudo dos processos de fluxo e de transporte nas zonas não-saturada e saturada dos solos, onde a infiltração, evapotranspiração, ascensão e salinização são fenômenos dependentes (Ribeiro et al., 2003).

2.3. Manejo de irrigação

A irrigação aumenta o risco da salinidade em áreas de lençol freático raso, que pode estar associado a camadas de impedimento. Blackburn (2002) destaca que, nas áreas cristalinas, as faixas de aluvião são de grande importância para agricultura familiar, desde que apresentam teores salinos aceitáveis.

O correto manejo da irrigação é de extrema importância para um desenvolvimento sustentável da agricultura por diversos fatores, pois proporciona o fornecimento adequado de água às culturas, em quantidade e qualidade, no momento certo, considerando, pois, os aspectos econômicos, sociais e ecológicos.

Os métodos de manejo da água de irrigação podem ser divididos em três grupos (Mantov Ani & Soares, 1998; Salazar et al., 1987, citado por Souza, 1993):

- Os que se baseiam no monitoramento da umidade do solo, utilizando equipamentos como sonda de nêutrons, blocos de gesso, tensiômetros, etc;
- no conhecimento do estado hídrico da planta, seja da forma direta, como é o caso da câmara de tensão xilemática, seja indireta, por meio de sua temperatura como indicador do estresse hídrico;
- e no balanço hídrico do solo; o balanço pode ser feito em superfícies reduzidas, como é o caso dos lisímetros, ou em unidades, parcelas ou zonas de irrigação, com diferentes níveis de precisão. Este método pode ser simulado em rotinas computacionais, sendo essas rotinas usadas no presente trabalho.

Em trabalho realizado em cultura do tomateiro, Manonelli et al.(2003) verificaram a eficiência do uso da água pelas plantas apresentou correlação linear positiva com a tensão da água na zona radicular no estágio vegetativo. Assim, visando maximizar a produtividade e a

eficiência do uso da água, as irrigações devem ser realizadas com tensões de água no solo avaliadas de acordo com os sucessivos estádios fenológicos.

Santiago (2002) realizou trabalho na mesma área estudada, com o manejo baseado no monitoramento dos gradientes hidráulicos a partir de tensiômetros. Evitou-se a ocorrência de ascensão capilar nas camadas menos profundas e inibiu-se a formação de camadas salinas próximas à superfície do solo.

2.4. Qualidade da água de irrigação

A qualidade da água usada para irrigação pode influenciar vários fatores tais como disponibilidade de água para as plantas, toxicidade de íons específicos além de crescimento vegetativo excessivo, acamamento e corrosão dos equipamentos. Segundo Cruz & Melo (1969), as águas localizadas no cristalino apresentam nível elevado de condutividade elétrica (CE) com valores, maiores que 1,4 dS/m, atingindo freqüentemente 4,5 dS/m e podendo ultrapassar este valor, com limitações de vazão, em torno de 4,0 m³/h na maioria dos poços perfurados nessa formação. Para utilização dessas águas para irrigação faz-se necessário manejo adequado da irrigação e drenagem, assim como o uso de plantas tolerantes aos níveis de salinidade.

O uso de indicadores de qualidade de água permite correlacionar as alterações ocorridas na microbacia sejam tanto de origem antrópica quanto natural, tentando acompanhar a possível deterioração da qualidade das águas no tempo. Para uma interpretação ecológica deste fenômeno, é necessário estabelecer um sistema de monitoramento e a utilização de métodos simples que produzam informações objetivas e interpretáveis (Toledo & Nicolella, 2002).

Foi observado que a qualidade da água de irrigação, principalmente em regiões de semi-árido, pode ocasionar a degradação do solo alterando o seu comportamento hidráulico. Em experimento com solos de referência do Estado de Pernambuco, Freire et al., (2003) verificaram que o incremento da relação de adsorção de sódio da água de irrigação resultou na diminuição da condutividade hidráulica (Ksat), principalmente nos casos onde a água de irrigação tem condutividade elétrica (C.E.) baixa e relação de adsorção de sódio (RAS) mais elevada, favorecendo à dispersão dos colóides no solo.

2.5. Manejo de salinidade

A salinização dos solos ocorre, de uma maneira geral, em regiões de baixas precipitações pluviais, alto déficit hídrico e que apresentam deficiências naturais de drenagem interna. Montenegro et al. (2003) destacam que, através da análise geoestatística, para caracterizar a variabilidade espacial de variáveis relacionadas ao comportamento hidrossalino do solo, verifica-se que a condutividade elétrica é influenciada pelas características pedológicas do solo.

Para o manejo da água de irrigação existem um conjunto de práticas que favorecem a diminuição da condutividade elétrica no perfil agricultável, entre elas:

- Aplicação de lâminas de lixiviação- Para a redução dos níveis excessivos de sais no solo, deve-se fazer uso de algumas práticas que mantenham o equilíbrio (balanço de sais), entre os sais que entram e os que saem do solo. Para tanto são calculados os coeficientes de lixiviação que deverão ser adicionados às lâminas de irrigação necessárias a cultura. Esses valores são dados em função da tolerância da cultura aos sais e pela qualidade da água de irrigação, dada por sua condutividade elétrica.
- Frequência de irrigação - Para o cultivo em solos salinos a frequência de irrigação é um fator muito importante, pois, quanto maior a frequência, menor será a concentração dos sais, devido ao efeito da diluição. Entretanto, esta prática tende a consumir elevadas quantidades de água, devido à evaporação em solo nu. Assim, em áreas com elevadas demandas evaporimétricas, o uso de cobertura morta pode se constituir em importante alternativa (Antonino et al., 2000).

2.6. Lixiviação

Segundo AYERS & WESTCOT (1999), a lixiviação é o método prático para controlar a acumulação de sais na zona radicular, podendo ser utilizado para prevenir ou corrigir o acúmulo dos sais provenientes da água de irrigação e por evapotranspiração. Para o manejo efetivo da salinidade faz-se necessário tanto a drenagem de forma a controlar e estabilizar o nível do lençol freático, como a lixiviação, para evitar acumulação excessiva de sais no perfil

do solo, em particular nas áreas de aluvião das regiões áridas e semi-áridas, com a ocorrência do lençol freático raso.

2.7. Lâmina de lixiviação

Segundo Ribeiro et al. (2003), o umedecimento do perfil do solo é um objetivo agrônomico da irrigação. Para um dado solo, o método de aplicação das lâminas controla a distribuição espacial da umidade, interferindo diretamente em processos como infiltração e geração de escoamento superficial. Após a redistribuição da lâmina aplicada no perfil, fluxos de infiltração podem ser substituídos por ascensões, particularmente em presença de lençol freático raso. As elevadas demandas de evapotranspiração contribuem para tal inversão, à medida que secam mais rapidamente as camadas superficiais. Desse modo, irrigações mais freqüentes e com lâminas menores tendem a manter as superfícies irrigadas mais úmidas, exibindo, portanto, menores concentrações de sais nos períodos entre irrigações, além de evitarem a ocorrência de saturações temporárias em camadas de menor permeabilidade do perfil.

Para melhorar as condições de drenagem interna da área, deve-se proceder a aplicação de lâminas de lavagem (apenas nos solos salinos), objetivando carrear o excesso de sais para abaixo do perfil cultivado, afim de não afetarem o cultivo. Esta atividade normalmente é feita aplicando-se uma maior lâmina de irrigação. Pode-se também aproveitar a pluviosidade natural, caso chova suficientemente.

Segundo Ribeiro et al.(2003), para que os sais solúveis acumulados nos solos sejam removidos da zona de raízes, a quantidade de água de irrigação a ser aplicada deve exceder as necessidades da cultura. O intervalo de tempo entre tais lavagens não deve permitir que as concentrações salinas excedam os níveis tolerados pela cultura.

Em trabalho de dissertação na mesma área estudada, Santiago (2002) aplicou coeficiente de lixiviação igual a dois, promovendo intensa lavagem de sais do perfil, tendo-se verificado que o valor da CEes (condutividade elétrica do extrato de saturação) no final da implantação do repolho situou-se próximo ao inicial.

2.8. Culturas tolerantes

A salinidade tolerada refere-se à salinidade média do extrato de saturação (CEes) contida na zona radicular, que induzem uma diminuição aceitável no rendimento da cultura. Esta diminuição aceitável equivale a uma queda de produção $\leq 10\%$, segundo Ferreira (1998).

Nas áreas do vale aluvial que apresentam salinidade moderada, hortaliças como cenoura, beterraba, e repolho são intensamente cultivadas, devido aos níveis de tolerância a salinidade. Neste trabalho em particular, a cultura da cenoura foi adotada, que apresenta baixa tolerância.

2.9. Cenoura (*Daucus carota L.*)

Hortaliça anual herbácea cujo produto é constituído por uma raiz tuberosa, reta e sem ramificação, cônica ou cilíndrica, e de coloração alaranjada, cultivadas em diversas variedades, sendo a *Brasília* usada de acordo com a época de plantio e o clima da região.

Em relação aos níveis de tolerância a sais no solo e na água de irrigação, segundo Ayers e Westcot (1976), a cultura da cenoura não apresenta qualquer redução de produção quando a CE da água de irrigação é de até 0,7 mS/cm e CE do extrato saturado até 1,0 mS/cm a 25°C. Após esses valores, existe a necessidade de lixiviação de sais, devido à baixa tolerância da cultura, ocasionando uma diminuição da produtividade.

A escolha da variedade é importante devido a sensibilidade da cultura às condições climáticas. Os solos devem ser de preferência areno-argilosos, de forma a permitirem o desenvolvimento de cenouras retas e lisas. É necessário um eficiente sistema de irrigação, pois, como as outras culturas, o teor de umidade deve estar próximo a 100% de água útil, durante e logo após a emergência. Seguindo-se todas as recomendações necessárias pode-se chegar há uma produtividade de 20-30 t.ha⁻¹, segundo CISAGRO (1989).

2.10. Evapotranspiração

Evapotranspiração foi o termo usado por Thornthwaite para expressar o processo simultâneo de transpiração e evaporação. A evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica, e pelo suprimento de água do solo às plantas.

2.10.1. Tanque Classe A.

Uns dos métodos mais conhecidos para se obter os valores de evapotranspiração, são dados através do método de Tanque Classe A, desenvolvido pelo serviço meteorológico norte americano (U.S.W.B.), que consiste em leituras de lâminas evaporadas que são equiparadas à evapotranspiração através do coeficiente de tanque, que varia de acordo com o diâmetro da bordadura, com a velocidade do vento e com a velocidade relativa do ar.

O método do Tanque de evaporação é baseado na evaporação de água livre e num coeficiente do tanque (K_p), relacionado às condições do meio onde se determinam ET_o .

Doorenbos & Pruitt (1977) apresentam no Manual 24 da FAO, uma tabela com valores de K_p que depende do local onde o tanque está instalado, se é rodeado por terreno gramado ou por solo sem vegetação, além de outros fatores como: velocidade do vento, umidade relativa e tamanho da bordadura, relacionados a grama irrigada. Neste presente trabalho o valor de K_p utilizado foi de 0,75, utilizados quase sempre nos trabalhos executados nessa região.

2.10.2 Equação de Penman-Monteith

Penman em 1948 combinou o equilíbrio de energia com o método de transferência de massa e derivou uma equação para calcular a evaporação de uma superfície de água livre a partir de registros climatológicos de radiação solar, temperatura, umidade e velocidade do vento.

Conforme Allen et al. (1994a), a evapotranspiração (ET) é um processo governado por trocas de energia de uma superfície vegetada e é limitado pela quantidade de água disponível. Por isso, é possível prever a taxa de ET através do balanço de fluxo de energia, conforme a equação: $\lambda ET = R_n - H - G$, em que: λET é a densidade de fluxo de calor latente; H é o calor sensível da camada limite de equilíbrio; G é o calor sensível do solo; R_n é a densidade de fluxo de radiação líquida; λ é o calor latente requerido para evaporar uma unidade de água, expresso como umidade de energia por unidade de massa.

A partir da equação de balanço de energia, pode-se calcular a razão de Bowen (β) que é igual à relação entre o calor sensível (H) e o fluxo de calor latente λET .

Equação de resistência (r_a) e resistência total da superfície (r_s) são combinadas com o método de Penman-Monteith, para formar uma equação mais simples, descrevendo a grama

hipotética de referência. Pela combinação de expressões generalizadas de densidade do ar (σ), com expressões simplificadas de r_s e r_a para a grama, Allen et al. (1989), Smith (1991), Allen et al. (1994a) e Allen et al. (1998), parametrizaram a chamada equação de Penman-Montheith FAO (PM-FAO), reduzindo a:

$$ET_{o_{PM}} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)}$$

Equação 1

em que: Rn e G têm as mesmas unidades ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); T é a temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$); U_2 é a velocidade média do vento medida a 2m (ms^{-1}); 0,408 corresponde a $1/\gamma$ sendo γ o calor latente de evaporação da água, igual a $2,45\text{MJ.Kg}^{-1}$ a 20°C ; 900 é um coeficiente para a cultura de referência ($\text{kJ}^{-1}.\text{Kg.K}^{\circ}.\text{d}^{-1}$), que envolve os valores constantes da equação.

2.10.3. Evapotranspiração da cultura (ETc)

A evapotranspiração da cultura (ETc) considera o crescimento progressivo da planta e o aumento da área disponível. Doorenbos & Kassam (1994) chamam de evapotranspiração máxima, onde são equiparados a evapotranspiração através do coeficiente da cultura (K_c), expressados no capítulo material e métodos.

2.11. Balanço hídrico

A maior parte da Fazenda Nossa Senhora do Rosário está situada em um terraço fluvial do rio Ipanema, formando uma microbacia de grande importância para o desenvolvimento da agricultura local. Mesmo nas microbacias menores, existe sempre uma área de terreno que recebe água de chuva. Parte dessa água evapora e o restante compõe o deflúvio ou a recarga de água subterrânea (Hewlet, 1982), havendo ainda a retirada e adição de água pela prática de irrigação.

Ranzini (1990) considera que, do ponto de vista hidrológico, o deflúvio de uma microbacia pode ser considerado o produto residual do ciclo hidrológico, o qual é influenciado por três grandes grupos de fatores: clima, fisiografia, cobertura e/ou uso do solo.

O balanço hídrico envolve a quantificação dos componentes do sistema, e baseia-se no princípio da conservação de massa, sendo analisado pelos insumos, ou entradas de água, e pelas saídas de água do sistema (Pereira et al. 1997; Righetto, 1998, Tucci, 2000; Zakia, 1987). Pode ser resumido na seguinte equação hidrológica fundamental:

$$Q_e - Q_s = dV/dt \quad \text{Equação 2}$$

onde:

Q_e = vazão de entrada;

Q_s = vazão de saída;

dV = variação de armazenamento de água;

dt = intervalo de tempo.

As possíveis entradas no sistema incluem a chuva, o escoamento superficial, a drenagem lateral, e a irrigação, enquanto que as possíveis saídas incluem a evapotranspiração, o escoamento superficial, a drenagem profunda e lateral e a ascensão capilar (Pereira et al., 1997).

2.12. Movimento da água no solo

A água no solo se movimenta em resposta a gradientes de potencial total. Este movimento ocorre no sentido da redução do gradiente ou energia, isto é, dos pontos de maior potencial para os de menor, obedecendo à lei natural da mínima energia (Amaro Filho, 1982).

Condutividade hidráulica é a propriedade de um meio poroso, o solo no caso, de se deixar atravessar pela água.

A condutividade hidráulica do solo (K_o) é um dos principais parâmetros utilizados para estudos agrícolas e ambientais que envolvem o fluxo de água no solo, tais como, planejamento de sistemas de irrigação e drenagem, rebaixamento do lençol freático, movimento de água no solo, nutrição de plantas, controle da erosão e poluição da água (Jones & Wabonet, 1984; Freeze, 1994; Filizola et al., Jong van Lier & Libardi, 1999; Libardi, 2000; Radcliffe & Rasmussen, 2000).

Libardi (2000) ressalta que há carência de estudos da dinâmica da água em condições não-saturadas. Para avaliação de tais fluxos, as propriedades hidráulicas da zona não-saturada precisam ser estimadas. Dentre os métodos de campo mais utilizados para medir as

propriedades hidráulicas não-saturadas destaca-se o permeâmetro de Guelph (Zhang et al., 1998).

Para explicar o movimento da água em meios porosos saturados, Darcy em 1856 comprovou em seus estudos que a densidade de fluxo (q) é proporcional ao gradiente hidráulico (dH/dz), sendo a constante de proporcionalidade denominada condutividade hidráulica (K), podendo ser expresso por:

$$q = -K (dH/dz) \quad \text{Equação 3}$$

Hillel (1980) e Beven et al. (1972) estenderam posteriormente a Equação de Darcy para meios porosos não saturados, definindo-se a condutividade hidráulica como dependente da tensão matricial como:

$$K = K(\varphi) \quad \text{Equação 4}$$

Gardner (1958) propôs o uso da relação exponencial para relacionar a condutividade hidráulica não saturada em função da umidade ou do potencial matricial, e apresentou os seguintes modelos empíricos:

$$K(\theta) = K_0 \exp(\gamma (\theta - \theta_0)) \quad \text{Equação 5}$$

ou

$$K(\varphi) = K_0 \exp(\alpha \varphi) \quad \text{Equação 6}$$

onde K é a condutividade hidráulica não-saturada, K_0 representa a condutividade hidráulica saturada e γ e α são os parâmetros de forma das curvas $K(\theta)$ e $K(\varphi)$ respectivamente. Tais variáveis podem ser estimadas em testes de laboratório e de campo, como o utilizado nesse estudo.

O movimento de água no perfil do solo é um importante componente no estudo de problemas relacionados à agricultura e ao ambiente. Os processos de infiltração, circulação e recarga são de grande relevância para a manutenção do equilíbrio salino em um aquífero, segundo Leprun (1993), citado por Ribeiro et al. (2003). Para tanto, é indispensável uma adequada caracterização das propriedades hídras do solo, dentre as quais pode-se citar a condutividade hidráulica, de grande importância neste trabalho.

2.13. Dispersão hidrodinâmica

Segundo Montenegro et al. (2004), em geral, pode-se escrever a dispersão hidrodinâmica como uma função linear da velocidade nos poros, cujo coeficiente angular é denominado de dispersividade, a qual depende da escala espacial do problema (Dagan, 1973). O transporte de soluto é altamente dependente da heterogeneidade na condutividade hidráulica do meio. A dificuldade inerente em se caracterizar devidamente tais heterogeneidades sem produzir excessiva suavização na variabilidade espacial, vem motivando a aplicação de modelos estocásticos para simulação de transporte na zona saturada (Mackay e O'Connell, 1991), citado por Montenegro et al. (2004).

2.14. Modelagem

Os modelos matemáticos utilizados na geração de cenários hidráulicos são fundamentados em uma abordagem física do processo hidrológico, utilizando a equação da conservação da massa e a equação geral do fluxo.

Geralmente o domínio em que ocorre o escoamento é subdividido em elementos ou células em que as equações diferenciais são discretizadas de modo a se obter um sistema de equações algébricas que relaciona as variáveis hidrodinâmicas com a posição no domínio e com o tempo. A completa definição do problema é feita com a especificação das condições iniciais e de contorno (Righetto, 1998) citado por Oliveira (2001).

Segundo Montenegro et al. (2004), no tocante à modelagem de transporte de sais, a equação clássica é baseada em modelo Fickiano, resultando na formulação conhecida como equação de advecção-dispersão, que em duas dimensões pode ser escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{C_w' W}{nb^*} + \frac{C_R' R}{nb^*} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

Equação 7

onde D_{xx} , D_{yy} , e D_{xy} são os componentes do tensor de dispersão hidrodinâmica; “ v_x ” e “ v_y ” são as componentes do tensor de velocidade de escoamento nos poros do aquífero; “ n ” é a

porosidade; “ b^* ” representa a espessura saturada efetiva do aquífero; “ C ”, “ C_w ” e “ C_R ” são as concentrações do aquífero, do poço, e da água de recarga, respectivamente.

Entre os modelos computacionais mais indicados para a quantificação das variáveis do balanço hídrico e transporte de soluto, o WAVE (Water and Agrochemicals in soil, crop and Vadose Environment) (Vancloster, 1994), foi escolhido para este experimento o qual permite simular a dinâmica de água e solutos em sistema solo-água-planta-atmosfera.

2.15. Fazenda N.Sra. do Rosário, Pesqueira - PE.

A Fazenda N.S. do Rosário, propriedade do governo do estado de Pernambuco, tornou-se parte do programa de apoio ao pequeno produtor rural. Há cerca de quinze anos vem-se implementando tecnologia para se obter um melhor aproveitamento hidroagrícola, visando a utilização do aquífero, o aumento das potencialidades agrícolas, o respeito aos limites do lote (CISAGRO, 1989).

A maior parte da Fazenda Nossa Senhora do Rosário está situada em uma superfície geomórfica aplainada, que constitui o terraço fluvial do rio Ipanema, formado por sedimentos aluviais de textura variada, com maior parte do solo classificada em Neossolo Flúvico e Neossolo Regolítico, como mostra o Quadro 1. O solo no lote em estudo foi classificado como Neossolo Flúvico, referenciado como RU4, descrito detalhadamente no Anexo A.

Quadro 1 - Unidades de mapeamento na área em estudo (Ribeiro et al., 1999)

CLASSE DE SOLO	ÁREA	
	ha	%
RR1-NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico + NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico ambos fase relevo suave ondulado	25	23
RR2-NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico solódico textura média (leve) fase relevo plano e suave ondulado	12	11
RU1-NEOSSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico textura arenosa ou média (leve)/média (leve) ou arenosa moderadamente drenado	25	23
RU2-NEOSSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico textura média/média (leve) ou arenosa moderadamente drenado	12	11
RU3-NEOSSOLO FLÚVICO Sódico típico textura média (leve)/média moderadamente drenado	4	3
RU4-NEOSSOLO FLÚVICO Sódico típico textura média/média ou arenosa moderadamente drenado	6	6
RU5-NEOSSOLO FLÚVICO Sódico salino textura média/média (leve) ou média imperfeitamente drenado	7	6
RU6-NEOSSOLO FLÚVICO Sálco sódico textura média imperfeitamente drenado	18	17

Vários estudos já foram realizados na área, entre eles, Blackburn (2002) avaliou as características hidráulicas do solo caracterizando o fluxo de água e a movimentação de sais, onde verificou que, em áreas de aluvião irrigadas com microaspersão e com culturas temporárias de baixa profundidade de zona radicular, a adoção de turno de rega diário não permitiu a ocorrência de inversões de fluxo até 1,2 m, mesmo durante a época de altas temperaturas e em solos de textura franco-argilosa. Santiago (2002) analisou o mesmo sistema, verificou que tais solos foram passíveis de lixiviação ao longo de todo o perfil, verificando que não houve ocorrência de saturações temporárias, não obstante a elevada variabilidade vertical de propriedades hidráulicas de solos aluviais.

