

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**RESPOSTA DA IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR EM
DIFERENTES CENÁRIOS PARA A CULTURA DA
SOJA NA MICRORREGIÃO DE PASSO FUNDO, RS.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Gisele Aparecida Vivan

**Santa Maria, RS, Brasil
2010**

**RESPOSTA DA IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR EM
DIFERENTES CENÁRIOS PARA A CULTURA DA SOJA NA
MICRORREGIÃO DE PASSO FUNDO, RS.**

por

Gisele Aparecida Vivan

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientadora: Prof^a Marcia Xavier Peiter

Santa Maria, RS, Brasil
2010

V855r

Vivan, Gisele Aparecida, 1984-

Resposta da irrigação suplementar em diferentes cenários para a cultura da soja na microrregião de Passo Fundo, RS / Gisele Aparecida Vivan. - 2010.

87 f. ; il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2010.

“Orientadora: Prof^a. Marcia Xavier Peiter”

1. Engenharia agrícola 2. Glycine max (L.) 3. Restrição hídrica 4. Rendimento 5. WINISAREG I. Peiter, Marcia Xavier II. Título

CDU: 633.34

Ficha catalográfica elaborada por
Patrícia da Rosa Corrêa – CRB 10/1652
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**RESPOSTA DA IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR EM DIFERENTES
CENÁRIOS PARA A CULTURA DA SOJA NA MICRORREGIÃO DE
PASSO FUNDO, RS.**

elaborada por
Gisele Aparecida Vivan

como requisito parcial para a obtenção de grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:

Marcia Xavier Peiter
Dr.^a. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Adroaldo Dias Robaina
Dr. (UFSM)
(Co-orientador)

Ana Rita Costenaro Parizi
Dr.^a. (IFF)

Ricardo Luis Schons
Dr. (IFF)

Santa Maria, 30 de Agosto de 2010.

OFEREÇO

À minha mãe Clori e ao meu pai Valdir
(in memorian) pelos ensinamentos, dedicação
e esforço para minha formação e incentivo
para sempre seguir em frente.

DEDICO

Ao meu namorado Fabrício!

Que ao longo destes seis anos me dedica
seu carinho, paciência e amizade. E que, acima
de tudo é meu porto seguro, onde nas horas de
aflição e agonia acolhe e nas de vitória e
realização está junto, para comigo vibrar.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), pela oportunidade oferecida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida. Ao INmet e a Embrapa Trigo - Passo Fundo pela disponibilização dos dados climáticos.

A Prof^a Marcia Xavier Peiter, uma grande amiga e orientadora. Agradeço pela amizade, orientações e ensinamentos. Pessoa que com sabedoria acolhe e protege, e que nos momentos certos nos concede seus conselhos e ensinamentos. Fica aqui, o CARINHO e o RESPEITO.

Ao Prof. Adroaldo Dias Robaina pela oportunidade e orientação proporcionadas durante este período, que transformaram nosso convívio em uma grande amizade. Fica aqui o meu agradecimento pelos ensinamentos que levarei comigo por toda a minha vida. Obrigada pela paciência, dedicação, incentivo, enfim, obrigada por fazer parte do meu crescimento profissional e pessoal. MEU RESPEITO e ADMIRAÇÃO!

Às maravilhosas pessoas que conheci neste período em especial a grande amiga e pessoa Fátima Cibele Soares, pela presença constante, incentivo, amizade e contribuição. E a Ana Rita Costenaro Parizi, que apesar do relativo pequeno período de convívio muito de meu carinho angariou com sua força, vontade e dedicação.

A Taíse e Rogério que estiveram presentes em muitos momentos para conversas, conselhos e ajudas. Ao seu Luiz, funcionário do Laboratório de Engenharia de Irrigação que a cada dia prova seu companheirismo e amizade por todos nós. Ao funcionário Estevão do PPGEA, pela sempre presente cordialidade e disposição.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Engenharia de Irrigação, em especial, ao Ricardo Schons, Adriana Gindri Salbego, Natália Schwab e Mario Nunes pela colaboração e amizade.

Enfim, agradeço a todos aqueles que me acompanharam durante este período e que, de alguma forma contribuiram para a realização deste trabalho. Saibam que apesar deste momento marcar o findar de um período, muitos outros passaremos juntos...

Muito Obrigado...

"A vida não dá e nem empresta, não se comove e nem se apieda. Tudo quanto ela faz é retribuir e transferir aquilo que nós lhe oferecemos".

Osho

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

RESPOSTA DA IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR EM DIFERENTES CENÁRIOS PARA A CULTURA DA SOJA NA MICRORREGIÃO DE PASSO FUNDO, RS.

Autora: Gisele Aparecida Vivian

Orientadora: Marcia Xavier Peiter

Santa Maria, Agosto de 2010.

O manejo da água na agricultura deve propiciar ao produtor vantagens quanto ao uso da água, aumentando a produtividade das culturas, com redução dos custos de produção, potencializando seu uso sustentável. Neste foco, o presente trabalho objetiva quantificar a lâmina de irrigação suplementar requerida pela cultura da soja na microrregião de Passo Fundo. Simulando combinações de datas de semeadura e duração do ciclo da cultura e, determinando o cenário com mais elevada probabilidade de ocorrência de aplicação de menor lâmina de irrigação, estudando também o efeito em termos de rendimento da aplicação de diferentes percentuais de lâmina de irrigação. O estudo baseou-se nas safras 93/94 a 06/07, utilizando-se do modelo WINISAREG para determinação das lâminas de irrigação suplementar. Realizando análise de variância e teste de comparação de médias para as interpretações e determinação da combinação data de semeadura e duração do ciclo da cultura que apresenta-se mais favorável em termos de menores necessidades de complementação hídrica. Utilizou-se também de funções de rendimento relativo para o estudo do efeito de percentuais variáveis da lâmina suplementar no rendimento relativo da cultura da soja. Observou-se que todos os cenários demonstraram necessidade de complementação hídrica, com necessidades de aplicação de lâmina de irrigação variando de 54.1 a 429.9 mm, sendo que as culturas com duração de ciclo médio e tardio e semeadura em 15/12 necessitaram de menores lâminas de irrigação suplementar comparadas às demais combinações simuladas. As funções de rendimento em relação à lâmina aplicada demonstraram reduções de rendimento máximas entre 25 a 42%, dependendo do cenário estudado. Conclui-se que a distribuição das precipitações pluviais na microrregião é elevadamente variável no tempo e espaço, verificando-se a necessidade de aplicação de lâmina de irrigação suplementar, independentemente da safra e do cenário simulado, sendo o rendimento relativo cultura mais afetado quanto menor o percentual de lâmina de irrigação suplementar aplicado.

