

JOSÉ GRACILIANO DA SILVA JÚNIOR

**ABORDAGEM INTEGRADA PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO EM REGIÃO
SEMI-ÁRIDA: EXPERIMENTAÇÃO E MODELAGEM**

RECIFE – PE

Março - 2009

JOSÉ GRACILIANO DA SILVA JÚNIOR

**ABORDAGEM INTEGRADA PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO EM
REGIÃO SEMI-ÁRIDA: EXPERIMENTAÇÃO E MODELAGEM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós – Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Professora Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro.

Co – Orientador: Abelardo Antônio de Assunção Montenegro.

RECIFE - PE

Março - 2009

Ficha catalográfica

S586a Silva Júnior, José Graciliano da
Abordagem integrada para manejo da irrigação em
região semi-árida: experimentação e modelagem / José
Graciliano da Silva Júnior. -- 2009.
79 f. : il.

Orientadora: Suzana Maria Gico Lima Montenegro.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento
de Tecnologia Rural, Recife, 2009.

Referências

1. Irrigação 2. Repolho 3. Modelagem 4. Zona não saturada
5. semi-árido I. Montenegro, Suzana Maria Gico Lima II. Título

CDD 631.7

JOSÉ GRACILIANO DA SILVA JÚNIOR

**ABORDAGEM INTEGRADA PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO EM REGIÃO
SEMI-ÁRIDA: EXPERIMENTAÇÃO E MODELAGEM**

Dissertação defendida e aprovada em 09 de março de 2009 pela Banca Examinadora:

Orientadora:

Suzana M. G. L. Montenegro, Prof^ª. Dr.

DECIV/UFPE

Examinadores:

Hans Raj Gheyi, Prof. Dr.

CTRN-UFCG

Marcus Metri Correa, Prof. Dr.

DTR-UFRPE

Elvira Maria Regis Pedrosa, Prof^ª. Dr.

DTR-UFRPE

“Sonhe alto... Queira o melhor do melhor... Se pensarmos pequeno... Coisas pequenas teremos... Mas se desejarmos fortemente o melhor e, principalmente, lutarmos pelo melhor... O melhor vai se instalar em nossa vida. Porque sou do tamanho daquilo que vejo, e não do tamanho da minha altura”.

Carlos Drummond de Andrade

“É melhor tentar e falhar que preocupar-se e ver a vida passar. É melhor tentar, ainda que em vão, que sentar-se fazendo nada até o final. Eu prefiro na chuva caminhar que em dias tristes me esconder. Prefiro ser feliz embora louco, que em conformidade viver”.

Martin Luther King

“A mente que se abre a uma idéia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

“Algo só é impossível até que alguém duvide e acabe provando o contrário”.

Albert Einstein

“Sonhe, pois o sonho é o combustível da realização”.

Paulo Roberto Gaefke

“Pois a sabedoria entrará no teu coração, e o conhecimento será apazível à tua alma”.

Provérbios 2:10

“Posso todas as coisas naquele que me fortalece”.

Filipenses 4:13

“Entrega teu caminho ao Senhor e o mais Ele fará”.

Salmo 37:05

Ao meu querido pai, **Graciliano** (*In Memoriam*), que onde quer que esteja estará sempre em meu coração e lembranças e a minha querida mãe, **Maria das Graças**, que me incentiva desde o primeiro momento da minha vida, e por estar sempre presente no meu crescimento moral e intelectual e por sempre acreditar em mim.

OFEREÇO

À minha esposa **ELIZABETH** e ao meu filho **DAVID**, pela companhia, compreensão, amor e carinho.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, por ter guiado meus passos nessa longa caminhada e por me mostrar a melhor maneira para superar os obstáculos.

A minha família, em especial meus pais, José Graciliano da Silva (*in memoriam*) e Maria das Graças Lima que sempre se dedicaram e me ensinaram os valores da vida.

Aos meus queridos irmãos Álbane, Álvaro, Adriano, André, Glauciane, Graciele, Glauce e Gláucia, meus fiéis companheiros, que sempre confiaram no meu potencial e sucesso.

As minhas cunhadas Rosinete, Elilde e Valéria pelas palavras de incentivo e por todo apoio.

Aos meus sobrinhos pelos momentos de felidades e por acreditar muito no potencial de seu tio.

Aos meus primos e primas em especial Jaidenilson e Gilson pelo incentivo e por todo apoio.

Aos meus amigos conterrâneos em especial, Inaldo, Rivaldo, Rinaldo, Daniel, Ezequiel e Roberto Brito os quais considero como verdadeiros amigos.

Aos amigos de residência estudantil Erlan, Cícero Roberto, Jacson, Adevaldo, Fernando, Luis Carlos, Flávio, Leiton, Alexandre Sanharól, Bruno, Reinaldo, Airon, Almeida pela amizade e pelos momentos de convivência e descontração.

Aos amigos e amigas de Mestrado e Doutorado, em especial a Marcio Salú, Manoel Vieira, José Francisco (Zezito), Alexandre, Ricardo Wanderley, Terezinha, Marcos, Leila, Gledson, Valdirene, José Roberto, Eduardo, Waldemir, Táfnes, Adriana, Aérica, Albert, Anildo, Manoel Costa, Júlio José, Emídio, Pedro, George, Luciana, André Suêlto, Anildo, Guilherme, Bianca, Thirciano, Lúcio, Matheus, Cícero que em pouco tempo de curso soubermos construir uma bela amizade.

Aos amigos da Sala 03 do DTR da UFRPE, Thaís, Ana Paula, Adriano, Francisco, Edivan, Issac, Cléber e todos que fazem parte do laboratório de hidrologia aplicada pelo trabalho em conjunto.

A Profa. Dra. Suzana Montenegro, pela oportunidade de trabalhar com modelagem matemática, pela orientação e pelos conhecimentos transmitidos.

Aos Professores Dr. Abelardo Montenegro e Dr. Ênio Farias de França pelos conhecimentos e apoio na fase experimental.

Ao Prof. Dr. João Audifax César de Albuquerque Filho DTR/UFRPE e a sua esposa Iêda Lituak pelas palavras de incentivo, amizade, pelos conhecimentos e por todo apoio que tem mim dado desde a graduação até os dias de hoje.

A todos os meus professores da Graduação e Pós-graduação, em especial aos professores Dr. Marcus Metri, Dr. Fernando Cartaxo e ao Prof. Dr. Ronaldo Freire de Moura (*In Memoriam*), pela contribuição que deram ao meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional durante todo o curso.

Aos funcionários da UFRPE, José Luiz (Lulinha), Júnior Granja, Ednalva (Nana), Bartolomeu, Anacleto pela amizade, momentos de descontração e serviços prestados ao longo do curso.

A Coordenação do mestrado de Engenharia Agrícola pelo apoio dado sempre que necessário.

Ao Sr. Vivaldo Tavares de Araújo, pela considerável ajuda: tanto pela área disponibilizada como pela sua dedicação no manejo experimental durante a etapa de campo.

Ao CNPq/CT-Agro/CT-Hidro pela concessão da bolsa e pelo suporte financeiro aplicado neste trabalho.

A todos que contribuíram diretamente ou indiretamente para este feito, deixo aqui a minha mais profunda gratidão. E que Deus continui vos abençoando.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA E REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Caracterização dos vales irrigados no agreste do estado de Pernambuco.....	3
2.2 Mananciais aluviais.....	3
2.3 Irrigação.....	3
2.4 Manejo de irrigação.....	4
2.5 Potencial da água no solo.....	5
2.6 Curva característica de umidade do solo.....	6
2.7 Salinização dos solos.....	7
2.8 Dinâmica da água e de solutos no solo.....	8
2.9 Condutividade hidráulica.....	11
2.10 Aplicação de modelos.....	14
3 MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 Generalidades.....	18
3.2 Área de estudo.....	18
3.3 Descrição do experimento.....	19
3.4 Manejo de irrigação.....	20
3.5 Aquisição de dados de campo para o SALTMED.....	21
3.5.1 Variáveis climatológicas.....	21
3.5.2 Dados de irrigação.....	23
3.5.3 Dados de solos.....	23
3.5.3.1 Umidade do solo no campo.....	23
3.5.3.2 Avaliação da tensão da água no solo.....	24
3.5.3.3 Determinação da condutividade hidráulica.....	25
3.5.3.4 Caracterização do solo.....	26
3.5.3.4.1 Granulometria.....	26
3.5.3.4.2 Curva característica de umidade do solo.....	27

3.5.3.4.3 Extrato de saturação do solo.....	28
3.5.3.4.4 Cápsulas de extração.....	29
3.6 Descrição do modelo SALTMED.....	30
3.7 Análise do desempenho do modelo.....	35
3.8 Análise da dispersividade longitudinal.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1 Curvas de retenção da água no solo.....	37
4.2 Avaliação da umidade do solo com sonda de nêutrons.....	39
4.3 Análise da tensiometria.....	42
4.4 Rendimento da cultura do repolho.....	42
4.5 Precipitação e evapotranspiração de referência (ET _o) durante o ciclo da cultura do repolho.....	43
4.6 Qualidade da água de irrigação.....	44
4.7 Salinidade do solo.....	45
4.8 Modelagem computacional.....	46
4.8.1 Simulações para umidade do solo.....	46
4.8.2 Simulações para salinidade do solo.....	52
4.8.3 Análise de sensibilidade para os parâmetros de transporte.....	53
5 CONCLUSÕES.....	54
6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa do município de Pesqueira com vista da área em estudo. Fonte: (Almeida, 2005)	18
Figura 2 Vista do tanque “Classe A” e Estação climatológica compacta.....	22
Figura 3 Curva de calibração neutrônica para o solo estudado. Fonte: (Santiago, 2002).....	24
Figura 4 Vista do tensiômetro e do tensímetro de punção no campo.....	25
Figura 5.a 5.b Sucção da solução do solo com a bomba a vácuo manual.....	29
Figura 6 Módulo de dados meteorológicos do modelo SALTMED.....	32
Figura 7 Módulo de dados de irrigação do modelo SALTMED.....	32
Figura 8 Módulo de dados da cultura do repolho do modelo SALTMED.....	33
Figura 9 Módulo de dados das camadas do solo do modelo SALTMED.....	34
Figura 10 Dados de entrada para as duas camadas de solo a 0-20 e 20-40.....	35
Figura 11 Curva de retenção de umidade ajustada pelo modelo de van Genuchten para camada de 0-20 cm.....	38
Figura 12 Curva de retenção de umidade ajustada pelo modelo de van Genuchten para camada de 20-40 cm.....	38
Figura 13 – Umidade do solo estimada com sonda de nêutrons para freqüência de irrigação de 12 horas	39
Figura 14 Umidade do solo estimada com sonda de nêutrons para freqüência de irrigação de 24 horas.....	40
Figura 15 Umidade do solo estimada com sonda de nêutrons para freqüência de irrigação de 48 horas.....	41
Figura 16 Umidade do solo estimada com sonda de nêutrons para as três freqüências de irrigação na profundidade de 20 cm.....	41
Figura 17 Tensões estimadas no cultivo do repolho, com freqüência de irrigação de 24 horas.....	42
Figura 18 Valores da evapotranspiração de referência (ET _o) e da precipitação durante o ciclo da cultura.....	44
Figura 19 Comparação das umidades simulada de todos os dias experimentais com as umidades observadas para profundidade de 20 cm na freqüência de 12 horas.....	49

Figura 20 Comparação das umidades simulada de todos os dias experimentais com as umidades observadas para profundidade de 20 cm na freqüência de 24 horas.....	49
Figura 21 Comparação das umidades simulada de todos os dias experimentais com as umidades observadas para profundidade de 20 cm na freqüência de 48 horas.....	50
Figura 22 Comparação das umidades simulada de todos os dias experimentais com as umidades observadas para profundidade de 40 cm na freqüência de 12 horas.....	50
Figura 23 Comparação das umidades simulada de todos os dias experimentais com as umidades observadas para profundidade de 40 cm na freqüência de 24 horas.....	51
Figura 24 Comparação das umidades simulada de todos os dias experimentais com as umidades observadas para profundidade de 40 cm na freqüência de 48 horas.....	51
Figura 25 Correlação das salinidades simuladas e medidas nas profundidades de 20 e 40 cm para freqüência de 24 horas.....	53
Figura 26 Análise de sensibilidade para parâmetros de transporte.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Condutividade hidráulica saturada da camada do solo em estudo em dois blocos.....	26
Tabela 2 Atributos físicos da área experimental.....	27
Tabela 3 Parâmetros da curva característica da camada do solo em estudo.....	37
Tabela 4 Valores médios da produtividade em cada frequência de rega.....	43
Tabela 5 Condutividade elétrica da água de irrigação.....	45
Tabela 6 Médias da condutividade elétrica do extrato de saturação e suas respectivas correções, para as frequências de 12, 24 e 48 horas nas camadas de 0-20 e 20-40 cm para o período de cultivo.....	45
Tabela 7 Condutividade elétrica obtida através da extração das cápsulas porosas para a frequência de 24 horas nas camadas de 0-20 e 20-40 cm durante o período de cultivo.....	46
Tabela 8 Coeficientes e parâmetros da cultura do repolho utilizados no plantio e na calibração e validação do modelo.....	46
Tabela 9 Propriedades hidráulicas e parâmetros do solo da área experimental utilizados no ajuste do modelo.....	47
Tabela 10 Índices estatísticos de comparação entre resultados observados e simulados das umidades no perfil do solo correspondente as figuras (19, 20, 21, 22, 23 e 24 respectivamente).....	52

Resumo

No semi-árido brasileiro, a pequena agricultura familiar constitui suporte financeiro a pequenas comunidades pobres, vindo a contribuir para redução do êxodo rural. Entretanto, devido às condições climáticas adversas pela concentração da chuva em alguns meses durante o ano, a irrigação se torna indispensável para o desenvolvimento da agricultura. O objetivo desse trabalho foi de calibrar o modelo SALTMED durante a estação de crescimento do repolho para que o mesmo possa ser utilizado para analisar alternativas de manejo integrado de irrigação em sistemas do semi-árido considerando aspectos dos recursos naturais (solo e água), clima, cultura e sistema de irrigação numa frequência de rega de 24 horas e validá-lo para os tratamentos com frequência de 12 e 48 horas em áreas com solo do tipo aluvial de textura média com susceptibilidade à salinização. O experimento foi conduzido em lote irrigado da Fazenda Nossa Senhora do Rosário, município de Pesqueira, Agreste do Estado de Pernambuco. As lâminas de irrigação, para as frequências de 12, 24 e 48 horas, foram calculadas com base no coeficiente de cultura (K_c) e na evapotranspiração de referência do Tanque Classe A (E_{to}). Durante o ciclo da cultura foram monitorados os conteúdos de umidade nas profundidades de 20 e 40 cm que foram comparados com valores calculados pelo SALTMED para calibração e validação. Também foi medida a salinidade do solo, para o tratamento com frequência de 24 horas. A produtividade da cultura do repolho foi avaliada para as diferentes frequências. Verificou-se experimentalmente que as três frequências utilizadas no estudo podem ser utilizadas como alternativa de manejo para redução da salinidade do solo, com destaque para as frequências de 12 e 48 horas. Os resultados também mostraram que o modelo SALTMED respondeu satisfatoriamente na predição dos dados de umidade e de salinidade do solo, para as condições testadas. Portanto o modelo pode ser utilizado para previsão de manejo de irrigação semelhante, de maneira a proporcionar maiores produtividades de culturas olerícolas sensíveis a salinidade, variando lâmina de água, qualidade da água e tipos de sistemas de irrigação.

ABSTRACT

In the Brazilian semi-arid the family agriculture comprises a financial support to small poor communities, contributing for reduction of the rural exodus. However, due to the adverse climatic conditions, as the concentration of the rainfall in some months during the year, the irrigation becomes indispensable for the practising agriculture. The objective of the work was of gaging the model SALTMED during the station of growth of the cabbage so that the same can be used to analyze alternatives of integrated handling of irrigation in systems of the semi-arid considering aspects of the natural resources (soil and water), climate, culture and overhead irrigation in a frequency of watering of 24 hours and to validate him/it frequently for the treatments of 12 and 48 hours in areas with soil of the alluvial type of medium texture with salinity potentials. The experiment was driven in irrigated lot of Our Finance Mrs. of Rosario, municipal district of Pesqueira-PE, Rural of the State of Pernambuco. The irrigation sheets, for the frequencies of 12, 24 and 48 hours, they were calculated with base in the culture coefficient (K_c) and in the reference evapotranspiration of the (E_{to}) from pan. During the cycle of the culture the humidity contents were monitored in the depths of 20 and 40 cm that were compared with values made calculations by SALTMED for calibration and validation. Also the salinity of the soil was measured, for the treatment frequently of 24 hours. The productivity of the culture of the cabbage was evaluated for the different frequencies. It was verified experimentally that the three frequencies used in the study can be used as handling alternative for reduction of the salinity of the soil, with prominence for them frequency of 12 and 48 hours. The results also showed that the model SALTMED answered satisfactorily in the prediction of the humidity data and of salinity of the soil, for the tested conditions. Therefore the model can be used for forecast of handling of similar irrigation, in way to provide larger productivities of cultures sensitive olerícolas the salinity, varying sheet of water, quality of the water and types of overhead irrigations.

1. INTRODUÇÃO

A expansão da agricultura irrigada tem-se tornado preocupante, devido ao elevado consumo e às restrições de disponibilidade de água, bem como ao risco de degradação dos recursos naturais envolvido, ou seja, sistema solo-água-planta. No Nordeste brasileiro, o elevado déficit hídrico contribui também para o incremento da salinidade de água e solo nas áreas irrigadas. Nos vales aluviais do semi-árido tem se praticado com vigor a pequena agricultura irrigada, uma vez que os recursos hídricos superficiais são escassos e cabe como único recurso a exploração dos mananciais subterrâneos existentes nestas áreas. A irrigação nestas áreas pode incidir em impactos ambientais, quanto ao solo e à água subterrânea, pela susceptibilidade de salinização dos recursos naturais dos vales aluviais do semi-árido nordestino (Montenegro et al., 2001).

Nas regiões semi-áridas, a questão da gestão hídrica se torna mais importante e necessária devido à escassez das reservas naturais de água e, sobretudo, à regularidade, no tempo e no espaço, das precipitações e escoamentos superficiais (Vieira, 2003).

Estudos referentes ao teor salino das águas disponíveis no Nordeste são de grande relevância, já que o processo de salinização dos solos é acelerado, principalmente, pela deposição de sais através da água de irrigação. Pesquisas que abordem a salinidade do solo são de fundamental importância, pois os sais além de ocasionarem danos às propriedades físicas e químicas do solo podem gerar perdas significativas de produtividade nas culturas exploradas (Souza, 2007).

De acordo com Ragab (2005), quando o recurso hídrico é limitado e o custo de água não-salina fica proibitivo, cultura de moderada e alta tolerância aos sais podem ser irrigada com água salina especialmente em fases de crescimento tardio. Assim, o uso de água de drenagem salina para irrigação tem uma vantagem ambiental por reduzir a demanda por água de boa qualidade que podem ser utilizada para fins mais nobres.

Segundo Bernardo (1997), a baixa eficiência e uniformidade dos sistemas de irrigação, e a limitada lixiviação de sais do solo estão dentre os principais fatores que influenciam na degradação do solo. Em áreas de agricultura familiar, o cenário de risco de degradação se agrava, devido ao limitado nível de capacitação dos agricultores.

A gestão dos recursos hídricos em áreas irrigadas no semi-árido deve enfatizar aspectos não apenas relacionados ao uso eficiente da água, mas também ao controle da salinização da água e do solo, cuja ocorrência está relacionada a fatores naturais (solo e clima) e à prática da irrigação.

De acordo com Bowman et al. (1991), independentemente do método e das culturas instaladas, um planejamento adequado de áreas irrigadas deve efetivamente estar integrado com as informações de clima, de solo e também com as funções de resposta das culturas em relação à lâmina de água aplicada, além de recursos de capital, de trabalho e de tecnologia agrícola, mantendo as condições de umidade e nutrientes no solo favoráveis ao bom desempenho da cultura.

A frequência de irrigação possui papel importante no controle da salinização. Rhoades et al. (1992) destacaram o controle da frequência de irrigação como uma das práticas potenciais de manejo de água disponível aplicável a solos e águas salinas. Poucas evidências experimentais existentes, entretanto, sustentam como recomendação adequada, redução do intervalo de irrigação através da utilização de água salina.