Também foi avaliada a influência da cultura halófito na dinâmica hidrossalina de uma área em processo de desertificação, conseqüente da irrigação sem o manejo adequado, do tipo de solo e das condições climáticas (Oliveira, 2001).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área experimental

O trabalho foi desenvolvido na Fazenda Nossa Senhora do Rosário, situada no Agreste do Estado Pernambucano, no Município de Pesqueira, a 22 km da cidade de Pesqueira e 270 km da capital. As coordenadas geográficas são 08°10'25"S, 35°11'25"W, de latitude e longitude, respectivamente, e 650m de altitude. O Rio Mimoso possui regime temporário e inserido numa região de várzea. Suas terras distribuem-se em estreita faixa ao longo do terraço aluvial do rio Ipanema, e são limitadas por áreas de encostas do embasamento cristalino, abrangendo cerca de 100ha, onde há uma área de assentamento estadual, requerendo a implantação de sistemas de irrigação. A região apresenta infra-estrutura para a pequena irrigação. O uso do aporte hídrico subterrâneo na fazenda necessita de um manejo de irrigação adequado para manter a qualidade do solo e da água subterrânea.

Na área estudada o aquífero aluvial é raso, apresentando espessura média de 10m, com cerca de 15 km de extensão e 300 m de largura (Montenegro, 1999).

A condição climática do município de Pesqueira, de acordo com Montenegro et al. (2001), é semi-árida, muito quente, tipo Estepe. Nessa área ocorrem precipitações médias anuais da ordem de 600 mm, concentradas nos meses de abril a agosto. A temperatura média mensal oscila em torno de 20-30 °C (Ribeiro et al., 1999). Essas condições climáticas reduzem o potencial matricial nas camadas mais superficiais do perfil do solo, induzindo fluxos ascendentes.

A área em estudo possui drenagem subterrânea artificial a 1,5m de profundidade, com poço instalado, e próximo ao leito do riacho principal, seco durante a maior parte do ano. A salinidade da água subterrânea situa-se, em média, em 1dS/m, a qual vem sendo monitorada diariamente. Caracterizações de tais áreas foram concluídas por Blackburn (2002) e Santiago (2002).

Adotou-se controle diário da irrigação baseado no Tanque Classe A e usou uma lâmina de lixiviação reduzida em área cultivada com hortaliça (cenoura), conduzindo-se monitoramento das variáveis tais como condutividade elétrica e pH do lençol freático e do solo. Tal área foi monitorada com tensiômetros, cápsulas de extração de solução do solo, e com extratos de saturação do solo em laboratório. As leituras de campo foram conduzidas por agricultor local, por supervisão.

Foi estabelecida uma malha com 12 pontos dentro da área em estudo, onde foram coletadas amostras de solo em diversas profundidades, entre 0 e 100cm, sendo quatro desses pontos nas estações tensiométricas (01, 02, 03, 04), conforme apresentado no croquis da Figura 3.

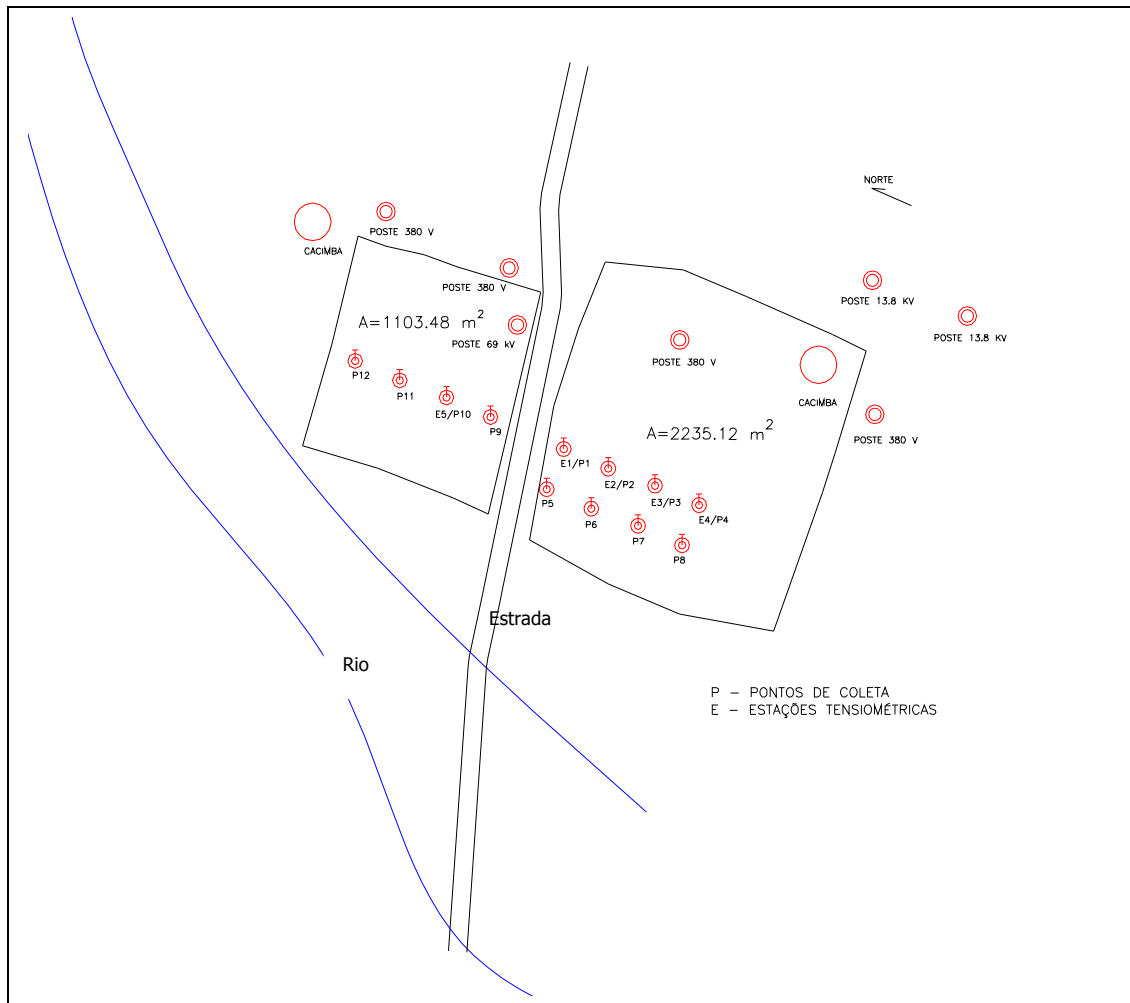


Figura 3 – Croquis da área em estudo.

A área é dotada de estação meteorológica completa (Figura 4), a cerca de 300m da área em estudo, fornecendo leituras horárias de precipitação, umidade relativa, temperatura, radiação solar e velocidade do vento. Através de poços de observação é possível acompanhar as variações da salinidade da água subterrânea. E o tanque classe “A” fornece estimativas indiretas de evapotranspiração potencial.



Figura 4 – Estação Meteorológica completa e Tanque Classe “A”

A área experimental estudada dispõe de sistema de irrigação localizada, de tensiômetros, pluviômetros, tubos de acesso para sonda de nêutrons, e piezômetros. A unidade vem sendo cultivada com hortaliça (no momento do experimento, cenoura) através de microaspersão, adotando o controle diário da irrigação baseado no Tanque (adotando o valor de $K_p = 0.75$). Os valores de evapotranspiração do Tanque classe A estão comparados com os de Penman-Monteith, calculados através do software Cropwat, que necessita da Estação meteorológica para obter os dados de entrada (Anexo D):

- Temperatura média ($T_{máx}$, °C);
- Temperatura mínima ($T_{mín}$, °C);
- Velocidade média do vento (U_2 , $m.s^{-1}$);
- Umidade relativa média (%);
- Altitude; Latitude e Longitude.

O monitoramento do solo foi efetuado com sonda de nêutrons, que possibilita ensaios não-destrutivos para avaliação da umidade do solo. O monitoramento sistemático de piezômetros permitiu o acompanhamento do nível piezométrico e da avaliação da condutividade elétrica das águas subterrâneas, junto aos poços de observação.

3.2. Análise do desempenho do sistema de irrigação

Para determinar o coeficiente de uniformidade de aplicação de água na irrigação foi determinado o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) (Christiansen, 1942). Para a microaspersão, foi instalada uma malha de coletores distanciados entre si de 0,5 m entre linhas da cultura, e realizada três repetições. A malha foi constituída de nove linhas de coletores sendo três linhas instaladas no início, três linhas no centro e outras três linhas instaladas no final da área irrigada. Essa avaliação foi realizada em setembro de 2000 e setembro de 2001.

O sistema de irrigação foi avaliado por Santiago (2002), quando se encontrou o valor médio para a vazão de 44,54 L.h⁻¹, próximo ao avaliado em teste realizado no início desse experimento. Foi estabelecida uma pressão de serviço de 175,60 KPa.

3.3. Manejo de irrigação

As lâminas de irrigação foram aplicadas a nível diário, utilizando as leituras de evaporação do Tanque classe A e as precipitações no período para determinar a lâmina necessária de irrigação. Foi adotado para todo o ciclo da cultura o valor igual a 0,75 referente ao coeficiente de tanque (Kp), conforme Doorembos & Kassam (1979).

Foram considerados quatro estádios de desenvolvimento para a obtenção dos coeficientes de cultura (Kc) da cenoura, como mostra o Quadro 2, assumindo-se produtividade de 100%.

Quadro 2- Valores de coeficiente de cultura para a cenoura.

Estádio (dias)	0-20	20-50	50-80	80-100
Kc	0,45	0,75	1,05	0,90
Datas (período)	10/02/03	a 01/03/03 a	31/03/03 a	30/04/03 a
	28/02/03	30/03/03	29/04/03	15/05/03

Fonte: Doorembos e Kassam (1979)

Os 1º, 2º, 3º e 4º estádios foram aplicados nos intervalos de 10/02/2003 a 28/02/2003, 01/03/2003 a 30/03/2003, 31/03/2003 a 29/04/2003, 30/04/2003 a 15/05/2003.

Foi assumida para todo o ciclo do manejo da irrigação uma eficiência de aplicação do sistema de irrigação igual a 85 %, conforme orientação de Keller & Bliesner (1990). O coeficiente de lixiviação C_x foi calculado como (Ayers & Westcot, 1999):

$$C_x = \frac{1}{1 - \frac{CE_{irrig}}{CE_{dre}}} \quad \text{Equação 8}$$

sendo:

$$CE_{irrig} = 2 \text{ dS/m} \quad \text{e} \quad CE_{dre} = 4 \text{ dS/m}$$

Obtendo-se:

$$C_x = 2,0$$

Sendo proposto um $C_x = 1,1$; para proporcionar uma lixiviação incompleta.

3.4. Evapotranspiração

Para determinação da evapotranspiração real diária da cultura foi estimada usando a equação:

$$ETR = K_c \times K_p \times EV \quad \text{Equação 9}$$

onde:

ETR - evapotranspiração real diária da cultura, mm;

Kc - coeficiente de cultivo (Quadro 2);

Kp - coeficiente de tanque (0.75);

EV - evaporação.

As lâminas brutas diárias de irrigação foram estimadas para um turno de rega diário, como:

$$L_{bruta} = \frac{L_{liquida}}{E_f} * C_x = \frac{(ETR - P)}{E_f} * C_x \quad \text{Equação 10}$$

onde:

L_{bruta} - lâmina bruta diária ou total de irrigação, mm,

$L_{líquida}$ - lâmina líquida de irrigação diária, mm,

E_f - eficiência do sistema de irrigação,

Cx - coeficiente de lixiviação necessário para a manutenção do equilíbrio salino no perfil de solo,

P – precipitação efetiva, mm.

3.5. Caracterização física

Para avaliar a granulometria foi utilizado o método do densímetro descrito pela Embrapa (1997), juntamente com o diagrama triangular das classes texturais do solo (Figura 5).

Foram considerados amostras de cinco profundidades (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm, 80-100 cm), retiradas nas proximidades das estações tensiométricas, em uma malha formada por 12 pontos equidistantes.

As análises de densidade do solo foram realizadas nos laboratórios de Física do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE e obedeceram aos métodos descritos no Manual de Métodos de Análises do Solo (Embrapa, 1997).

A coleta da amostra para a densidade global foi feita através do cilindro apropriado produzindo amostras indeformadas em um anel coletor de volume conhecido.

A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico. Junto com os resultados da densidade global, é avaliada a porosidade total de campo (Embrapa, 1997).

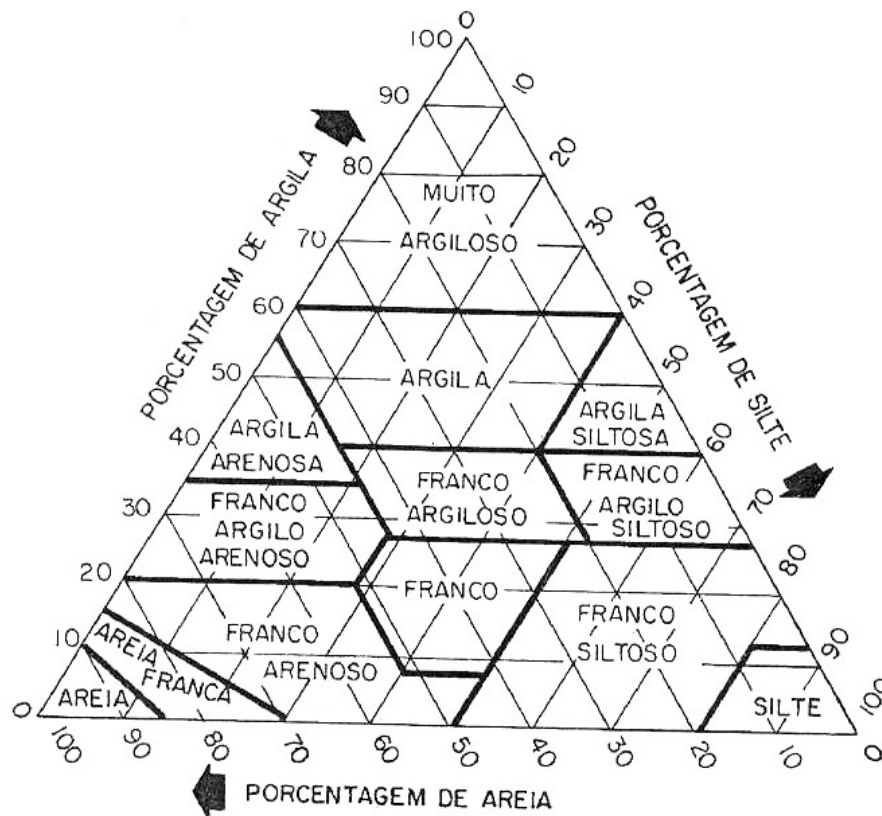


Figura 5 - Diagrama triangular das classes texturais do solo (EMBRAPA, 1997).

A porosidade total é expressa em percentagem, segundo a expressão proposta por VOMOCIL (1965):

$$Pt = \left(1 - \frac{d_g}{d_p} \right) * 100 \quad \text{Equação 11}$$

em que:

Pt - é a porosidade total do solo (%),

dg - é a densidade global (g/cm^3),

dp - é a densidade das partículas (g/cm^3).

A avaliação da curva característica de retenção de umidade do solo foi realizada utilizando a câmara de pressão de Richards (Richards, 1954), no Laboratório de Física do Solo da UFRPE. As umidades do solo, na base de massa, foram obtidas de acordo com os potenciais matriciais de 0; -0,01; -0,033; -0,1; -0,25; -0,75; e -1,5 MPa para as profundidades

de 0 – 20cm; 20 – 40cm; 40 - 60cm, 60 – 80cm;. A plotagem das tensões com as respectivas umidades resulta na curva característica de umidade do solo (EMBRAPA, 1997).

As amostras saturadas foram colocadas em placas de cerâmica previamente saturadas e submetidas a uma determinada pressão, até atingir a drenagem máxima da água contida nos seus poros, correspondente a tensão aplicada. Determina-se então por gravimetria, a umidade da amostra. Os dados obtidos são ajustados para os modelos de van Genuchten (1980), para obtenção do perfil de umidade a partir do perfil de tensão (Equação 12).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^{1/m}} \quad \text{Equação 12}$$

O modelo de van Genuchten (1980) faz-se o ajuste dos parâmetros empíricos (n e gama) a partir de regressão múltipla com os dados de laboratório, para estimação da função W(h). O parâmetro empírico m é obtido pela relação $m=1-1/n$ (Anexo E e F).

3.6. Condutividade hidráulica (K)

Através dos funcionais desenvolvidos por van Genuchten (1980) foi determinado um dos modelos mais utilizados para aproximação da condutividade hidráulica sendo escrito da seguinte forma:

$$K = K_{\text{sat}} S_e^x \left[1 - (1 - S_e^{x/m})^m\right]^2 \quad \text{Equação 13}$$

onde:

x = parâmetro de inclinação (Mualen, 1976) propôs 0,5 para a maioria dos solos);

K_{sat} = condutividade hidráulica saturada;

S_e = saturação efetiva ($0 \leq S_e \leq 1$), dada por:

$$S_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad \text{Equação 14}$$

3.7. Permeâmetro de Guelph

Foi utilizado o Permeâmetro de Guelph, para medição da condutividade hidráulica, que consiste em um conjunto de tubos concêntricos. O tubo central tem a função de permitir a entrada de ar e regular o nível d'água dentro do furo de sondagem. Os demais fazem a função de reservatório e suporte.

O Permeâmetro de Guelph é de fácil montagem. O ensaio é realizado com reduzido volume de água, apenas o necessário para encher os tubos. Após o registro da taxa de infiltração, pode-se obter estimativa do parâmetro α da função $K(\phi)$, proposta por Gardner(1958), e da condutividade hidráulica saturada K_o . O potencial de fluxo mátrico ϕ_m e a sorvidade S são calculados segundo Reynolds & Elrich (1986) como recomendado pelo manual Soil Moisture (1991).

O princípio é de que o fluxo a partir de um furo cilíndrico em solo não saturado, homogêneo e isotrópico, no qual é mantida uma carga hidráulica pequena, atinge o regime permanente rapidamente. A vazão para estas condições foi descrita por Reynolds & Elrich (1986) como:

$$CQ = 2\pi H^2 K_o + C\pi \alpha^2 K_o + 2\pi H \phi_m \quad \text{Equação 15}$$

onde:

a - é o raio do furo;

ϕ_m - é o potencial de fluxo matricial;

H - é o nível da água no furo;

K_o - é a condutividade hidráulica saturada de campo;

C - é um parâmetro de ajuste dimensional, e

Q - é a vazão.

Foram adotadas quatro cargas, o que permitiu utilizar seis pares de cargas hidráulicas diferentes (5,0cm, 7,5cm, 10,0cm, 12,5cm).

Cada par de cargas hidráulicas distintas forma um sistema de equações, cujas incógnitas são K_o e o ϕ_m .

O ϕ_m é definido como:

$$\phi_m = \int_{\phi_i}^0 K(\phi) d\phi \quad \text{Equação 16}$$

$$\phi_i < \phi < 0$$

Substituindo-se a Equação 13 (função de condutividade hidráulica não saturada) na Equação 16, tem-se:

$$\frac{\phi_m}{K_0} = \frac{(1 - \exp(\alpha \phi))}{\alpha} \quad \text{Equação 17}$$

Como o numerador do segundo membro da Equação anterior tende para 1, obtém-se:

$$\frac{\phi_m}{K_0} = \alpha^{-1} \quad \text{Equação 18}$$

As equações seguintes permitiram o cálculo da condutividade hidráulica e do fluxo de potencial mátrico.

Condutividade hidráulica:

$$K_{fs} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad \text{Equação 19}$$

onde:

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad \text{Equação 20}$$

e onde,

$$G_1 = G_2 \frac{[H_2 C_1]}{[H_1 C_2]} \quad \text{Equação 21}$$

com,

$$Q_2 = (X)(R_1)$$

Fluxo potencial matricial:

$$\phi_m = J_1 Q_1 - J_2 Q_2 \quad \text{Equação 22}$$

onde,

$$J_1 = \frac{(2H_2^2 + a^2 C_2) C_1}{2\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad \text{Equação 23}$$

com,

$$J_2 = J_1 \left[\frac{(2H_1^2 + a^2 C_1) C_2}{(2H_2^2 + a^2 C_2) C_1} \right] \quad \text{Equação 24}$$

A Sorvidade (S) é calculada diretamente como se segue:

$$S = \sqrt{2(\Delta \theta) \phi_m} \quad \text{Equação 25}$$

Onde: $\Delta \theta = \theta_{cc} - \theta_i$; θ_{cc} é umidade volumétrica na capacidade de campo; θ_i é a umidade volumétrica inicial.

O Permeômetro de Guelph traz grande praticidade no campo (Figura 6), tanto pelo fácil manuseio e montagem, quanto pela facilidade de realizar o ensaio, além de permitir uma boa estimativa da curva de condutividade hidráulica não saturada mesmo com pequenos gradientes hidráulicos junto à parede do furo.



Figura 6- Permeômetro de Guelph, montado no campo.

3.8. Tensiometria

Entre os instrumentos disponíveis para avaliação da umidade do solo está o tensiômetro, que mede indiretamente as condições de umidade do solo inclusive na região das raízes da planta em forma de Potencial matricial (Ψ_m). É importante evidenciar que, em geral, as hortaliças têm seu desenvolvimento intensamente influenciado pelas condições de umidade do solo.