Palavras-Chave: Restrição Hídrica; *Glycine max* (L.); Rendimento; WINISAREG.

ABSTRACT

Masters Dissertation

Agricultural Engineering Post Graduation Program

Santa Maria Federal University, RS, Brazil

RESPONSE OF SUPPLEMENTARY IRRIGATION IN DIFFERENT SCENARIOS FOR THE CULTURE OF SOYBEAN IN THE MICROREGION OF PASSO FUNDO, RS.

Author: Gisele Aparecida Vivan

Advisor: Marcia Xavier Peiter

Santa Maria, August 2010.

The management of water in agriculture should offer advantages to producers in the use of water, increasing crop productivity, reduced costs of production, enhancing their sustainable use. In this focus, this paper aims to quantify the additional irrigation required by the soybean crop in the microregion of Passo Fundo. Simulating combinations of sowing dates and duration of the crop cycle, determining the scenario with higher probability of application of smaller irrigation, also studying the effect in terms of yield of applying different rates of irrigation. The study was based on the agricultural years 93/94 to 06/07, using the model WINISAREG to determine the supplemental irrigation. Performing analysis of variance and comparison test of means for the interpretation and determination of the combination of sowing date and duration of crop cycle that has become more favorable in terms of reduced need for supplemental irrigation. Was used also functions of yield to the study of the effect of varying of the blade on the additional yield for the soybean crop. It was noted that all scenarios demonstrated need for additional water, with application requirements for water ranging from 54.1 to 429.9 mm, and the cultures with life cycle middle and late seeding in 15/12 required smaller blades supplemental irrigation compared to other combinations simulated. The functions of income in relation to irrigation depth showed maximum yield reductions between 25-42%, depending on the scenario studied. Concludes that the distribution of rainfall is high variable in space and time, verifying necessity of applying additional irrigation, regardless of the sowing date and the simulated scenario, being the yield on culture, most affected as lower the percentage of supplemental irrigation applied.

Keywords: Water Restriction; *Glycine max* (L.); Yield; WINISAREG.

LISTA DE TABELAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 01- Dados de capacidade de campo e ponto de murcha permanente relativos a diferentes camadas de um Latossolo Vermelho Distrófico Típico..... | 40 |
| TABELA 02 - Data de início dos estádios de desenvolvimento da cultura da soja, considerando semeadura em 15/10 para culturas de ciclo precoce médio e tardio e profundidades do sistema radicular e fração p para cada estádio..... | 41 |
| TABELA 03 - Data de início dos estádios de desenvolvimento da cultura da soja, considerando semeadura em 15/11 para culturas de ciclo precoce médio e tardio e profundidades do sistema radicular e fração p para cada estádio..... | 42 |
| TABELA 04 - Data de início dos estádios de desenvolvimento da cultura da soja, considerando semeadura em 15/12 para culturas de ciclo precoce médio e tardio e profundidades do sistema radicular e fração p para cada estádio..... | 42 |
| TABELA 05 - Valores de lâmina média de irrigação suplementar (mm) requeridas para a cultura da soja em cada combinação de duração do ciclo da cultura e data de semeadura, seguidos de seus desvios..... | 57 |
| TABELA 06 - Análise da Variância para experimento bifatorial, sendo Fator A (data de semeadura) e Fator D (duração do ciclo da cultura)..... | 60 |
| TABELA 07 - Teste Tukey para comparação de médias, considerando os níveis do fator D (duração do ciclo da cultura) dentro do fator A (data de semeadura)..... | 60 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 01 - Mapa de produtividade média municipal para a cultura da soja no estado do Rio Grande do Sul para o período agrícola 2004-2008..... | 20 |
| FIGURA 02 - Distribuição das áreas com agricultura irrigada por região brasileira no ano de 2001..... | 24 |
| FIGURA 03 - Evolução das áreas irrigadas no Brasil do ano de 1950-2001..... | 25 |
| FIGURA 04 - Localização espacial da área de estudo..... | 34 |
| FIGURA 05 - Tela de inicialização do modelo WINISAREG..... | 38 |
| FIGURA 06 - Tela principal do modelo com a apresentação das pastas referentes aos dados de solo, clima e cultura e, série dos dados inseridos para o início da simulação..... | 38 |
| FIGURA 07 - Mapa representativo dos principais tipos de solo encontrados na microrregião de Passo Fundo..... | 39 |
| FIGURA 08 - Determinação da duração dos estádios de desenvolvimento para a cultura da soja, em seus ciclos precoce, médio e tardio..... | 41 |
| FIGURA 09 - Estrutura genérica do modelo WINISAREG..... | 47 |
| FIGURA 10 - Valores de precipitação média (mm) com seus desvios para o intervalo entre safras 1993-2007, para as combinações de data de semeadura e duração do ciclo da cultura..... | 52 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 11 - Distribuição temporal da precipitação total ocorrida (mm) em cada safra para a combinação de data de semeadura e duração do ciclo da cultura..... | 54 |
| FIGURA 12 - Valores simulados a partir do modelo WINISAREG de lâmina suplementar média (mm) requerida para a cultura da soja nas safras de 1993 a 2007 considerando a combinação data de semeadura e duração do ciclo da cultura..... | 56 |
| FIGURA 13 - Distribuição temporal das necessidades de aplicação de lâmina de irrigação suplementar considerando a combinação data de semeadura e duração do ciclo da cultura para as safras de 93/94..... | 58 |
| FIGURA 14- Diagramas relativos às frequências absolutas de eventos de aplicação de lâminas de irrigação suplementar considerando as diferentes combinações de data de semeadura e duração do ciclo da cultura para o período entre safras entre 1993 a 2007..... | 61 |
| FIGURA 15 - Representação do número de eventos de irrigação necessários para a combinação de data de semeadura e duração do ciclo da cultura para o período entre safras 03/04 a 06/07..... | 62 |
| FIGURA 16 - Distribuição temporal do número de eventos de irrigação necessários para a aplicação da lâmina requerida na cultura da soja considerando as combinações de data de semeadura e duração do ciclo da cultura para o período entre safras 03/04 a 06/07..... | 63 |
| FIGURA 17 - Rendimento relativo em função do percentual de lâmina média de irrigação simulada aplicada para o período em estudo, nas diferentes combinações data de semeadura e duração do ciclo da cultura..... | 65 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Δh | - Variação da armazenagem de água (mm) |
| D | - Drenagem interna (mm) |
| ET | - Evapotranspiração (mm) |
| Rd | - Deflúvio superficial (mm) |
| Q_{r1} | - Escoamento superficial (mm) |
| G | - Contribuição da água subterrânea (mm) |
| R | - Água disponível para as plantas (mm) |
| θ_s | - Umidade de saturação (mm^3/mm^3) |
| θ_{cc} | - Umidade na capacidade de campo (mm^3/mm^3) |
| θ_p | - Umidade ótima (mm^3/mm^3) |
| θ_{pm} | - Umidade no ponto de murcha permanente (mm^3/mm^3) |
| $R_{m\acute{a}x.}$ | - Limite superior da zona de rendimento ótimo (mm) |
| $R_{m\acute{i}n.}$ | - Limite inferior da zona de rendimento ótimo (mm) |
| CAD | - Água total disponível do solo (mm) |
| Z | - Profundidade radicular (m) |
| P | - Fração de depleção de água ou coeficiente de depleção |
| FAD | - Fração de água do solo realmente disponível |
| Kc | - Coeficiente de cultura |
| ETo | - Evapotranspiração de referência (mm) |
| ETa | - Evapotranspiração Real (mm) |
| ETm | - Evapotranspiração Máxima (mm) |
| ETc | - Evapotranspiração cultural (mm) |
| Ky | - Fator de resposta do rendimento |
| Ya | - Rendimento Real (kg/ha) |
| Ym | - Rendimento Máximo (kg/ha) |
| ΔR | - Variação do volume de água armazenada num intervalo de tempo (mm/s) |