A modelagem matemática está sendo cada vez mais indispensável no estabelecimento de políticas protetoras do ambiente. Com a evolução dos computadores pessoais, a modelagem matemática e numérica tornou-se uma escolha natural como ferramenta atualizada de avaliação e gestão (Cabral e Demétrio, 1997). Centenas de modelos foram desenvolvidos para o manejo de diferentes tipos de aquíferos e condições específicas encontradas no campo. No entanto, vale salientar que a principal limitação quanto ao uso de modelos é a coerência de dados de entrada necessários, os quais não se encontram frequentemente disponíveis, assim como resultados de ensaios para calibração e validação dos mesmos (Gonçalves, 2002).

O modelo SALTMED é um modelo aplicável para diferentes cultivos, solos, sistemas de irrigação e estratégias de manejo de água e que prediz o avanço de sais no perfil do solo conhecendo-se as propriedades hidrodinâmicas do solo, as climatológicas, de irrigação e parâmetros da cultura. Ragab et al. (2005), aplicaram o SALTMED para cinco estações de crescimento na cultura do tomate no Egito e Síria e observaram que uma boa predição de salinidade ajuda a evitar a salinização na zona radicular e no perfil do solo, e ajuda determinar o requerimento de lixiviação a ser aplicado.

Diante do exposto o objetivo geral desse trabalho foi propor e analisar alternativas de manejo integrado da irrigação em sistemas do semi-árido considerando aspectos dos recursos naturais (solo e água), clima, cultura e sistema de irrigação, e avaliar o desempenho do modelo SALTMED durante a estação de crescimento do repolho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Caracterização dos Vales Irrigados no Agreste do Estado de Pernambuco

Oliveira (2001) comenta que no Estado de Pernambuco 12% do território é ocupado pela zona úmida e rios perenes, enquanto 88% estão nas zonas do Agreste e Sertão, onde os rios são temporários, com exceção do rio São Francisco. O regime dos rios que compõem a rede hidrográfica depende diretamente da intensidade e duração das chuvas, mas a reduzida capacidade de retenção de água no solo e a própria irregularidade das precipitações, que se concentram somente nos meses de Março a Julho, faz com que seus rios sejam temporários, com o fim do escoamento d'água no mês posterior ao término da estação chuvosa. As áreas do Agreste e Sertão possuem algumas particularidades como as manchas úmidas e os vales irrigados que se destacam pelas condições excepcionais de suprimento de água. Mesmo sendo considerado como verdadeiros "oásis", os perímetros irrigados apresentam problemas como a forte erosão dos solos devido à intensidade do uso, a falta de práticas conservacionistas, a ao uso irracional da cobertura florestal; salinização de solos e estrutura fundiária concentrada.

2.2 Mananciais aluviais

Segundo Feitosa (1997), cerca de 50% da região semi-árida do Nordeste é ocupada por rochas cristalinas do embasamento Pré-cambriano, reconhecida com má vocação hidrológica no que diz respeito particularmente ao abastecimento humano, devido às baixas vazões e altas taxas de salinidade, comumente encontradas.

Em decorrência da baixa potencialidade hídrica das rochas cristalinas, os depósitos aluviais que podem ocorrer ao longo dos vales assumem grande importância no contexto hídrico da região. Nos aquíferos aluvionais, as altas permeabilidades compensam freqüentemente suas pequenas espessuras saturadas, tornando possível a obtenção de vazões de exploração que podem atingir, em alguns casos específicos, valores da ordem de $150 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, embora os valores mais comuns variem entre $8,0$ e $15,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

2.3 Irrigação

Para que um projeto de irrigação seja considerado eficiente e que sua vida útil projetada seja atingida, é de fundamental importância que este considere não apenas a aplicação de água dentro da parcela, mas uma operação integrada, incluindo também, a qualidade da água de irrigação, a equidade na distribuição de água, as práticas culturais, a tolerância das plantas à

salinidade e toxidade, a retirada do excesso de água da área irrigada e principalmente a relação solo-água-planta e clima (Bernardo, 1995).

Entretanto, só a partir da década de 70 se tratou a irrigação com um enfoque científico racional, onde os métodos de irrigação são escolhidos de acordo com cada caso, baseados na viabilidade técnica e econômica do projeto e nos seus benefícios sociais, de modo a utilizar a água com maior eficiência, minimizando efeitos adversos como a erosão, a drenagem deficiente e a salinização dos solos (Bernardo, 1995).

A irrigação deve ser controlada para prevenir acumulação de sais na zona radicular. A lâmina infiltrada de água no solo deve ser relativamente uniforme para satisfazer às necessidades da cultura e promover adequada lixiviação, sem gerar escoamento superficial nem percolação profunda excessivas. Para satisfazer tais necessidades de lâminas e uniformidade, os sistemas de irrigação devem ser adequados para o local e bem projetados e manejados (Kruse et al., 1990).

2.4 Manejo de irrigação

Devido aos recursos hídricos estarem cada vez mais escassos, tornou-se absolutamente necessário o planejamento mais eficaz do aproveitamento da água na produção agrícola, bem como a utilização de metodologias que permitam estimar volumes cada vez mais precisos de água necessária para obtenção de grandes produtividades dos cultivos (Silva, 2003).

Desta forma, a utilização do manejo da irrigação visa não apenas maximizar a produtividade do cultivo e a eficiência do uso da água, levando em consideração a relação solo-água-planta e clima, como também melhorar, ou no mínimo manter, as condições físicas e químicas do solo, como por exemplo, o controle da salinização do solo e da água subterrânea, e ainda a erosão do solo.

Bernardo (1989) destaca que o manejo racional de qualquer projeto de irrigação deve considerar os aspectos sociais e ecológicos da região, procurando maximizar a produtividade e a eficiência do uso da água e minimizar os custos de mão-de-obra e de capital, mantendo as condições de umidade do solo e de fitossanidade favoráveis ao bom desenvolvimento da agricultura irrigada.

Sá (1990) ressalta que a implementação de um manejo racional na irrigação resulta em redução do consumo de energia, aumento de produtividade, economia de água, lâminas de irrigação e lixiviação mais precisas, bem como redução da salinidade do solo.

O manejo da irrigação pode ser baseado em modelos matemáticos fundamentados em balanço hídrico simplificado ou através de análises probabilísticas (Franke e Dorfman, 1997); Antonino et al. (2000).

Modelos matemáticos mais sofisticados podem ainda ser utilizados na obtenção de um manejo mais eficiente, levando-se em consideração aspectos de fluxo e transporte em solos não saturados e saturados (Cardon e Letey, 1992); Montenegro et al. (1999); Correa et al. (2001). Para a aplicação desses modelos, informações mais detalhadas sobre parâmetros hidrodinâmicos e hidrodispersivos são requeridas, além de valores de variáveis climatológicas, relacionadas à água e ao soluto no solo e à cultura, ao longo do ciclo vegetativo.

2.5 Potencial da água no solo

Bergamaschi et al. (1992) ressaltam que ao longo de várias décadas, o estado hídrico do solo foi expresso e medido na base de quantidade de umidade (gravimétrica ou volumétrica). Entretanto, como as características de retenção de água do solo variam muito, principalmente em função da textura, no caso da matéria orgânica e do estado de agregação, houve a necessidade de expressar a umidade do solo em termos de potencial de água no solo (ψ), que tem um significado físico mais consistente e que está relacionado ao estado energético da água no solo na planta e na atmosfera (Reichardt, 1985).

De acordo com Reichardt e Timm (2004), o potencial da água no solo (ψ) define o estado de energia do sistema no ponto considerado. Composto por uma série de componentes sendo: a componente de pressão (ψ_p) que se apresenta toda a vez que a pressão atuante sobre a água do solo é diferente e maior que a pressão que atua sobre a água padrão; componente gravitacional (ψ_g) que é a componente que representa a ação do campo gravitacional terrestre; componente osmótica (ψ_{os}), que existe pelo fato da água no solo ser uma solução de sais minerais e outros solutos e a água padrão ser pura; e por fim, a componente matricial (ψ_m) que envolve a interação entre a matriz sólida do solo e a água, como forças de adsorção e capilaridade. Esses fenômenos geram pressões negativas, denominadas tensões ou sucções. Assim, o potencial total da água no solo pode ser descrito pela seguinte equação.

$$\Psi = \psi_p + \psi_g + \psi_{os} + \psi_m \quad (1)$$

Segundo Richards (1974), a existência de sucção em solos não saturados é decorrente dos efeitos combinados de capilaridade (predominante em solos arenosos) de adsorção (predominantes em solos argilosos) e o de osmose (que tem a mesma importância relativa tanto em solos saturados como não saturados). Assim, a sucção total (ψ_t) corresponde ao trabalho total das forças de capilaridade, adsorção e osmótica é igual a:

$$\psi_t = \psi_m + \psi_{osm} \quad (2)$$

A sucção total que é equivalente ao potencial matricial e osmótico em termos de pressão, pode ser definida como a diferença entre a pressão da fase gasosa (U_a) e da fase líquida (U_w), presente nos poros do solo:

$$\psi_t = U_a - U_w \quad (3)$$

A sucção matricial é igual a sucção total quando o líquido contido no solo é idêntico a água padrão (pura), restando apenas a matriz do solo (capilaridade e adsorção).

A sucção osmótica é igual a sucção total quando o solo se encontra saturado, ou seja, a componente matricial não ocorre, restando apenas o efeito de diferentes concentrações de solutos.

2.6 Curva característica de umidade do solo

Como a quantidade de água retida ou armazenada na matriz do solo é função do tamanho e do volume dos poros que a contêm, conseqüentemente, o teor de umidade está intimamente relacionado com a pressão matricial. A esta função que relaciona a pressão matricial com a umidade do solo dá-se o nome de curva característica de umidade do solo (Tucci, 2000).

A curva característica de umidade, assim como outros fatores inerentes ao solo apresenta variações em função do tipo de solo. Nos solos argilosos a inclinação da curva é suave, pois a distribuição dos poros é uniforme, proporcionando maior quantidade de água retida por adsorção e conseqüentemente, fazendo com que o decréscimo de umidade motivado pelo incremento da pressão matricial seja gradual. Já nos solos arenosos a inclinação da curva é acentuada, pois há predominância de poros grandes, que perdem quase toda a água quando submetidos a pressões ainda pequenas. Justificando desta forma o pequeno armazenamento de água nestes solos.

Diferentes culturas apresentam diferentes intervalos de tensões admissíveis para que ocorra um aproveitamento satisfatório da água disponível. Portanto, dados que relacionam direta ou indiretamente a componente matricial à umidade são de suma importância no aproveitamento racional da água, bem como no aumento da produção agrícola (Blackburn, 2002).

Para a determinação da curva de retenção da água no solo, pode-se empregar vários métodos como o funil de placa porosa, mesa de tensão ou câmaras de pressão (panela de Richards), em amostra de solo indeformada ou deformada (EMBRAPA, 1997). Em campo, uma combinação de métodos é utilizada, na maioria das vezes o potencial da água (ψ) é determinado por um tensiômetro conectado a um manômetro de mercúrio ou a um transdutor de pressão, enquanto que técnicas como a moderação de nêutrons, reflectometria no domínio do tempo (TDR) e gravimetria são utilizadas para a determinação da umidade volumétrica (θ_v) Vaz et al. (2003).

Devido às dificuldades experimentais e ao longo tempo envolvido nessas determinações, tem-se observado um crescente interesse por métodos indiretos de estimativa da capacidade de retenção da água nos solos (Arya et al., 1999; Pachepsky e Rawls, 1999), os quais utilizam dados taxonômicos simples. Dentre eles, os mais importantes são os métodos da Função de Pedotransferência (PTF), que descrevem equações que expressam dependências entre a retenção da água e condutividade hidráulica com propriedades básicas disponíveis em levantamentos de solos. O modelo de Arya e Paris (1981) usa a similaridade entre as curvas de distribuição do tamanho de partículas e as curvas de retenção de água no solo.

Tomazella et al. (2000) desenvolveram um modelo de PTF para as condições de solos brasileiros, utilizando dados de mais de 500 horizontes. O desenvolvimento das equações de PTF adaptadas para as condições de solos tropicais, possibilitou a determinação dos parâmetros da curva de retenção de van Genuchten (1980) com uma precisão muito maior do que com o uso de equações de PTF desenvolvidas para outros solos. Já o modelo de Arya & Paris (1981), ainda carece de validação para as condições de solos brasileiros.

2.7 Salinização dos solos

A salinização do solo pode estar ligada a processos naturais como a pedogênese do solo ou ao clima local, por exemplo, ou pode ter origem secundária, podendo estar relacionada às atividades antrópicas capazes de alterar esta propriedade do meio (Silva, 2002).

A salinização primária é um processo típico de climas áridos e semi-áridos, onde a precipitação é consideravelmente menor que a evapotranspiração potencial em uma maior parte do ano. Em climas úmidos, os sais solúveis do solo e os formados pela intemperização dos minerais, comumente são levados por percolação até o lençol subterrâneo. Em condições naturais, os poucos casos de solos salinizados nas regiões úmidas se verificam quando o solo encontra-se exposto às águas do mar, como os deltas dos rios e outras terras baixas ao longo do litoral. Nas regiões secas, além da lixiviação não ser completa, a intensa evaporação contribui para a concentração dos sais no solo e nas águas superficiais (Oliveira, 2001).

Todos os solos contêm sais, uns mais, outros menos, e estes encontram-se normalmente sob a forma de íons na água do solo, na forma de cátions adsorvidos às partículas do solo e na forma de sal precipitado (Bernardo, 1995).

Os principais problemas causados pela salinização secundária dos solos são decorrentes de projetos de irrigação deficientes, os quais estão associados principalmente à falta de sistema de drenagem e à falta de estudos específicos para a escolha do melhor manejo a ser adotado.

Fatores como o método de irrigação escolhido, o tipo de cultura a ser implantada, a profundidade em que se encontra o lençol freático, as condições climatológicas da região escolhida, o turno de rega, entre outros, são de suma importância para o controle da salinização dos solos (Santiago, 2002).

O principal problema observado devido à concentração de sais solúveis em um solo é a diminuição do potencial osmótico, prejudicando diretamente a cultura em razão do decréscimo da disponibilidade de água no solo para as plantas. Como forma de solucionar este problema, uma lâmina extra de irrigação é aplicada, sendo esta responsável pela lixiviação dos sais para as camadas inferiores a zona radicular (Bernardo, 1995).

Souza (2007) ressalta que é necessário um estudo referente ao teor salino das águas utilizadas, já que, o processo de salinização dos solos é acelerado, principalmente, pelo depósito de sais através da irrigação. Assim, estudos que abordem a salinidade do solo são de essencial importância, pois além de ocasionar danos às propriedades físicas e químicas do solo, as culturas exploradas podem sofrer perdas significativas de produtividade.

2.8 Dinâmica da água e de solutos no solo

Prevedello (1996) relata que o solo é um reservatório natural de água para as plantas e todas as práticas de manejo na agricultura visam promover condições ideais para o crescimento das culturas. Por ser um reservatório aberto para a atmosfera e para os horizontes

ou camadas mais profundas do perfil de solo, tem-se procurado quantificar a capacidade de armazenamento desse reservatório, como também os fluxos que ocorrem tanto na superfície quanto na profundidade no solo, que por sua vez identificam os caminhos de contaminação. A avaliação desse processo no campo envolve gastos de tempo e dinheiro, porque as propriedades hidráulicas do solo sofrem extensa variabilidade espacial e estão sujeitas a freqüentes alterações no tempo.

Em 1856, engenheiro hidráulico francês Henry Darcy, estudando a dinâmica da água em meios porosos saturados verificou que a densidade de fluxo é proporcional ao gradiente hidráulico, e que, a constante de proporcionalidade é função das características do meio quanto à capacidade de transmitir água, denominada de condutividade hidráulica.

Após uma série de experimentos em colunas de areia, na vertical, sob condições saturadas chegou a equação denominada mundialmente como a lei de Darcy.

$$\vec{q} = -K_{\text{sat}} \frac{\partial H}{\partial Z} \quad (4)$$

em que:

\vec{q} – densidade de fluxo na direção z (LT^{-1});

K_{sat} – condutividade hidráulica do solo saturado ($L T^{-1}$);

∂H – potencial total da água no solo (L);

∂Z – coordenada de posição vertical, sendo positiva para cima (L).

Darcy estabeleceu a primeira lei que descreve o fluxo de água em meios porosos saturados. Porém, grande parte dos processos de dinâmica da água no solo, em condições naturais ocorre normalmente em meios não saturados. Na zona não saturada a condutividade hidráulica é função do espaço poroso do solo não ocupado por ar e, por conseguinte do conteúdo de umidade ou do potencial matricial do meio. Argumentos deste tipo foram primeiramente considerados por Buckingham (1907) com base na analogia do fluxo de calor e elétrico, sem fazer menção à equação de Darcy.

Buckingham (1907) chamou a atenção para o fato de que o movimento de água em qualquer solo não saturado é dependente de sua condutividade hidráulica e das forças envolvidas com a secagem do solo.

Buckingham (1907) adaptou a equação de Darcy para solos não saturados, passando então a equação a ser chamada de Darcy-Buckingham, e apesar de suas limitações, é a

equação que melhor descreve o fluxo de água no solo. De maneira mais geral, ela pode ser escrita na forma:

$$q = -K \cdot \nabla H = -K \cdot \text{grad} H \quad (5)$$

em que q é a densidade do fluxo (flux density) de água ($L \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), ∇H ou $\text{grad} H$, gradiente de potencial hidráulico ($m \text{ m}^{-1}$) e K a condutividade hidráulica do solo ($mm \text{ dia}^{-1}$).

$$q = \frac{V}{A \cdot t} = \frac{L^3}{L^2 \cdot T} = L \cdot T^{-1} \quad (6)$$

A equação da continuidade expressa pela conservação da massa de água, no sistema radicular, pode ser expressa por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} - S \quad (7)$$

em que:

t = tempo (T);

θ = volume de água no solo ($L^3 L^{-3}$)

S = a absorção de água pela raiz da planta (T^{-1}), que representa o volume de água extraído pela planta por unidade de volume de solo no tempo.

Combinando a equação 4 com a equação 7 Richards (1931) introduziu a equação diferencial clássica que descreve o fluxo instável em sistema de solos não saturados. Ignorando o potencial de pressão e osmótico. Em termos, inicialmente o potencial total pode ser escrito como: $H = h+z$, onde h representa a pressão inicial, relacionado ao potencial mátrico, e z o potencial gravitacional. A coordenada vertical z é positiva com origem na superfície do solo. Usando o conceito diferencial da capacidade de água do solo $C = d\theta/dh$, introduzido por Richard conforme a equação.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{C(h)} \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - \frac{S(h)}{C(h)} \quad (8)$$

Em que a pressão inicial da água no solo apresenta valores negativos. Normalmente, h é determinado em cm; t em dias, $K(h)$ em $cm \text{ dia}^{-1}$ e $C(h)$ em cm^{-1} .

Jury e Roth (1990) destacam que a estrutura do solo tem importante influência no transporte de solutos, que dependem, dos parâmetros hidrodispersivos do solo. Portanto, em experimentos com colunas de solo, recomenda-se a utilização de amostras de solo indeformadas, embora grande parte dos estudos baseados em ensaios experimentais tenha sido realizada com colunas de solo sem a preservação de sua estrutura.

De acordo com Borges Júnior e Ferreira (2006), aplicar determinada solução numa coluna de solo previamente lixiviado com água pura, a interface entre a solução e a água perde nitidez a medida que avança no perfil, isto ocorre em razão dos efeitos combinados da difusão do soluto e da dispersão hidrodinâmica que, por sua vez, é conseqüente à geometria irregular do meio poroso e ao atrito de cisalhamento, inerente ao escoamento dentro de cada poro.

A equação clássica de convecção-dispersão foi derivada de conceitos de conservação de massa adaptada para descrever o movimento de transporte de solutos na porosidade média do solo, através das interações físicas dominantes por advecção, difusão molecular e dispersão mecânica. O transporte advectivo é resultante de forças de fluido, enquanto a difusão molecular e a dispersão mecânica são conseqüências da mistura e dos contaminantes espalhados.