O tensiômetro consiste em uma cápsula porosa (geralmente de material cerâmico), conectada a um tubo de PVC. Estando a cápsula em contato com o solo, a água no interior do tensiômetro fica em equilíbrio, permitindo a livre passagem de água e solutos. Para leitura da diferença de sucção pode-se usar manômetro de ponteiro ou manômetro de mercúrio. Neste experimento, o manômetro de mercúrio foi usado.

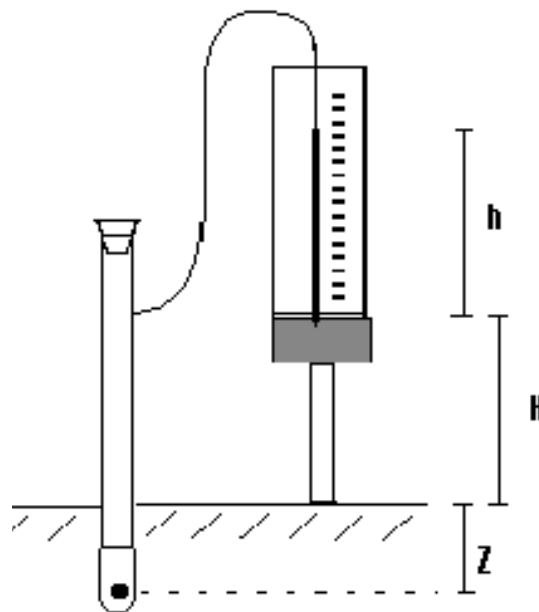


Figura 7 - Imagem esquemática do modelo do tensiômetro empregado. Fonte: Blackburn, 2002

Quanto menor a umidade do solo, maior a sua tensão, neste caso o solo retira (por sucção) a água do tensiômetro através da cápsula porosa, elevando a coluna de mercúrio (Figura 7).

O cálculo do potencial matricial se dá pela aplicação direta da lei de Stevin conforme se segue:

$$\psi_m = -12,6 h + H + Z$$

Equação 26

sendo:

h = altura da coluna de mercúrio;

H = altura da cubeta de mercúrio até a superfície do solo;

Z = profundidade do tensiômetro.

Para se obter o potencial total precisa-se adicionar o potencial gravitacional. Para simplificação do cálculo foi adotado como nível de referência à superfície do solo, anulando-se assim o termo Z da Equação 26.

As tensiômetros são, no entanto limitados a sucções matriciais inferiores a 1 atm (cerca de 1 bar ou 100 KPa).

Para avaliar o comportamento da umidade da área em estudo, fez-se necessário à instalação de uma malha de tensiômetros, distribuídos em cinco estações tensiométricas (Estação tensiométrica 01 - 02 - 03 - 04 - 05) com tensiômetros instalados a cada vinte centímetros até atingir a um metro de profundidade (Figura 8).



Figura 8 – Estação Tensiométrica.

3.9. Sonda de nêutrons

A Sonda de nêutrons 503 DR hydroprobe moisture gauge, de fabricação da CPN International Inc., foi utilizada para obter diretamente os perfis de umidade do solo, que é dado em forma de contagem normalizada de nêutrons.

A sonda de nêutrons é dividida em uma parte constituída pela fonte radioativa, que emite os nêutrons rápidos através de um tubo de acesso no solo, e outra pelo detector de nêutrons térmicos.

A fonte radiativa emite nêutrons rápidos (grande energia) no solo que está em volta do emissor. Esses nêutrons colidem com átomos de hidrogênio (H) existentes na molécula de água tornando-os lentos; esses nêutrons lentos chegam ao detector dando origem a impulsos elétricos que são contabilizados pela sonda em um determinado tempo. Então quanto maior a umidade do solo, maior o número de impulsos elétricos registrados.

A sonda penetra no solo através de um tubo de acesso de alumínio, instalado em cada estação tensiométrica, a fim de que sejam executadas as leituras nas profundidades desejadas: 10,20,30,40,60,80,100,120 e 140cm.

Blackburn (2002) executou a calibração da sonda, sendo necessários dois períodos de coleta para determinar a umidade volumétrica localizada próxima ao tubo de acesso. A primeiro foi feito com o solo seco, e o segundo com o solo úmido, para que abrangesse uma faixa de umidade mais ampla. A calibração foi executada com a umidade determinada em laboratório e a regressão linear simples da contagem normalizada (CN). A regressão linear simples da CN representa a razão entre o número de contagens no solo (C_{solo}), e o mesmo número de contagens conseguido no mesmo intervalo de tempo, num moderador padrão (C_{barril}). Esta contagem é realizada em barril cheio com água ($CN = C_{\text{solo}} / C_{\text{barril}}$).

O coeficiente r^2 da regressão linear simples foi superior a 98%. A reta da calibração neutrônica, obtida pela plotagem dos valores de umidade volumétrica em função da contagem normalizada de nêutrons atenuados (CN), pode ser vista na Figura 9 abaixo, como também a função de transformação da CN em umidade volumétrica.

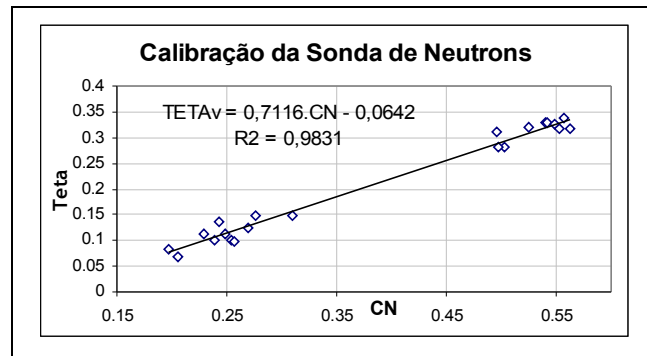


Figura 9- Curva de calibração neutrônica para o solo estudado (fonte: Blackburn, 2002).



Figura 10- Leitura de umidade em reservatório de água para calibração.

3.10. Condutividade elétrica da água e do solo (CE)

Através da condutividade elétrica é quantificado o teor de eletrólitos ou sais dissolvidos na solução do solo. A concentração de sais na solução do solo varia com o teor de umidade do solo. Em áreas de clima semi-árido, devido à dificuldade de se determinar as concentrações efetivas de sais em teores de umidade do solo, utiliza-se o extrato de saturação como padrão, correlacionando-se os resultados obtidos com o crescimento das plantas.

O extrato de saturação representa o menor teor de umidade do solo que pode ser repetido com certa segurança e relativa facilidade, possibilitando a coleta de volumes adequados razoáveis de líquido para análises (Rhoades, 1982). Os valores de parâmetros analíticos obtidos no extrato de saturação geralmente apresentam alta correlação com os

medidos na condição de umidade natural do solo. Por este motivo, a tolerância das culturas à salinidade é relacionada à condutividade elétrica, ou concentração total de eletrólitos do extrato de saturação.

O método de obtenção do extrato de saturação descrito a seguir é o método apresentado por Rhoades (1982), utilizando bomba de vácuo, filtros de Büchner e filtro de Millipore.

3.11. Simulação computacional com o modelo WAVE

Através do software WAVE (Vanclouster et al., 1994) é possível simular o balanço hídrico e o balanço de sais nas condições adotadas, avaliando-se a evapotranspiração real, em função do nível do lençol freático ou das tensões nas camadas do perfil.

As informações físicas, químicas e hidrológicas são fornecidas nos seguintes arquivos de entrada:

- Climdata.in (CLIMATOLOGICAL DATA INPUT), com as informações sobre a climatologia, evaporação, irrigação e precipitação, temperaturas máximas e mínimas e radiação solar, para cada dia ou período simulado;
- Gendata.in (GENERAL INPUT FOR THE MODEL), onde são colocadas informações sobre número de camadas e tamanho dos compartimentos, período das simulações, parâmetros relativos à solução numérica;
- Watdata.in (INPUT FOR MODELING WATER TRANSPORT), onde estão as informações sobre as propriedades hidráulicas, curva característica de retenção do solo, condições de contorno inferior, aspectos de captação de água pela planta como o coeficiente de crescimento da cultura (K_c) o índice de área foliar (LAI).
- Soldata.in (SOLUTE DATA INPUT), onde estão as informações sobre as propriedades hidrodinâmicas do meio poroso, as propriedades físico-químicas do soluto, condições de contorno da simulação de transporte.

Depois de editados os arquivos de entrada, são gerados o arquivo ERR_File (com as informações sobre erros nos arquivos editados) e os arquivos de resposta (*.out), a saber: WAT_SUM.OUT, com os resultados de umidade de campo, WAT_CUM.OUT, WC.OUT e PH.OUT que trazem as condições do balanço hídrico em função do tempo, FLX.OUT para

fluxos de água, e WAT_ET.OUT, para a evapotranspiração atual e potencial. Ainda existem outros arquivos de saída que simulam o transporte de soluto e nitrogênio, embora tais informações não estejam abordadas nesse estudo.

Na pesquisa em questão está sendo simulada a seguinte situação de perfil:

- Solo com 5 camadas (0-120 cm), sendo cada compartimento com 10cm, no total de 12;
- Lençol freático a uma profundidade constante de 2 metros;
- Irrigação durante 95 dias.

As simulações foram realizadas considerando as condições de tensão especificada no contorno inferior do perfil.

3.11.1 Discretização dos perfis para simulação.

Na área cultivada adotou-se um perfil com uma profundidade de 120cm, compreendendo o solo não saturado. Para simulações, dividiu-se o perfil em cinco camadas e doze compartimentos de 10 cm cada, de acordo com o esquema da Figura 11.

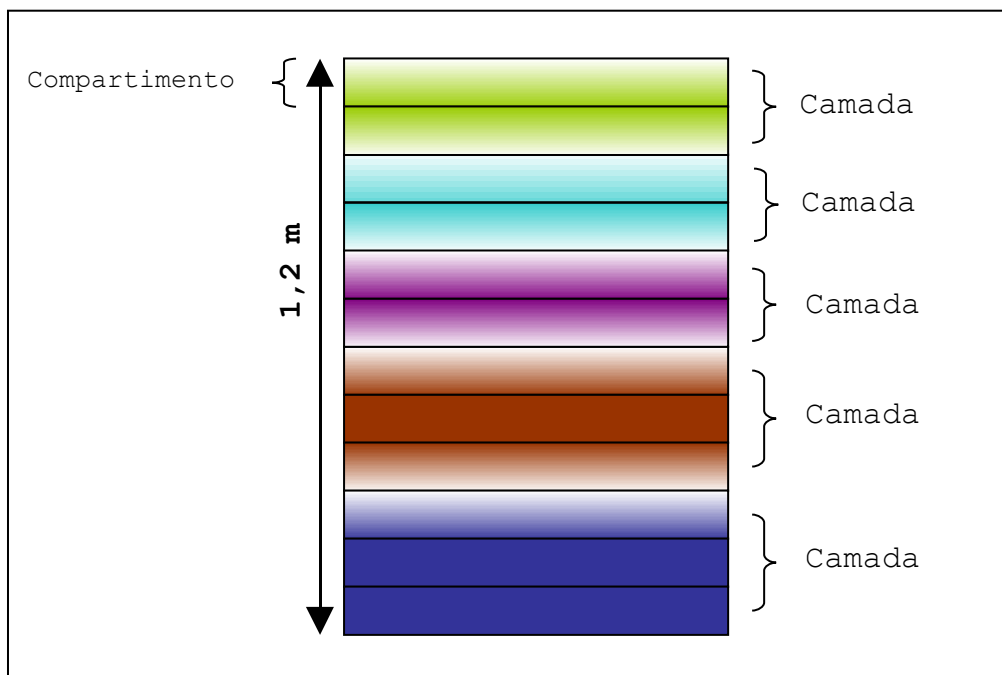


Figura 11 – Esquema de discretização dos perfis simulados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização textural

Para avaliação hidráulica global do solo, fez-se necessário a caracterização da granulometria, sendo observado os parâmetros físico-hídricos que estão diretamente correlacionados com as frações texturais encontradas. Foi adotada uma malha com 12 pontos dentro da área em estudo, onde foram coletadas amostras em diversas profundidades, entre 0 e 100cm, sendo quatro destes pontos localizados nas estações tensiométricas (01, 02, 03, 04).

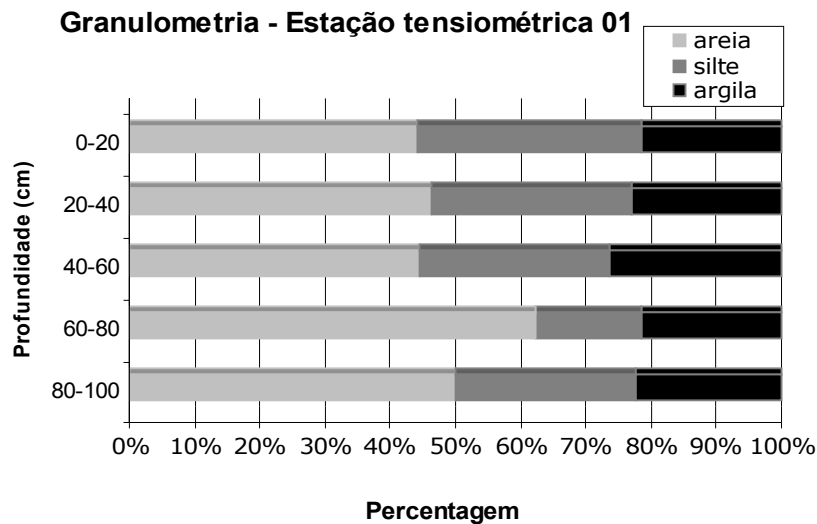


Figura 12 – Granulometria na estação tensiométrica 01

Na estação tensiométrica 01 (Figura 12) é observado um acréscimo na percentagem de areia sendo 62,24% entre 60-80cm de profundidade, maior em relação às outras profundidades desta mesma estação, ocorrendo também nesta mesma profundidade um decréscimo na percentagem de silte (16,28%), a percentagem de argila teve sua distribuição bastante uniforme ao longo das profundidades nesta estação tensiométrica, cerca de 20-25%.

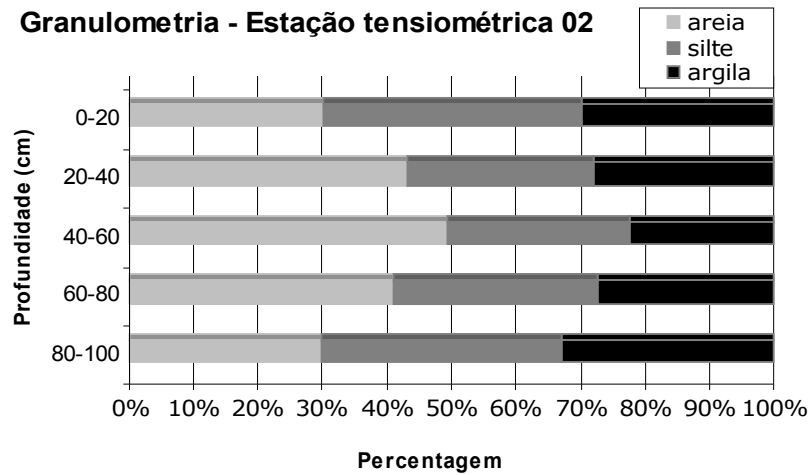


Figura 13 – Granulometria na estação tensiométrica 02.

Na estação tensiométrica 02 (Figura 13) não foi observada nenhuma variação abrupta de textura entre profundidades, apenas um comportamento apresentando uma maior percentagem de areia entre 20-80cm, sendo encontrada a percentagem de quase 50% entre 40-60cm de profundidade.

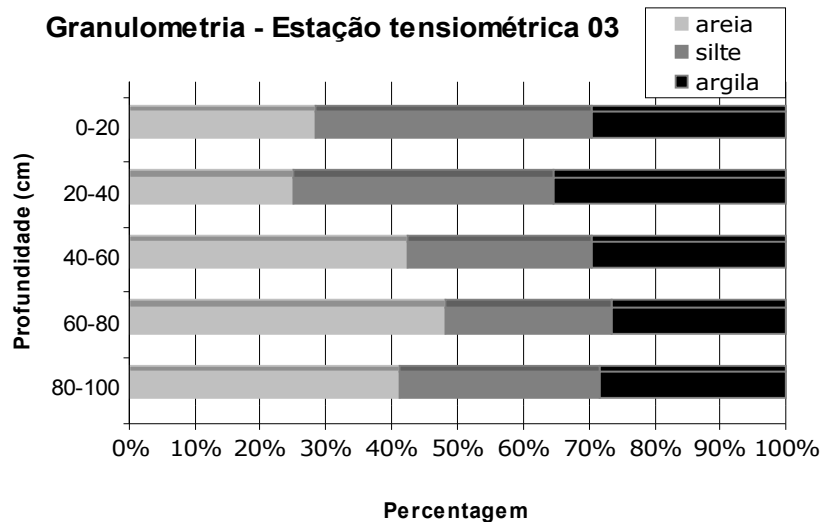


Figura 14 – Granulometria na estação tensiométrica 03.

A estação tensiométrica 03 (Figura 14) apresentou um comportamento próximo ao encontrado na estação 01, sendo as percentagens de silte e argila maiores nesta estação, entre 60-80cm de profundidade foi encontrada a maior percentagem de areia da estação (48,24%).

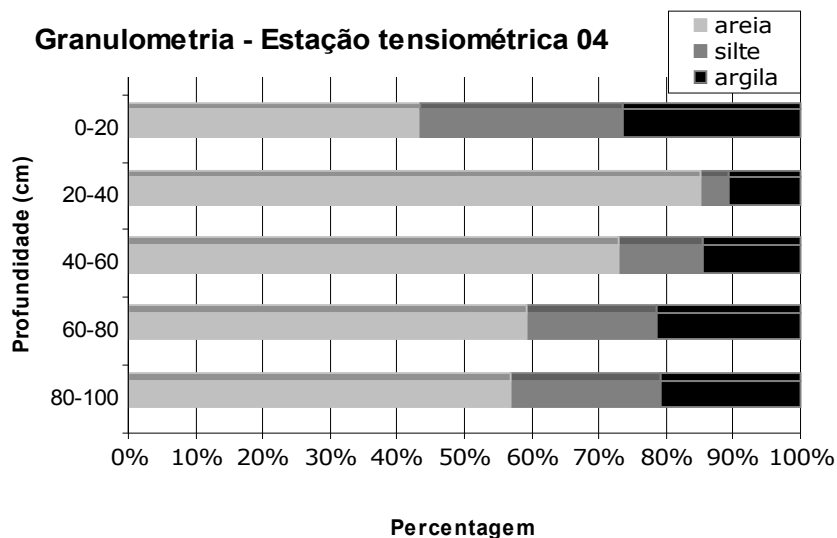


Figura 15 – Granulometria na estação tensiométrica 04.

A estação tensiométrica 04 (Figura 15) teve um comportamento diferente das estações anteriores, sendo encontradas as maiores percentagens de areia com um significativo aumento entre 20-40cm de profundidade (85,24%). Conseqüentemente, a percentagem de silte foi bruscamente menor (4,28%).

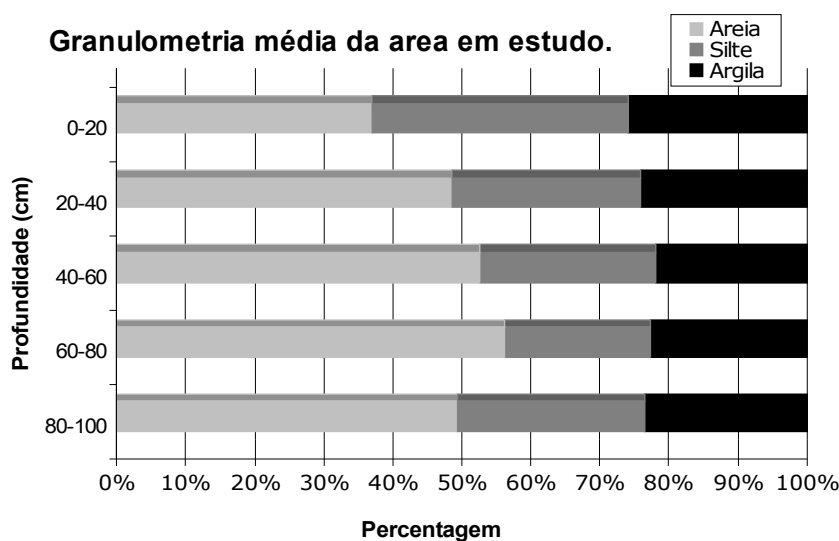


Figura 16 – Granulometria média da área em estudo.

Em termos médios, nota-se um aumento gradual da percentagem de areia desde a superfície até os 80cm de profundidade, ocorrendo o inverso com o teor de silte, para as quatro estações estudadas. A argila manteve sua percentagem bastante uniforme ao longo das profundidades, com uma média de 23,57%, um desvio padrão de 1,54 e coeficiente de variação (CV) de 6,55, como mostra o Quadro3.

Quadro 3 - Valores médios, desvio-padrão e coeficiente de variação de areia, argila e silte, e classe dos perfis de solo.

Profundidade (cm)	areia	argila	silte	Classes de solo
0 - 20	37,05	25,92	37,03	Franca
20 - 40	48,52	24,01	27,47	Franco argilo-arenosa
40 - 60	52,66	21,95	25,39	Franco argilo-arenosa
60 - 80	55,60	22,48	20,71	Franco argilo-arenosa
80 - 100	49,35	23,51	27,14	Franco argilo-arenosa
Média	48,63	23,57	27,55	
Desvio	7,063	1,545	5,949	
CV	14,52	6,55	21,59	

Segundo a classificação pelo triângulo textural, as classes de solo encontradas variaram entre Franco e Franco argilo-arenosa.

Esta avaliação das frações texturais junto à avaliação de densidade global e hidráulica do perfil dá uma idéia da área próxima à estação tensiométrica 03, principalmente em relação a sua drenagem e lixiviação dos sais.