- P** - Precipitação (mm)
- Pe** - Precipitação efetiva (mm)
- Rg** - Irrigação (mm)
- Ac** - Ascensão capilar (mm)
- Es** - Escoamento superficial (mm)
- Dr** - Perdas por drenagem e percolação profunda (mm)
- Δt** - Variação do tempo (s)
- Vr** - Entrada de água no sistema (mm)
- V** - Volume de água nas camadas no final do intervalo considerado (mm)
- Drp** - Volume de água perdido (mm)
- Zm** - Profundidade radicular máxima (m)
- PV** - Volume de água que aflui ao sistema (mm)
- RFU** - Volume de água utilizável (mm)
- ti e tf*** - Valores de tempo no início e no fim dos intervalos considerados (s)

LISTA DE APÊNDICES

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| APÊNDICE A - Representação da distribuição da umidade nas camadas do perfil do solo (a) e da distribuição da água disponível nas camadas do perfil de solo (b), obtidas a partir do modelo WINISAREG..... | 79 |
| APÊNDICE B - Evolução temporal do coeficiente de cultivo (Kc), para as combinações de duração de ciclo da cultura e data de semeadura simuladas, obtidos a partir do modelo WINISAREG..... | 80 |
| APÊNDICE C - Dados climáticos de saldo de radiação, umidade relativa média, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação e velocidade do vento em base diária para o período entre safras 1993-2007..... | 81 |
| APÊNDICE D - Evolução temporal dos valores de saldo de radiação, umidade relativa média, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação e velocidade do vento para o período entre safras 1993-2007 em escala mensal..... | 86 |

SUMÁRIO

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1.1 Objetivos..... | 18 |
| 1.1.1 Objetivo geral..... | 18 |
| 1.1.2 Objetivos específicos..... | 18 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 19 |
| 2.1 Considerações gerais | 19 |
| 2.2 Fatores de produção da cultura da soja | 21 |
| 2.3 Irrigação - Importância na produção agrícola..... | 23 |
| 2.3.1 Manejo de sistemas de irrigação | 26 |
| 2.3.2 Balanço hídrico | 28 |
| 2.3.3 Modelos de simulação do balanço hídrico | 29 |
| 2.4 O modelo WINISAREG..... | 31 |
| 2.5 Funções de rendimento para a cultura da soja | 32 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 34 |
| 3.1 Descrição da área de estudo..... | 34 |
| 3.2 O modelo WINISAREG..... | 35 |
| 3.2.1 Balanço hídrico do solo | 35 |
| 3.2.2 Dados de entrada no modelo | 38 |
| 3.2.3 Disponibilidade hídrica e rendimento da cultura..... | 42 |
| 3.2.4 Formulação dos cenários no WINISAREG..... | 43 |
| 3.2.5 Intervalos de tempo..... | 45 |
| 3.2.6 Variação temporal do volume de água armazenada no solo | 45 |
| 3.2.7 Cálculo da evapotranspiração cultural | 46 |
| 3.3 Rendimento relativo em função das lâminas de irrigação suplementar | 47 |
| 3.3.1 Rendimentos máximos | 48 |
| 3.3.2 Evapotranspiração | 48 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.3 Rendimento Real..... | 49 |
| 3.3.4 Fator de resposta da cultura | 49 |
| 3.3.5 Redução de rendimento em função do déficit de evapotranspiração relativo | 50 |
| 3.4 Análise de Variância | 50 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 52 |
| 4.1 Distribuição temporal das precipitações pluviais..... | 52 |
| 4.2 Necessidades de lâmina de irrigação suplementar..... | 55 |
| 4.2.1 Análise temporal das necessidades de lâmina suplementar..... | 55 |
| 4.2.2 Análise das lâminas de irrigação suplementar..... | 59 |
| 4.2.3 Análise de freqüência dos eventos de aplicação de lâmina suplementar | 61 |
| 4.3 Número de eventos de irrigação | 62 |
| 4.4 Rendimentos relativos em função das lâminas aplicadas | 64 |
| 5 CONCLUSÕES..... | 67 |
| 6 SUGESTÕES | 68 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 68 |
| APÊNDICES | 78 |

1 INTRODUÇÃO

A água é um bem escasso não somente nas regiões áridas, mas também, em regiões como o Sul do Brasil, onde as precipitações são relativamente abundantes, porém insuficientes para algumas culturas no transcorrer de seu ciclo. No estado do Rio Grande do Sul, verifica-se pelas séries históricas de precipitação pluvial que a altura de lâmina de chuva total precipitada durante o período de safra é suficiente numericamente para atender à demanda da cultura.