A equação de convecção-dispersão unidimensional é caracterizada pelo transporte de solutos não reativos.

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} + \frac{\partial(v\theta C)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (9)$$

em que:

v = velocidade da água nos poros (LT^{-1})

θ = conteúdo de umidade volumétrica (l);

C = concentração de solutos (ML^{-3}) e

D = coeficiente de dispersividade longitudinal (L^2T^{-1}).

2.9 Condutividade hidráulica

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).

O permeâmetro de Guelph é um dispositivo que permite o monitoramento da taxa de infiltração a partir de uma queda do nível d'água, dentro de um reservatório até que o equilíbrio seja atingido, onde a determinação dos valores de condutividade hidráulica saturada podem ser calculados segundo a metodologia de Reynolds e Elrick (1986) citados por (Bastos, 2004). Trata-se de um equipamento simples 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 têm a função de reservatório e suporte. Possui várias vantagens, dentre elas, fácil montagem em campo.

Segundo Antonino et al. (2001), alternativamente, o infiltrômetro de disco representa uma técnica utilizada para a determinação da condutividade hidráulica não saturada. O infiltrômetro de disco com sucção controlada permite que se realizem medidas no campo para caracterizar os parâmetros de infiltrabilidade, como a condutividade hidráulica e a sorvidade capilar, conforme proposto por Zhang (1997), citado por Montenegro e Montenegro (2004).

O Permeâmetro de Guelph, segundo Montenegro e Montenegro (2004), possui maior adequação para investigação ao longo dos perfis do solo. Desse modo, utilizo-se esta metodologia na presente pesquisa. O mesmo também possui a vantagem de sua fácil montagem e operação em campo além de um volume de água reduzido para sua utilização.

Por sua vez, a vazão de teste para obtenção da carga hidráulica constante foi descrita pela seguinte equação (Reynolds et al., 1986).

$$Q = \frac{(2\pi Z^2 K_p + C\pi a^2 K_p + 2\pi Z\psi_m)}{C} \quad (10)$$

em que:

a - é o raio do furo (mm);

ψ_m - é o potencial de fluxo matricial (kPa);

Z - é o nível da água no furo (mm);

K_p - é a condutividade hidráulica saturada de campo (mm dia^{-1});

C - capacidade hídrica específica;

Q - é a vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

A utilização de duas cargas hidráulicas distintas forma um sistema de equações cujas incógnitas são K_p e ψ_m .

O potencial de fluxo matricial ϕ_m é definido como:

$$\psi_m = \int_{\psi_i}^0 K(\psi) d\psi \quad (11)$$

$$\psi_i < \psi < 0 \quad \text{e} \quad K(\psi) = K_p \exp(\alpha\psi) \quad (12)$$

em que:

ψ - é a pressão matricial no solo (kPa)

α - é um parâmetro de porosidade do solo

Substituindo-se a Equação (12), que é a função de condutividade hidráulica na Equação (13), obtém-se:

$$\frac{\psi_m}{K_p} = \frac{(1 - \exp(\alpha\psi))}{\alpha} \quad (13)$$

As equações seguintes permitem o cálculo da condutividade hidráulica e do fluxo de potencial mátrico, em testes com duas cargas hidráulicas.

Condutividade hidráulica:

$$K = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad (14)$$

em que:

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (15)$$

onde: Q_1 e Q_2 são as vazões de testes correspondentes às cargas H_1 e H_2 respectivamente.

$$G_1 = G_2 \frac{[H_2 C_1]}{[H_1 C_2]} \quad (16)$$

com:

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

Fluxo potencial matricial:

$$\Psi_m = J_1 Q_1 - J_2 Q_2 \quad (17)$$

em que:

$$J_1 = \frac{(2H_2^2 + a^2 C_2) C_1}{2\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (18)$$

com:

$$J_2 = J_1 \left[\frac{(2H_1^2 + a^2 C_1) C_2}{(2H_2^2 + a^2 C_2) C_1} \right] \quad (19)$$

A Sorvidade capilar (S) pode ser calculada diretamente como se segue:

$$S = \sqrt{2(\Delta\theta)\Psi_m} \quad (20)$$

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

O permeâmetro de Guelph permite uma boa estimativa da curva de condutividade hidráulica não saturada, mesmo com pequenos gradientes hidráulicos junto à parede do furo.

2.10 Aplicação de Modelos

A dinâmica do fluxo vertical da água no solo pode ser modelada numericamente pela equação de Richards. Várias técnicas podem ser aplicadas para a construção de algoritmos numéricos relativos aos processos de infiltração, percolação e redistribuição de água no solo. Em geral, as dificuldades numéricas e computacionais são superáveis. No entanto, as informações necessárias para calibração dos modelos existentes são de difícil determinação (Righetto, 1998).

Os modelos numéricos utilizam equações que regem os processos físicos de fluxo e transporte de água e solutos desenvolvidos anteriormente que, devido à sua complexidade, são integradas através de técnicas numéricas (Monteiro, 2007).

Os modelos podem ser utilizados para prever cenários físicos e ajudar na tomada de decisões relacionadas à gestão de recursos hídricos, em particular em perímetros irrigados, como no estudo em tela.

Monteiro (2007) comenta que a análise dos resultados simulados por um modelo tem valor limitado e se faz necessário o amparo de uma base de dados gerada por um monitoramento contínuo para se validar o modelo, e orientar assim as técnicas de manejo.

Os modelos mais complexos são aqueles que descrevem o maior número de processos e, conseqüentemente, mais informações sobre o sistema descrito são requeridas.

De acordo com van Dam et al. (2004), a precisão das simulações de fluxo e transporte de solutos em meio não saturado requer amplo conhecimento ambiental, uma vez que para cada situação de uso do solo, clima e organismos vivos devem ser caracterizados todos os possíveis fatores que afetam o sistema solo.

Segundo Vanderborght et al. (2005), um modelo de previsão deve incluir todos os processos e propriedades do sistema que influenciam em seu funcionamento e comportamento.

De acordo com Ragab (2002), o modelo SALTMED foi desenvolvido com objetivo de produzir subsídios para aumentar a produtividade e sustentabilidade da agricultura irrigada em áreas que apresentam potencialidades de materiais salino. O modelo inclui, dentre outros os processos fundamentais seguintes: Evapotranspiração, produtividade da cultura, transporte de água e solutos, considerando o uso de diferentes sistemas de irrigação.

Zavattaro e Grignani (2001) destacam que a precisão do resultado de um modelo depende das suposições e simplificações realizadas e das relações deles com as condições específicas locais.

Com base em dados de campo no Egito e Síria, Ragab et al. (2005) aplicaram o modelo SALTMED para prever o impacto da salinidade no rendimento da cultura do tomate cv. Floridade, na absorção de água pela planta, e a distribuição da salinidade e umidade do solo. Os resultados obtidos com base nos dados simulados e observados indicaram que a cultivar foi tolerante ao sal e se desenvolveu satisfatoriamente na Região do Mediterrâneo. Os autores também concluíram que a salinidade da água de irrigação de 7 dS m⁻¹ reduziu em 50% a produtividade do tomate. Além disso, os resultados também indicaram que a relação entre rendimento e absorção de água pela planta como uma função da salinidade da água de irrigação é não-linear e foi melhor descrita por uma função polinomial do quarto grau.

As estimativas da taxa e quantidade de água de drenagem que contribuem para as camadas mais profundas do solo devem ser investigadas e o conhecimento dos fatores que

determinam as perdas de água do solo por drenagem interna pode permitir a adoção de técnicas que objetivem controlá-la. Além disso, essas estimativas constituem poderoso instrumento de avaliação para técnicos de áreas afins ou interessados em estudos hidrológicos, mediante uso em programas de computação de fácil acesso e manuseio. Como ferramenta de quantificação e caracterização da dinâmica de fluxo pode ser utilizada a ferramenta computacional HYDRUS 1D (Simunek et al., 1998).

De acordo com Monteiro (2007), a maioria das variáveis requeridas pela maioria dos modelos pode ser medida diretamente no campo ou laboratório, tais como umidade inicial e a salinidade do solo. Condições de contorno superior (superfície do solo) e inferior (camada inferior do solo) podem ser estabelecidas com grande flexibilidade, além de condições iniciais de umidade no HYDRUS.

Segundo Oliveira (2001), a evaporação e a extração de água do solo pelas plantas são fenômenos importantes na determinação do balanço hídrico no solo, uma vez que a evaporação e a transpiração geralmente são tratadas separadamente nos modelos de fluxo de água no solo.

Tendo em vista o alto custo dos equipamentos de campo e o tempo dedicado nos trabalhos de laboratório, muitos pesquisadores têm procurado desenvolver novas metodologias para prever os parâmetros da curva característica e também da curva de condutividade hidráulica.

Uma dessas metodologias alternativas que vem recebendo destaque é constituída pelas funções de transferência hidropedológica (FTH). Essas funções são equações de regressão, obtidas a partir de uma extensa base de dados, entre os parâmetros hidráulicos e selecionadas propriedades físicas do solo. No entanto, as propriedades físicas do solo em geral são bem mais fáceis de avaliar do que as propriedades hidráulicas (Montenegro e Montenegro, 1997).

Monteiro (2007) comenta que o modelo HYDRUS devidamente calibrado, pode ser utilizado como ferramenta satisfatória para simulação da umidade, em solos aluviais de textura similar. Estes resultados concordam com os dados obtidos por Arbat et al. (2005), que aplicou o modelo HYDRUS aos solos da Estação Experimental Agrícola Mas Badia da província de Girona.

Segundo Monteiro (2007), o modelo HYDRUS após ser calibrado e validado com base na montagem experimental e em estudos de casos específicos, o mesmo pode ser utilizado como ferramenta para a simulação de transferência de sais em meio irrigado, em Neossolo flúvico e similares a este.

O desenvolvimento de modelos matemáticos para se descrever, com precisão, o transporte de água e solutos, é bastante difícil. As equações que descrevem esses processos, em condições reais de campo, apresentam grande complexidade (Cox et al., 1994). No entanto, Kinouchi et al. (1991) e Wallach e Shabtai (1992) consideram que a evolução dos recursos computacionais, aliada às técnicas numéricas, tem facilitado a modelagem do transporte de solutos, tornando possível integrarem-se a os múltiplos processos que determinam as mudanças na concentração dos solutos presentes no solo, no tempo e no espaço, o que permite melhor entendimento do comportamento dos processos associados ao transporte e à transformação dos solutos no solo.

Para simular o transporte de água e solutos no solo, Montenegro (1997) utilizou o modelo WAVE na mesma área de estudo, como ferramenta de quantificação e caracterização da dinâmica de fluxo.

Abdel Gawad et al. (2005) afirmam que a seleção de um método de irrigação apropriado pode proporcionar o uso eficiente da água e reduzir a demanda de água de boa qualidade. Em seu estudo utilizaram dois tipos de água de irrigação: não salina (1 dS m^{-1}) e salina (8 dS m^{-1}), dois métodos de irrigação (sulco e gotejamento), e diferentes variedades de tomate foram usados para obter os parâmetros de crescimento da planta para validação do modelo SALTMED e avaliaram o efeito da salinidade da água de irrigação em diferentes práticas de manejo na sustentabilidade da produção da cultura estudada.

Lyle (2007) utilizou o modelo SALTMED na Fazenda Rosário para prever o impacto da salinidade da água subterrânea na produção da cultura da mamona e observou que o modelo fornece bons resultados, mas apresentou algumas limitações quanto aos dados disponíveis. A curva característica do solo foi extremamente útil na calibração do modelo e melhoria de seus resultados. A mesma autora também afirma que a tolerância do cultivo da mamona a salinidade, nas condições climáticas do Nordeste Brasileiro, apresentou um rendimento máximo de 38% em condições de irrigação localizada por linha de gotejamento.

Vários modelos, como o HYDRUS e o SALTMED, têm módulos com base de dados utilizando FTH.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Generalidades

Neste trabalho foram utilizados dados de experimento de campo em lote irrigado, com características típicas de práticas de agricultura familiar no semi-árido do Nordeste. Estes foram utilizados no modelo matemático SALTMED, para processar sua calibração para posteriormente ser usado como ferramenta de gerenciamento. É válido salientar que neste trabalho o modelo foi calibrado apenas nos tratamentos sem cobertura morta e em três freqüências de rega 12, 24 e 48 horas aplicando-se a mesma lâmina.

3.2 Área de Estudo

A área de estudo está localizada na Fazenda Nossa Senhora do Rosário, a 230 km de Recife-PE com altitude de 650 m, zona fisiográfica do Agreste, no município de Pesqueira, região que apresentam condições típicas do semi - árido com prática de agricultura familiar.

A Fazenda esta situada na Bacia hidrográfica do Rio Ipanema, nas coordenadas geográficas 08°10'28''S, 35°11'25''W, de latitude e longitude, respectivamente (Figura 1).

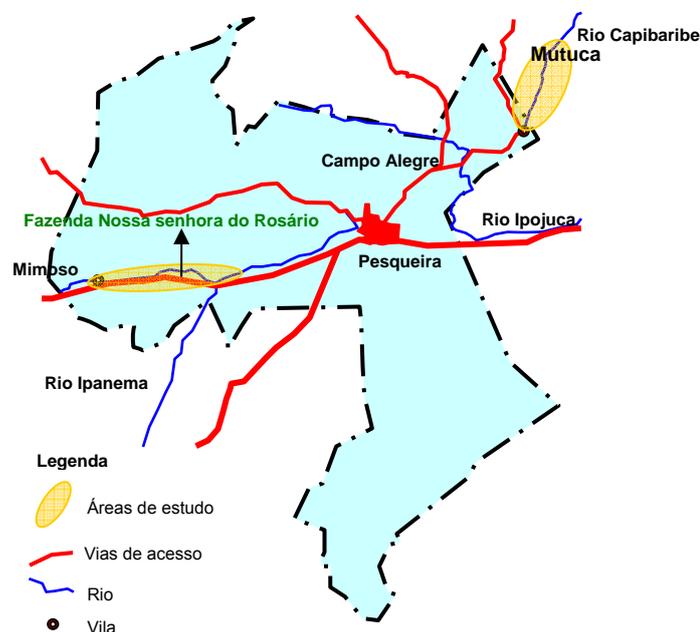


Figura 1 – Mapa do Município de Pesqueira com vista da área em estudo. Fonte: (Almeida, 2005).

Dados obtidos de uma estação climatológica instalada a aproximadamente 15 km no local registram uma precipitação média anual de 730 mm, com o coeficiente de variação anual

(CV) superando, freqüentemente, o valor de 0,30 e uma evapotranspiração potencial de referência, estimada por Tanque Classe “A”, de 1638 mm por ano (Montenegro, 2001).

As chuvas são distribuídas desuniformemente, concentrando-se no primeiro semestre (março a julho), quando ocorre, em média, mais de 75% da precipitação total dos 12 meses.

De acordo com Ribeiro et al. (1999), o local possui uma 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 piemontês de maciços montanhosos que circundam o vale e em alguns pontos o limitam abruptamente.

O tipo de solo predominante nessa área é o aluvial, onde estão presentes os solos amarelo-vermelho Podzólico e o Litólico das formações montanhosas. Entretanto, manchas de solos Planossolo podem ser identificadas próximo à Pesqueira, mesmo não sendo registrada sua presença dentro da Fazenda (Montenegro et al., 2000).

O clima do local é classificado, segundo a classificação de Köppen, como BShw' semi-árido quente, caatinga hiperxerófila, com temperatura média anual em torno de 27^o C e umidade relativa média anual do ar é de 73%, e a velocidade média do vento é de 2,5 ms⁻¹ (CISAGRO, 1990).

3.3 Descrição do Experimento

Inicialmente as sementes do repolho, variedade midori (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.) foram semeadas em um canteiro, de dimensões 20,00 x 1,00 m, confeccionado no campo próximo a área de cultivo. Passados 40 dias após a semeadura, as mudas foram transplantadas para quatro blocos, cada ocupado por seis tratamentos e sua respectiva bordadura. As plantas foram distribuídas nos blocos, obedecendo a um espaçamento médio de 0,30 x 0,50 m entre mudas. As parcelas experimentais foram espaçadas em 10,00 x 2,70 m, com bordaduras obedecendo ao mesmo espaçamento.

O cultivo foi desenvolvido sob condições de irrigação localizada por sistema de microaspersão, com um total de 264 microaspersores distanciados a cada 3 m com raio de alcance de 3 m e rotação de 360° sob pressão média de serviço de 213,9 kPa e vazão de 54,26 L h⁻¹ proporcionando uma intensidade de aplicação de 6,03 mm h⁻¹ em toda área experimental.

A avaliação da uniformidade da distribuição da lâmina de água foi realizada nos dias 16 e 17 do mês de janeiro de 2008 de acordo com a metodologia de Merriam e Keller (1978) e Deniculi (1980). O sistema de irrigação foi composto de 214 quadras, das quais foram

selecionadas ao acaso, as quadras: 16, 81, 158 e 193. Cada quadra tem uma área de 8,4m² e foram distribuídos por quadra 64 coletores com área de 33,18 cm². O teste teve duração de uma hora, e em seguida desligou-se o sistema para realizar a coleta da água precipitada em cada coletor através de uma proveta graduada com capacidade para 100 ml. Em seguida foram realizados cálculos de lâmina média da área precipitada pelos aspersores.

$$L_m = \frac{\sum C_i}{A_t} \quad (21)$$

em que:

L_m = lâmina média da área precipitada pelos aspersores (mm);

$\sum C_i$ = soma total da água precipitada nos coletores (mm);

A_t = área total envolvida com os coletores (m²).

A captação da água foi feita por sucção através de poço amazonas existente na área, operando sob vazão de 4,50 m³ h⁻¹.

O delineamento experimental foi em blocos inteiramente casualizados com quatro repetições e os tratamentos distribuídos em esquema fatorial 3x2, ou seja, três turnos de rega e duas situações para superfície do solo, com e sem cobertura morta, considerando-se a lâmina aplicada em frequências diferentes de (12, 24 e 48 horas). Nos tratamentos de frequência de 12 horas foi aplicada lâmina diária pela manhã e final da tarde.

O desenvolvimento da cultura foi avaliado fundamentando-se no diâmetro do caule, medido com paquímetro, e no comprimento do sistema radicular, largura e comprimento das folhas, aferidos com régua. As avaliações foram efetuadas em três repetições para as mesmas plantas aos 20, 45 e 74 dias após o transplante, sendo avaliada três plantas por parcela. A colheita foi realizada 75 dias após transplante. Para a calibração e validação do modelo foram utilizados apenas os tratamentos sem cobertura morta e os que tinham tensiômetros e cápsulas de extração.

3.4 Manejo de Irrigação

O manejo da irrigação foi realizado diariamente com base na evaporação potencial do tanque “Classe A”, e considerando as precipitações que ocorreram durante o ciclo da cultura. Essas variáveis foram usadas para estimar a lâmina necessária de irrigação, considerando o K_c (coeficiente de cultura) de 0,75 para o período inicial do cultivo até o 34º dia (4 de janeiro a 7 de fevereiro 2008). Nos períodos seguintes utilizou-se o K_c de 0,95 (8 a 26 de fevereiro,

19 dias), e o K_c de 0,80 (27 de fevereiro até a data da colheita 27 de março 2008, 29 dias), respectivamente. Os valores de K_c foram considerados com base no boletim da FAO-24, em 1975 (Doorenbos e Pruitt, 1977).

O coeficiente do tanque (K_p) foi de 0,75 para todo o ciclo da cultura conforme Doorenbos e Kassam (1979), pelo motivo deste ser utilizado quase sempre nos trabalhos executados nessa região com bons resultados, inclusive neste lote experimental (Bastos, 2004), pois reflete as características do local de instalação do tanque.

Além disso, adotou-se um coeficiente de lixiviação de 20% de modo a promover uma quantidade suplementar de água ao terreno, sendo esta quantidade de água responsável pela drenagem do excesso de sais ao longo da zona radicular da cultura para camadas inferiores do solo (Santiago, 2002).

De acordo Ayres (1999) usando o manual 29 da FAO, o excesso de sais deve ser lixiviados a um percentual de 15 a 20% se a qualidade da água de irrigação e a fração de lixiviação foram constantes numa estação crescente, onde leva um determinado tempo para que haja equilíbrio do sal no solo.