4.2. Caracterização da densidade global (DG), densidade das partículas (DP) e porosidade (δ)

Foram estimadas a densidade global, densidade da partícula e porosidade nas quatro estações de estudo. Os valores médios para os intervalos 0-20cm, 20-40cm, 40-60cm e 60-80cm estão apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Estatísticas básicas para as densidades globais, da partícula e porosidade.

Profundidades (cm)	DP(g/cm ³)	DG(g/cm ³)	Porosidade (δ)
0 - 20	2.564	1.628	0.365
20 - 40	2.564	1.513	0.410
40 - 60	2.564	1.547	0.397
60 - 80	2.597	1.485	0.428
Média	2.572	1.543	0.400
Erro padrão	0.0083	0.0309	0.0133
CV	0.6493	4.0116	6.6500
Desvio padrão	0.0167	0.0619	0.0266
Variância da amostra	0.0003	0.0038	0.0007

A Figura 17 mostra a densidade global ao longo da profundidade, onde é possível visualizar uma maior compactação da camada superficial.

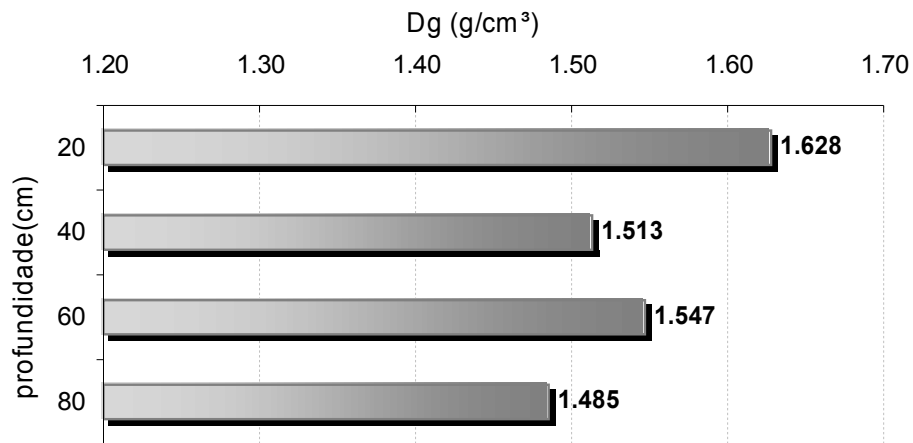


Figura 17 – Gráfico da densidade global encontrada no perfil.

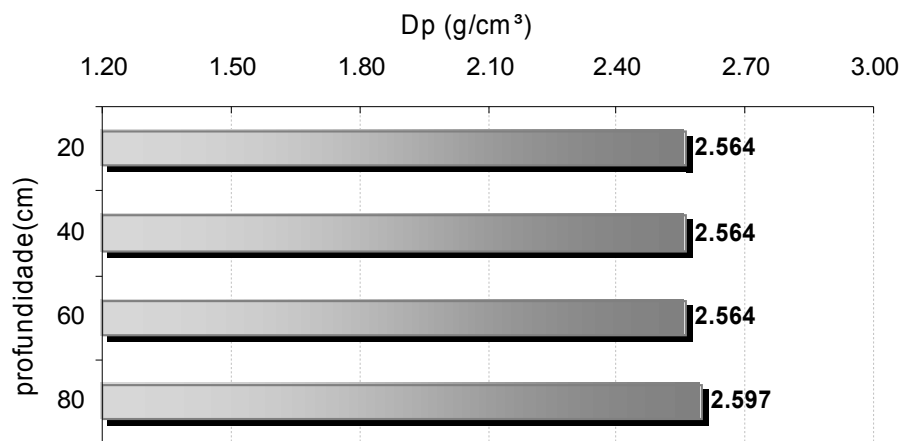


Figura 18 – Gráfico da densidade da partícula encontrada no perfil, (estação tensiométrica 03).

A Figura 18 apresenta a densidade das partículas ao longo do perfil, podendo-se notar uma homogeneidade como esperado.

4.3. Balanço hídrico

A evaporação medida diretamente em Tanque Classe A (E_v), a evapotranspiração potencial real (E_{To}) e a evapotranspiração potencial da cultura (E_{TPc}), estimadas através do método indireto do Tanque Classe A estão representadas na Figura 19.

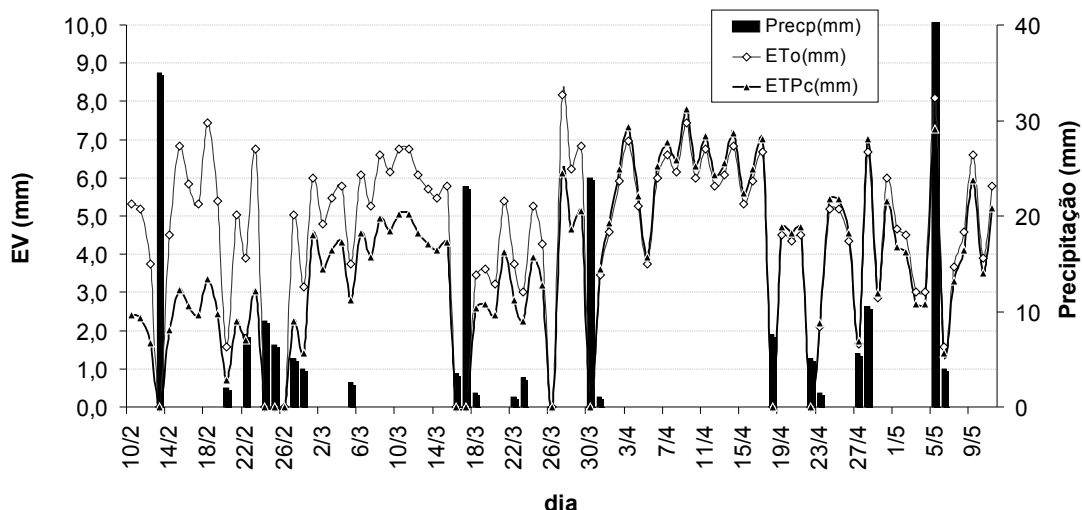


Figura 19 – Comportamento da precipitação e das evapotranspirações de referência e da cultura, estimadas no período em estudo.

Observa-se claramente a interferência das precipitações ao longo do período estudado, do dia 10 de fevereiro de 2003 ao dia 13 de maio de 2003, diminuindo as evaporações e evapotranspirações. A evapotranspiração avaliada no Tanque Classe A apresentou média ao longo do período de $6.04\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$. Os dados obtidos de evapotranspiração através da estação meteorológica foram comparados aos medidos através do método de Penman-Monteith, usando o software Cropwat (versão 5.7), onde se obteve resultados bastante satisfatórios, havendo discrepância nos valores apenas nos dias de chuva (Figura 20), com média ao longo do período de $5,94\text{ mm dia}^{-1}$.

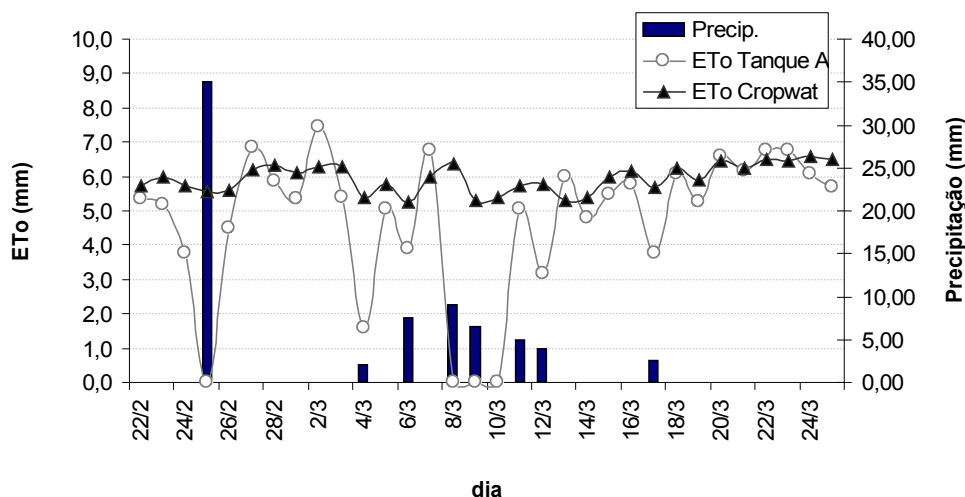


Figura 20 – Acompanhamento da evapotranspiração obtidos no tanque classe A e medidos através do método de Penman-Monteith.

4.4. Distribuição de lâminas

Quanto à distribuição das lâminas, embora tenha sido pré-determinada lâmina de irrigação calculada de acordo com a precipitação, evaporação diária e taxa de lixiviação ($C_x = 1,1$), não foi possível aplicar efetivamente em campo a lâmina prevista, devido a várias restrições (como volume de água disponível para a irrigação, consumo de energia elétrica e potência da bomba utilizada). De qualquer modo, eventos de lixiviação foram produzidos no período de 02/03 a 12/03 e 27/03 a 01/04. A Figura 21 apresenta a lâmina líquida aplicada durante o experimento.

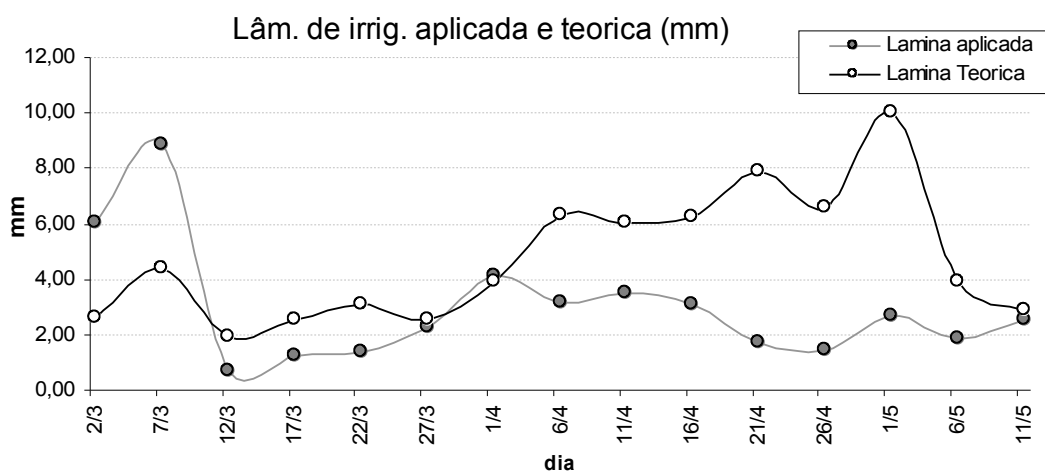


Figura 21 - Lâmina de irrigação aplicada e lâmina teórica.

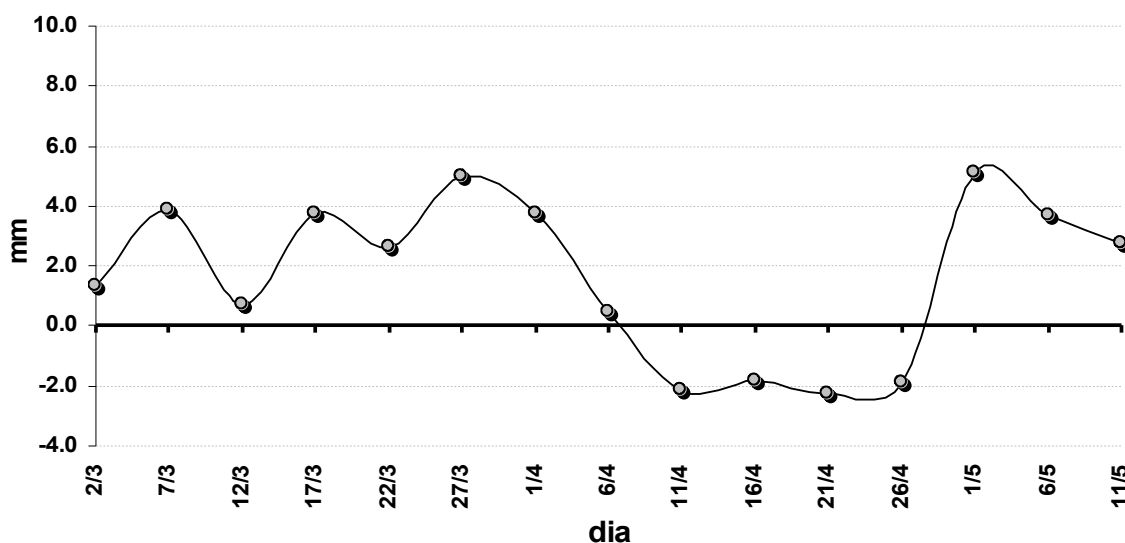


Figura 22 - Saldo de lâmina acumulado da área em estudo.

A Figura 22 mostra o saldo de lâmina de irrigação acumulado no cultivo da cenoura (*Daucus carota L.*), durante o período de irrigação. Pode-se visualizar a ocorrência de lâmina

negativa, devido à soma da lâmina de irrigação e a precipitação ser inferior à lâmina de ETo, causando déficit hídrico em vários momentos. Entretanto, embora bem próximo da reposição total, houve reposição da lâmina perdida por evaporação, com um saldo final de 2,76mm de lâmina.

4.5. Condutividade hidráulica

É de extrema importância para o conhecimento das propriedades hidráulicas do solo em estudo, a avaliação da condutividade hidráulica não saturada, que foi realizada em campo através do permeâmetro de Guelph, que permitiu a estimativa da condutividade hidráulica não saturada a partir da medição do coeficiente de condutividade hidráulica saturada de campo e do potencial de fluxo mátrico.

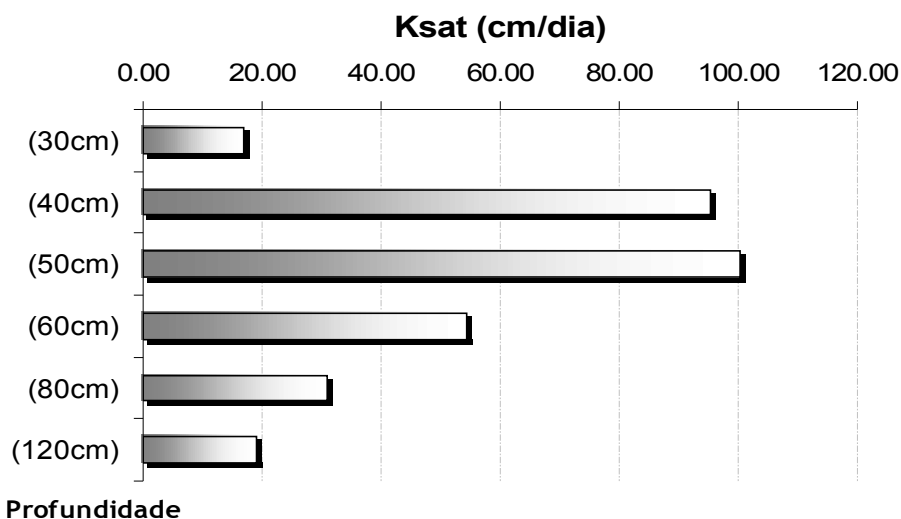


Figura 23 – Condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), estimada através do Permeâmetro de Guelph.

De acordo com as condutividades hidráulicas saturadas encontradas em campo pelo Permeâmetro de Guelph (Figura 23 e Quadro 5), pode-se verificar que na camada mais superficial ($K_{sat} = 0,0002\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ para a profundidade de 0-30cm), a condutividade hidráulica saturada é menor que nas seguintes, o que pode estar relacionado com a compactação desta camada e acúmulo de matéria orgânica devido a prática da agricultura (ver também Figura 17).

Quadro 5 - Valores de condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e Alfa (α).

Profundidade	30cm	40cm	50cm	60cm	80cm	120cm
K_{sat} (cm/h)	0.70	3.97	4.18	2.27	1.29	0.80
Alpha (α) cm^{-1}	0.027	0.041	0.051	0.021	0.027	0.035

4.6. Curva característica

As curvas características foram ajustadas de acordo van Genuchten (1980), relacionando o potencial matricial do solo (cm), em escala logarítmica, com a umidade volumétrica. Os parâmetros encontrados estão resumidos no Quadro 6.

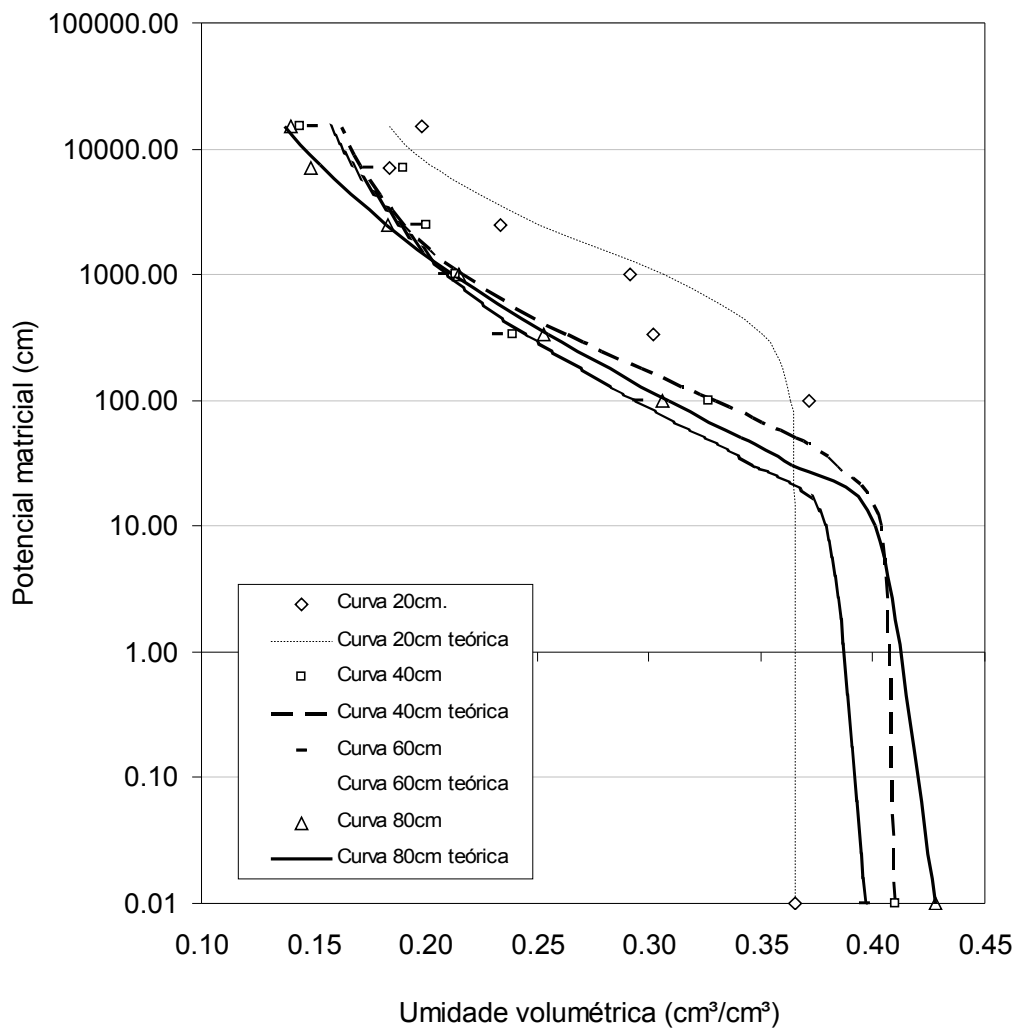


Figura 24- Curvas características de retenção de umidade, profundidades 0-20,20-40,40-60 e 60-80cm.

Quadro 6. - Parâmetros encontrados com o Software Soil Water Retention Curve (SWRC, versão 3.0. Piracicaba, SP, 2001).

Profundidade:	0-20cm	20-40cm	40-60cm	60-80cm
$n =$	1.7030	1.4321	1.2824	1.1810
$\psi =$	0.00111	0.01717	0.04375	0.06055
$\theta r =$	0.1550	0.1377	0.1123	0.0173
$R =$	0.9783	0.9660	0.9868	0.9987

4.7. Impacto da irrigação no nível do lençol freático

De acordo com a Figura 25, que mostra o acompanhamento do nível do lençol freático no período através do piezômetro instalado na área, foi possível observar que não houve mudanças significativas principalmente relacionadas à adição da lâmina de irrigação.

O nível do lençol apresentou uma variação entre 3,8m e 4,2m durante todo período do cultivo da cenoura (02/2003 a 05/2003) com ocorrência de período de recarga, provenientes da precipitação e lixiviação.

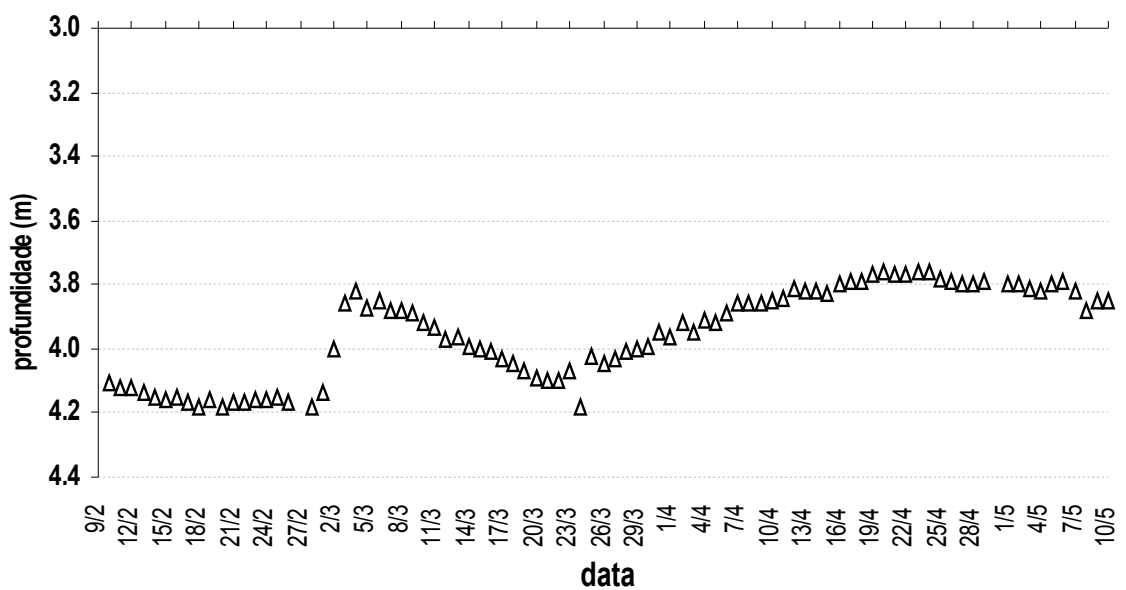


Figura 25 - Nível do lençol freático ao longo do período de manejo de irrigação.