No entanto, existem registros de quebras parciais e totais de safra em várias regiões do estado em função das estiagens ou “veranicos” que são períodos de déficit de chuva e que ocorrem, muitas vezes, nos estádios de maior susceptibilidade hídrica da cultura. Exemplos disto podem ser encontrados nos registros da safra de 2004/2005 entre muitas outras. Desta forma, se considerados os altos investimentos necessários para a implantação dos cultivos agrícolas, reduções de produção implicam em aumento de risco para a atividade agropecuária.

Em regiões susceptíveis a estiagens no período de safra, o risco da atividade agrícola é inversamente proporcional à frequência destes eventos. Sendo, a análise da viabilidade de implantação de sistemas de irrigação fundamental, pois desta foram são tomadas consideração no que diz respeito os diversos sistema disponíveis e a opção pelo que apresente-se mais eficiente técnica e economicamente.

Na produção comercial da cultura da soja, a disponibilidade hídrica é o principal fator limitante ao rendimento da cultura, sendo a precipitação pluvial em muitas safras não suficiente para o atendimento da demanda potencial da cultura em todas as regiões do Estado.

Modificações de datas de semeadura e na escolha por culturas com diferente duração de ciclo podem interferir nas necessidades hídricas totais. A complementação hídrica adequada no período onde a deficiência é mais severa pode ser manejada de modo a minimizar as perdas de produtividade decorrentes da escassez.

A utilização de modelos de simulação na agricultura tem sido importante ferramenta para a previsão de resultados do manejo de sistemas sob determinadas condições ambientais, possibilitando a análise de diferentes cenários combinando fatores como data de semeadura, duração do ciclo da cultura e lâminas de irrigação requeridas para atingir um determinado nível de produção.

As funções de rendimento da água são particularmente importantes para as análises de produção agrícola quando a água é escassa. Para o processo de planejamento, essas funções

constituem o elemento básico de decisão dos planos de manejo e operação de projetos de irrigação, permitindo a tomada de decisões sobre planos ótimos de cultivo e ocupação de área para produção econômica com base na água disponível.

Sendo assim busca-se propor um procedimento metodológico que auxilie na tomada de decisões quanto ao planejamento e manejo agrícola visando a implementação da irrigação suplementar para a cultura da soja na microrregião de Passo Fundo, RS.

1.1 Objetivos

Diante das considerações apresentadas, o presente trabalho, tem por objetivo:

1.1.1 Objetivo geral

- Quantificar e analisar as demandas de irrigação suplementar, com base nas safras agrícolas de 1993 a 2007 para a cultura da soja na microrregião de Passo Fundo, realizando a simulação de cenários para as combinações de datas de semeadura e duração dos ciclos da cultura, determinando lâminas requeridas e as funções de rendimento relativo decorrentes da aplicação de percentuais da lâmina de irrigação requerida.

1.1.2 Objetivos específicos

- Coletar as séries de dados climatológicos para o período 1993-2007, além dos dados referentes aos principais tipos de solo que formam a microrregião com sua quantificação e espacialização e dados da cultura da soja, com especial interesse para datas de semeadura e duração de ciclo da cultura;
- Simular o modelo WINISAREG para a determinação da lâmina de irrigação suplementar requerida para a cultura da soja na microrregião de Passo Fundo;
- Determinar a combinação data de semeadura e duração do ciclo da cultura mais atrativa em termos de menor necessidade de aplicação de lâmina de irrigação suplementar;
- Determinar o rendimento relativo para os diversos cenários simulados em função das lâminas de irrigação suplementar médias requeridas para a cultura da soja na microrregião.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Considerações gerais

A cultura da soja conforme a sua classificação botânica pertence à família Fabaceae, subfamília Faboideae, espécie *Glycine max* (L.). Tratando-se de uma planta nativa da Ásia, considerada uma das culturas mais antigas daquela área. Sua origem seria na China, entre latitudes de 30° a 45° N, nas regiões norte e central (COSTA, 1996; MUNDSTOCK & THOMAS, 2005).

No Brasil, a introdução da cultura ocorreu a partir da Bahia por Gustavo D'Utra, em 1882, com sementes trazidas dos Estados Unidos. Entretanto, os primeiros relatos do seu cultivo comercial no Rio Grande do Sul datam de 1924. O ano de 1936 marcou o início da expansão da cultura neste Estado e, em 1941, a soja aparecia pela primeira vez nas estatísticas agrícolas estaduais oficiais (COSTA, 1996).

A partir da segunda metade da década de 1960, a área cultivada aumentou consideravelmente, fato que se deve em especial ao aproveitamento da infra-estrutura utilizada no cultivo do trigo, que permanecia ociosa no período de estação quente, e a boa adaptação das cultivares originários do sul dos Estados Unidos (EMBRAPA, 1981; COSTA, 1996). No início dos anos 70, o estado do Paraná tornou-se grande produtor e a partir de 1980 ocorreu elevada expansão para a região Centro-Oeste do país, caracterizada por condições edáficas e climáticas privilegiadas.

A cultura da soja constitui-se em um dos principais cultivos da agricultura mundial e brasileira, com alto potencial produtivo e valor nutritivo, o que lhe confere multiplicidade de aplicações na alimentação humana e/ou animal, com relevante papel sócio-econômico, constituindo-se em matéria-prima indispensável para impulsionar diversos complexos agroindustriais (GOMES, 2007).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2005), a área de cultivo de soja na safra 2005/2006 foi de 23 milhões de hectares, sendo considerada a cultura de maior relevância nas exportações de grãos do país. No balanço mundial do mercado da soja, o Brasil tem se destacado como o segundo maior produtor e exportador de grãos da leguminosa nos últimos oito anos (NEHMI et al., 2004). Tendo em 2005, produzido 51 milhões de toneladas (IBGE, 2005) e exportado 23 milhões de toneladas (BLACKBURN, 2005).

A cultura apresenta fundamental papel como fonte de riqueza de forma direta (geração de renda ao produtor) e indireta (geração de empregos, crescimento e desenvolvimento local, regional, nacional e mundial) ao longo de sua cadeia de produção. Desta forma, o complexo agroindustrial da soja tem contribuído com um superávit considerável na balança comercial brasileira (FARIAS et al., 2001).

No Rio Grande do Sul a soja é a principal cultura agrícola, com a maior área de cultivo nacional, algo atualmente em torno de três milhões de hectares, sendo cultivada em 32 microrregiões geográficas, respondendo por aproximadamente 20% da produção de grãos do Estado (MELO, 2005).