Quanto às variações da salinidade da água subterrânea, foram monitoradas periodicamente através dos poços de observação que estão instalados próximos ao lote irrigado, numa profundidade de 5 m.

3.5 Aquisição de dados de campo para o SALTMED

3.5.1 Variáveis climatológicas

Para caracterização da área de estudo, utilizou-se uma estação meteorológica automática, e um tanque Classe “A”, instalados nas proximidades do lote experimental. Foram obtidos valores diários de precipitação, umidade relativa, temperatura máxima e mínima, radiação solar e velocidade média do vento a 2 m de altura.

O tanque “Classe A” consiste de um reservatório circular de aço inoxidável ou galvanizado, com 1,21 cm de diâmetro interno e 25,5 cm de profundidade, instalado sobre um estrado de madeira, de 15 cm de altura. A evaporação da água no tanque foi medida com o auxílio de um micrômetro de gancho, assentado sobre um poço tranquilizador situado no interior do tanque. O nível de água dentro do tanque evaporimétrico foi mantido a uma altura entre 5 e 8 cm da borda superior, e o mesmo é reabastecido quando o nível alcança a altura mínima estabelecida (Figura 2).



Figura 2 – Vista do Tanque “Classe A” e Estação Climatológica Compacta

As leituras, tanto de evaporação do tanque “Classe A” quanto de precipitação, registradas no pluviômetro, foram realizadas diariamente pelo agricultor em torno das 07h30min da manhã. O balanço da evaporação do tanque foi obtido diariamente através da equação.

$$E_p = (L_{\text{anterior}} - L_{\text{atual}}) \times 10 + P \quad (22)$$

em que:

E_p = Evaporação do tanque “Classe A”, em mm.dia^{-1} ;

L_{anterior} = Leitura do tanque “Classe A” no dia anterior, em cm;

L_{atual} = Leitura do tanque “Classe A” no dia atual, em cm;

P = Precipitação, em mm.

A evapotranspiração de referência foi estimada diariamente pelo método indireto do tanque “Classe A” através da leitura das variações do nível do tanque, ou seja, a partir da evaporação de uma superfície de água livre.

$$E_{T_o} = K_p \times E_p \quad (23)$$

em que:

E_{T_o} = Evapotranspiração de referência, em mm.dia^{-1} ;

K_p = Coeficiente do tanque “Classe A”,

E_p = Evaporação do tanque, em mm.dia^{-1} .

O agricultor foi capacitado para fazer aplicação de água através das leituras diárias do tanque classe A. Uma vez feito à leitura do tanque, este tinha uma tabela de horas de aplicação correlacionada com a lâmina líquida evaporada no tanque em mm, ou seja, para todo o mm evaporado no tanque classe A, ele aplicava o tempo correspondente a este mm evaporado. Os valores correspondentes se encontravam na tabela entregue ao mesmo, a tabela foi elaborada com base nos valores de E_p , K_p e nos K_c correspondente aos estádios fenológicos e no coeficiente de lixiviação adotado no estudo.

3.5.2 Dados de irrigação

Para atender ao modelo, foi estimada a taxa de aplicação de água do microaspersor em $\text{cm}^3 \text{min}^{-1} \text{dia}$ e seus respectivos tempo de aplicação e a salinidade da água aplicada em dS m^{-1} . Para estimativa da taxa de aplicação mediu-se a vazão de cada microaspersor, pelo método direto, obtendo um valor médio de $54,26 \text{ L h}^{-1}$ com uma área de abrangência de 9 m^2 e uma intensidade de aplicação de $6,03 \text{ mm h}^{-1}$ que multiplicando-se por um fator de conversão de unidade de 16,7 se obteve uma taxa de $100,70 \text{ cm}^3 \text{min}^{-1} \text{dia}$. No caso dos dias chuvosos a taxa foi obtida através do volume de chuva precipitado em mm h^{-1} multiplicado pelo mesmo fator de conversão utilizado na taxa de aplicação do microaspersor. Para o cálculo da lâmina total a ser aplicada diariamente ainda adotou-se uma eficiência do sistema de 85% e uma fração de lixiviação de 0,20.

3.5.3 Dados de solo

3.5.3.1 Umidade do solo no campo

O monitoramento da umidade do solo foi feito através da sonda de nêutrons antes da irrigação. Foram instalados 91 tubos de acesso de PVC de 1,0 m em uma malha de 5,00 x 5,00 m, distribuídos em toda área experimental. Os tubos foram introduzidos no solo a 0,70 m, permanecendo 0,30 m acima da superfície. A perfuração do solo, para instalação dos tubos de acesso, se deu com trado de diâmetro semelhante aos tubos, para que a aderência ao solo se desse de maneira adequada.

A sonda de nêutrons 503 DR hydroprobe moisture gauge, de fabricação da CPN International Inc. (Figura 3) foi utilizada para obter diretamente os valores de umidade do solo, que são obtidos em forma de contagem normatizada de nêutrons. Durante as leituras, a sonda foi introduzida no tubo de acesso até as profundidades de 20, 40 e 60 cm.

A calibração da sonda de nêutrons foi realizada por Blackburn (2002) através da regressão linear simples da contagem normalizada (CN) em função da umidade determinada em laboratório, para a mesma área de estudo. A contagem normalizada (CN) representa a razão, para um mesmo intervalo de tempo, entre o número de contagens no solo (C_{solo}) e o número de contagens em um moderador padrão (C_{barril}), no caso, em um barril cheio de água (Blackburn, 2002).

A reta da calibração neutrônica para o solo estudado, foi obtida pela plotagem dos valores de umidade volumétrica em função da contagem normalizada de nêutrons atenuados (CN). A função de transformação da CN para umidade volumétrica em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ apresentou coeficiente R^2 da regressão linear simples superior a 95%, o que é considerado alto (Figura 3).

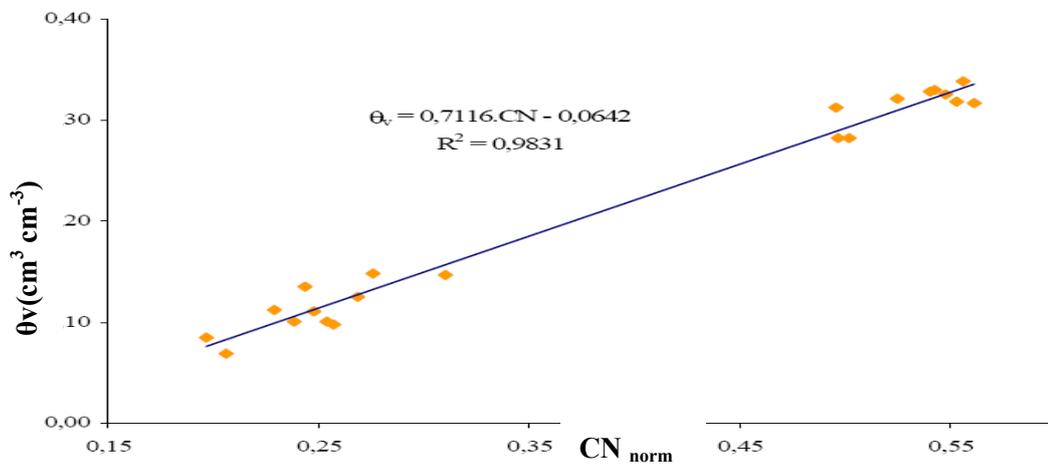


Figura 3 - Curva de calibração neutrônica para o solo estudado. Fonte: (Blackburn, 2002)

3.5.3.2 Avaliação da tensão da água no solo

Foram selecionados oito locais no bloco 01 para instalação de 16 tensiômetros, priorizando os tratamentos com turnos de rega de 24 horas. Em cada local utilizaram-se dois tensiômetros nas profundidades de 0,15 e 0,30 m, a fim de estimar o potencial matricial do solo na região atingida pelo sistema radicular da planta.

As leituras no tensiômetro foram realizadas diariamente com auxílio de um tensímetro de punção, constituído de um manômetro digital conectado a uma agulha de diâmetro de 1 mm, inserida na borracha situada na parte superior do tensiômetro, para determinação da tensão em mBar.

O tensiômetro foi confeccionado com um tubo de PVC rígido de $\frac{1}{2}$ polegada, de comprimento variável com a profundidade de instalação, onde se fixou na sua extremidade uma cápsula porosa de 60 mm de comprimento e 21 mm de diâmetro. Para facilitar a medição da tensão, utilizou-se uma cubeta de acrílico e uma rolha de borracha acoplada na parte superior do tubo (Figura 4).



Figura 4 – Vista do Tensiômetro e do Tensímetro de Punção no campo

3.5.3.3 Determinação da condutividade hidráulica

Para determinação da condutividade hidráulica não saturada foi utilizado o permeâmetro de Guelph conforme Costa Netto (2008). Este dispositivo permitiu o monitoramento da taxa de infiltração a partir da taxa de queda do nível d'água dentro do reservatório de alimentação até se estabelecer o equilíbrio de carga. Nesse estudo foram utilizadas as cargas hidráulicas adotadas por Costa Netto (2008), que constitui em quatro cargas hidráulicas: $H_1 = 2,5$; $H_2 = 5,0$; $H_3 = 7,5$ e $H_4 = 10,0$ cm, permitindo utilizar seis pares de cargas hidráulicas diferentes, sendo cada par de lâminas usada considerada uma repetição. As taxas de fluxo Q_1 e Q_2 foram obtidas através da multiplicação das taxas de fluxo medidas por um coeficiente correspondente à razão das áreas do reservatório e do furo de sondagem. Os valores de condutividade hidráulica saturada foram calculados segundo Reynolds et al. (1986).

A metodologia de campo e do procedimento de cálculo foram efetuados conforme Reynolds e Elrich (1985). Através da metodologia pode-se estimar os parâmetros de α e de θ_{sat} da curva hidráulica do modelo de Gardner (1958).

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 e Elrich (1986) como:

$$CQ = 2\pi H_f^2 K_{sat} + C\pi r^2 K_{sat} + 2\pi H_{fpm} \quad (24)$$

em que:

r = raio do furo (L);

ψ_m = potencial de fluxo mátrico (LT^{-1});

H_f = nível da água no furo (L);

K_{sat} = condutividade hidráulica saturada de campo (LT^{-1});

C = parâmetro de ajuste dimensional;

Q = vazão ($L^3 T^{-1}$).

A condutividade hidráulica do solo local foram obtidos através de testes com o permeâmetro de ghelf nas camadas de 0-20 e 20-40 cm por Costa Neto (2008) em seu estudo na mesma área experimental onde o autor encontrou condutividades hidráulica saturada (K_{sat}) da ordem de 580,61 a 945,95 $mm\ dia^{-1}$ Tabela 1.

Tabela 1. Condutividade Hidráulica Saturada da camada do solo em estudo em dois blocos.

Profundidade (cm)	$K_{saturado}$ (mm dia ⁻¹)	
	Bloco 1	Bloco 2
20	945.95	580.61
40	945.95	632.58

$K_{saturado}$ – Condutividade Hidráulica Saturado. Fonte (Costa Neto, 2008).

3.5.3.4 Caracterização do solo

3.5.3.4.1 Granulometria

Os atributos físicos e a granulometria média do solo do local foram obtidos no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Agronomia da UFRPE, utilizando-se amostras deformadas.

A classificação textural foi determinada de acordo com o triângulo americano de classificação textural utilizado pelo United States Department of Agricult, após adaptações feitas pelo Centro Nacional de Pesquisas de Solos (CNPS)-Embrapa e a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (Lemos e Santos, 1996), conforme Figura 1 do capítulo 2.

O solo é do tipo Neossolo Flúvico, com textura predominantemente siltosa (Ribeiro e Correa, 2001). Na Tabela 2 estão apresentadas as características físicas da área, considerando duas regiões: na região 1 onde foram alocados os blocos 1 e 2, encontrou-se uma textura mais arenosa; e na região 2 onde foram alocados os blocos 3 e 4, foi caracterizado uma textura mais siltosa.

Tabela 2. Atributos físicos da área experimental.

Atributo	Região 1		Região 2	
Profundidade	0-20	20-40	0-20	20-40
Areia (%)	53,5	52,16	33,49	34,54
Silte (%)	34,0	39,12	51,56	49,20
Argila (%)	12,5	8,7	14,95	16,26
Classe textural	Franco	Franco	Franco siltoso	Franco
Ds (g cm ⁻³)	1,36	1,44	1,32	1,34
Dp (g cm ⁻³)	2,51	2,56	2,56	2,51
Porosidade	0,46	0,44	0,48	0,47

Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partículas. Fonte (SANTOS, 2008)

3.5.3.4.2 Curva característica de umidade do Solo

As curvas de retenção de umidade do solo foram obtidas em nível de campo através dos tensiômetros instalados no campo versus umidades obtidas pela sonda de nêutrons.

A curva característica de campo e os parâmetros empíricos da equação de van Genuchten (α , n e m) foram ajustados através do modelo RETC conforme van Genuchten et al. (1991), utilizando tensões e umidades obtidas no campo, e para obter tensões e umidades de saturação e ponto de murcha, utilizou-se ensaio de laboratório no extrator de Richards. Os dados obtidos foram ajustados ao modelo de van Genuchten (1980), que representa a relação entre a umidade volumétrica e a pressão capilar.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_{sat} - \theta_r)}{\left(1 + |\alpha \cdot \psi_m|^n\right)^m} \quad (25)$$

Sendo:

$$n = \lambda + 1 \quad (26)$$

$$m = 1 - (1/n) \quad (27)$$

em que:

θ = Umidade volumétrica, em $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$;

θ_r = Umidade volumétrica residual em $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$;

θ_s = Umidade volumétrica correspondente à saturação, em $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$;

Ψ_m = Potencial matricial, em cm;

λ = Índice do tamanho dos poros;

α , n e m = parâmetros obtidos por regressão a partir de dados experimentais de θ e Ψ_m .

3.5.3.4.3 Extrato de Saturação do Solo

Ao todo foram coletadas 192 amostras de solos deformadas, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, em cada tratamento. A primeira coleta de amostras foi no dia 26 de janeiro de 2008, a segunda no dia 22 de fevereiro de 2008 e a terceira no dia 17 de março de 2008. A condutividade elétrica (CEs) foi determinada no extrato de saturação, através da utilização de vácuo na pasta saturada.

As análises foram realizadas no laboratório de Hidrologia do Departamento de Tecnologia Rural da UFRPE, com base na metodologia proposta pela EMBRAPA (1997).

As diferentes frequências de irrigação podem imprimir uma diferenciação quanto à dinâmica da salinidade nos diferentes tratamentos dado ao uso de água moderadamente salina (Santos, 2008).

Por essa razão, avaliou-se a salinidade do solo em três estádios de desenvolvimento da cultura, visando analisar a possível interferência dos tratamentos aplicados. Utilizou-se amostragem de solo em cada tratamento, com coletas nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, para determinação da condutividade elétrica do extrato de saturação (CEs) em laboratório. O monitoramento ocorreu em três fases durante o ciclo experimental do repolho, 17 de janeiro, 22 de fevereiro e para 17 de março de 2008.

A correção da condutividade elétrica foi feita através da relação entre as umidades iniciais de campo com a condutividade corrigida assim como a umidade de saturação estar para a condutividade saturada de laboratório em uma função inversamente proporcional.

$$CE_c = \frac{CE_{LAB} * \theta_{SAT}}{\theta_{CAMPO}} \quad (28)$$

em que:

CE_c = Condutividade elétrica corrigida;

CE_{Lab} = Condutividade elétrica do extrato saturado de laboratório;

θ_{Sat} = Umidade de saturação do solo;

θ_{Campo} = Umidade inicial da amostra quando coletada no campo

3.5.3.4.4 Cápsulas de Extração

A condutividade elétrica do solo em campo foi determinada, através de cápsulas de extração. Ao todo, foram instaladas 25 cápsulas próximas a alguns tubos de acesso nas profundidades de 0,15 e 0,30 m conforme ilustra a Figura 3.

A cápsula de extração é um dispositivo que permite a extração direta no campo da solução do solo. As cápsulas de extração foram constituídas de uma cápsula porosa de 60 mm de comprimento e diâmetro de 21 mm, um tubo de PVC rígido comercial do tipo ½ polegada, de comprimento que varia com a profundidade de instalação e com uma cubeta de acrílico acoplada a uma rolha de borracha para vedar todo o sistema. A tensão mínima de sucção utilizada foi de 50 kPa feita através de uma bomba à vácuo manual feita de PVC (Figura 5). Procurou-se manter esta tensão em seu sistema durante um período de aproximadamente 18 a 24 horas, possibilitando então extração de um volume significativo para determinação da condutividade elétrica, bem como, outros atributos químicos.



Figura 5.a 5.b – Sucção da solução do solo com a bomba a vácuo manual

3.6 Descrição do Modelo SALTMED

Com uma interface gráfica amigável, o SALTMED foi desenvolvido para ser processado na plataforma Windows XP, e baseado em três bancos de dados residentes para solo, cultura e sistemas de irrigação.

O SALTMED é um modelo genérico e compreensivo que responde por diferentes cultivos, água e práticas de manejo de campo. Além disso, é um modelo aplicável para diferentes cultivos, solos, sistemas de irrigação e estratégias de manejo de água.

O modelo é descrito em detalhes em Ragab (2002), com alguns exemplos de aplicação, e abrange simulações dos seguintes processos: evapotranspiração, transporte de água e solutos para diferentes sistemas de irrigação, drenagem e a relação entre o rendimento da cultura e o uso da água.

O modelo SALTMED é baseado nas seguintes equações: Penman-Monteith FAO (1998) para cálculo da evapotranspiração de referência; equação de Richard para fluxo de água; equação de convecção-dispersão resolvida por diferenças finitas para o transporte de solutos; função ligada a evapotranspiração de referência FAO (1998) para absorção de água e para condutividade hidráulica e para retenção de água no solo o modelo baseia-se nas equações de van Genuchten.

A evapotranspiração potencial da cultura (ET_c) é calculada como:

$$ET_c = ET_o(K_{cb} + K_e) \quad (29)$$

Em que:

ET_o = evapotranspiração de referência;

K_{cb} = coeficiente de transpiração da cultura;

K_e = coeficiente de evaporação do solo.

Nos dados de entrada do modelo estão inclusos a taxa de precipitação do sistema de irrigação utilizado em $\text{cm}^3\text{min}^{-1}$, parâmetros da equação de van Genuchten para calibração do modelo, dados climatológicos ou evaporação da lâmina líquida do tanque classe A para estimativa da evapotranspiração de referência, condutividade hidráulica saturada, índice da faixa de cobertura do aspersor (F_w), índice de pressão osmótica (π_{50}), tipo de sistema e frequência utilizada, informações gerais da cultura em estudo, tais como; estágios de crescimento, K_c , produtividade, K_{cb} e etc., informações das camadas do solo estudado e informações da latitude, longitude e altitude dentre outros.

Os resultados de saída do modelo são determinados como arquivos em formato de textos e gráficos. Estes incluem a distribuição vertical e horizontal da umidade do solo, salinidade do solo, concentração relativa, perfil do potencial matricial do solo e a série de referência do tempo, transpiração do cultivo, evaporação do solo n_u , requerimento de lixiviação, quantidade de água aplicada na irrigação, os coeficiente de cultivo K_c , K_{cb} , profundidade do sistema radicular e o rendimento máximo do cultivo.

O SALTMED processa as variáveis por cada camada ao longo do perfil do solo para cada dia, ou seja, ele processa os dados de saída de umidade, salinidade, requerimento de lixiviação, evapotranspiração, quantidade de água aplicada na irrigação, sistema radicular e produtividade em frações.

O processo de calibração do modelo SALTMED neste estudo foi feito através de várias simulações utilizando informações de solo, água, planta e alguns dados meteorológicos extraídos da literatura, laboratório e de dados medidos em campo durante a fase experimental.

Foram criados vários cenários com diferentes camadas de solo, diferentes valores de salinidade do solo, taxa de aplicação. Foram feitas também simulações com diferentes discretização temporal, extensão vertical e condutividade hidráulica. Foram feitas várias alterações dos parâmetros do modelo de van Genuchten, ou seja, todos os testes que foram feitos objetivaram encontrar o melhor ajuste do modelo para o presente estudo.

Foram feitos também vários teste de sensibilidades às umidades iniciais, a salinidade inicial da camada do solo, bem como aos parâmetros da curva característica.