4.8. Resultados tensiométricos

Através dos dados de tensões obtidos com os tensiômetros instalados em campo foi possível obter o potencial matricial. Na Figura 26 é possível observar a sensibilidade das tensões em relação às precipitações, para a estação tensiométrica 03.

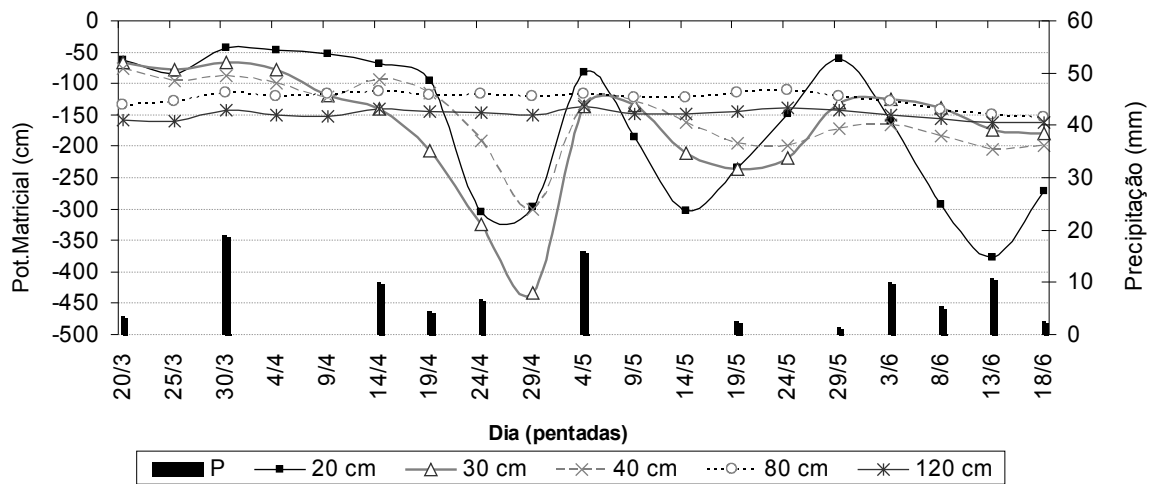


Figura 26 – Variação do potencial matricial do solo em várias profundidades x precipitação.

4.9. Avaliação hidráulica

Através das leituras diárias das tensões nas respectivas estações tensiométricas, foram calculados potenciais matriciais e totais, além da condutividade hidráulica não saturada (Figura 27) e o fluxo (Figura 28), para a estação tensiométrica 03.

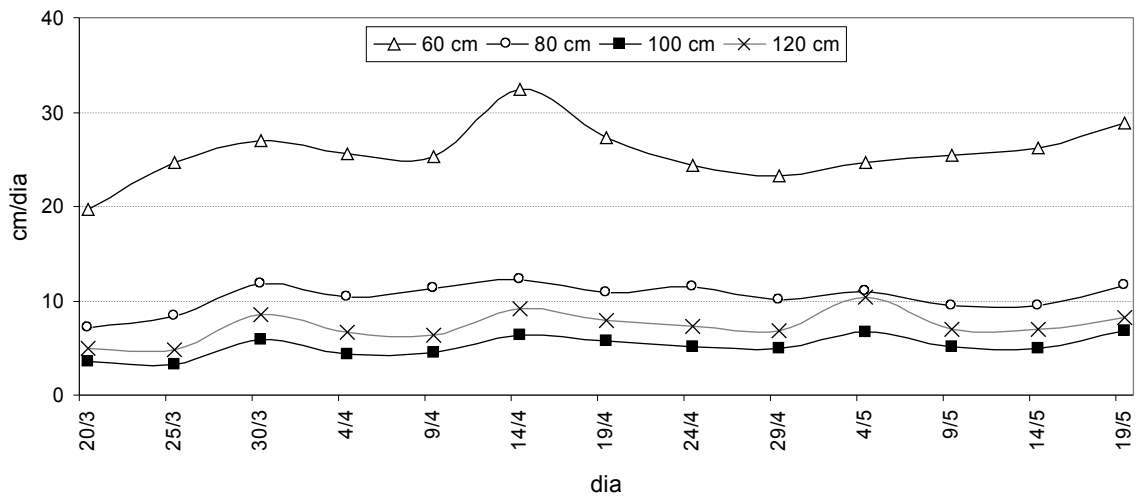


Figura 27 – Variação da condutividade hidráulica não saturada (K), encontrada através do método do permeâmetro de Guelph.

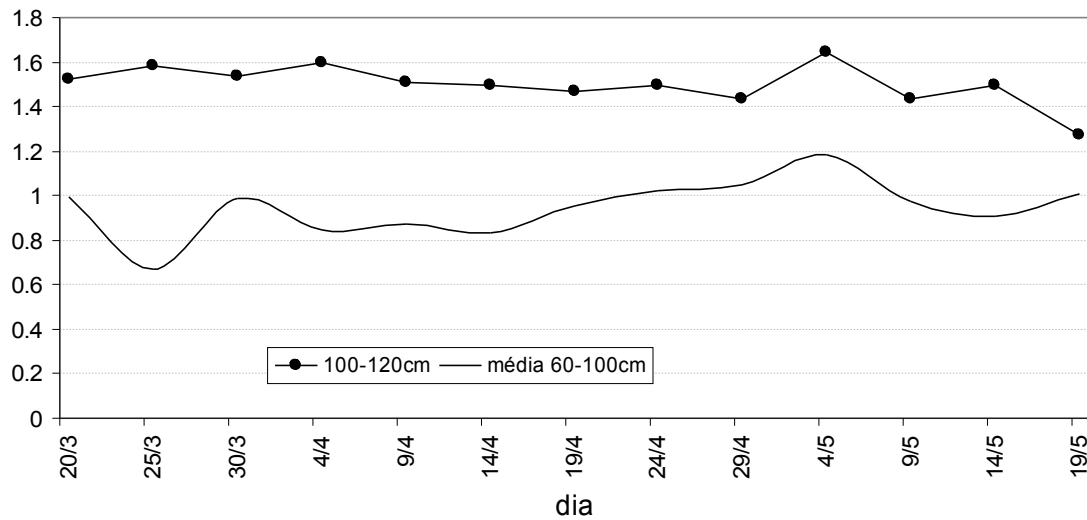


Figura 28 – Gradiente entre as camadas 100-120cm, média 60-100cm.

Na Figura 28 foi observado que os gradientes entre as profundidades de 60 à 120cm geraram fluxos descendentes, podendo assim admitir que não ocorreu ascensão capilar nestes perfis do solo ao longo do período de experimento.

4.10. Umidade do solo

Com os dados oriundos dos tensiômetros instalados, foi possível verificar a variação do estoque hídrico produzido pela irrigação, após a ocorrência de precipitação e durante a drenagem subsequente. Os conteúdos de umidade foram estimados indiretamente a partir das leituras tensiométricas e da curva característica, e diretamente através do emprego da sonda de nêutrons.

Foi observada a variação de umidade em campo através da sonda de nêutrons na estação tensiométrica 03, onde é possível visualizar que durante todo o dia, mesmo após a irrigação que ocorreu às 11:00hs da manhã, as profundidades de 10, 20, 30, 40, 120cm foram as mais úmidas.

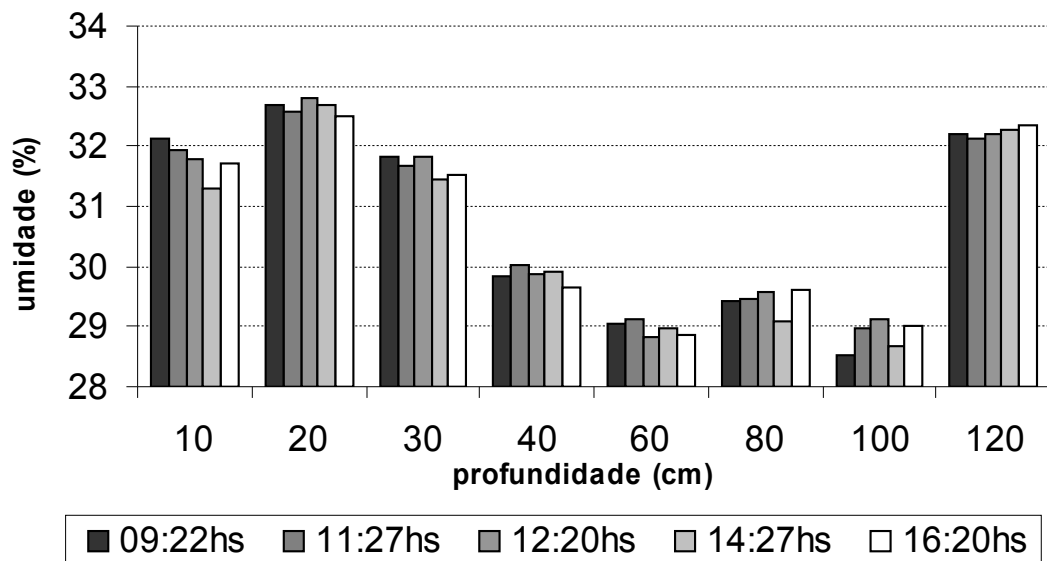


Figura 29 - Umidade, em várias profundidades, obtida com sonda de nêutrons.

Através da figura 29, é possível observar que a umidade em cada profundidade se mantém em equilíbrio, mesmo com o acréscimo pela irrigação quanto o decréscimo pela evapotranspiração, demonstrando um balanço entre as camadas.

4.11. Balanço salino e da Magnitude da Lixiviação

Foram realizadas no Laboratório de Química do Solo da UFRPE análises do extrato saturado do solo, antes do início do período de irrigação (10/02/2003) e após o manejo (15/05/2003). Através do Anexo B e da Figura 30, pode-se verificar que em todas as profundidades ocorreu um decréscimo na concentração de sais após a irrigação acompanhada da lâmina de lixiviação, sendo aos 80cm de profundidade os maiores valores encontrados, acumulando-se nesse perfil intermediário entre a camada das raízes das plantas e o lençol freático, como proposto no manejo.

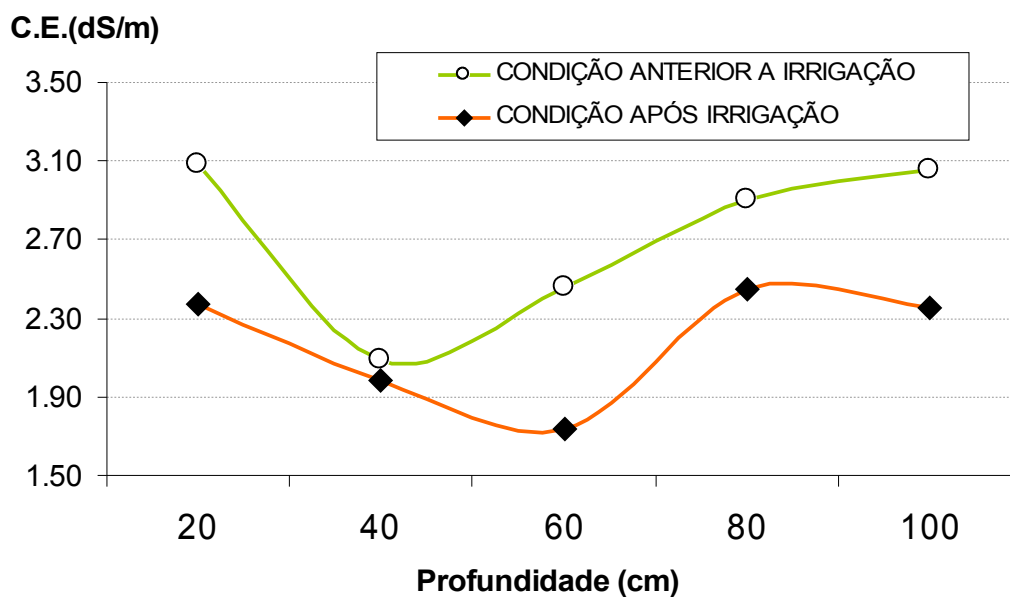


Figura 30 – Evolução da condutividade elétrica da água no solo (CEas).

A condutividade elétrica no período de 9 de janeiro à 15 de maio no lençol freático teve média de 2.14dS/m, com desvio padrão de 0.712, e coeficiente de variação de 0.332.

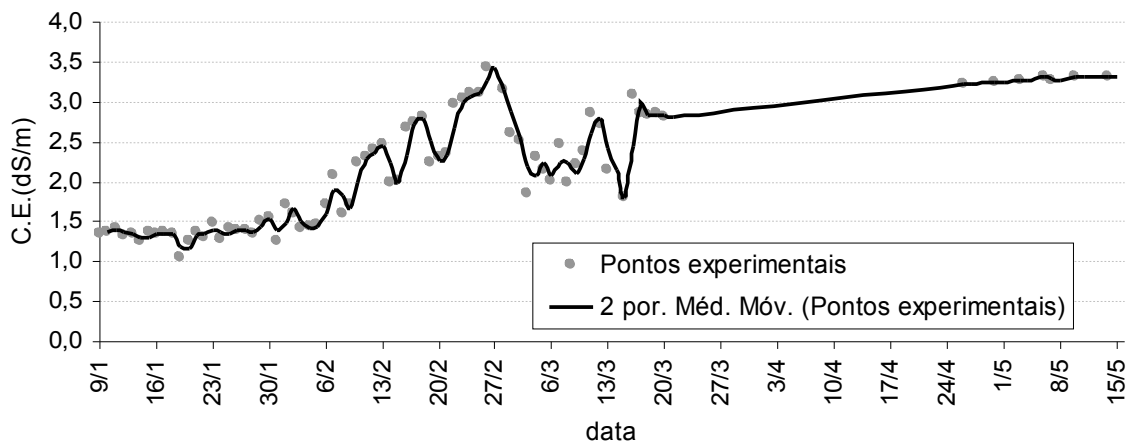


Figura 31 – Evolução da condutividade elétrica (CE) no lençol freático no período de 1/fev. - 19/mar.

O aumento da condutividade elétrica está relacionada à recuperação do lençol freático, provavelmente devido a aportes de sais.

Através de coleta em 08/04/2003, na cápsula de extração, foi possível observar em campo a condutividade em período intermediário do experimento, como mostra o Quadro 7 e a Figura 32.

Quadro 7 – Condutividade elétrica e pH, retirada através da cápsula de extração.

Cápsula de Extração (08/04/2004)		
Profundidade (cm)	pH	C.E.(ds/m)
40	8,00	2.05
60	8.15	2.43
80	8.20	2.54

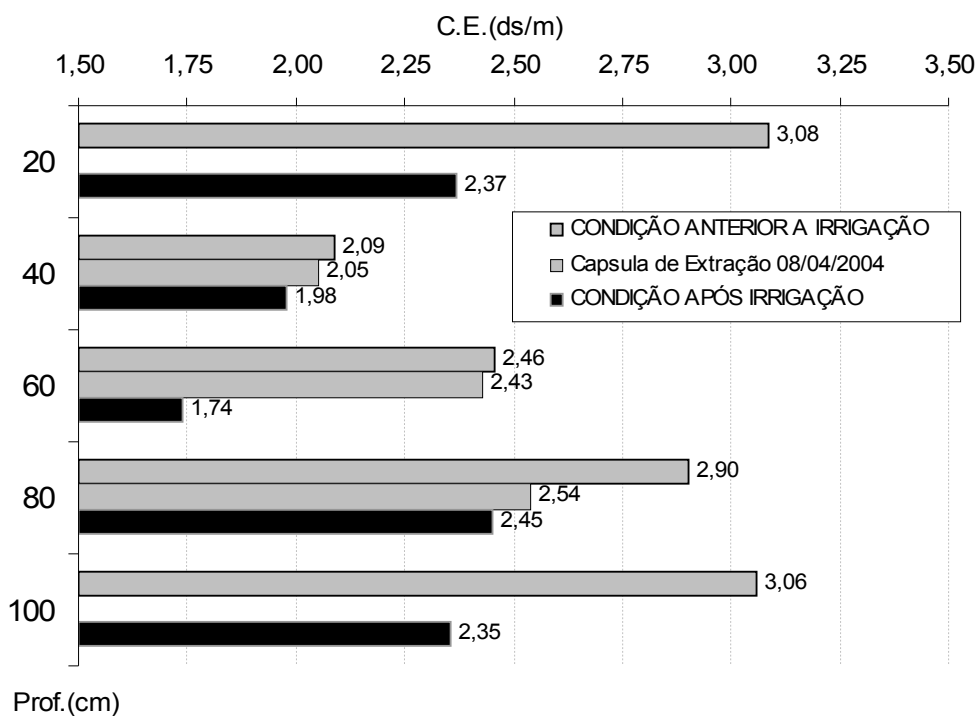


Figura 32 - Condutividade elétrica medida no perfil de solo, em três momentos diferentes do experimento.

4.12. Simulações computacionais

As simulações com o modelo WAVE permitiram a comparação das tensões matriciais, medidas em campo, com as obtidas pelo modelo, no período de 95 dias de experimento.

As Figuras 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 e 40 apresentam as tensões medidas com as tensões simuladas pelo modelo em “cm de H₂O”, diariamente, para as faixas entre os compartimentos.

Conforme observado na Figura 33, até o dia 04/03 não houve funcionamento adequado dos tensiômetros instalados em campo. Assim, só foram feitas as comparações entre as tensões após o dia 05/03, ocorrendo outra falha de leitura nos tensiômetros entre os dias 24/04 a 02/05. Deve-se observar que nessa primeira faixa, entre os compartimentos 1-3, que equivalem as profundidades de 10-30cm, houve uma maior incerteza devido à maior interferência da superfície e evaporação do solo. Mesmo assim, foi possível observar coerência de valores entre os dias 03/05 a 15/05, e ainda uma aproximação dos valores no período entre os dias 03/03 a 23/04, apresentando uma mesma tendência.

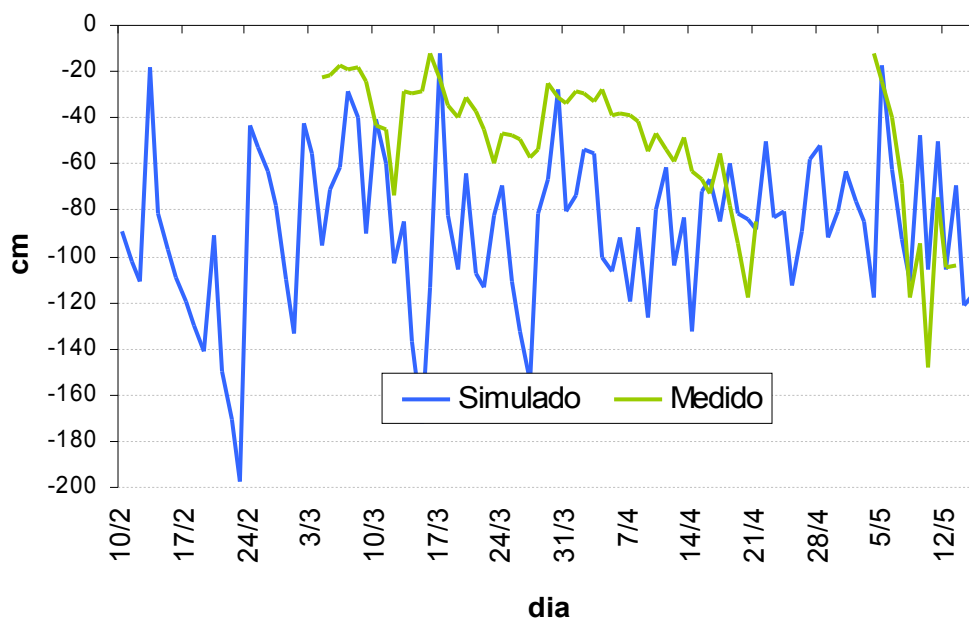


Figura 33 – Tensões medidas e simuladas, nos compartimentos 1-3 (10-30cm).

Na Figura 34 pode-se observar que, até o dia 11/03, não houve funcionamento do tensiômetro instalado em campo, para as profundidades de 40 a 60cm. As comparações entre as tensões foram realizadas apenas após o dia 12/03, ocorrendo outra falha de leitura dos tensiômetros entre os dias 23/04 a 02/05, provavelmente devido a operação inadequada dos

tensiômetros no campo . Embora as tensões medidas tenham sido maiores durante quase todo o período, ocorreu um comportamento temporal similar entre as tensões, havendo em alguns momentos uma sobreposição, principalmente no final do período (dias 03/05 a 15/05).

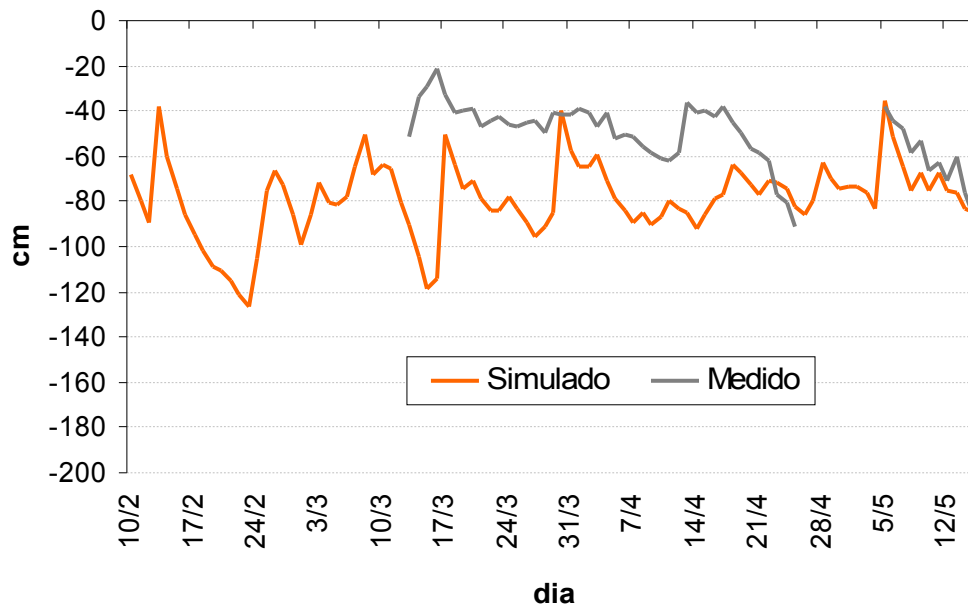


Figura 34 – Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 4-6 (40-60 cm).