Atualmente, com a modernização da agricultura e busca por otimização dos processos produtivos, a cultura da soja, vem passando por modificações, em especial no Estado do Rio Grande do Sul, com o uso de formas de manejo alternativo e otimizado a fim de se elevarem os índices de produtividade, que atualmente, encontram-se bastante reduzidos.

Segundo Vivian et. al (2010) no período de 2004-2008 o estado do Rio Grande do Sul apresentou uma produtividade média de 1570 kg/ha, enquanto a média brasileira esteve acima das 2500 kg/ha. O que pode ser apontado como fator preocupante quanto à susceptibilidade da permanência da cultura no estado, ao menos no que diz respeito às vastas áreas cultivadas com rendimentos reduzidos. A Figura 01 apresenta o mapa com os rendimentos relativos médios da cultura da soja para o estado do Rio Grande do Sul no período agrícola 2004-2008.

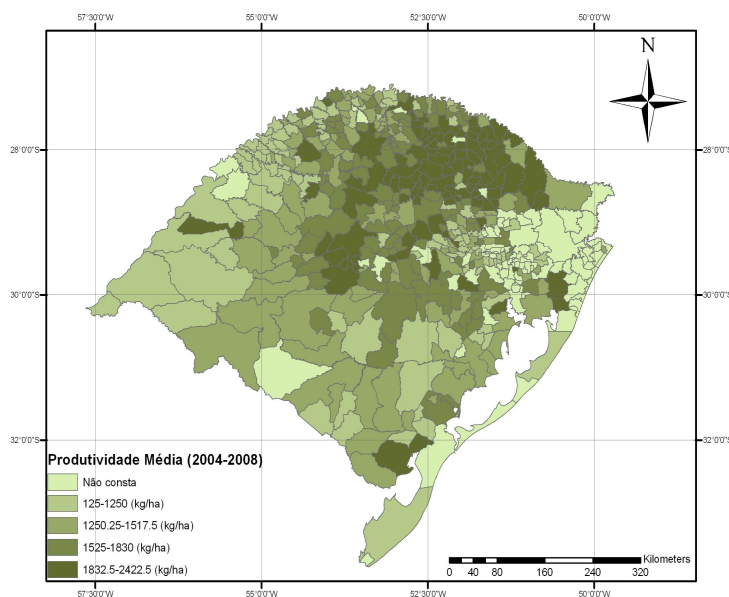


Figura 01. Mapa de produtividade média municipal para a cultura no estado do Rio Grande do Sul para o período agrícola 2004-2008.

Fonte: VIVAN et al. (2010).

Segundo Vivan et al. (2010) os reduzidos níveis de produtividade apresentados pelo estado expressam a necessidade da incorporação de técnicas mais eficientes de condução da atividade agrícola, dentre as quais sobressai o manejo de irrigação suplementar.

Cita-se que segundo Michelon (2005), nos últimos anos têm-se observado um significativo aumento da irrigação por aspersão no estado, estimando-se que a área irrigada através de pivô central, esteja próxima dos 35 a 40 mil hectares. Fato que reflete a busca pela modernização, planejamento e empresariamento da agricultura.

2.2 Fatores de produção da cultura da soja

Em áreas agrícolas, sob os mais diversos cultivos, o suprimento de água às plantas depende da quantidade e distribuição sazonal das precipitações pluviais. Isso significa que o clima é o principal determinante de risco de frustração e oscilação da produção e produtividade agrícola.

Os parâmetros climáticos exercem influência em todos os estágios dos processos agrícolas, desde o preparo do solo, semeadura, crescimento das plantas e colheita até o armazenamento, transporte e comercialização (AYOADE, 1986).

No estado do Rio Grande do Sul, o cultivo da soja é realizado sob condições ambientais variadas e predominantemente sem irrigação (RODRIGUES, 2001). No entanto, a frequência e a intensidade das chuvas, no período de desenvolvimento da cultura, na média dos anos, não é suficiente para que as plantas de soja manifestem seu total potencial produtivo (REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 2005).

A cultura da soja apresenta necessidade hídrica crescente durante o desenvolvimento da planta, atingindo o pico durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm/dia) e, decrescendo após esse período. Déficits hídricos expressivos, durante tais estádios, provocam alterações fisiológicas na planta, como o fechamento estomático e o enrolamento de folhas e, como consequência, a queda prematura de folhas e de flores e abortamento de vagens, resultando, por fim, em redução do rendimento de grãos (EMBRAPA, 1999).

A água constitui aproximadamente 90% do peso da plantas de soja, atuando em processos fisiológicos e bioquímicos, desempenhando a função de solvente, através do qual, gases, minerais e outros solutos entram nas células e movem-se pela planta. Tendo papel fundamental na regulação térmica, agindo tanto no resfriamento como na manutenção e distribuição do calor (KUDREV, 1994).

Para uma produtividade considerável a necessidade hídrica para o desenvolvimento da cultura da soja situa-se entre 450 a 850 mm por ciclo, esta larga faixa deve-se as em especial as variações do clima e da duração do período de crescimento da cultura (DOORENBOS & KASSAN, 1979; REICHARDT, 1987).

De acordo com a duração de seu ciclo, as cultivares de soja podem ser classificadas como precoces (até 115 dias), semi-precoces (116 a 125 dias), médias (126 a 137 dias), semi-tardias (138 a 150 dias) e tardias (> 150 dias) (EMBRAPA, 2007). Contudo, a duração do ciclo pode variar quando a cultura é exposta a diferentes condições de clima, faixas de latitude, altitudes, entre outros (FUNDAÇÃO CARGILL, 1986).

Outro fator condicionante a ser considerado é a época da semeadura, que, para da cultura da soja, tem sido baseada em condições climáticas que favoreçam a obtenção de altos rendimentos de grãos. No entanto, em algumas situações, não é possível realizar a semeadura na época recomendada, o que pode provocar perdas na produtividade, em especial, quando estas não são contornadas com sistemas de manejo corretivo.

Em geral, as agências de pesquisa em agropecuária fornecem anualmente aos produtores os resultados dos ensaios regionais de cultivares onde os elementos relacionados ao desenvolvimento morfofisiológico de cada uma delas é avaliado, compondo a base de recomendação de semeadura. Normalmente, estes resultados são também cruzados com elementos meteorológicos resultando no zoneamento agroclimático que é o fracionamento do território em regiões caracterizadas como preferenciais marginais ou não-recomendadas para uma determinada cultivar.