Na Figura 6 está a representação do módulo de dados meteorológicos do SALTMED referente à Eto obtida pelo tanque Classe A durante o cultivo do repolho. Nesse módulo o modelo permite duas opções para calcular a evapotranspiração de referência, tanto pelo modelo de Penman-Monteith quanto pelo Tanque Classe A. Caso se escolha o tanque ele permite a escolha do K_p do tanque, que pode ser fixado como mostra o exemplo da figura ou pode ser calculado de acordo com a (FAO-56, 1998), desde que especificados.

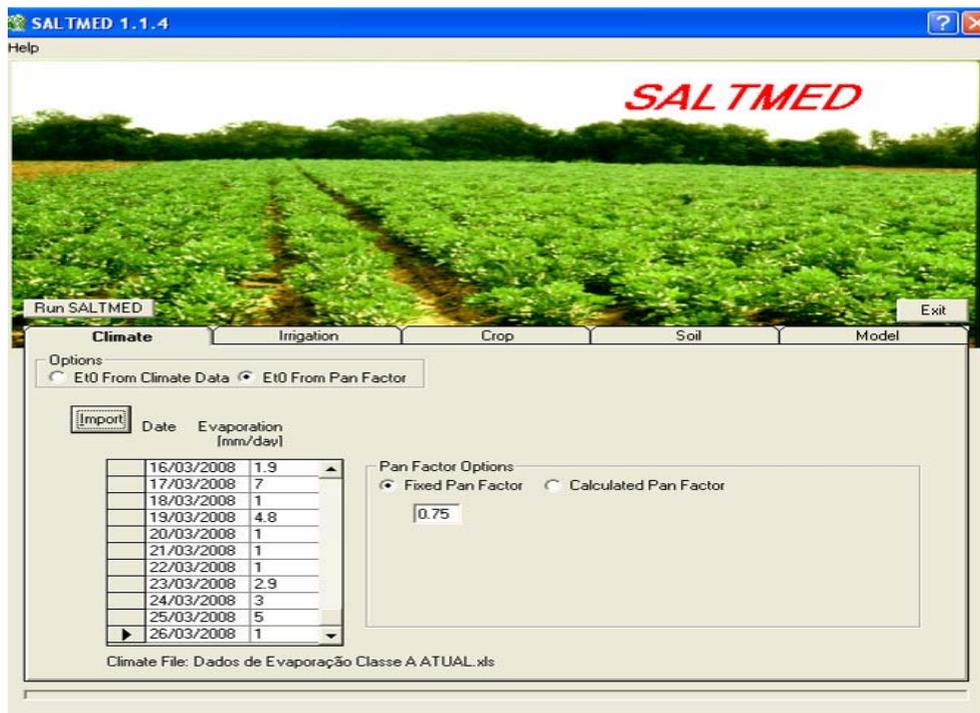


Figura 6 - Módulo de dados meteorológicos do modelo SALT MED

Na Figura 7 apresenta-se a representação do módulo de dados de irrigação do SALT MED, mostrando os dados de irrigação utilizados no cultivo do repolho, e em destaque o tipo de sistema usado, micro aspersão (Sprinkler).

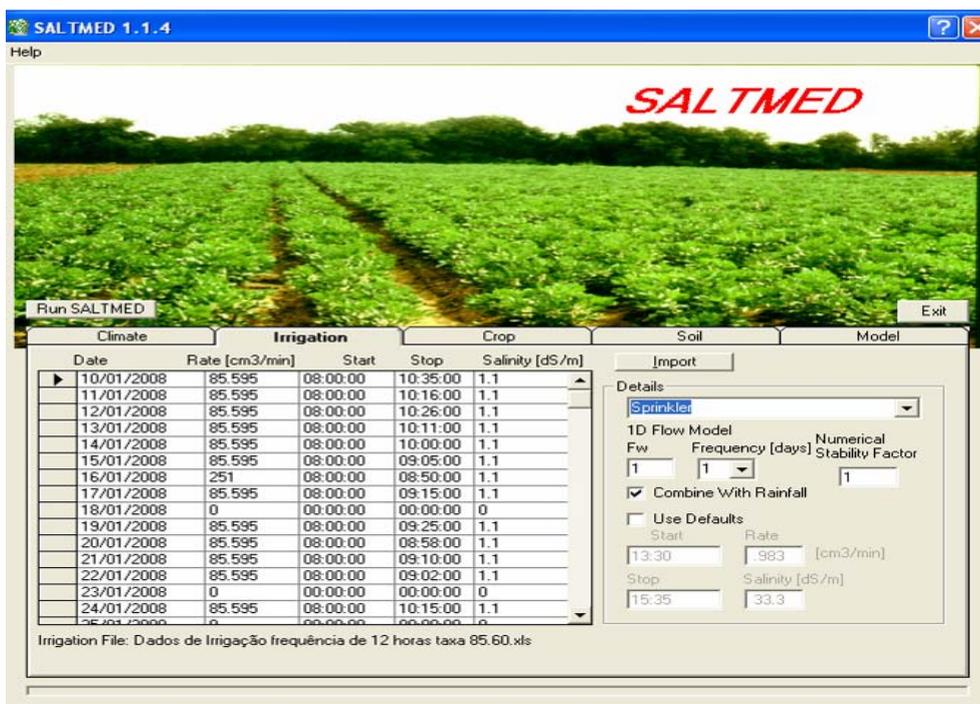


Figura 7 – Módulo de dados de Irrigação do modelo SALT MED

Na Figura 8 está a representação do módulo de dados da cultura, onde é possível visualizar as variáveis exigidas pelo modelo, tais como: mês da sementeira, dia da sementeira, dia em que a planta emergiu, dia da colheita, produtividade máxima da cultura em toneladas por hectare, altura máxima da planta, profundidade máxima e mínima da raiz, fatores da cultura como coeficiente de cultivo (K_c), coeficiente de transpiração da cultura (K_{cb}), coeficiente de evaporação do solo (K_e), fração de cobertura (F_c) e π_{50} que representa a salinidade em dS m^{-1} com decréscimo de 50% na absorção potencial de água pela planta, além disso, mostra também em dias, a duração de cada um dos estádios fenológicos.

Dados de diversas culturas são encontrados no banco de dados interno do SALTMED, podendo, no entanto, serem alterados pelo usuário.

The screenshot shows the 'Crop' data entry module for Cabbage. The interface includes the following elements:

- Window Title:** SALTMED 1.1.4
- Buttons:** Run SALTMED, Exit
- Navigation Tabs:** Climate, Irrigation, **Crop**, Soil, Model
- Crop Details:**
 - Common Name: Cabbage
 - Botanical Name: Brassica oleracea capitata
 - Max. Height [m]: 0.3
 - Root Depth [m]: Max 0.3, Min 0
- Cultivation:**
 - Month Sown: January
 - Day sown: 5
 - Emergence: 10
 - Harvest: 76
 - Unstressed crop yield [tonnes per ha]: 34
- Crop Factors:**

	K_c	K_{cb}	F_c	π_{50}
Initial Stage	0.75	0.15	0.15	4
Mid. Stage	0.95	0.75	0.5	4.6
End Stage	0.8	0.7	0.8	5
- Growth Stage Lengths [days]:**

	Initial	Develop	Mid	Late	Total
	12	35	15	14	76
- Buttons:** Add, Edit, Delete, Save, Cancel
- Location:** Calif. Desert, USA

Figura 8 – Módulo de dados da cultura do Repolho do modelo SALTMED

Na Figura 9 está a representação do módulo de dados do perfil do solo por camada. Neste módulo encontram-se os compartimentos que representam os parâmetros de cada camada do solo estudado e suas respectivas unidades. Os parâmetros são; nome dado ao solo, classe textural, porosidade de saturação do solo, umidade na capacidade de campo e ponto de murcha, λ (lambda), umidade residual, fator de cobertura da raiz, condutividade hidráulica saturada, pressão de borbulhamento e dispersividade do solo na horizontal e na vertical. O SALTMED possui banco de dados com valores dos parâmetros para diversos tipos de solo.

O módulo permite alteração de todos os parâmetros dos compartimentos. Nesse caso, para cada camada de solo se adiciona novos valores dos parâmetros citados anteriormente e em seguida são salvas as alterações, para posteriormente, no módulo de dados do modelo, serem chamados pelo nome referente a cada camada, no compartimento de camada do solo.

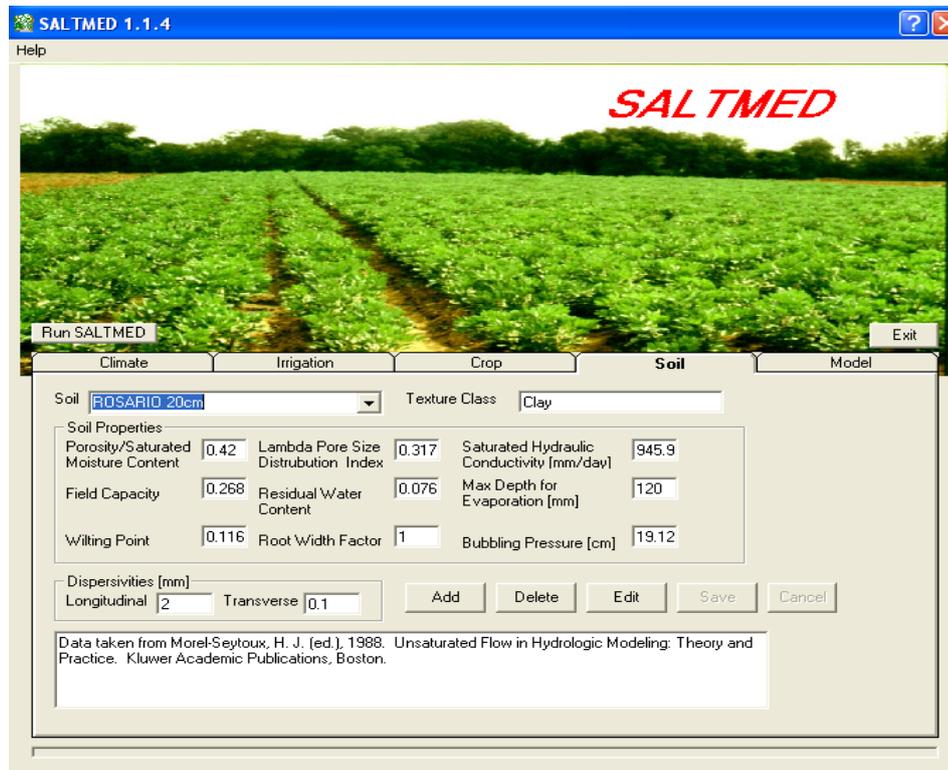


Figura 9 – Módulo de dados das camadas do solo do modelo SALT MED

A Figura 10 representa o módulo de dados do modelo. Neste módulo encontram-se compartimentos com parâmetros hidráulicos, tendo opção de calcular ou interpolar os dados de chuva efetiva. As possíveis opções são de calcular a percentagem mínima, não calcular ou de fixar uma percentagem. Ao lado ficam os compartimentos com dados de longitude, latitude e altitude da área em análise, e abaixo deste os compartimentos com data do início e fim do período de simulação e mais abaixo da condição de contorno há opção de drenagem livre ou drenagem com camada de impedimento.

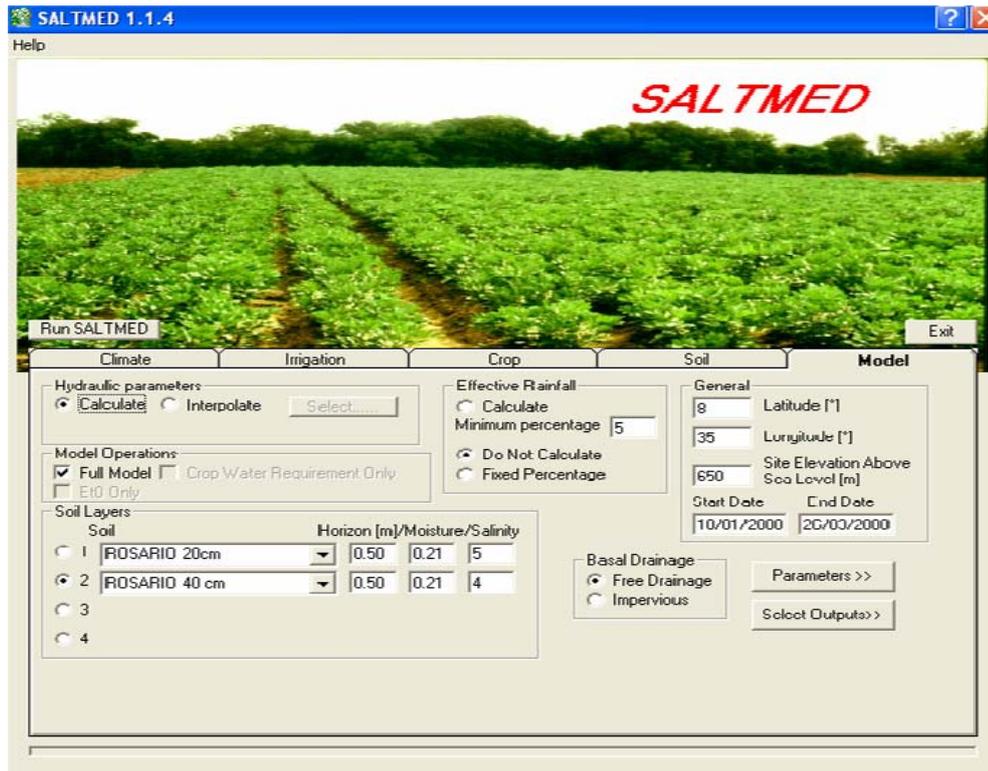


Figura 10 – Dados de entrada para as duas camadas de solo a 0-20 e 20-40

3.7 Análise do desempenho do modelo

A análise do desempenho do modelo SALT MED foi realizada comparando os valores de umidade medidos e simulados. Foram calculados coeficientes estatísticos de desempenho, para então poder avaliar a resposta do modelo. Os melhores resultados em termos de desempenho do modelo para estimar valores medidos são aqueles que apresentam coeficientes estatísticos de menor magnitude, ou seja, aqueles que têm valores mais próximos de zero.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [X_{obs}(i) - X_{sim}(i)]^2}{N}} \quad (30)$$

$$ME = \text{Max} |X_{obs} - X_{sim}|_{i=1}^N \quad (31)$$

$$\text{CRM} = \frac{\left| \sum_{i=1}^n X_{\text{obs}}(i) - \sum_{i=1}^n X_{\text{sim}}(i) \right|}{\sum_{i=1}^n X_{\text{obs}}(i)} \quad (32)$$

em que:

RMSE = Erro Quadrático Médio;

ME = Erro Máximo;

CRM = Coeficiente Residual da Massa.

X_{Obs} = Dados Observados e

X_{Sim} = Dados simulados

3.8 Análise da dispersividade longitudinal

Como não se dispunha de valores medidos dos parâmetros de transporte, foi feita uma análise de sensibilidade para averiguar seu grau de influência nos resultados do modelo. A análise foi feita em relação a dispersividade longitudinal, por ser esse parâmetro de fundamental importância na simulação do transporte de soluto considerado fluxo unidimensional na direção vertical. Foram feitas simulações considerando os parâmetros da cultura e hidrodinâmicos obtidos pela calibração/validação de modelo e foram considerados os valores de 2, 20, 30 e 50 mm para a dispersividade longitudinal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Curvas de Retenção da Água no Solo

As Figuras 11 e 12 representam as curvas de retenção de umidade e suas equações de ajuste para as camadas de 0- 20 e 20-40 cm, combinando os métodos da tensiometria e do extrator de Richards proposta por Sarvasi et al. (1992).

O ajuste das curvas obtidas pelo método do extrator de Richards foi obtido a partir de dados experimentais levados a laboratório para estimar tensões de 0,00, 10, 250, 750 e 1500 kPa e para os demais intervalos, as umidades e tensões foram estimadas no campo, através da sonda de nêutrons e dos tensiômetros instalados na área, no solo de classe textural franco. Estas curvas correlacionam o potencial matricial em (kPa) com umidade volumétrica em ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Foi possível observar que houve bom ajuste em relação às camadas estudadas, ao modelo de van Genuchten. Os coeficientes de determinação encontrados foram 0.8495 e 0.8092, respectivamente (Figuras 11 e 12).

Na Tabela 3 estão os valores dos parâmetros do solo e de van Genuchten nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, utilizados na curva característica do solo para ajuste e calibração do modelo SALTMED.

Tabela 3. Parâmetros da curva característica da camada do solo em estudo.

Camada (cm)	θ_r ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n
0-20	0,0760	0,42	0,0523	1,3172
20-40	0,0803	0,41	0,0129	1,4238

α e n parâmetros da equação de van Genuchten; θ_r - umidade residual; θ_s - Umidade de saturação.

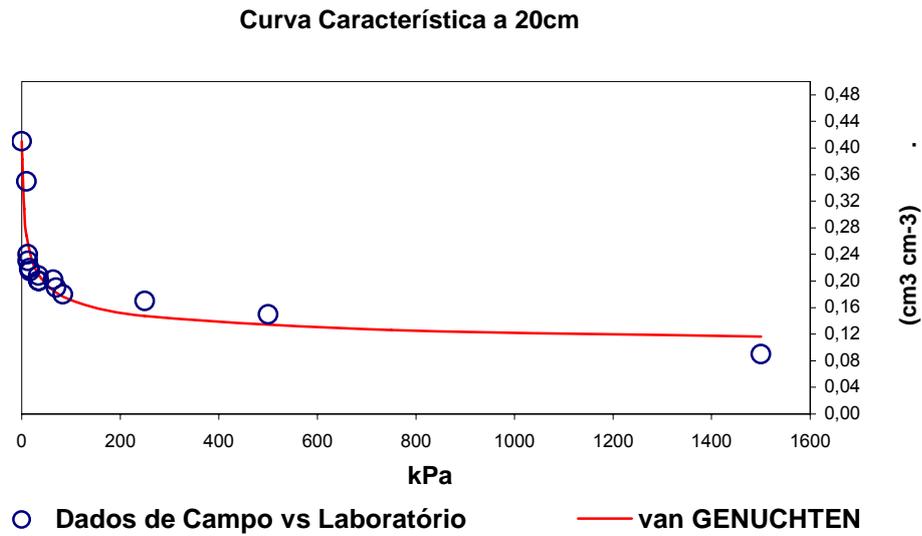


Figura 11 - Curva de retenção de umidade ajustada pelo modelo de van Genuchten para camada de 0-20 cm

A curva de retenção de umidade ajustada pelo modelo de van Genuchten, foi de suma importância para melhoria e validade dos resultados de calibração do modelo SALTMED neste trabalho, confirmado por Lyle (2007) em seu estudo.

As curvas características ajustadas pelo modelo de van Genuchten podem ser usadas como parte de metodologia de manejo da irrigação, onde a lâmina a ser aplicada é calculada levando-se em consideração também o estado de umidade do solo (Silva, 2003).

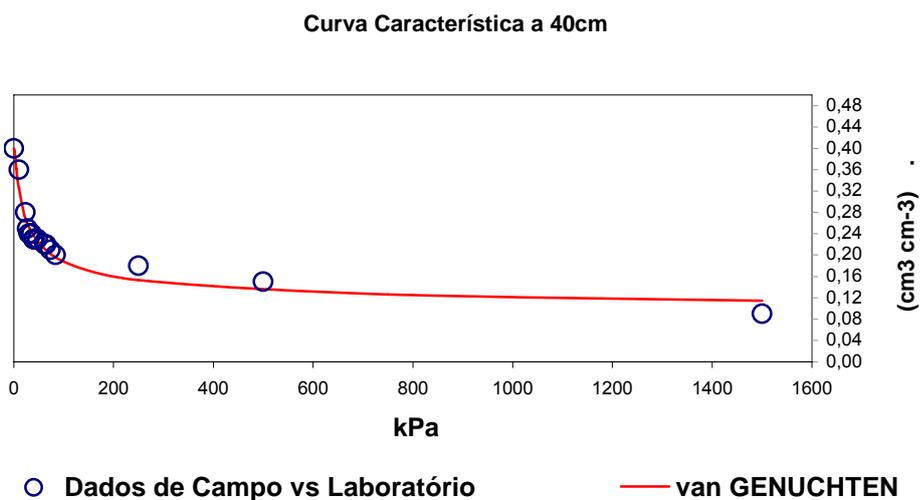


Figura 12 - Curva de retenção de umidade ajustada pelo modelo de van Genuchten para camada de 20-40 cm

4.2 Avaliação da Umidade do Solo com Sonda de Nêutrons

Nas Figuras 13, 14 e 15 estão dispostas a variação da umidade no perfil do solo em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ durante o experimento, nas freqüências de irrigação de 12, 24 e 48 horas para os tratamentos sem cobertura morta. Pode-se observar para os dias de medição que as umidades apresentaram coeficiente de variação médio de 6,40% para a profundidade 20 cm entre as freqüências de 12, 24 e 48 horas, e na profundidade de 40 cm as umidades apresentaram um coeficiente de variação médio de 5,50 %.