As leituras no tensiômetro de 80cm foram utilizadas para analisar as tensões simuladas entre os compartimentos 7 e 9, conforme mostrado na Figura 35.

Até o dia 06/03 não houve funcionamento adequado do tensiômetro instalado em campo. Então as comparações se limitaram a períodos após o dia 07/03. Nestes compartimentos as tensões medidas e simuladas estiveram bastante próximas e seguindo a mesma tendência.

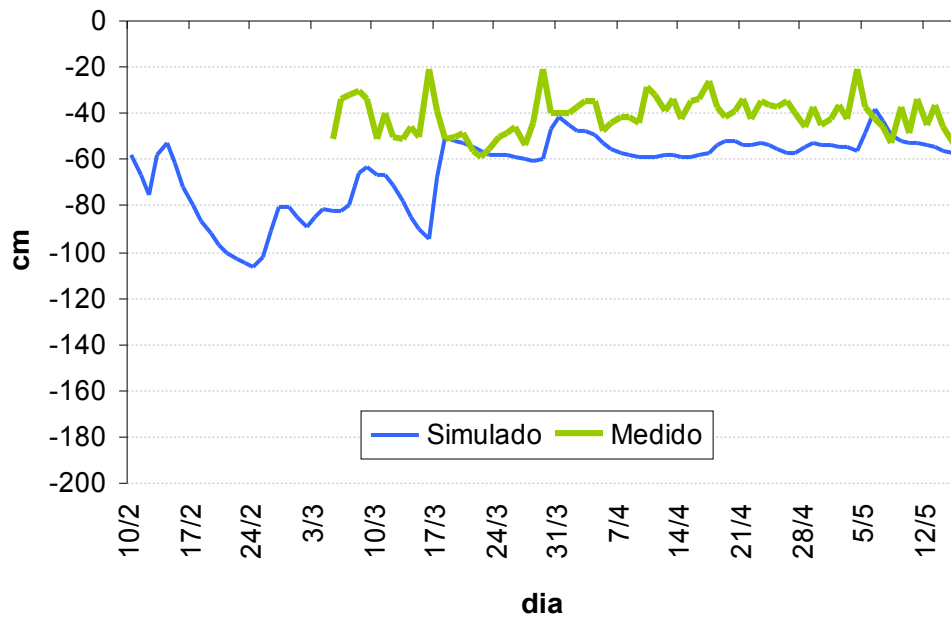


Figura 35 – Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 7-9 (70-90cm).

A similaridade entre valores medidos e simulados é ainda maior na zona entre as profundidades de 100 a 120cm, como mostrado na Figura 36. Até o dia 16/03 não houve funcionamento dos tensiômetros instalados em campo. As comparações entre as tensões, após o dia 17/03 de experimento, mostram coerência dos valores simulados. Os resultados melhoram ainda mais a partir do dia 10/04, ocorrendo sobreposições em vários momentos.

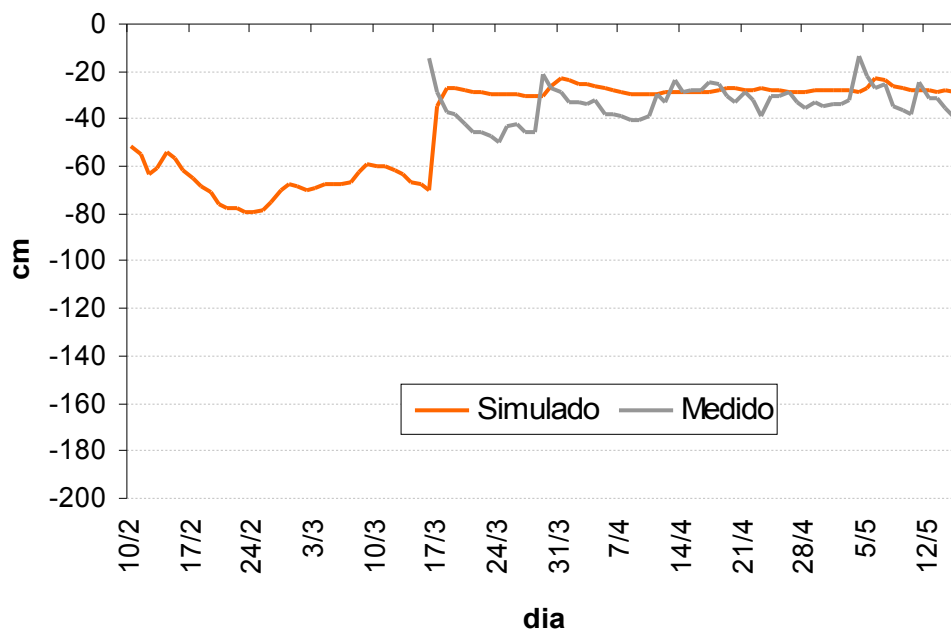


Figura 36 – Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 10-12 (100-120cm).

As Figuras a seguir mostram comparação entre tensões medidas e simuladas em pentadas (médias a cada cinco dias), observando mais facilmente a tendência das tensões medidas no campo e simuladas pelo modelo.

Foi comparada a tensão entre os dias conforme as figuras anteriores (16/03/2003 a 15/05/2003), devido a uma maior coerência nos dados medidos neste período.

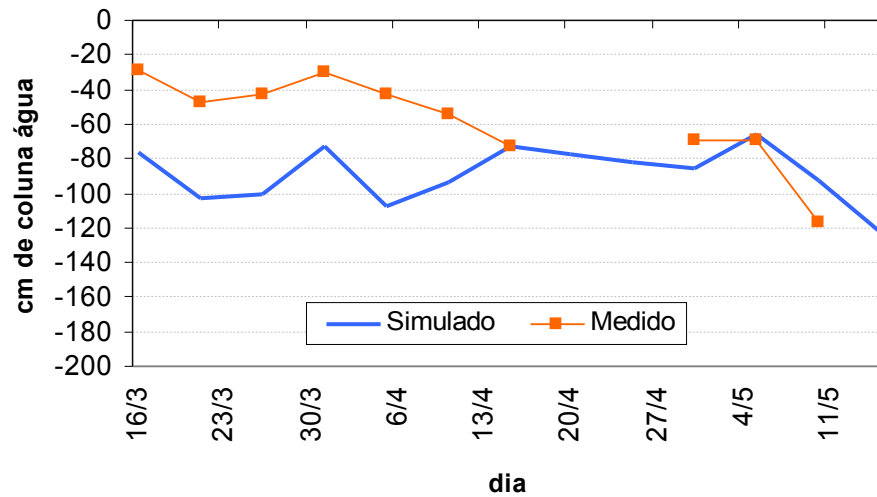


Figura 37 – Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 1-3 (10-30cm), em pentadas.

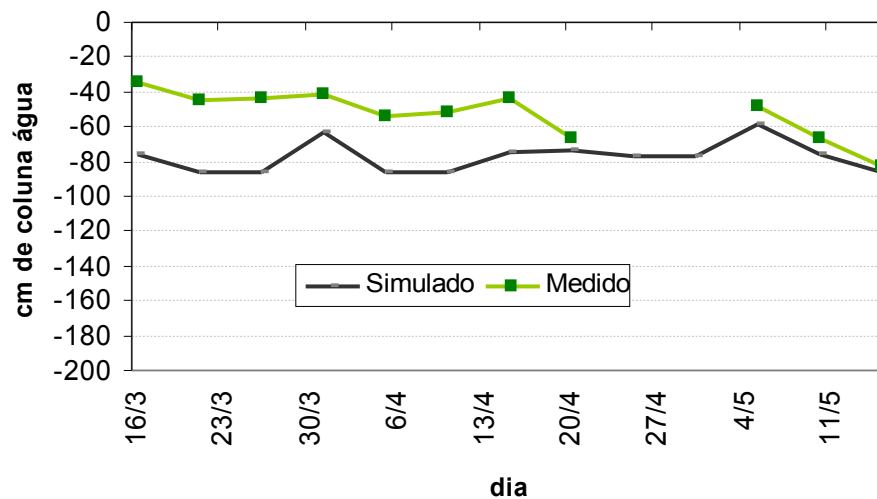


Figura 38 – Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 4-6 (40-60cm), em pentadas.

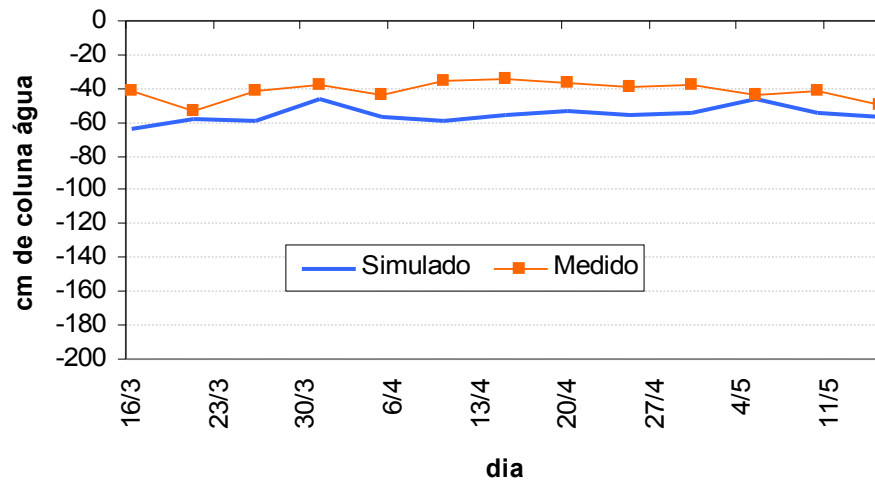


Figura 39 – Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 7-9 (70-90cm), em pentadas.

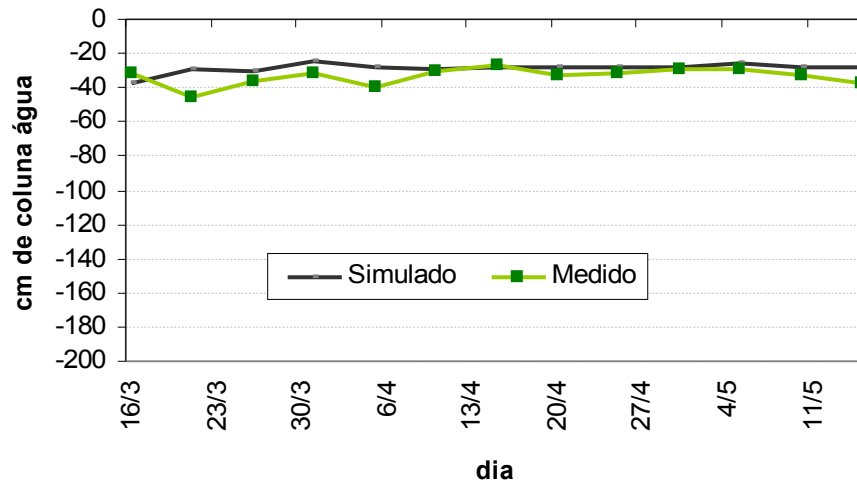


Figura 40 – Tensões medidas e simuladas, entre os compartimentos 10-12 (100-120cm), em pentadas.

É possível visualizar nas Figuras 37, 38, 39 e 40 que houve uma mesma tendência, embora os valores medidos tendam a ser maiores. Essa tendência foi prejudicada nas Figuras 37 e 38, devido ao mau funcionamento dos tensiômetros entre 13/04 e 04/05, que ocasionou um aumento da tensão medida. Os compartimentos mais profundos (compartimentos 7-12) foram os que apresentaram um melhor ajuste, devido a menor interferência da superfície e homogeneidade do meio, havendo um comportamento mais uniforme e as vezes sobreposições entre as tensões.

A Figura 41 mostra a lâmina de evapotranspiração real acumulada e evapotranspiração potencial acumulada, obtidos através das simulações com o WAVE. A lâmina de

evapotranspiração real é menor que a lâmina de evapotranspiração potencial, mas com o mesmo comportamento.

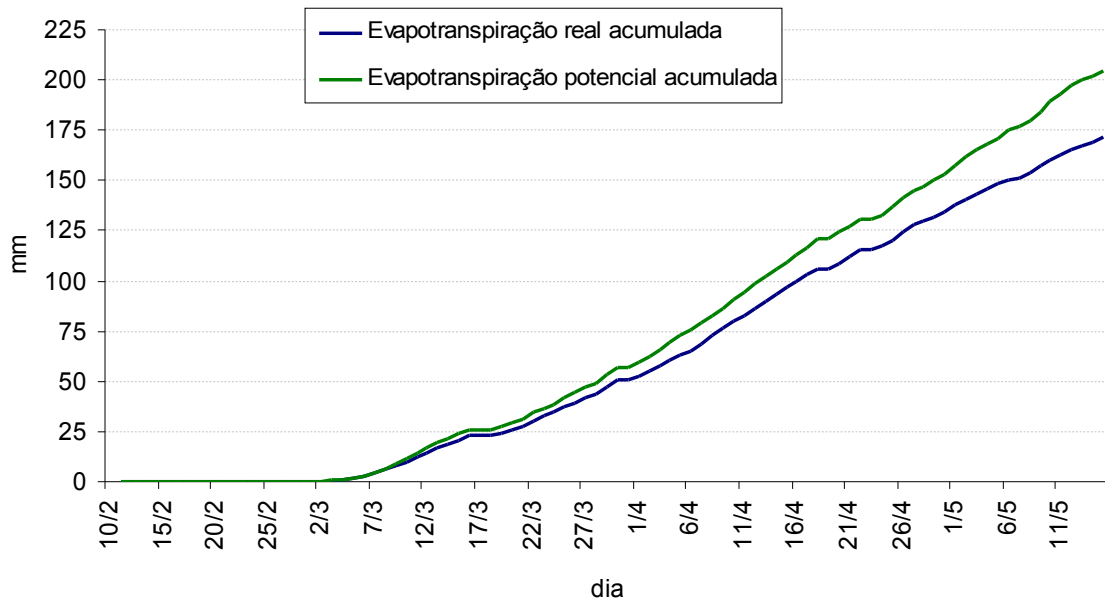


Figura 41 – Evapotranspiração real e Evapotranspiração potencial acumuladas, ocorridas entre os dias 10/02/2003 e 15/05/2003, simuladas pelo WAVE.

A Figura 42 mostra a lâmina de evapotranspiração real acumulada, potencial acumulada, transpiração real da planta e evaporação do solo nu. É possível observar a contribuição da evaporação do solo nu e da transpiração real da planta. Essa última contribui muito mais na formação da evapotranspiração real acumulada.

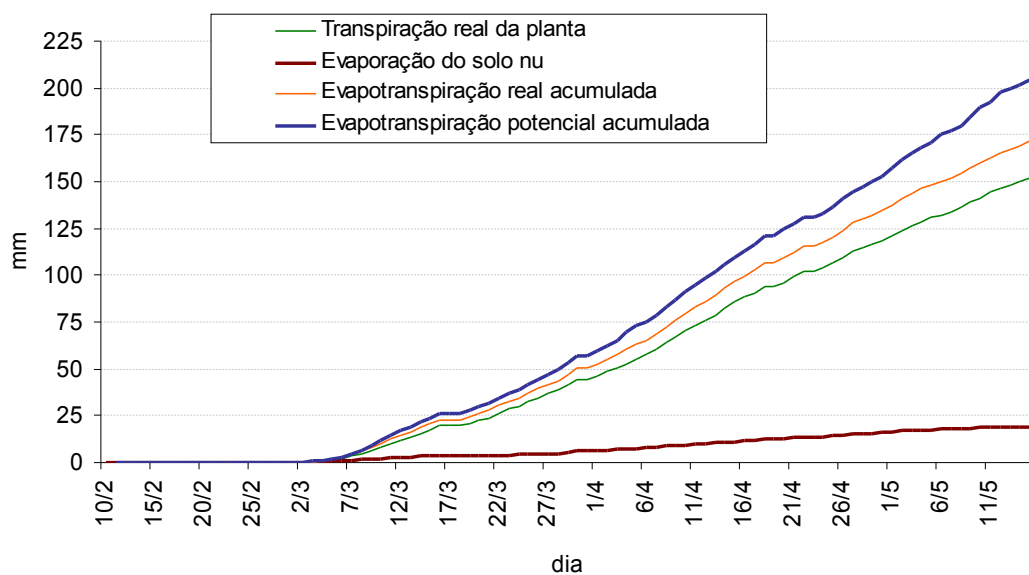


Figura 42 – Evapotranspiração real, potencial acumuladas e transpiração real da planta e evaporação do solo nu, ocorridos entre os dias 10/02/2003 e 15/05/2003, simuladas pelo modelo WAVE..

Com base nos parâmetros hidrodinâmicos do solo e utilizando as simulações quantitativas, foi possível utilizar o modelo WAVE para gerar cenários de salinidade do perfil, utilizando uma condutividade elétrica de 2,0dS/m para a água de irrigação, e assumindo-se nula a concentração de sais da chuva.

A Figura 43 compara as condutividades elétricas do solo (CE), medidas em campo e simulada, para o perfil, antes e após o experimento. Além de observar que as condutividades elétricas diminuíram em todas as profundidades após o experimento, a simulação foi capaz de gerar valores bem próximos aos medidos, principalmente nas profundidades de 40, 60 e 100cm.

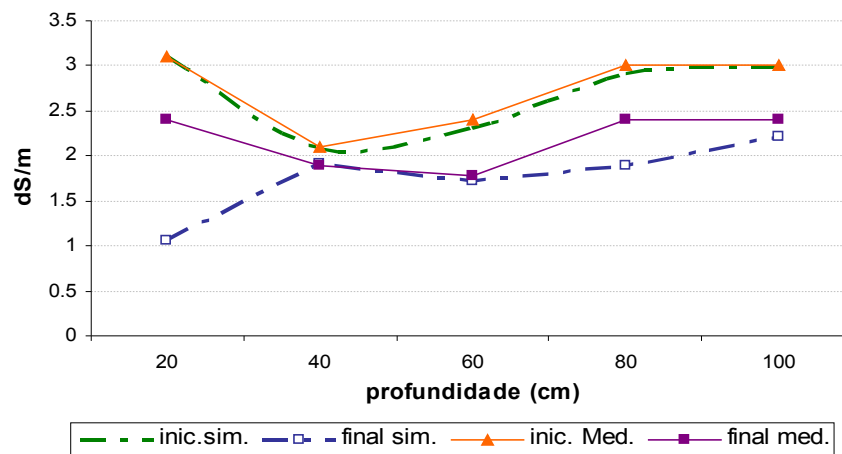


Figura 43 – Condutividades elétricas no perfil, medidas e simuladas.

A Figura 44 apresenta a distribuição temporal da condutividade elétrica do solo, medido e simulado. Através da simulação é possível perceber que a lixiviação diminuiu bastante a condutividade elétrica nas camadas mais superficiais sem comprometer as camadas inferiores (não-saturadas), concentrando os sais nessas camadas intermediárias até que ocorra uma lixiviação completa, o que pode ser ocasionado pelas chuvas.

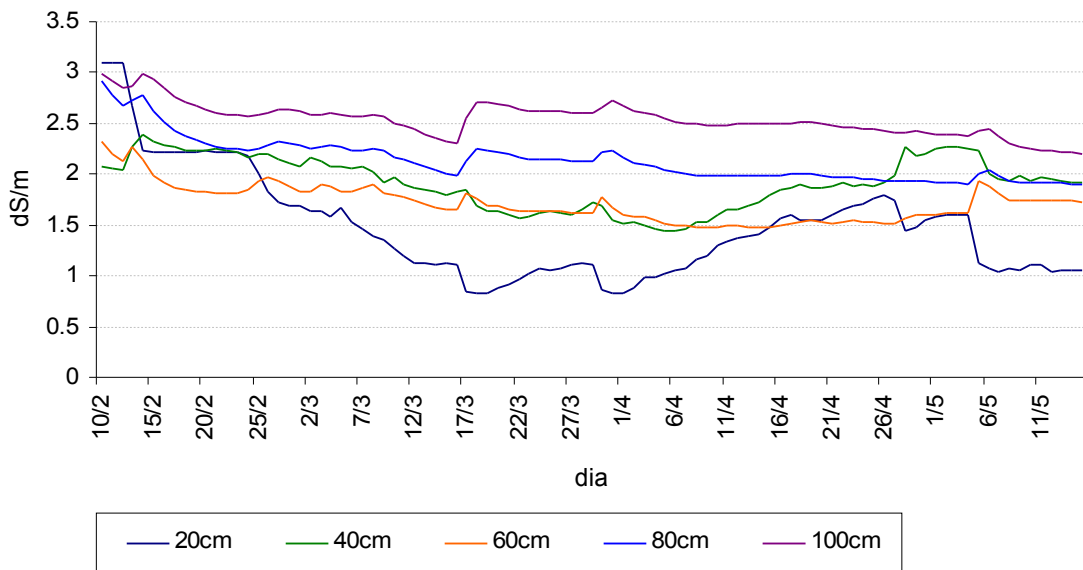


Figura 44 – Série temporal de condutividades elétricas, simulada com modelo WAVE.

Comparando-se as Figuras 44 e 45, é possível observar os efeitos causados pela lixiviação completa e incompleta. Na lixiviação completa é notada a oscilação da condutividade elétrica na camada superficial (20cm), estando relacionada à maior lâmina de irrigação aplicada. Esta lâmina provoca um maior acúmulo de sais devido à condutividade elétrica da água de irrigação ser alta.