Nas semeaduras tardias em relação à época preferencial (meados de novembro), estresses durante o final do período vegetativo e início do reprodutivo, também contribuem para a redução na produção de grãos (BOARD, KAMAL & HARVILLE, 1992; BOARD & TAN, 1995; BOARD & HARVILLE, 1998).

Diferentes cultivares de soja respondem de maneira diferenciada à irrigação e a população de plantas, em função do ciclo e de características intrínsecas a cada cultivar. Doss & Thurlow (1974) concluíram que dentre os fatores que influenciam no rendimento da soja como irrigação, população de plantas, espaçamento entre linhas e variedade, a irrigação e a variedade são os fatores que mais contribuíram para modificações em termos de rendimento.

Mota et al. (1996) indicaram que a disponibilidade de água é o principal fator limitante ao rendimento de soja e que a precipitação natural não atende a demanda potencial de água para essa cultura, em todas as regiões do estado do Rio Grande do Sul.

A reduzida disponibilidade hídrica e a distribuição irregular das precipitações pluviais, que, em muitas vezes, coincidem com a fase crítica das culturas nas diferentes regiões do RS, são as principais variáveis meteorológicas determinantes de oscilações no rendimento de grãos da cultura da soja (MOTA et al., 1991; MOTA et al., 1996; CUNHA et al., 1998; BERLATO & FONTANA, 1999).

2.3 Irrigação - Importância na produção agrícola

O uso de água na agricultura é responsável por grande parcela da produção mundial de alimentos, aponta-se que a agricultura irrigada utiliza em torno de 18% (275 milhões de hectares) da área total cultivada no planeta (1,5 bilhão de hectares), consumindo cerca de 70% do total de água de qualidade, valor superior à quantidade consumida pelo setor industrial (21%) e pelo consumo doméstico (9%) (SANTOS, 1998).

No Brasil o suprimento das necessidades de irrigação das culturas pode ser abordado em dois patamares, o primeiro, em locais onde os sistemas de irrigação são forma necessária para o provimento de água às culturas, como no semi-árido. No outro patamar, encontram-se regiões onde a irrigação surge de forma complementar as necessidades hídricas das culturas, atendendo a estas quando a precipitação não coincidir com a necessidade específica da cultura em uma dada fase de seu desenvolvimento, mas ambos buscam potencializar o uso do fator água de modo a reduzir as perdas decorrentes da deficiência hídrica.

Neste âmbito cita-se o caso da região Sul do Brasil, em especial o caso do estado do Rio Grande do Sul, com a cultura da soja, onde a utilização da irrigação complementar pode vir a proporcionar elevações nos índices de produtividade e conseqüentemente dos lucros advindos da produção.

Em regiões semi-temperadas, como o caso do Rio Grande do Sul, onde a agricultura é dependente da aleatoriedade das chuvas, a prática da irrigação complementar representa a estratégia mais eficiente para a obtenção e manutenção de altos rendimentos na produção agrícola (BERLATO, 1992).

Segundo Couto (2003), a produtividade da agricultura irrigada apresenta-se 2,4 vezes superior a da agricultura de sequeiro, sendo que no Brasil a agricultura irrigada utiliza-se de em torno de três milhões de hectares, distribuídos em Norte 3%, Nordeste 19%, Sudeste 30%, Sul 41% e Centro-Oeste 7%. A Figura 02 apresenta a distribuição das áreas irrigadas (ha) para as regiões do Brasil no ano de 2001.

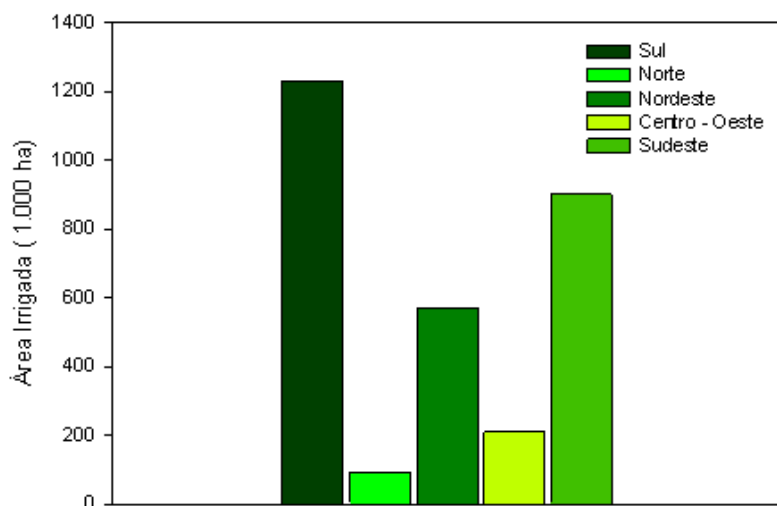


Figura 02. Distribuição das áreas com agricultura irrigada (ha) por região brasileira no ano de 2001. Fonte: Adaptado de COUTO (2003).

A utilização da irrigação na agricultura consiste em um método artificial de suprimento das necessidades hídricas da planta, em caráter total ou suplementar, muitas vezes viabilizando o cultivo de espécies de plantas em locais onde, sem sua aplicação, a produção seria de difícil condução.

Assim, com o desenvolvimento tecnológico e a criação de diferentes métodos de manejo agrícola, a irrigação tornou-se uma aliada na busca pela eficiência de produção, modernidade e qualidade dos produtos.

Aponta-se que em dadas regiões a incorporação e expansão das áreas irrigadas estão associadas à necessidade de elevação dos níveis de produtividade, uma vez que a expansão horizontal da agricultura está praticamente esgotada e/ou torna-se substancialmente onerosa em termos monetários.

Quanto aos aumentos de produtividade advindos da irrigação cita-se que nos Estados Unidos, a produção de um hectare de terra irrigada equivale aproximadamente à produção de três e meio hectares de culturas de sequeiro (LEO & HERNANDEZ, 2001), o que vem a subsidiar a questão de aumentos de produção, sem aumentos de área de cultivo.