Na freqüência de 12 horas, obteve-se um coeficiente variação de menor magnitude para as duas profundidades quando comparado com o coeficiente das freqüências de 24 e 48 horas. Isso se deve ao fato de uma melhor uniformidade do sistema radicular e crescimento vegetativo em função desse intervalo de rega de 12 horas, durante todo ciclo. Assim foi possível observar dentre as três freqüências que a melhor resposta da cultura em função do coeficiente de variação da umidade nas profundidades estudadas foi à freqüência de 12 horas, com coeficiente de variação médio de 4,40 % para a profundidade de 20 e de 3,50 % para a profundidade de 40 cm (Figura 13). Souza (2007), na mesma área utilizando uma freqüência de 12 horas no cultivo da cenoura, observou que houve pouca variação da umidade em profundidades diferentes, indicando que com maior umidade no solo, a variação tende a ser menor. Esse comportamento também foi encontrado por Grego et al. (2006) e Timm et al. (2006), trabalhando com a variabilidade espacial da umidade do solo.

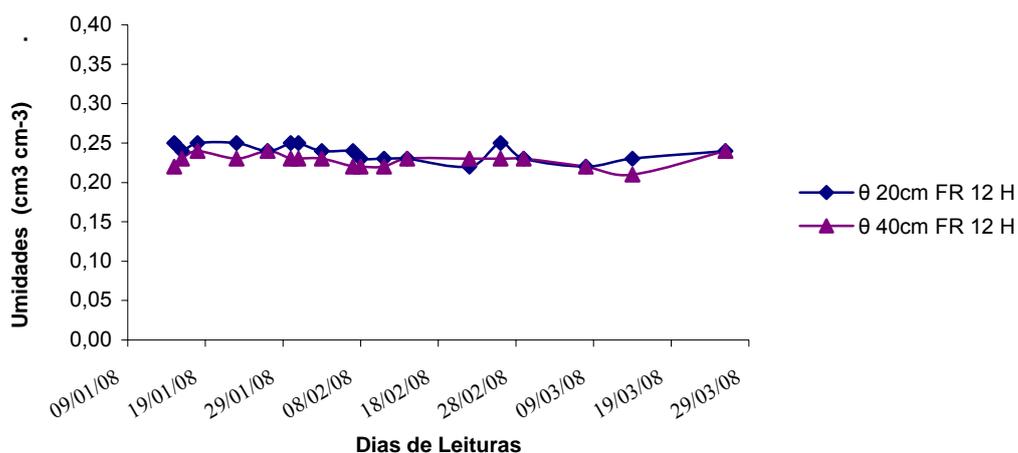


Figura 13 – Umidade do solo estimada com sonda de nêutrons para freqüência de irrigação de 12 horas

Para a frequência de 24 horas também foi possível observar uma pequena variação de umidade nas duas profundidades, com uma média de 21% para profundidade de 20 cm e 20% para profundidade de 40 cm. Isso se explica porque o sistema radicular se desenvolveu uniformemente nas duas profundidades. Percebe-se que do início de formação da cabeça até a fase final de desenvolvimento, a umidade de 20 cm permaneceu bem próxima da umidade de 40 cm (Figura 14).

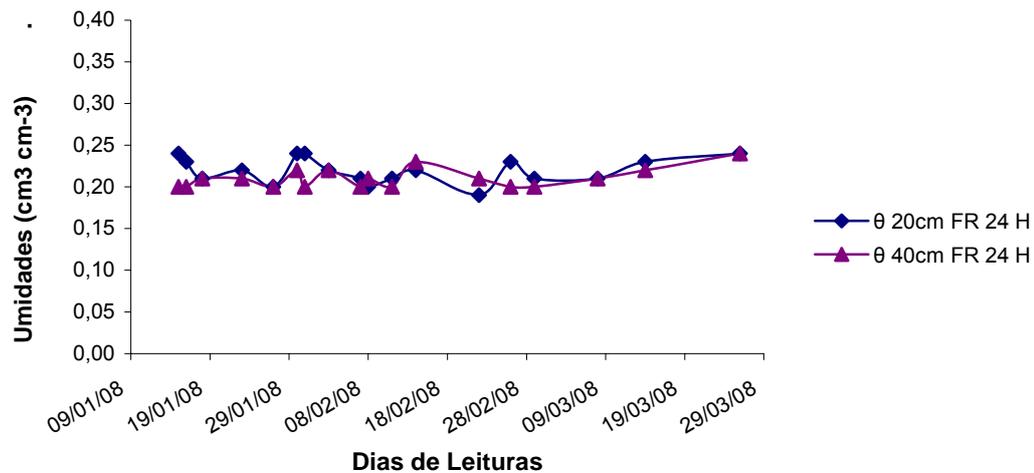


Figura 14 – Umidade do solo estimada com sonda de nêutrons para frequência de irrigação de 24 horas

Percebe-se, portanto, que houve uma maior variação de umidade para profundidade de 20 cm, principalmente na frequência de 48 horas no período de desenvolvimento da cultura (Figura 15). Isso se deve a um maior consumo na fase vegetativa e a presença de uma maior massa de raízes na profundidade de 20 cm.

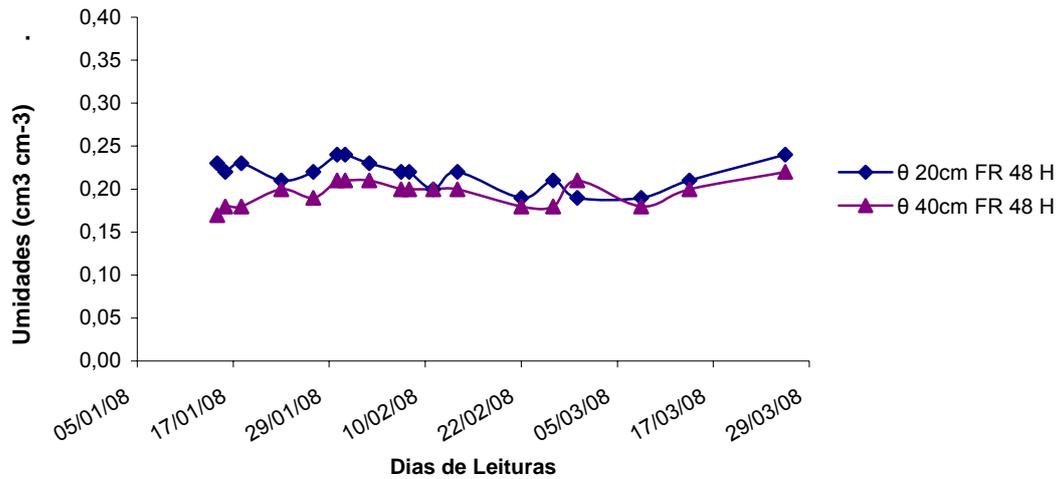


Figura 15 – Umidade do solo estimada com sonda de nêutrons para frequência de irrigação de 48 horas

Na Figura 16 estão dispostas no gráfico a variação da umidade no perfil do solo em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ durante o experimento, nas frequências de irrigação de 12, 24 e 48 horas para os tratamentos sem cobertura morta para a profundidade de 20 cm. Observa-se uma pequena variação entre as umidades nesta profundidade. No entanto, percebe-se que na frequência de 12 horas existe variação menor, quando comparada com as outras, ou seja, é praticamente uma constante, o que deixa claro a maior uniformidade de umedecimento do solo nesta profundidade e frequência.

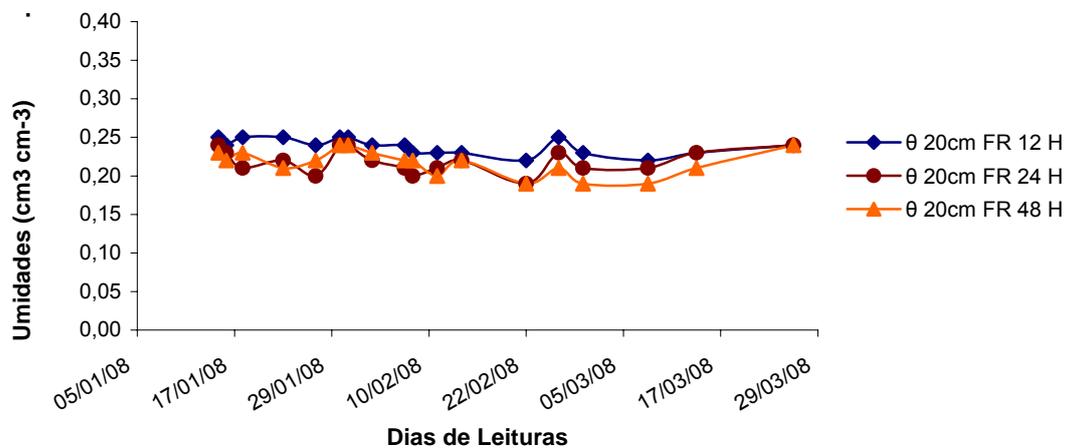


Figura 16 – Umidade do solo estimada com sonda de nêutrons para as três frequências de irrigação na profundidade de 20 cm

4.3 Análise da Tensiometria

Na Figura 17 estão representadas as tensões para as profundidades de 15 e 30 cm, para frequência de 24 horas. Percebe-se que as tensões a 15 cm de profundidade apresentaram variação de aproximadamente 5 a 30 kPa, enquanto que as tensões a 30 cm de profundidade variaram de 5 a 42 kPa.

De acordo com Souza et al. (2008), a classe textural local predominante para as profundidades de 15 e 30 cm é do tipo franco com baixo percentual de argila no solo e, por esta razão, apresentam uma baixa capacidade de retenção de água pelo solo e maiores perdas por percolação.

O aumento do potencial mátrico nas duas profundidades, com destaque para a profundidade de 30 cm, ocorrido após a semeadura, entre os dias dez a vinte e nove de fevereiro, foi em decorrência do início do surgimento e desenvolvimento de cabeças. Nesta fase, a cultura exige maior lâmina de água. No entanto, com o início dos eventos chuvosos, percebe-se uma diminuição do potencial, com destaque para final de fevereiro até final de março, quando as chuvas foram mais frequentes e de maior intensidade.

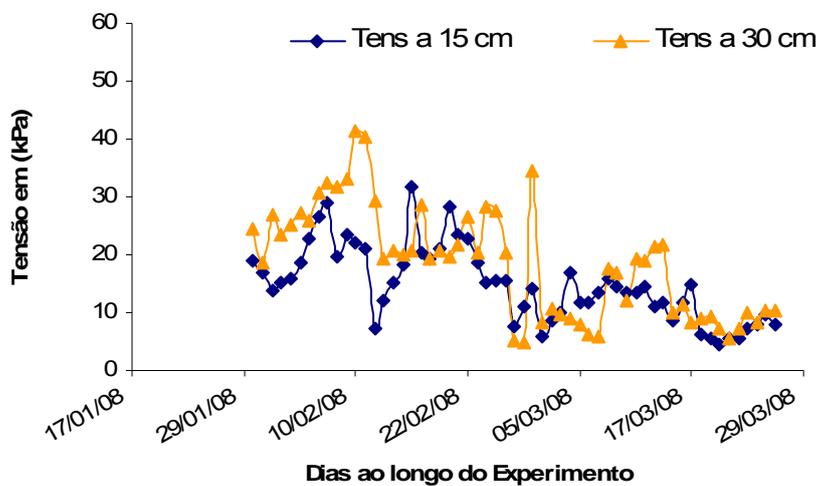


Figura 17 - Tensões estimadas no cultivo do repolho, com frequência de irrigação de 24 horas.

4.4 Rendimento da Cultura do Repolho

No cultivo do repolho, variedade Midori, se obteve uma produtividade média de 34.330 Kg ha⁻¹, podendo-se observar numericamente e estatisticamente que o melhor rendimento da cultura em função das frequências foi a de 12 horas (Tabela 4). No entanto, observar-se na

mesma tabela que a produtividade para os tratamentos de frequência de 24 e 48 horas foram satisfatório, tendo em vista os ataques de pragas sofridos e um maior intervalo de exposição a radiação solar. Pois, observou-se durante o experimento que as plantas que recebiam água com intervalos de 24 e 48 horas, eram mais castigadas pela radiação solar e pelo efeito toxicológico dos sais da água de irrigação nas folhas o que refletiu significativamente na redução de rendimento desses tratamentos.

De acordo com Carvalho (2009), ao aplicar estatística experimental neste mesmo estudo, concluiu que iteração entre a variável frequência de irrigação e produtividade foi altamente significativa. Segundo Moura et al. (2006), quando se cultiva plantas olerícolas em regiões de altas temperaturas e por irrigação de microaspersão se faz necessário aumentar a frequência para que se melhore o arrefecimento das plantas. Souza (1999) obteve, no sistema de cultivo orgânico, uma produtividade média de 25.760 kg ha⁻¹, utilizando a mesma variedade.

Santiago (2002), em seu estudo, obteve para esta mesma área uma produtividade média 10.154 kg ha⁻¹, no período de setembro a novembro de 2001. Segundo o autor, os baixos valores de produtividade ocorreram devido ao comprometimento de cerca de 55% do plantio por motivo de ataque da praga traça do repolho (*Plutella xylostella*).

A alta produtividade obtida no experimento se deve a um controle de pragas com produto mais eficiente e aos tratos culturais tais como controle de ervas daninhas e amontoa, inclusive nas frequências de irrigação em menor intervalo de tempo, visto que as plantas olerícolas são muito sensíveis às altas temperaturas.

Tabela 4. Valores médios da produtividade em cada frequência de rega.

Produtividade Média	kg ha⁻¹
Frequência de 12 Horas	37.560 +/- 3.171,71
Frequência de 24 Horas	33.93 +/- 1.889,05
Frequência de 48 Horas	31.240 +/- 3.861,25

4.5 Precipitação e evapotranspiração de referência (ET_o) durante o ciclo da cultura do repolho

Como já foi descrito anteriormente, o suprimento de água da cultura foi baseado na necessidade da mesma, tomando-se como base a evapotranspiração de referência obtida pela multiplicação da evaporação do Tanque Classe A pelo coeficiente de tanque representativo

para a região. Os valores de evapotranspiração de referência (ET_o) e das precipitações pluviométricas ocorridas no período do experimento podem ser visualizados na Figura 18.

É possível visualizar através desta figura que o maior volume de água precipitado foi no final do mês de março, próximo ao dia da colheita, logo, esta precipitação não apresentou nenhuma influência no aumento da produtividade da cultura do repolho.

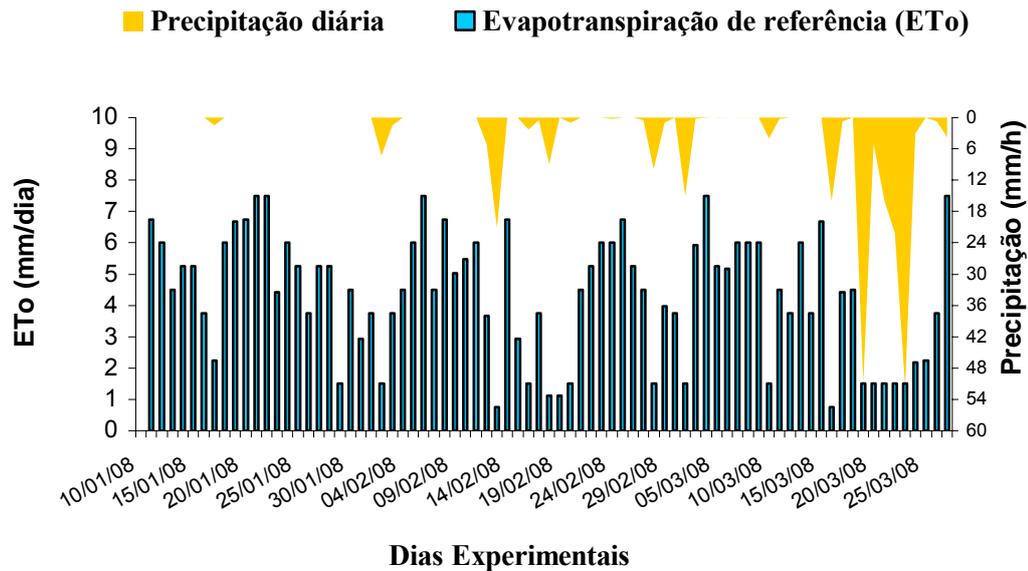


Figura 18 - Valores da evapotranspiração de referência (ET_o) e da precipitação durante o ciclo da cultura

4.6 Qualidade da Água de Irrigação

Na Tabela 5 estão representadas a condutividade elétrica (CE) da água do poço utilizada na irrigação durante o cultivo do repolho. Pode-se observar que no mês de fevereiro houve um aumento da condutividade elétrica. Isso pode ser explicado pelo fato de uma maior lâmina de irrigação neste mês o que acarretou uma maior lixiviação dos sais para o lençol freático. No caso da diminuição da condutividade no mês de março, pode ser explicado por ter sido o período de maior concentração das chuvas, provocando a diluição dos sais. Neste estudo não foi levado em consideração a influência do nível do lençol freático.

A qualidade da água de irrigação utilizada no experimento, segundo o Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos, é classificada como (C3) água com salinidade alta (CE entre 0,75 e 2,25 dS m⁻¹, a 25 °C), ou seja não pode ser empregada em solos com deficiência de drenagem. Mesmo em situação de drenagem adequada, em alguns casos, são necessárias

práticas especiais para o controle da salinidade. No entanto pode ser usada somente em plantas com boa tolerância aos sais (Bernardo, 2008).

Tabela 5. Condutividade elétrica da água de irrigação.

Poço	Coordenadas Numéricas		CE dS m ⁻¹		
	X	Y	Jan/2008	Fev/2008	Mar/2008
CA 17 Vivaldo	735631	9071310	1,10	1,25	1,01

4.7 Salinidade do Solo

Na tabela 6 estão representadas os valores das condutividades elétrica do extrato de saturação do solo e suas respectivas correções para o período de desenvolvimento da cultura do repolho, obtidas pela média aritmética das condutividades elétrica estimada em um determinado dia nas respectivas profundidades e frequências.

Observa-se que para o mês de janeiro os valores das condutividades são maiores que fevereiro e março para todas as frequências. Isso se explica pelo fato da lâmina de irrigação ter sido a menor em relação aos outros meses, ou seja, de menor coeficiente de cultura (Kc), além de ser o mês de maior intensidade de radiação solar, bem como sendo o mês de menor precipitação, o que justifica a maior concentração de sais no solo, principalmente para a camada de 0-20.

Tabela 6. Médias da condutividade elétrica do extrato de saturação e suas respectivas correções, para as frequências de 12, 24 e 48 horas nas camadas de 0-20 e 20-40 cm para o período de cultivo.

Frequências (Horas)	Profundidades (cm)	Médias das CEs dS m ⁻¹			Médias das CEC dS m ⁻¹		
		26/Jan	22/Fev	17/Mar	26/Jan	22/Fev	17/Mar
12	20	3,1	2,0	1,4	5,5	3,8	2,8
	40	2,0	1,8	1,4	3,7	3,5	2,8
24	20	2,7	2,0	1,6	5,4	4,3	3,0
	40	2,1	1,7	1,5	4,6	3,4	2,9
48	20	2,5	2,9	1,3	5,7	6,4	2,5
	40	2,2	2,0	1,6	5,5	5,0	3,2

CEs: Condutividade do Extrato Saturado; CEC: Condutividade do Extrato Saturado Corrigida

Na tabela 7 estão representados os valores de condutividade elétrica estimados através das extrações de cápsulas porosas instaladas no bloco 1 no tratamento de frequência de 24 horas. Percebe-se que assim como os valores da condutividade do extrato de saturação os valores das condutividades estimadas através das cápsulas porosas, também apresentaram uma diminuição de sais para o mês de fevereiro e março quando comparados aos de janeiro para a frequência de 24 horas. Isso se explica pelos eventos de chuva serem mais intensos nos meses de fevereiro e março acarretando a lavagem de sais na camada estudada neste período.