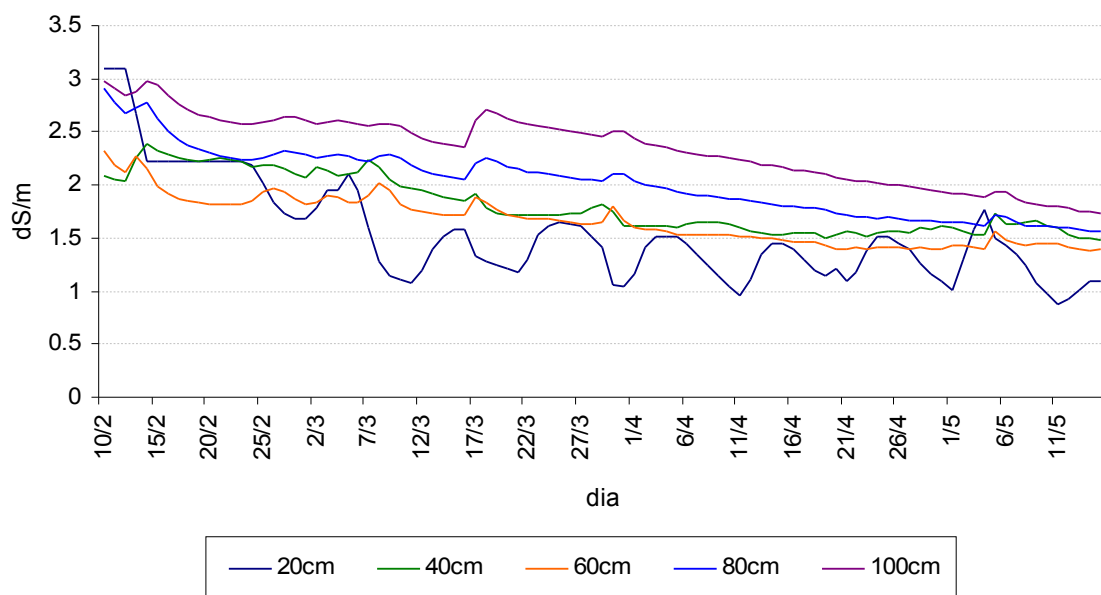


Figura 45 – Lixiviação completa de sais, simulada com modelo WAVE.

Na lâmina de lixiviação incompleta (Figura 44) é observado um maior acúmulo de sais na zona intermediária não-saturada no final do experimento, o que indica que esses sais não foram arrastados para a zona saturada, ao contrário do que aconteceu na lixiviação completa, mostrada na Figura 45.

Na Figura 46 observa-se a distribuição de frequência acumulada da salinidade. Pode-se observar que as distribuições de sais na lixiviação incompleta e na lixiviação completa são bastante similares. Entretanto, na lâmina completa, embora ocorra uma maior lavagem, o volume de sais incrementado ao perfil é maior, devido à condutividade elétrica encontrada na água de irrigação, capaz de promover maior degradação do lençol freático.

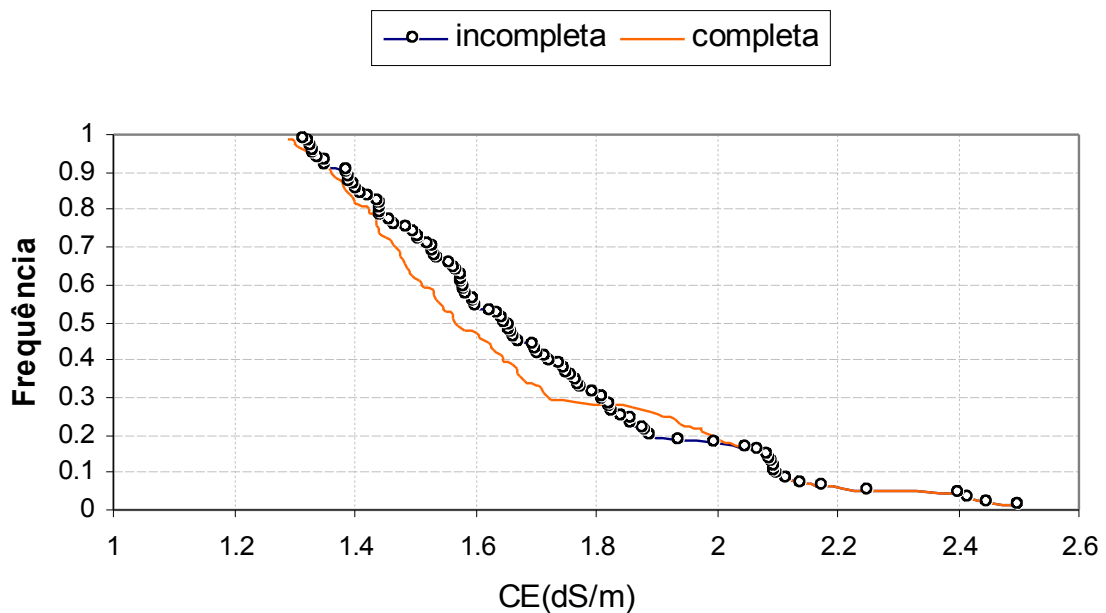


Figura 46 - Distribuição de frequência acumulada da salinidade.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

A condutividade elétrica do solo apresentou uma queda média para todas as profundidades ao longo do experimento, como mostra a Figura 32. O decréscimo da condutividade elétrica do solo CE, indica que o manejo de irrigação juntamente com a lâmina de lixiviação usada foi adequado para as condições do experimento, e para o solo em questão.

Com base na evolução da salinidade do perfil foi possível observar que, embora a lixiviação tenha sido inferior a teórica, foi possível reduzir as condutividades elétricas em todas as profundidades estudadas, sem que houvesse um incremento pronunciado de sais no lençol freático, mesmo após as chuvas que ocorreram.

Observou-se que as distribuições de sais na lixiviação incompleta e na lixiviação completa foram similares. Entretanto, na lixiviação completa, embora ocorra uma maior lavagem, o volume de sais incrementado ao perfil é maior devido à condutividade elétrica da água de irrigação, podendo promover degradação do lençol freático. Assim, o manejo mais adequado nesse caso foi o da lixiviação incompleta de sais, para o perfil não-saturado, considerando a complementação da lavagem dos sais pela precipitação.

REFERÊNCIAS

- ABREU, G. H. F. G. de. **A função das barragens subterrâneas como obra de convivência com a seca.** 2001. 184 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- ALLEN R. G. et al. **Crop evapotranspiration.** Rome: FAO, 1998. 297p (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- AMARO FILHO, J. **Determinação da condutividade capilar mediante método do perfil instantâneo.** 1982. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 1982.
- ANTONINO, A.C.D. Balanço hídrico em solo com cultivos de subsistência no semi-árido do nordeste do Brasil, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 29 - 34, 2000.
- AUDRY, P.; SUASSUNA, J. **A salinidade das águas disponíveis para a pequena irrigação no sertão nordestino:** caracterização, variação e limitações de uso. Recife, CNPq. 1995. 128p.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura.** Campina Grande: UFPB, 1999. (FAO: Irrigação e drenagem, 29)
- AZEVEDO, N.; MARTINIANO, J. **Manual de hidráulica.** 7. ed. São Paulo. Edgard Blücher, 1982. 335p.
- BERGAMASCH; H., *et al.* **Agrometeorologia aplicada à irrigação.** 2. ed. Porto Alegre/RS: Editora da Universidade. 1999.
- BERNADO, S. Manejo racional da irrigação. ITEM, **Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem**, Brasília, DF, v. 36, p. 25 – 26, mar. 1989.
- BEVEN, L.D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics.** 4. ed. New York: [s.n.], 1972. 498p.
- BINSWANGER, H. C. Fazendo a sustentabilidade funcionar. In: CAVALCANTI, C. (Org.). **Meio ambiente, desenvolvimento sustentável e políticas públicas.** 3. ed. São Paulo: Cortez; Recife: Fundação Joaquim Nabuco, p. 41-55.
- BLACKBURN, D. M. **Efeito da drenagem subterrânea no balanço hidrossalino de um Neossolo flúvico irrigado em Pesqueira- PE.** 2002. Tese (Doutorado em Departamento de Agronomia) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

BORCHERS, B.; URAM, T. HENDRICKX, J. M. H. Tikonov regularisation of electrical conductivity depth profiles in field soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, 1997.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedade dos solos**. Biblioteca Universitária Freitas Bastos, 1983.

CADIER, E. **Hidrologia das pequenas bacias do Nordeste Semi-Árido**. Série Hidrológica nº 31. Recife – 1994. SUDENE – ORSTOM.

CISAGRO. **Projeto de irrigação da Fazenda Nossa Senhora do Rosário - Pesqueira – PE**. Recife, 1989. 120p. Relatório.

COELHO, M.A.; OLIVEIRA, F.N.S. de - Procedimento para determinação da curva característica da água do solo com o emprego de tensiômetro – **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 18, n. 2, p. 59, dez. 1987.

CORREA, M. M.; RIBEIRO, M. R. **Levantamento detalhado de solos da Fazenda Nossa Senhora do Rosário (Pesqueira – PE)**, Recife: UFRPE, 2001. 34p.

COSTA, W. D. **Manual da barragem subterrânea**. 2. ed. Recife, Universidade Federal de Pernambuco. 2 ed. 2001. 43p.

CRUCIANI, D.E. **A drenagem na agricultura**, São Paulo: Nobel, 1989. 337p.

CRUZ, W. B.; MELO, F.A.F. **Zoneamento químico e salinização das águas subterrâneas do Nordeste do Brasil**. (Boletim de Recursos Naturais) – SUDENE. Recife, v. 7, n. ¼, p. 7 – 40, jan./dez. 1969.

DAGAN, G.; KROSZINSKI, U. **Physical aspects of soil water and salts in ecosystems: Drainage of a vertical column**, p. 17-29, New York: [s.n.], 1973. p. 17 – 29.

DOORENBOS, J; KASSAM, A. H. **Efectos del agua en al rendimiento de los cultivos**. Roma, FAO, 1979. p.212 (Riego Y Drenage n. 33)

DOORENBOS, J; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. 2 nd ed. Rome: FAO. 1977. 179p. (Irrigation and Drainage Paper 24).

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997.

FERREIRA, P.A. **Manejo de água : planta em solos salinos**. Viçosa-MG: . UFV/DEA, 1998, 93p.

FILGUEIRA, F.A. **Manual de olericultura: cultura e comercialização de hortaliças**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Agrônômica Ceres, 1982.

FILIZOLA, H.F.; SANS, L.M.A.; FERRACINI, V.L. Parâmetros hídricos do solo como auxiliares na avaliação da poluição da água superficial e subsuperficial (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. **Anais...** Rio de Janeiro: SBSCS, 1997.

FREEZE, R.A. Henry Darcy and the fountains of Dijon. **Ground water, Dublin**, v.32, n.1, p.23-30, 1994.

FREIRE, M.G.B. S.. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água da irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, , v.7. n.1. p. 45-52, 2003.

GARDNER, W.R. Some steady – state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil Science**, Baltimore, v.85, p.228-232, 1958.

GARDNER, W. R.; FIREMAN, M. Laboratory studies of evaporation from soil columns in the presence of a water table. **Soil Science**, Baltimore, v.85, p.244-249, 1958.

GHEYI, H.R.; QUEIROZ, J.E.; MEDEIROS, J.F. de; In: Simpósio “ **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**”. Campina Grande: UFPB. 1997.

HEWLET, J.D. **Principles of forest hydrology**. Athens: The University of Georgia Press, 1982. 183 p.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**: Amhest, Department Of Plant and Soil Science. 1980. 411p.

INCRA. Disponível em < site <http://www.INCRA.com.br>>. Acesso em: 20 março. 2004.

JONES, A.J.; WAGENET, R.J. In situ estimation of hydraulic conductivity using simplified methods. **Water Resources Research**, Washington, v.20, n.11, p. 1620-1626, 1984.

JONG VAN LIER, Q.; LIBARDI, P.L. Variabilidade dos parâmetros da relação entre condutividade hidráulica e umidade do solo determinada pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, p.1005-1014, 1999.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: van Nostrand Reinhold, 1990. 625 p.

KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Nobel, 1988. 408p.

KRUSE, E.G.; WILLARDSON, L.; AYARS, J. On-farm irrigation and drainage practices. In: TANJI, K.K. **Agricultural salinity assessment and management**. New York: ASCE, 1990. cap.16, p.349-391.

LEPRUN, J.C. **Primeira avaliação das águas superficiais do nordeste**: Recife: SUDENE, 1983. p 91-147. Relatório.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2 ed. Piracicaba: P.L. Libardi, 2000. 509p.

MAAS, E. V. Salt tolerance of plants. **Applied Agricultural Research**, New York, v.1, p. 12 – 25, 1986.

MAGALHÃES, A. F. **Manejo da fertilidade dos solos irrigados**: produtividade degradação e correção. In: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo, 21, 1995; Petrolina. **Anais...** Petrolina: editora, 1995.

MANONELLI, W.A., SILVA, W.L.C., MORETTI, C.L. **Resposta do tomateiro para processamento a tensões de água no solo, sob irrigação por gotejamento**. São Paulo. Engenharia Agrícola, Jaboticabal. v.23. n.1. p.1-8. jan/abr.2003.

MACKAY, R.; MONTENEGRO, A. A. A. **Salinity control for sustainable small scale agriculture**, local: DDA, 1996 . 36p.

MANTOVANI, E.C.; SOARES, A.A. **Manejo de irrigação** In: COSTA, L.C.;MANTOVANI, E.C.;SOARES, A.A. **Sistema de suporte à decisão agrícola: manejo da cultura e dos recursos hídricos**. Brasília: Workshop Internacional Sobre Manejo Integrado das Culturas e dos Recursos Hídricos, 1998. 153p.

McNEILL, J.D. **Electrical terrain conductivity measurements at low induction numbers**. technical Notes TN-6, GEONICS Ltd., 1980.

MERICO, L. F. K. **Introdução à economia ecológica**. Blumenau: FURB, 1996. 160 p.

MILLAR, A.A. **Drenagem de terras agrícolas**: bases agronômicas, São Paulo: Editerra, 1988.

MONTENEGRO, A.A.A. **Stochastic hydrogeological modelling of aquifer salinization from small - scale agriculture in noretheast Brazil**. Ph. D. Thesis. Departmenet of Civil Engineering. University of Newcastle. UK. 1997.

MONTENEGRO, A.A.A. **Análise de risco de salinização em áreas aluviais irrigadas de regiões semi-áridas**. XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Belo Horizonte-MG, 1999.

MONTENEGRO, A.A.A; et al. **Influência de zonas de recarga e descarga na salinidade de vale aluvial de semi-árido**. ABAS , 2004. 14p.

MONTENEGRO, S.M.G.L. **Stochastic analysis of salt accumulation in heterogeneous irrigated soils: a case study in Northeast Brazil**. 1997.Thesis, University of Newcastle Upon Tyne., 1997.

MONTENEGRO, S.M.G.L.; Análise da variabilidade espacial da salinidade em área irrigada e do nível d' água em aluvião sob uso agrícola na região semi-árida do Nordeste Brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS,14., 2001, Aracaju. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2001.

MUALEN, Y. A. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**. Washington, v.12, p. 2187 – 2193, 1976.

NIELSEN, D.R.; et al, O. A brief review of soil water, solute transport and regionalized variable analysis, **Scientia Agricola**, Piracicaba, vol. 54, Número especial, p 89-115, 1997.

OLIVEIRA, L.F.C. de; SARVASI, F. de O. – Determinação da curva de retenção de umidade de um latossolo vermelho-escuro da região de Alfenas por tensiometria- **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 21, n. 1. jan./ mar. 1997.

OLIVEIRA, I. P. **Dinâmica hidrossalina em solo aluvial salinizado sob cultivo de halófitas**. 2001. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

QUEIROZ, J.E.; MENDONÇA, I.C. de; SANTOS, R.V. Um estudo comparativo entre dois procedimentos de cálculo da condutividade hidráulica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.1, p.113-115, 1997.

RADCLIFFE, D.E.; RASMUSSEN, T.C. Soil water movement. In: SUMMER, M.E. **Handbook of Soil Science**. New York: CRC Press, 2000. cap.4, p.87-127.

RANZINI, M. **Balço hídrico, ciclagem de nutrientes e perdas de solo em duas microbacias reflorestadas com Eucalyptus saligna Smith**, no vale do Paraíba, SP. 1990. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiros”, Universidade de São Paulo.

REICHARDT, K.; BACCHI; O. O. S.; VILLAGRA, M. M. **Estimativa de fluxos de água em solos não saturados**. **Bragantia**, Campinas, v. 52, n. 1, p. 83 - 87. 1993.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity conductivity- pressure head relationships. **Ground Water**, Dublin. v. 6, p. 84 – 95, 1986.

RHOADES, J. D. Methods of soil analysis: **Chemical and microbiological properties**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1982.

RHOADES, J.D.; KANDIAH, A.; MASHAL, A.M. **The use of saline water for crop production**. Rome: FAO. 1992. 133p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 48).

RHOADES, J.D.; et al. Soil electric conductivity and soil salinity: _____ new formulations and calibrations. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 53. 1989a.

RHOADES, J.D.; et al. Determining soil salinity from soil and soil-paste electric conductivity: sensitivity analysis of models. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 53. 1989b.

- RIBEIRO, M. R.; et al. **Caracterização e classificação de solos de referência do estado de Pernambuco**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1999. Relatório.
- RIBEIRO, M.R.; FREIRE, F.J.; MONTENEGRO, A.A.A. **Solos holomórficos no Brasil: ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável**. In: URI, N.; MARQUES, (Ed.). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa – MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3, cap.4, p.165-208.
- RICHARDS, E.A. **Diagnostico e rehabilitacion de suelos salinos y sodicos**. Mexico: Limusa,1974. 172p.
- RIGHETTO, A.M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC/USP, 1998. 840p. (Prometo REENGE).
- RIJTEMA, P. E. **Soil moisture forecasting**. Warginingen Institut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding., 1970. Nota 513.
- RITZEMA, H. P. **Drainage principles and applications**. Wageningen, International Institute for Land and Reclamation and Improvement. 1994.
- SÁ, P. S.C.G. **Uso racional de equipamentos de irrigação**. ITEM, Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem. n° 41. Junho de 1990.
- SAMPAIO, R.A. **Manejo de água na recuperação de solos salino-sódicos em colunas**. Viçosa ,MG. 1993. 75 f. Dissertação (Mestrado em Solos) - Universidade Federal de Viçosa.
- SANTIAGO, F.dos.S. **Efeito do manejo da irrigação na salinidade e umidade de neossolo flúvico, com a cultivar de repolho midori (Brassica oleracea var.capitata), no município de Pesqueira/P**. 2002. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- SARVASI, F. de O.C.; et al. Curvas de retenção de água por tensiometria para dois solos da região de Alfenas - MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 6, p. 893 -900, 1992.
- SHALHEVET, J.; KAMBUROV, J. **Irrigation and salinity: a world-wide survey**. New Delhi: International Comission on Irrigation and Drainage, 1976. 106p.
- SIMÃO, G. E. Irrigação e tecnologia moderna. Revista: **Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem**. n. 41, jun. 1990.
- SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**: Rome: FAO, 1991. 54p.
- SOIL MOISTURE. Guelph permeameter operating instructions: **Manual Santa Bárbara**. 1991. 28p.
- SOUZA, E.F. **Modelo computacional aplicado ao manejo e planejamento de irrigação**. 1993. 65p. Dissertação (Mestrado de Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOUZA, J.L. **Cultivo orgânico de hortaliças: brócolis, couve-flor e repolho**. Viçosa, MG, CPT,1999. 134p.

SOUZA, L.C.; QUEIROZ,J.E.;GHEYI,H.R. Variabilidade espacial da salinidade de um solo aluvial no semi-árido Paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4. n. 1, 2000.

SPARKS, D.L. **Enviromental soil chemistry**. Newark: Department of Plant and Soil Science University of Delaware. 1995. 265p.

STANHILL, G. The concept of potencial evapotranspiration in arid climate. In:_____. Methodologie de l'écophysologie végétale. De Mont' pelier: Unesco, 1965. v. 25. p. 109 – 117.

TOLEDO. L.G.; NICOLELLA, G. Índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 1, p. 181 - 186, jan/mar. 2002.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia, ciencia e aplicação**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS; ABRH, 2000. 943 p.

ULRICH, B.; KHANA, P.K. Desorption and dissolution of salt from soil as a function of soil: water ration. **Soil Science**, Baltimore, v.114. p.251-253, 1972.

VANCLOOSTER, M., P. et al. **A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment**. Leuven, Belgium, Reference and User's Manual (release 2.0). Leuven: Institute for Land and Water Management. Katholieke Universiteit Leuven, 1994.

VÁRALLYAY, G. **Application of the unsaturated flow theory in the prognosis of salinization from the groundwater**. 9th. European Regional Conference of ICID. Q2, R: 2.1/4,1. 1973.

VIEIRA, S. R. **Geostatística em estudos de variabilidade espacial do solo: tópicos em ciência do solo**, SBSC, 1999.

VOMOCIL, J.A. Porosity. In: BLACK, C.A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, includ statistics of measurement and sampling**. Madison, America Society Agronomy, 1965. pt 1, 299-314.

ZAKIA, M.J.B. **O balanço hídrico levando-se em conta o sistema solo-planta-atmosfera de quatro tipos de coberturas vegetais na região de Grão Mogol, MG**. 1987. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo., São Paulo.

ZHANG, R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disc infiltrometer. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.61, p.1024-1030, 1997.

ZHOU, C. **GIS monitors out fragile Earth.** Fort Collins – CO – USA, GIS World. v.11, n. 10, 1998.

7. ANEXOS

ANEXO A - 1.

Perfil do solo em estudo.

Taxonomia: **NEOSSOLO FLÚVICO Sódico típico textura média/arenosa moderadamente drenado**

Localização: Fazenda N.S. do Rosário, Pesqueira-PE

Lençol freático: ausente

Geologia: Holoceno. Sedimentos aluviais

Material de origem: sedimentos de textura média e arenosa

Situação: planície aluvial do rio Ipanema

Vegetação primária: caatinga de várzea

Relevo: plano

Drenagem: moderadamente drenado

Pedregosidade: ausente

Erosão: não aparente

Uso atual: campo secundário e culturas irrigadas de banana, tomate e repolho.