De acordo com Christofidis (2002), a importância da agricultura irrigada pode ser contemplada através dos dados da superfície agrícola mundial colhida no ano de 2000, que correspondeu a uma área da ordem de 1,5 bilhões de hectares, sendo que desta área, cerca de 275 milhões estavam sob irrigação. A superfície produtiva agrícola sob sequeiro, em torno de 1.225 bilhões de hectares, foi responsável por 58% do total colhido, enquanto a superfície

agrícola irrigada, corresponde a 18% da área total sob produção agrícola, possibilitando cerca de 42% do total colhido. A Figura 03 apresenta a evolução das áreas irrigadas (ha) no Brasil para o período de 1950 a 2002.

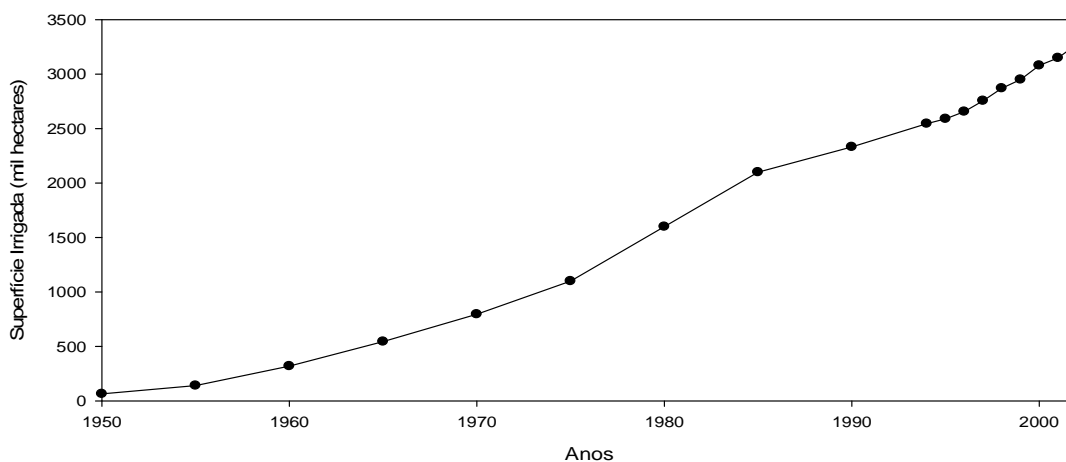


Figura 03. Evolução das Áreas Irrigadas no Brasil de 1950-2001.
Fonte: Adaptado de CHRISTOFIDIS (2002).

Quanto à geração de empregos, estima-se que no Brasil o setor da agricultura irrigada seja responsável por pelo menos 1,6 milhões de empregos diretos e 3,2 milhões de empregos indiretos; números que apresentam grande potencial de crescimento pela tendência de ampliação das áreas cultivadas com culturas irrigadas (ANA, 2004).

Outro fato contemplável na questão da agricultura irrigada é a modernização agrícola, onde o gerenciamento eficiente e o uso de tecnologias visando à redução de custos e aumento de produtividade passam a ter especial importância para a participação dos produtores em mercados cada vez mais globalizados e competitivos, dentre estes, salienta-se o uso da irrigação, em especial devido a reduções e/ou variações expressivas dos níveis pluviométricos no decorrer de uma mesma safra ou entre safras.

Reduções dos níveis pluviométricos associam-se a deficiência hídrica em determinadas culturas, fato que se torna mais ainda mais significativo dependendo da fase dentro do ciclo da cultura que esta venha a ocorrer.

Cita-se que Shaw & Laing (1965), Doss, Pearson & Roggers (1974) e Sionit & Kramer (1977) que obtiveram significativa redução do rendimento da soja quando impuseram deficiência hídrica durante o período de enchimento de grãos e Shaw & Laing (1965) que

também observaram redução do tamanho da semente com a ocorrência de deficiência hídrica durante o período de formação de grãos.

Cabe salientar-se que na agricultura de sequeiro, o risco de ocorrência de estiagem nos períodos críticos da lavoura está sempre presente, tornando a atividade agrícola um empreendimento com certo grau de incerteza. Principalmente nas regiões onde a distribuição de chuvas é irregular e a frequência de veranicos é grande (ANA, 2004).

Nestes locais, ocorre receio pela realização de investimentos na aquisição de fatores de produção e geralmente as produtividades obtidas são baixas. Por outro lado, com a irrigação esse fator de risco é reduzido, possibilitando aplicação de níveis elevados de insumos para obtenção de produtividades também altas. Essa segurança conseguida através da irrigação possibilita também um melhor planejamento da produção permitindo a realização de contratos entre produtores, agroindústrias e distribuidores.

A irrigação, portanto, apresenta-se como forma de melhor planejar a produção, possibilitando o escalonamento e a maximização produtiva, com maior segurança de altas produtividades e produtos de melhor qualidade.

2.3.1 Manejo de sistemas de irrigação

No âmbito dos recursos hídricos, a agricultura irrigada é considerada a principal usuária de água, responsabilizando-se pelo uso de aproximadamente 61% do volume total utilizado no país. Sendo que dentre os principais problemas encontrados na agricultura irrigada merecem destaque a reduzida eficiência da utilização das técnicas de manejo de irrigação, com desperdício de água e energia e a utilização por um grande número de irrigantes de sistemas de produção e de tecnologias desenvolvidas para a agricultura de sequeiro. Outro grande equívoco que tem sido cometido é com relação à escolha do método e do sistema de irrigação (ANA, 2004).

O manejo de um sistema irrigado envolve a escolha do método de aplicação, do momento e da quantidade de água a ser aplicada na irrigação (PEITER, 1998). Assim, os métodos determinam a forma com que a lâmina irá ser aplicada às culturas, sendo associado a cada método um ou mais sistemas, onde a escolha do conjunto mais adequado depende de fatores tais como a topografia (declividade do terreno), tipo de solo (taxa de infiltração), cultura (sensibilidade da cultura ao molhamento) e clima (frequência e quantidade de precipitações, temperatura e efeitos do vento).

O correto manejo da irrigação, para obtenção de produtividades viáveis é aquele em que se aplica água no solo, no momento oportuno e em quantidades suficientes para suprir as necessidades hídricas da cultura, sem falta ou desperdício de energia (VILLA NOVA, 1991).

A agricultura irrigada requer elevados investimentos em sistemas e equipamentos de irrigação e, independentemente do tamanho do estabelecimento, exige a utilização de tecnologia de produção. Desta forma, cada vez mais a agricultura irrigada deverá buscar a racionalização do uso da água, o aumento da produtividade física, a melhoria da qualidade dos produtos, o atendimento as estratégias de mercado, aos aspectos relacionados à pós-colheita e comercialização e a sustentabilidade dos sistemas do ponto de vista ambiental, econômico e social.