Tabela 7. Condutividade elétrica obtida através da extração das cápsulas porosas para a frequência de 24 horas nas camadas de 0-20 e 20-40 cm durante o período de cultivo.

Frequências (Horas)	Profundidades (cm)	Condutividade Elétrica (dS m ⁻¹)				
		31/Jan	09/Fev	08/Mar	16/Mar	26/Mar
24	20	2,02	1,55	1,45	2,10	2,14
	40	4,60	3,20	2,00	2,00	1,60

4.8 Modelagem computacional

4.8.1 Simulações para umidade do solo

Na Tabela 8 encontram-se os coeficientes da cultura e os estágios de crescimento da cultura do repolho juntamente com seus respectivos dias, que foram utilizados na fase experimental e na calibração do SALTMED neste estudo. É válido salientar que os coeficientes da cultura (K_c) utilizados no experimento foram da magnitude de 0,75, 0,95 e 0,80 respectivamente de acordo com a FAO-56, assim como os valores dos coeficientes π_{50} e F_c . Os valores na tabela 8 foram identificados na calibração do modelo.

Tabela 8. Coeficientes e parâmetros da cultura do repolho utilizados no plantio e na calibração e validação do modelo

Estágio de crescimento do repolho	Coeficientes e parâmetros				
	K_c	K_{cb}	F_c	π_{50}	Nº de dias para os estágios do repolho
Inicial	0,60	0,15	0,15	13,0	12
Desenvolvimento					35
Mediano	0,95	0,75	0,50	13,0	15
Final	0,85	0,70	0,80	13,0	14
	Total				76

K_c - coeficiente da cultura; **K_{cb}** – coeficiente basal da cultura; **F_c** – fração de cobertura e **π_{50}** - potencial osmótico no qual o de potencial de absorção de água é reduzido para 50%

Na Tabela 9 estão representados os parâmetros e as propriedades hidráulicas do solo para as duas camadas caracterizadas durante o experimento e, utilizados na simulação com o modelo SALTMED. Todos estes dados foram de primordial importância para calibração e ajuste do modelo SALTMED neste estudo, destacando-se entre as propriedades, os valores da condutividade hidráulica saturada K_{Sat} e a umidade de saturação do solo θ_S , pois são as propriedades identificadas com maior sensibilidade na calibração e ajuste do modelo. A calibração do modelo consistiu nas possíveis tentativas de variação dos parâmetros, buscando o melhor ajuste do modelo para os parâmetros investigados no presente estudo.

Também se chama a atenção para as umidades e salinidades iniciais de entrada no modelo, pois influenciam significativamente no processamento do modelo bem como nos resultados dos dados simulados.

Tabela 9. Propriedades hidráulicas e parâmetros do solo da área experimental utilizados no ajuste do modelo.

Propriedades do Solo	Unidades	Franco 0-20 cm	Franco 20-40 cm
θ_{CC}	$cm^3 cm^{-3}$	0,27	0,25
θ_{PM}	$cm^3 cm^{-3}$	0,12	0,11
λ	-	0,317	0,424
θ_R	$cm^3 cm^{-3}$	0,076	0,080
θ_S	$cm^3 cm^{-3}$	0,42	0,41
K_{Sat}	$mm dia^{-1}$	945,95	945,95
Prof. Max. Evap.	mm	150	150
ψ_{ae}	cm	19,12	77,52
Disp. Long.	mm	2,0	2,0
Disp. Transv.	mm	0,1	0,1
CEc	$dS m^{-1}$	5,0	4,0

θ_{CC} - Umidade de capacidade de campo; θ_{PM} - Umidade de ponto de murcha; λ - índice de distribuição do tamanho de poros; θ_R - Umidade residual; θ_S - Umidade de saturação; K_{Sat} - Condutividade hidráulica saturada; **Prof. Max. Evap.** - Profundidade máxima para evaporação; ψ_{ae} - Pressão de borbulhamento; **Disp. Long.** - Dispersividade longitudinal; **Disp. Transv.** - Dispersividade transversal; **CEc** - Condutividade elétrica corrigida.

As simulações realizadas no modelo SALTMED apresentaram ajustes satisfatórios para os dados simulados de umidade, quando comparada aos dados de umidade medidos em campo para as frequências de 12, 24 e 48 horas.

Para a comparação dos dados de umidades, foram calculadas as médias das umidades simuladas, ou seja, para comparar com as umidades medidas a 20 cm, se utilizou a média entre as umidades simuladas de 20 e 30 cm e para as umidades medidas na profundidade de 40 cm, se utilizou a média entre as umidades simuladas de 30 e 40 cm.

As figuras 19, 20, 21, 22, 23 e 24 apresentam, respectivamente, a correlação entre as variações de umidades observados e simulados ao longo do perfil do solo, ocorridas nos 18 dias medidos durante 76 dias experimentais.

Nas figuras 19, 20 e 21 observa-se mesma tendência entre dados simulados e medidos, para profundidade de 20 cm nas frequências de 12, 24 e 48 horas respectivamente. No entanto, pode-se observar que para frequência de 12 horas houve uma maior concordância entre os valores medidos e simulados, quando comparados com os dados das frequências de 24 e 48 horas para profundidade de 20 cm. O que se pode afirmar que o SALTMED se tratando de umidade, na profundidade de 20 cm nas condições estudadas, demonstrou melhor ajuste para frequência de 12 horas. Isso se dá ao fato de uma melhor uniformidade no umedecimento do solo nesta profundidade com esta frequência.

É válido salientar que os dados de entradas de taxa de precipitação para frequência de 12 horas são os mesmos para frequência de 24 horas, a única diferença é que mesmo tendo a mesma taxa, os pontos de medição dos tratamentos de 12 horas são diferentes dos de 24 horas, o que resulta em umidades medidas diferentes.

O SALTMED apresentou uma boa resposta para camada de 0-20 cm na frequência de 12 horas e isso pode ser observado na figura 19 e confirmado na tabela 10 através dos coeficientes estatísticos (RMSE, ME e CRM) que apresentaram baixa magnitude para esta camada e frequência quando comparada as de 24 e 48 horas.

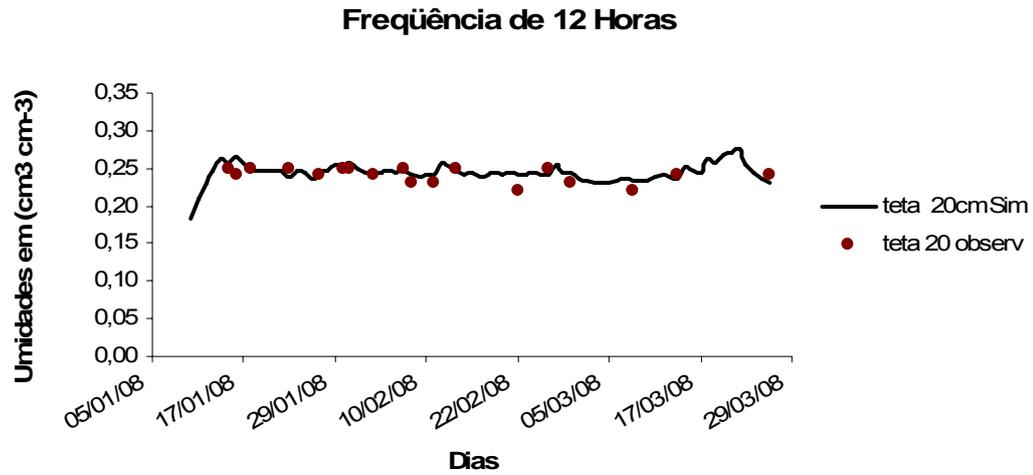


Figura 19 - Comparação das umidades simulada de todos os dias experimentais com as umidades observadas para profundidade de 20 cm na frequência de 12 horas

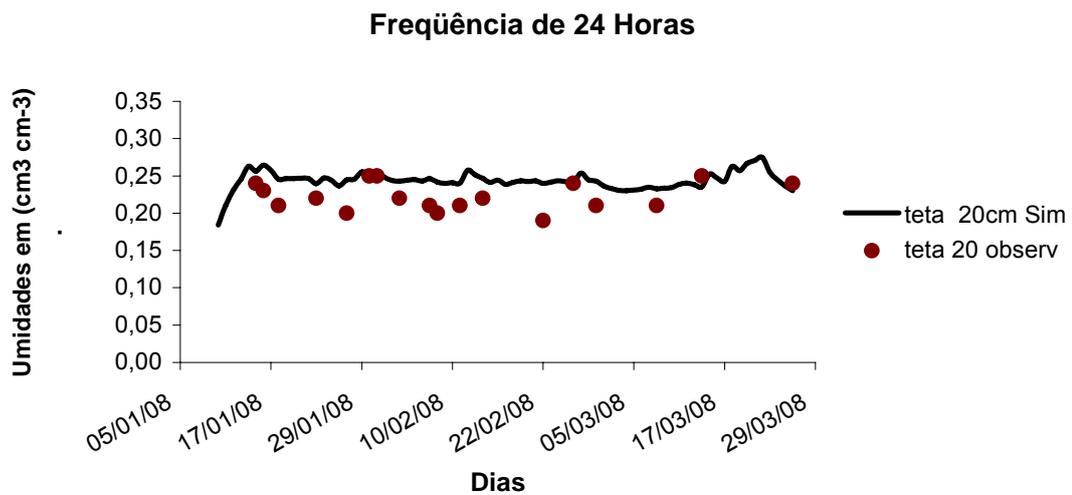


Figura 20 - Comparação das umidades simulada de todos os dias experimentais com as umidades observadas para profundidade de 20 cm na frequência de 24 horas

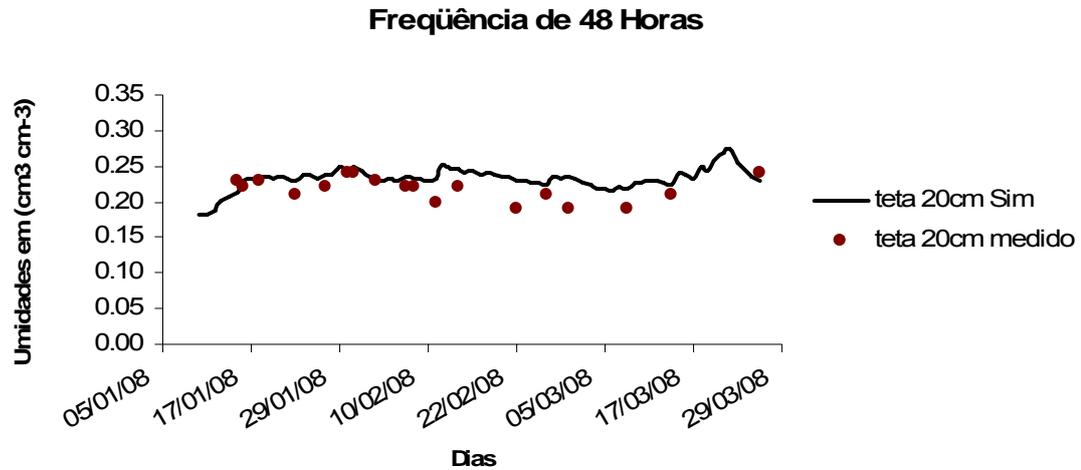


Figura 21 - Comparação das umidades simulada de todos os dias experimentais com as umidades observadas para profundidade de 20 cm na frequência de 48 horas

As simulações apresentaram-se satisfatórias também para as umidades nas profundidades de 40 cm entre as três frequências (Figuras 22, 23 e 24, respectivamente). Comparando com a profundidade de 20 cm, percebe-se que o modelo teve melhor desempenho para a profundidade de 40 cm. Pode-se observar também nas figuras 23 e 24 que houve melhor concordância entre as umidades simuladas e medidas na profundidade de 40 cm para as frequências de 24 e 48 horas. O que se pode afirmar, diante do exposto, que o modelo respondeu satisfatoriamente ao umedecimento da camada de 40 cm, com ênfase para as frequências de 24 e 48 horas.

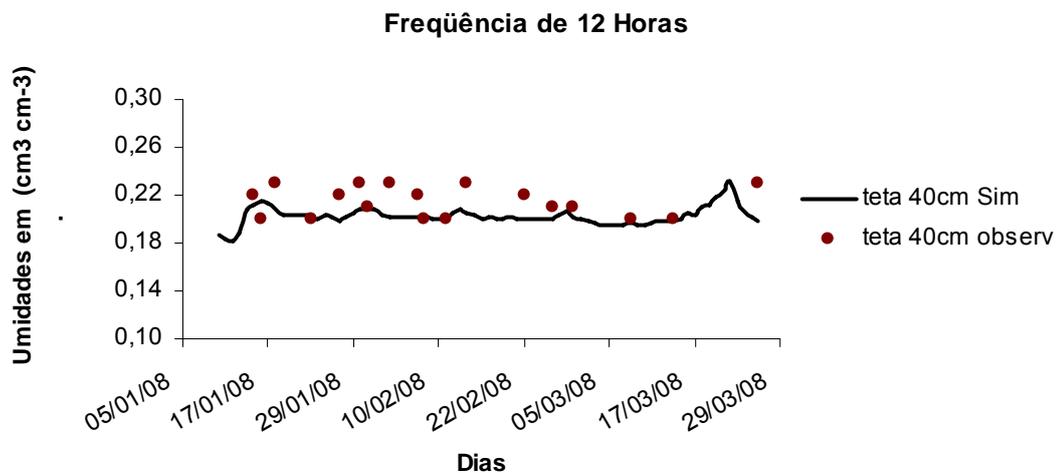


Figura 22 - Comparação das umidades simulada de todos os dias experimentais com as umidades observadas para profundidade de 40 cm na frequência de 12 horas

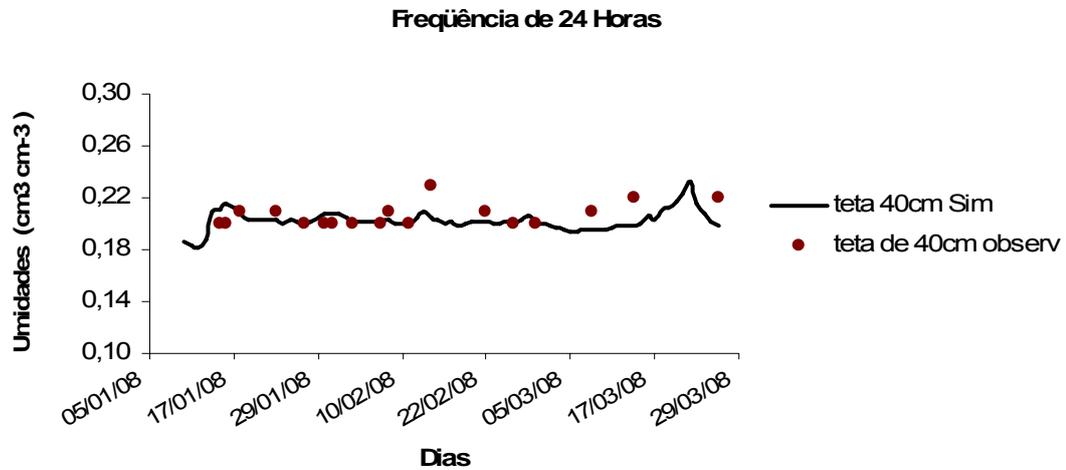


Figura 23 - Comparação das umidades simulada de todos os dias experimentais com as umidades observadas para profundidade de 40 cm na frequência de 24 horas

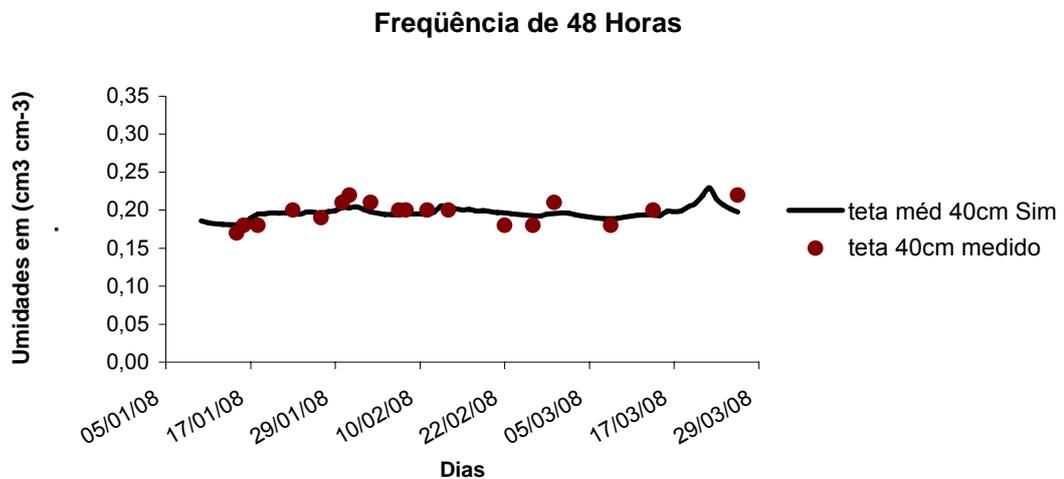


Figura 24 - Comparação das umidades simulada de todos os dias experimentais com as umidades observadas para profundidade de 40 cm na frequência de 48 horas

Na Tabela 10 está a representação dos valores dos coeficientes estatísticos de avaliação de desempenho do modelo (RMSE, ME e CRM).

Nesta mesma tabela é notório que os valores de RMSE, ME e CRM foram de baixa magnitude para as simulações de umidades, para as duas camadas e nas três frequências. Pode-se notar também que o maior valor para RMSE (0.0942) ocorreu para frequência de 24

horas, à profundidade de 20 cm, e que o menor valor de RMSE (0.0060) foi para frequência de 48 horas para profundidade de 40 cm.

Na mesma tabela pode-se observar que os erros das simulações para as umidades foram baixos. Logo, pode-se verificar a adequação do modelo SALTMED para o experimento realizado nas condições locais, utilizando-se os valores ajustados para os parâmetros pertinentes (Tabela 9), sendo possível sugerir que o modelo SALTMED, devidamente calibrado, pode ser utilizado como satisfatória ferramenta para simulação da umidade, em solos aluviais de textura similar.

Tabela 10. Índices estatísticos de comparação entre resultados observados e simulados das umidades no perfil do solo correspondente as figuras (19, 20, 21, 22, 23 e 24 respectivamente).

Frequências (horas)	Profundidade (cm)	RMSE	ME	CRM
12	20	0,0164	0,0241	-0,0160
	40	0,0477	0,0316	0,0524
24	20	0,0942	0,0500	-0,0999
	40	0,0147	0,0247	0,0167
48	20	0,0635	0,0462	-0,0689
	40	0,0060	0,0224	0,0072

RMSE – Erro Quadrático Médio; **ME** – Erro Máximo; **CRM** – Coeficiente Residual da Massa.

4.8.2 Simulações para salinidade do solo

As simulações realizadas utilizando o modelo SALTMED também apresentaram ajustes satisfatórios para os dados simulados de salinidade, quando correlacionados aos valores dos dados de salinidades medidos em campo, obtidos através das cápsulas de extração nos tratamentos de frequência de 24 horas.

Pode-se observar através da Figura 25 que o modelo SALTMED apresentou uma resposta razoavelmente boa para o parâmetro salinidade, para as duas profundidades na frequência de 24 horas.

A comparação dos dados de salinidade nas profundidades de 20 e 40 cm apresentou um coeficiente de determinação linear satisfatório, ou seja, o grau de dependência dos valores

simulados em relação aos valores medidos foi de 91.19%, significa que 8,81% da variação total dos dados simulados permanecem não explicados.