Ap 0-17 cm; bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmido); franca; maciça moderadamente coesa; muito dura, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

C1 17-29 cm; bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmido), mosqueado comum pequeno e distinto bruno-escuro (7,5YR 3/4, úmido); franco; maciça coesa; muito dura, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

C2 29-50 cm; bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmido), mosqueado comum pequeno e distinto bruno-escuro (7,5YR 3/4, úmido); francoargilosa; maciça coesa e fraca pequena a media blocos subangulares; extremamente dura, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.

C3 50-90 cm; bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmido), mosqueado comum médio e difuso bruno-escuro (7,5YR 3/2, úmido); francoargiloarenosa; maciça coesa; extremamente dura, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.

C4 90-118 cm; (10YR 4/1, úmido); franca; maciça coesa; muito dura, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta e plana.

2C5 118-145 cm; bruno-acinzentado (10YR 5/2, úmido); areia cascalhenta; grão simples; solta, solta, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e plana.

3C6 145-170 cm+; bruno (10YR 5/3, úmido), mosqueado abundante grande e proeminente bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/3, úmido); areia; grão simples com partes maciça pouco coesa; solta com partes ligeiramente dura, solta com partes friáveis, não plástica e não pegajosa.

Raízes: Muitas no Ap; poucas no C1; comuns no C2; raras em C3 e C4 ; ausentes no 2C5 e 3C6.

Macro Porosidade: Muitos em Ap, 2C5 e 3C6; comuns em C1, C2 e C4; poucos no C3

Obs.: Linha de calhaus arestados de rocha na transição entre 2C5 e 3C6.

Bolsão de material de textura areia fina no 3C6

Fonte: Correa et al. 2001.

ANEXO A - 2.

Análise do solo em estudo.

Horiz	Casc.	Areia	Silte	Argila	Argila Natur.	Grau Floc.	Densidade		Poros.	C.C.	P.M.P	Água Disp.
							Solo	Part.				
Ap	0,08	39,3	37,5	23,2	13,2	43,1	1,50	2,40	37,29	18,52	7,29	11,23
C1		29,3	45,5	25,2	20,2	19,8	1,45	2,35	38,43	21,40	8,17	13,24
C2	0,07	28,8	40	31,2	21,2	32,1	1,47	2,55	42,37	22,27	8,79	13,48
C3	0,00	51,3	23,5	25,2	21,2	15,9	1,51	2,56	41,2	15,03	7,30	7,73
C4	0,00	46,8	28	25,2	18,7	25,8	-	2,57	-	17,52	7,45	10,08
2C5	20,89	92,9	1,5	5,6	3,6	35,7	-	2,53	-	1,81	1,24	0,57
3C6	6,39	92,15	1,25	6,6	4,6	30,3	-	2,65	-	3,08	2,24	0,85

Horiz.	PH		Δ pH	K	Na	Ca	Mg	S	H	Al	CTC	V
	água	KCl										
Ap	6,41	5,38		0,61	0,29	2,07	1,31	4,27	1,70	0	5,97	72
C1	7,20	5,65		0,09	0,76	2,94	1,30	5,09	1,15	0	6,24	82
C2	7,50	6,14		0,09	1,09	3,20	1,27	5,65	0,60	0	6,25	90
C3	7,84	6,42		0,07	0,39	2,25	0,98	3,69	0,45	0	4,14	89
C4	7,60	6,08		0,09	0,30	2,40	1,26	4,05	0,55	0	4,60	88
2C5	7,33	6,20		0,05	0,03	0,38	0,28	0,74	0,15	0	0,89	83
3C6	7,77	6,56		0,07	0,11	0,48	0,53	1,18	0,15	0	1,33	89

Horiz.	P	PST	C	Sais Solúveis								
				PH	CE	CO ₃ ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Ap	47,16	5	11,50	8,2	0,54	0	3,50	2,50	2,99	0,44	1,04	1,19
C1	34,40	12	8,73	7,6	0,95	0	2,50	6,25	6,71	0,04	1,60	1,38
C2	40,03	17	8,92	7,8	1,4	0	2,50	11,25	9,29	0,06	2,79	2,01
C3	36,50	9	4,61	7,9	1,38	0	2,50	7,50	7,74	0,07	3,32	2,50
C4	32,46	7	4,37	7,8	0,68	0	2,00	3,75	3,09	0,04	1,89	1,54
2C5	15,91	3	2,77	7,3	0,26	0	2,00	2,50	0,92	0,09	0,80	0,92
3C6	38,80	8	1,41	7,1	0,53	0	3,75	5,00	3,55	0,08	0,85	1,07

Fonte: Correa et al. 2001.

ANEXO B.

Análise da condutividade elétrica do solo em estudo.

CONDIÇÃO - APÓS IRRIGAÇÃO								
PROFUNDIDADE (CM)	20	40	60	80	100	MÉDIA	DESVIO PAD	CV
Ponto 01	3.40	3.30	3,37	2,84	3,34	3.35	0.071	0.021
Ponto 02	1.89	1.81	2.03	2.75	3.41	2.38	0.687	0.289
Ponto 03	2.79	2.14	2.37	3.18	5.86	3.27	1.503	0.460
Ponto 04	6.83	4.81	-	3.77	3.00	4.60	1.660	0.361
Ponto 05	1.99	1.48	1.36	1.48	1.46	1.55	0.249	0.160
Ponto 06	1.73	2.00	2.12	3.85	3.90	2.72	1.064	0.391
Ponto 07	1.31	0.44	1.28	1.77	1.82	1.32	0.554	0.419
Ponto 08	2.33	2.28	2.23	3.02	1.76	2.32	0.451	0.194
Ponto 09	1.68	1.36	1.64	1.98	0.90	1.51	0.407	0.269
Ponto 10	1.56	1.55	1.76	2.00	1.25	1.62	0.278	0.171
Ponto 11	1.06	1.07	1.16	1.33	1.28	1.18	0.122	0.103
Ponto 12	1.87	1.52	1.45	1.82	1.25	1.58	0.260	0.165
MÉDIA	2.37	1.98	1.74	2.45	2.35			
DESVIO PAD	1.541	1.133	0.428	0.902	1.528			
CV	0.650	0.572	0.246	0.368	0.649			

CONDIÇÃO - ANTERIOR A IRRIGAÇÃO								
PROFUNDIDADE (CM)	20	40	60	80	100	MÉDIA	DESVIO PAD	CV
Ponto 01	3.37	1.98	1.72	1.51	1.44	2.00	0.792	0.395
Ponto 02	4.69	1.41	1.73	2.00	2.36	2.44	1.306	0.536
Ponto 03	3.51	2.71	2.56	5.00	2.54	3.26	1.049	0.321
Ponto 04	6.31	0.92	2.61	2.94	3.30	3.22	1.955	0.608
Ponto 05	2.24	2.51	1.35	1.73	2.64	2.09	0.543	0.259
Ponto 06	3.34	3.04	3.28	5.23	5.30	4.04	1.126	0.279
Ponto 07	2.51	1.80	1.55	1.61	1.79	1.85	0.384	0.207
Ponto 08	4.27	5.31	7.37	5.30	5.88	5.63	1.135	0.202
Ponto 09	1.74	1.40	2.14	1.61	1.86	1.75	0.277	0.158
Ponto 10	1.79	1.45	2.22	4.96	4.97	3.08	1.744	0.567
Ponto 11	1.44	1.13	1.74	1.22	1.55	1.42	0.247	0.174
Ponto 12	1.80	1.42	1.23	1.70	-	1.54	0.261	0.169
MÉDIA	3.08	2.09	2.46	2.90	3.06			
DESVIO PAD	1.465	1.207	1.655	1.693	1.599			
CV	0.475	0.577	0.673	0.584	0.523			

ANEXO C.

Análise da pH do solo em estudo.

CONDIÇÃO - ANTERIOR A IRRIGAÇÃO						DESVIO		
PROFUNDIDADE (CM)	20	40	60	80	100	Média	PAD	CV
Ponto 01	8.20	7.00	7.00	7.20	8.1	7.50	0.600	0.080
Ponto 02	8.00	8.50	7.80	8.00	7.80	8.02	0.286	0.036
Ponto 03	8.50	7.20	8.50	7.90	7.90	8.00	0.539	0.067
Ponto 04	7.20	7.00	-	7.40	8.00	7.40	0.432	0.058
Ponto 05	8.70	7.70	7.20	7.40	8.50	7.90	0.667	0.084
Ponto 06	8.10	7.20	6.80	7.80	7.70	7.52	0.517	0.069
Ponto 07	8.20	8.50	7.30	6.80	6.90	7.54	0.770	0.102
Ponto 08	9.20	7.80	8.50	7.60	7.70	8.16	0.680	0.083
Ponto 09	8.10	7.70	8.00	8.30	7.30	7.88	0.390	0.049
Ponto 10	8.10	8.50	7.20	8.60	7.50	7.98	0.614	0.077
Ponto 11	8.00	8.80	7.60	7.00	7.50	7.78	0.672	0.086
Ponto 12	8.40	8.00	8.00	7.60	8.10	8.02	0.286	0.036
Média	8.23	7.83	7.63	7.63	7.72			
DESVIO PAD	0.475	0.641	0.582	0.523	0.426			
CV	0.058	0.082	0.076	0.068	0.055			

CONDIÇÃO - APÓS IRRIGAÇÃO						DESVIO		
PROFUNDIDADE (CM)	20	40	60	80	100	Média	PAD	CV
Ponto 01	-	9.50	8.50	8.70	8.6	8.83	0.457	0.052
Ponto 02	8.00	9.30	8.80	8.50	9.20	8.76	0.532	0.061
Ponto 03	8.70	9.00	7.90	7.70	8.60	8.38	0.554	0.066
Ponto 04	8.80	8.00	8.40	8.90	9.20	8.66	0.467	0.054
Ponto 05	9.10	8.20	8.10	7.50	7.20	8.02	0.733	0.091
Ponto 06	8.40	8.90	8.60	9.00	8.40	8.66	0.279	0.032
Ponto 07	9.00	8.40	9.10	8.30	9.30	8.82	0.444	0.050
Ponto 08	9.80	9.70	9.30	8.80	9.00	9.32	0.432	0.046
Ponto 09	9.40	9.60	9.40	9.00	8.70	9.22	0.363	0.039
Ponto 10	9.70	8.90	8.60	7.80	8.60	8.72	0.683	0.078
Ponto 11	8.90	9.00	9.30	8.30	8.70	8.84	0.371	0.042
Ponto 12	9.60	9.00	9.10	9.00	-	9.18	0.287	0.031
Média	9.04	8.96	8.79	8.46	8.68			
DESVIO PAD	0.561	0.538	0.501	0.542	0.576			
CV	0.062	0.060	0.057	0.064	0.066			

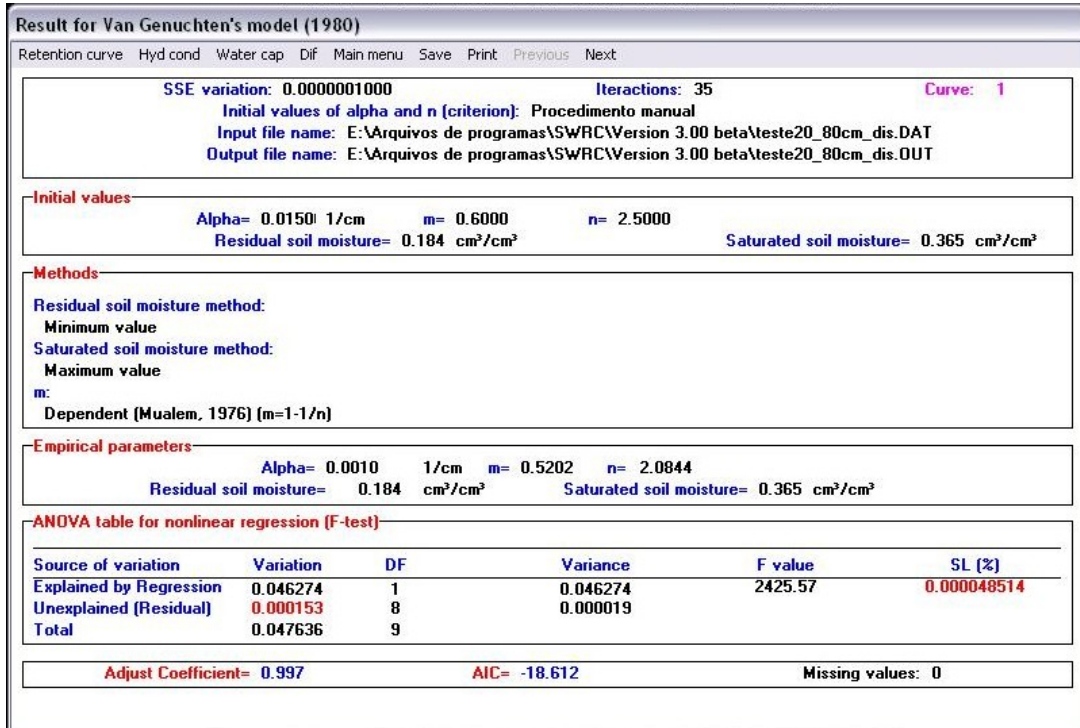
ANEXO D.

Dados inseridos ao software CROPWAT, para determinação de Evapotranspiração (ET_o - Penman Monteith).

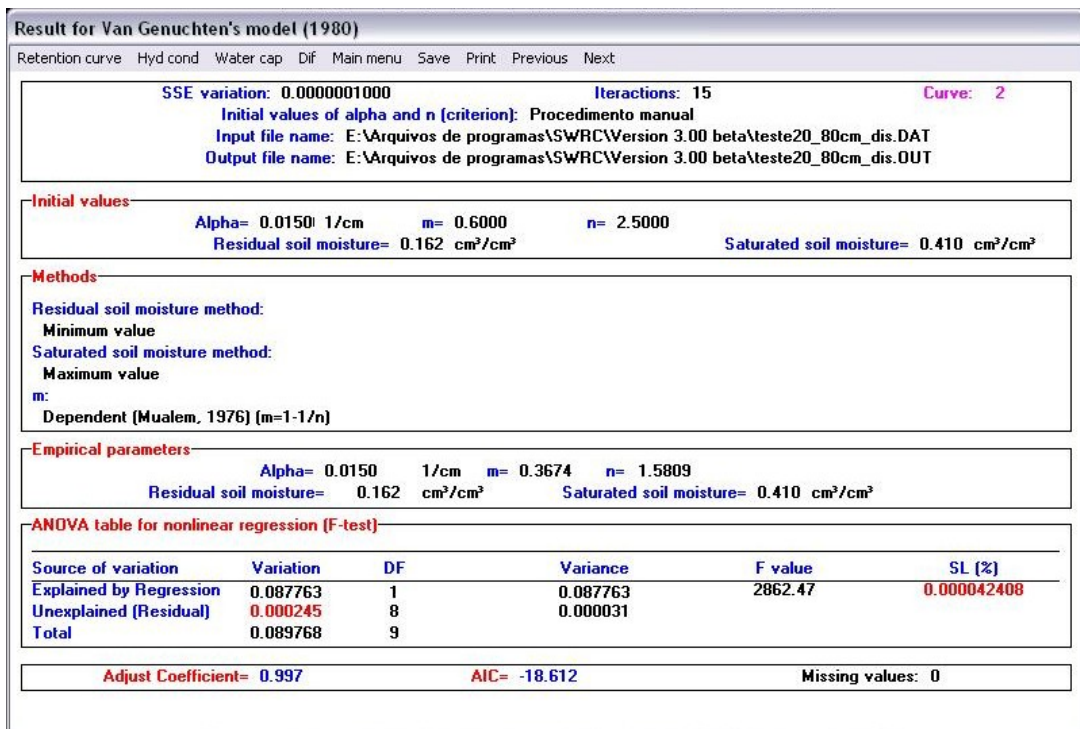
Data	Temperatura máx. T.máx. (°C)	Temperatura min. T.min.(°C)	Umidade média do ar UR (%)	Velocidade do vento U ² (m.s ⁻¹)	Evapotranspiração ET _o (mm)
10/fev	29.89	19.89	60.16	2.06	5.74
11/fev	32.77	18.07	59.31	1.96	6.00
12/fev	30.99	19.73	59.73	1.8	5.71
13/fev	30.62	21.65	62.50	1.6	5.55
14/fev	29.99	20.49	63.70	1.9	5.60
15/fev	32.47	19.29	61.03	2.43	6.21
16/fev	32.51	21.09	60.08	2.6	6.34
17/fev	32.55	18.4	59.66	2.2	6.12
18/fev	33.37	19.1	60.24	2.3	6.27
19/fev	33.97	17.71	59.89	2.2	6.30
20/fev	30.32	20.66	63.55	1.4	5.39
21/fev	30.82	19.63	65.88	2.2	5.77
22/fev	28.37	18.90	63.57	1.5	5.24
23/fev	32.38	20.43	62.20	2.1	5.98
24/fev	33.17	20.82	62.04	2.6	6.37
25/fev	29.33	20.76	69.41	1.5	5.28
26/fev	29.37	20.26	71.16	1.9	5.38
27/fev	32.98	21.02	68.21	1.7	5.72
28/fev	31.92	20.26	70.60	2.2	5.78
1/mar	28.11	21.09	67.92	1.7	5.28
2/mar	30.72	20.79	69.98	1.5	5.39
3/mar	31.92	19.16	68.43	1.8	5.97
4/mar	32.15	20.13	67.52	2.1	6.15
5/mar	29.96	17.58	68.94	1.7	5.70
6/mar	31.62	20.69	66.79	2.4	6.24
7/mar	29.80	20.36	67.15	2.1	5.90
8/mar	32.32	20.36	66.20	2.6	6.44
9/mar	32.08	20.23	66.42	2.3	6.24
10/mar	33.17	17.91	65.88	2.4	6.49
11/mar	33.23	21.51	66.09	2.4	6.46
12/mar	33.04	20.63	65.54	2.7	6.60
13/mar	34.00	17.34	65.56	2.2	6.51
14/mar	33.67	21.55	65.21	2.3	6.50
15/mar	33.67	21.36	64.69	2.6	6.66
16/mar	32.67	21.09	65.27	2.3	6.37
17/mar	32.28	19.76	69.24	1.4	5.81
18/mar	31.55	20.09	70.87	1.4	5.73
19/mar	30.39	19.99	68.75	1.3	5.61
20/mar	27.51	20.82	66.55	1.7	5.56
21/mar	31.78	19.17	67.02	1.9	6.03
22/mar	30.85	21.09	67.39	1.5	5.77
23/mar	31.55	20.96	69.09	1.7	5.89
24/mar	30.43	21.39	68.22	2.0	5.92
25/mar	29.20	18.14	68.04	1.5	5.56
26/mar	28.61	19.83	67.17	1.6	5.59
Altitude:	650m	Latitude:	08°10'25	Longitude:	35°11'25

ANEXO E.

Ajuste para a Curva Característica, profundidade de 20cm.



Ajuste para a Curva Característica, profundidade de 40cm.



ANEXO F.

Ajuste para a Curva Característica, profundidade de 60cm.

Result for Van Genuchten's model (1980)

Retention curve Hyd cond Water cap Dif Main menu Save Print Previous Next

SSE variation: 0.0000001000 Iteractions: 8 Curve: 3
 Initial values of alpha and n (criterion): Procedimento manual
 Input file name: E:\Arquivos de programas\SWRC\Version 3.00 beta\teste20_80cm_dis.DAT
 Output file name: E:\Arquivos de programas\SWRC\Version 3.00 beta\teste20_80cm_dis.OUT

Initial values
 Alpha= 0.0150 1/cm m= 0.6000 n= 2.5000
 Residual soil moisture= 0.258 cm³/cm³ Saturated soil moisture= 0.370 cm³/cm³

Methods
 Residual soil moisture method:
 Minimum value
 Saturated soil moisture method:
 Maximum value
 m:
 Dependent (Mualem, 1976) (m=1-1/n)

Empirical parameters
 Alpha= 0.0211 1/cm m= 0.6461 n= 2.8253
 Residual soil moisture= 0.258 cm³/cm³ Saturated soil moisture= 0.370 cm³/cm³

ANOVA table for nonlinear regression (F-test)

Source of variation	Variation	DF	Variance	F value	SL (%)
Explained by Regression	0.026534	1	0.026534	13.40	0.569611224
Unexplained (Residual)	0.015846	8	0.001981		
Total	0.052248	9			

Adjust Coefficient= 0.697 AIC= -18.612 Missing values: 0

Ajuste para a Curva Característica, profundidade de 80cm.

Result for Van Genuchten's model (1980)

Retention curve Hyd cond Water cap Dif Main menu Save Print Previous Next

SSE variation: 0.0000001000 Iteractions: 19 Curve: 4
 Initial values of alpha and n (criterion): Procedimento manual
 Input file name: E:\Arquivos de programas\SWRC\Version 3.00 beta\teste20_80cm_dis.DAT
 Output file name: E:\Arquivos de programas\SWRC\Version 3.00 beta\teste20_80cm_dis.OUT

Initial values
 Alpha= 0.0150 1/cm m= 0.6000 n= 2.5000
 Residual soil moisture= 0.137 cm³/cm³ Saturated soil moisture= 0.428 cm³/cm³

Methods
 Residual soil moisture method:
 Minimum value
 Saturated soil moisture method:
 Maximum value
 m:
 Dependent (Mualem, 1976) (m=1-1/n)

Empirical parameters
 Alpha= 0.0354 1/cm m= 0.2909 n= 1.4101
 Residual soil moisture= 0.137 cm³/cm³ Saturated soil moisture= 0.428 cm³/cm³

ANOVA table for nonlinear regression (F-test)

Source of variation	Variation	DF	Variance	F value	SL (%)
Explained by Regression	0.096137	1	0.096137	695.43	0.000164441
Unexplained (Residual)	0.001106	8	0.000138		
Total	0.099431	9			

Adjust Coefficient= 0.989 AIC= -18.612 Missing values: 0