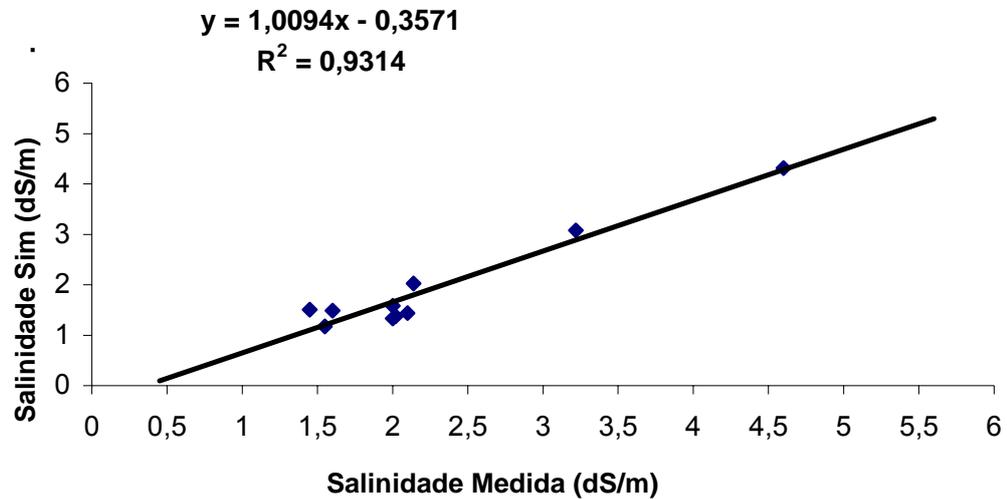


Figura 25 – Correlação das salinidades simuladas e medidas nas profundidades de 20 e 40 cm para frequência de 24 horas

4.8.3 Análise de sensibilidade para os parâmetros de transporte

A comparação dos resultados das simulações em termos de série temporal da condutividade elétrica na profundidade de 20 cm é apresentada na Figura 26. Os resultados obtidos não variaram significativamente entre as simulações, demonstrando uma baixa sensibilidade do modelo, para as condições simuladas, a esse parâmetro.

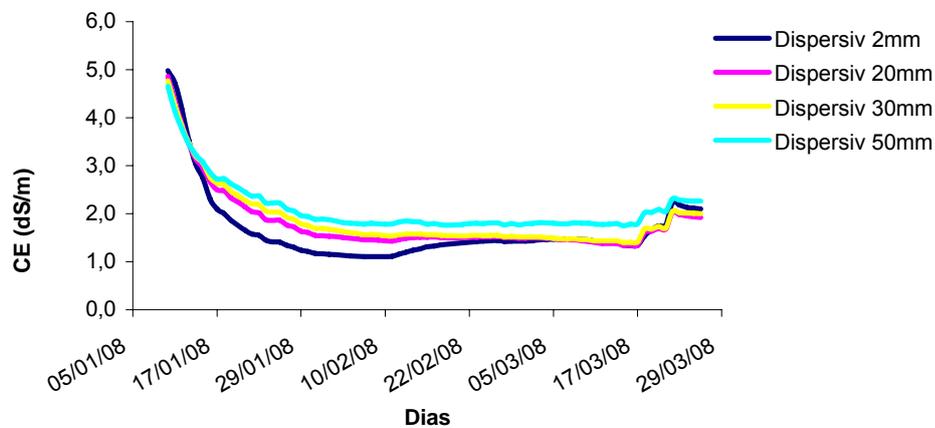


Figura 26 – Análise de sensibilidade para parâmetros de transporte

5 CONCLUSÕES

- As simulações realizadas no modelo SALTMED apresentaram ajustes aceitáveis aos dados medidos.
- Com base na montagem experimental desse estudo, foi possível calibrar e validar o modelo SALTMED, o qual pode ser utilizado como ferramenta para a simulação de avanço de sais em meio irrigado, em Neossolos flúvicos similares ao estudado.
- O modelo não é flexível quanto a discretização temporal, pois apresenta uma discretização temporal mínima de 24 horas.
- Quanto a extensão vertical o modelo é bastante flexível, o que facilita os testes para calibrar e validar.
- O modelo SALTMED apresentou-se flexível para simular o transporte de água e solutos no solo, demonstrando ser uma ferramenta útil para simular várias situações que poderão ser úteis em estudos de estratégias de manejo integrado e prevenção do avanço de sais no solo.
- A curva característica do solo, bem como os parâmetros da equação de van Genuchten, é fundamental para o ajuste e calibração do SALTMED.
- O modelo mostrou-se eficiente na predição de dados que definem o umedecimento do perfil do solo.
- O SALTMED também mostrou-se eficiente na avaliação da dinâmica da água-solo-planta.
- O modelo demonstrou sensibilidade, quanto aos parâmetros hidráulicos e físicos do solo.
- As diferentes frequências de irrigação influenciaram significativamente para eficiência do uso da água e produtividade.
- Quanto às variáveis produtividade e eficiência do uso da água, observou-se um incremento na frequência de irrigação de 12 horas.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar o modelo SALTMED calibrado e validado na área para analisar cenários de manejo da irrigação, por exemplo, com menor lâmina de lixiviação.

Em experimentos como o desse estudo para calibração e validação de modelo matemático sugere-se:

- Realizar maior número de coletas de dados de umidade, condutividade elétrica e tensão matricial, se possível todos os dias durante o ciclo da cultura;
- Determinar curvas características por camada investigada;
- Caracterizar bem condutividade hidráulica da camada do solo em estudo;
- Utilizar a metodologia de extração de cápsula porosa para estimar a (CEs) condutividade elétrica da água no solo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL, G. G.; ARSLAN, A.; GAIHBE, A.; KADOURI, F. The effects of saline irrigation water management and salt tolerant tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria (1999–2002). **Agricultural Water Management**. Amsterdam, v. 78, p. 39-53, 2005.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALMEIDA, T. A. de. Avaliação do manejo de irrigação no âmbito da gestão participativa dos recursos hídricos no Semi-árido pernambucano: estudo de caso. 2006. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2006.

ANTONINO, A. C. D.; SAMPAIO, E. V. S. B.; DALL'OLIO, A.; SALCEDO, I. H. Balanço hídrico em solo com cultivo 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.

ANTONINO, A. C. D. Determinação da condutividade hidráulica e da sorvidade de um solo com infiltrômetro a disco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 247-253, 2001.

ARBAT G. Modelación directa e inversa de la dinámica del agua en una plantación de manzanos regada por microaspersión. *Estudios de la zona no saturada del suelo*. F. J, Samper Calvete y A. Paz González, v. 7, 2005.

AYRES, R. S.; WESTCOT, D. W. A qualidade da água na agricultura. 2. ed. Campina Grande: UFPB, 1999. 153p. (Estudos FAO, irrigação e Drenagem 29).

ARYA, L. M. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 63, p. 1063-1070, 1999.

ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 45, p. 1023-1030, 1981.

- BASTOS, D. C. O. A. Manejo da salinidade em irrigação localizada: análise da alternativa de lixiviação incompleta. 2004. 57 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2004.
- BERGAMASCHI, H. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. 125p.
- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 5. ed. Viçosa, MG: UFV, 1989. 596p.
- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 6. ed. Viçosa, MG: UFV, 1995. 657p.
- BERNARDO, S. Impacto ambiental da irrigação no Brasil. Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura. Viçosa, MG: MMA, 1997. 252p.
- BLACKBURN, D. M. Efeito da drenagem subterrânea no balanço hidrossalino de um neossolo flúvico irrigado em Pesqueira- PE. 2002. 89 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2002.
- BORGES JÚNIOR, J. C. F.; Ferreira, P. A. Equações e programa computacional para cálculo do transporte de solutos do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 604-611, 2006.
- BONAM, B. J. Distribution patterns of microirrigation spinner and spray emitters. *Applied Engineering in Agriculture*, St. Joseph, v. 5, n. 2, p. 50-56, 1989.
- BOWMAN, J. A.; SIMMONS, F. W.; KIMPEL, B. C. Irrigation in midwest: Lessons from Illinois. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, New York, v. 117, n. 5, p. 700-15, 1991.
- BRAINWOOD, M. A.; BURGİN, S.; MAHESHWARE, B. “Temporal variations in water quality of farm dams: impacts of land use and water sources”. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 70, p. 151-175, 2004.
- BUCKINGHAM, E. Studies on the movement of soil moisture. USDA. Bur. Coils, BULL, 38p. 1907.
- CABRAL, J. J. S. P.; DEMÉTRIO, J. G. A. Aplicação de modelos em Hidrogeologia. In: *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Fortaleza: CPRM, LABHID UFPE, 1997. p. 367-389.

CARDON, G. E.; LETEY, J. **Soil- based irrigation and salinity management model: II – water and solute movement calculations. Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 1887-1892, 1992.

CARVALHO, J. F. Produtividade do repolho em função da cobertura morta e intervalos de irrigação com água moderadamente salina. Cap.3. p. 72-97. In **Manejo de irrigação no cultivo do repolho (*Brassica oleracea var. capitata* L.) em solo aluvial no semi-árido**. 2009. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.

Companhia Integrada de Serviços Agropecuários - CISAGRO. **Projeto de Irrigação da Fazenda Nossa Senhora do Rosário**. Pesqueira, 1990. 120p.

CORREA, M. M.; AKABASSI, L.; MONTENEGRO, A. A.; RIBEIRO, M. R.; MONTENEGRO, M. G. L. Caracterização do comportamento da dinâmica de sais em um aquífero aluvial na região do Agreste pernambucano. In: **Simpósio Regional de Recursos Hídricos**, 5., 2000, Natal – RN. **Anais...** Natal: 2000.10p.

COSTA, M. R.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CIRILO, J. A.; MAIA, A.; COSTA NETTO, M. L. Avaliação da qualidade da água em fontes superficiais e subterrâneas da região semi-árida do Nordeste. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 15., 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2003. 463p.

COSTA NETTO, M. L. Avaliação da salinidade do solo utilizando sensor de Indução eletromagnética e geoestatística em vale aluvial no Agreste de Pernambuco. 2008. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.

COX, C. L.; JONES, W.F.; QUISENBERRY, V.L.; YO, F. One-dimensional infiltration with moving finite elements and improved soil water diffusivity. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 30, n. 5, p. 1431-1438, 1994.

CLAWSON, M.; HELD, R. B. **Conservação do solo – passado - presente – futuro**. Rio de Janeiro: O Cruzeiro, 1965. p. 36-37.

DARCY, H. **Les Fontaines Publiques de la ville de Dijon**. Paris: Victor Dalmont, 1856. 592p.

DENÍCULI, W.; BERNARDO, S.; THIÁBAUT, J.T.L.; SEDIYAMA, G.C. Uniformidade de distribuição de água, em condições de campo num sistema de irrigação por gotejamento. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 27, n. 50, p. 155-162, 1980.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Campina Grande, PB: FAO, 1997. 179p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 24).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

FAO. Crop evapotranspiration. Rome, 1998. p. 12. Rome: FAO, 1998.

FASSBENDER, H.; BORNEMISZA, E. **Química de suelos com ênfasis en suelos de America Latina**. 2. ed. San José: IICA, 1987. p. 187-198.

FEITOSA, A. C. F. Hidráulica de poços. In: **Hidrogeologia conceitos e aplicação**. Fortaleza: CPRM LABHID-UFPE. 1997. Fortaleza, Cap.11, p. 243-300.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura**: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa, MG: UFV, 2000. 402 p.

FLOWERS, T. J. Sustainable strategies for irrigation in salt-prone Mediterranean: SALTMED. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 78, p. 3-14, 2005.

FRANKE, A. E.; DORFMAN, R. Análise probabilística das necessidades de irrigação suplementar no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 109-121, 1997.

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

GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação**: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1999. 390p.

GONÇALVES, M. C.; MARTINS, J. C.; GONÇALVES, A. R. Avaliação dos parâmetros de transporte de solutos no solo. **Revista das Ciências Agrárias**, v. 25, n. 3/4, p. 227-239, 2002.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R.; ANTONIO, A. M.; ROSA, S. C. D. Geostatistical analysis for soil moisture content under the no tillage cropping system. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 55-64, 2006.

JURY, W. A.; ROTH, K. **Transfer functions and solute transport through soil: theory and applications**. Basel: Birkhaeuser Publisher, 1990. 235p.

KINOUCI, T.; KANDA, M.; HINO, M. Numerical simulation of infiltration and solute transport in S-shaped model basin by a boundary-fitted grid system. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 122, n. 1/4, p. 373-406, 1991.

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: TA NJI, K. K. **Agricultural salinity assessment and management**. New York: ASCE, 1990. cap.16, p. 349-391.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2. ed. Campinas: Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, 1996. 83p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 1. ed. Piracicaba: ESALQ, 1995. 497p.

LYLE, S. Salinity in Mimoso Valley: a study on the effect of groundwater salinity on castor bean crop productivity. M.Sc. Thesis. University of Birmingham Department of Earth Sciences, 2007.

MERMOUD, A.; TAMINI, T. D.; YACOUBA, H. Impacts of different irrigation schedules on the water balance components of fan onion crop in a semi-arid zone. **Agriculture Water Management**, Amsterdam, v. 2, 2004.

MERRIAN, J. L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Agricultural and Irrigation Engineering, 1978. 271p.

MONTENEGRO, A. A. T.; CRISÓSTOMO, L. A.; GONDIM, R. S.; SANTOS, F. J. S. Avaliação de um sistema de irrigação localizada acionado por catavento hidráulico. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 15., 2005, Teresina. Anais... Teresina: Insigne, 2005. 1 CD-ROM.

MONTENEGRO, S. M. G. L. Stochastic analysis of salt accumulation in heterogeneous irrigated soils: a case study in Northeast Brazil. 1997. Tese (Doutorado em Civil Engineering), University of Newcastle, Londres, 1997.

MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. de A.; MACKAY, R. Análise do risco de salinização em áreas aluviais irrigadas de regiões semi áridas através de modelagem matemática de fluxo de água e transporte de soluto no subsolo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICO, 13, 1999, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: Insigne, 1999. 1 CD-ROM.

MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. de A.; RIBEIRO, M. R.; CORREA, M. M.; ALMEIDA, T. A.; LINS, F. V. 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/V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 5., 2001, Aracaju. Anais... Aracaju: Insigne, 2001. 1CD-ROM.

MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, K. C. M.; MONTENEGRO, A. A. A. Avaliação do manejo da irrigação por microaspersão da cultura do repolho em região Semi- árida. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 7., 2004, São Luís. Anais... São Luís: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2004. 1 CD-ROM.

MONTEIRO, A. L. N. Avaliação de lavagem incompleta de sais em Neossolo Flúvico utilizando modelagem computacional. 2007. 91 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2007.

OLIVEIRA, I. P. Dinâmica hidrossalina em solos aluviais salinizados sob o cultivo de halófitas. 2001. 11 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2001.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v. 63, n. 6, p. 1748-1757, 1999.

PREVEDELLO, C. L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba: Salesward-discovery, 1996. 446p.

RAGAB, R. A Holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: the SALTMED model. *Environmental Modelling & Software*, v. 17, p. 345-361, 2002.

RAGAB, R.; MALASH, N.; GAWAD, G. A.; ARSLAN, A.; GHAI BEH, A. Holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: The SALTMED model validation using field data of five growing seasons from Egypt and Syria. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 78, p. 89-107, 2005.

REICHARDT, K. Processos de transferência do sistema solo - planta – atmosfera. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 285p.

REICHARDT, K. Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas. 2. ed. Piracicaba: ESALQ/ USP, 1996. 505p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. São Paulo: Manole, 2004. 478p.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D. E. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α - parameters using the Guelph permeameter. **Soil Science**, Baltimore, v. 140, n. 4, p. 292-302, 1985.

RICHARDS, G. B. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics*: New York, 1974. p. 318-333.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC, 1998. 840p.

RITZEMA, H. P. **Drainage principles and applications**. Nether lands: Insigner, 1994.

RIVERA, R. N. C. Modelagem da dinâmica do potássio no solo sob irrigação por gotejamento: validação do modelo. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 388-394, 2006.

RHOADES, J. D.; CORWIN, D. L. Determining soil electrical conductivity – Depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Science: Soc. Am. Proc.*, 1981. p. 54-60.

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A.; MARSHALI, A. M. The use of saline waters for crop production. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Roma, 1992. 133p.

SANTIAGO, F. 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/PE. 2002. 115 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2002.

SANTOS, F. X. Evapotranspiração de cultura e influência de diferentes lâminas e frequências de irrigação no crescimento e produtividade da cultura da cenoura. 2008. 81 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.

SARVASI, F. 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.

SILVA JÚNIOR, A. A.; MIURA, L.; YOKOYAMA, S. Repolho: Novas cultivares de verão. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v. 1, n. 3, p. 47-49, 1988.

SILVA, E. F. F. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade na cultura do pimentão utilizando extratores de solução do solo: 2002. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

SILVA, K. C. M. Avaliação do manejo da irrigação por microaspersão da cultura do repolho em região semi-árida. 2003. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, M. T. H. “The HYDRUS 1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0”. IGWMC-TPS-70, International Groundwater Modeling Center, Colorado School of Mines. Golden: Colorado, 1998. 202p.

SUASSUNA, J. O processo de salinização das águas superficiais e subterrâneas no Nordeste Brasileiro. In: IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À UTILIZAÇÃO DE ÁGUAS DESSALINIZADAS NO SEMI-ÁRIDO, WORKSHOP, 1996, Fortaleza CE. Fortaleza: Ministério do Meio Ambiente, 1996.

SOUZA, E. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um neossolo flúvico cultivado com cenoura irrigada com água moderadamente salina. 2007. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2007.

SOUZA; E.R; MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Variabilidade espacial da umidade do solo em neossolo flúvico. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 13, n. 2, 2008.

TIMM, L. C.; PIRES L. F.; ROVERATTI, R.; ARTHUR, R. C. J.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J. C. M.; BACCHI, O. O. S. Field spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 63, n. 1, p. 55-64, 2006.

TOMAZELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 64, p. 327-338, 2000.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: EDUFRGS, 2000. p. 25-943.

van DAM, J. C. et al. Concepts and dimensionality in modeling unsaturated water flow and solute transport. In: FEDDES, R. A. Unsaturated zone modelling: Progress, challenges and applications. ed.3. Dordrech: Kluwer Academic Publishers, 2004. p. 1-36.

VANDERBORGHT, J.; MOUVET, C.; VEREECKEN, H. A Set of analytical benchmarks to test numerical models of flow and transport in soils. *Vadose Zone Journal*, v. 4, p. 206-221, 2005.

van GENUCHTEN, M. T. H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

van GENUCHTEN, M. T. H.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. Environmental Protection Agency. Ada, 1991. 85 p.

van GENUCHTEN, M. T. H.; WIERENGA, P. J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. In: **Methods of soil analysis**, Part 1. Madison: American Society of Agronomy – Soil Science Society of America, 1986. p. 1025-1054.

VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; MACEDO, A. Retenção de água no solo estimada através da medida de distribuição do tamanho das partículas do solo. São Carlos: EMBRAPA/CNIA, 2003. 6p. (EMBRAPA-CNIA. Circular técnica, 57).

VIEIRA, V. P. P. B. Desafios da gestão integrada de recursos hídricos no Semi-árido. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 7-17, 2003.

WALLACH, R.; SHABTAI, R. Modeling surface runoff contamination by chemicals under transient water infiltration. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 132, n. 1/4, p. 263-281, 1992.

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

ZAVATTARO, L.; GRIGNANI, G. Deriving hydrological parameters for modeling water flow under field conditions. *Soil Science Society, of American Journal*: Madison, v.2, 16p. 2001.

Nome do arquivo: Dissertação Final - Graciliano 01-09-2009.doc
Diretório: C:\Documents and Settings\Jose Francisco\Meus
documentos\DISSERTAÇÃO\DISSERTAÇÕES
Modelo: C:\Documents and Settings\Jose Francisco\Dados de
aplicativos\Microsoft\Modelos\Normal.dotm
Título: JOSÉ GRACILIANO DA SILVA JÚNIOR
Assunto:
Autor: Graciliano
Palavras-chave:
Comentários:
Data de criação: 8/9/2009 13:46:00
Número de alterações:9
Última gravação: 3/10/2008 19:02:00
Salvo por: ***
Tempo total de edição: 11 Minutos
Última impressão: 3/10/2008 21:55:00
Como a última impressão
Número de páginas: 80
Número de palavras: 21,460 (aprox.)
Número de caracteres: 115,886 (aprox.)