Segundo Fernandez & Turco (2003), a irrigação para dar resultados positivos deve ser bem quantificada, pois aplicações de lâminas de água insuficientes repõem a água apenas nas camadas superficiais do solo, não umedecendo toda a zona das raízes, tornando-as superficiais e incapazes de explorar o volume de solo disponível. Como consequência vê-se a redução considerável da reserva hídrica útil do solo, prejudicando as plantas, desperdiçando recursos valiosos e aumentando os custos da água aplicada.

Quanto aos custos da irrigação, é sabido que a aplicação de lâmina de forma inadequada acentua consideravelmente os custos de produção, estabelecendo um forte desequilíbrio na relação custo-benefício da área irrigada (CARLESSO et al., 2000), visto que na irrigação, como em qualquer atividade agrícola, a meta principal é a obtenção do máximo retorno econômico.

Na agricultura não-irrigada os impactos da deficiência hídrica podem ser parcialmente minimizados através do planejamento da atividade agrícola, orientado as épocas de semeadura de acordo com o regime pluviométrico de cada região, além da utilização de variedades tolerantes e/ou resistentes a curtos períodos de deficiência de água no solo.

Mas tratando-se de culturas que necessitam de complementação hídrica para expor seu máximo potencial produtivo, a questão da aplicação de lâmina no momento e na quantidade ótima se torna ainda mais preponderante, visto que esta deverá suprir a restrição potencializando cada estágio de desenvolvimento da cultura e conseqüentemente a produção final, a fim de produzir dividendos mais significativos.

A água é essencial para a produção das culturas, devendo-se fazer o melhor uso da água disponível, a fim de se obter produção satisfatória e altos rendimentos. O que exige conhecimento adequado do efeito da água de chuva e/ou de irrigação sobre o crescimento das culturas e seu rendimento, em diferentes condições de crescimento.

O limite superior de produção de uma cultura é determinado pelas condições climáticas e por seu potencial genético. Assim, a utilização eficiente da água na produção das culturas só será alcançada quando o planejamento, o projeto e a operação de suprimento de água e do sistema de distribuição, estiverem orientados com o propósito de atender, em quantidade e tempo requeridos, incluindo os períodos de escassez de água, às necessidades hídricas da cultura, para ótimo crescimento e altos rendimentos (DOORENBOS & KASSAM, 1979).

Segundo Begg & Turner (1976), citado por Frizzone (1986), a cultura deve ser conduzida de forma a se conseguir uma máxima eficiência de uso da água. Entretanto, este índice tem pouco significado como indicador econômico. Em termos econômicos pode-se propor a eficiência de uso da água, como sendo a relação entre o ótimo rendimento econômico e a ótima lâmina total de água econômica, ambos obtidos através da função de produção.

2.3.2 Balanço hídrico

A água é o principal fator abiótico que causa variação no rendimento das culturas na maior parte das áreas agrícolas (EITZINGER et al., 2003; OKUYAMA et al., 2004; STRECK et al., 2002). Assim, a estimativa da água disponível no solo para as plantas é parte importante de modelos de crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas agrícolas (DARDANELLI et al., 2004)

O conhecimento do conteúdo de água requerida pela cultura constitui-se em aspecto importante na agricultura irrigada para que haja uma adequada programação de manejo de irrigação. Segundo Hernandez (1994), existem várias metodologias e critérios para estabelecer programas de irrigação, que vão desde simples turnos de rega a completos esquemas de integração do sistema solo-água- planta-atmosfera.

O balanço hídrico trata-se de uma metodologia utilizada para prever a variação do conteúdo de água em uma dada região de solo. Esse método normalmente considera uma condição de água no solo que não deve causar déficit ou excesso ao sistema radicular, contribuindo, portanto, para que a cultura obtenha o máximo rendimento técnico.

Sendo o balanço hídrico de uma cultura, de acordo com Libardi (2000), a contabilização das entradas e saídas de água num dado volume de solo, durante certo período de tempo considerado, o armazenamento de água pelo solo e sua disponibilidade às plantas

dependem de processos dinâmicos, tais como: infiltração, redistribuição interna, drenagem e absorção pelas raízes das plantas. A equação que representa matematicamente o balanço hídrico das culturas é expressa por:

$$\Delta h = P + I \pm D - ET \pm R \quad (1)$$

onde: Δh é a variação da armazenagem de água; P é a precipitação; I é a irrigação; D é a drenagem interna; ET é a evapotranspiração e R é o deflúvio superficial.

Várias metodologias têm sido desenvolvidas para quantificar o balanço hídrico visando o planejamento e o gerenciamento das culturas na agricultura irrigada. Estas metodologias podem ser classificadas, conforme Souza (2001), em modelos pedológicos, baseados na determinação dos teores de água no solo; modelos físicos, que analisam a relação do teor de umidade com a tensão da água no solo; modelos fisiológicos, que relacionam a deficiência hídrica do solo com as reações das plantas; modelos irrigacionistas, que utilizam valores de evapotranspiração determinados por algum método de estimativa, como Penman-Monteith, Thorthwaite, tanque “Classe A” ou outros, e modelos climatológicos, baseados no balanço entre a precipitação e a evapotranspiração da cultura.

De acordo com Marouelli (1993) os modelos de balanço de água no solo podem ser estruturados através de programas computacionais e trazer informações de ganhos, perdas e armazenamento de água no solo, sendo de grande utilidade manejos de sistemas de irrigação.

2.3.3 Modelos de simulação do balanço hídrico

Na agricultura, a simulação tem sido uma importante ferramenta para a previsão de resultados do manejo de sistemas sob determinadas condições ambientais. À medida que os recursos hídricos estão cada vez mais escassos, as informações sobre os componentes do balanço hídrico de solos sob cultivo são consideradas cruciais para o planejamento da irrigação (JI et al., 2007).

Segundo Louzada (2004) considerando-se os custos e o tempo necessários em procedimentos experimentais, predições de balanço hídrico vêm sendo satisfatoriamente realizadas através de modelos de simulação.

O desenvolvimento e a utilização de modelos voltados às atividades agrícolas têm se intensificado nos últimos anos. A literatura tem mostrado que o desenvolvimento e

aprimoramento de modelos de simulação de balanço hídrico têm resultado em interessantes ferramentas para estimar alternativas de planejamento, dimensionamento e manejo da irrigação (SOUZA & GOMES, 2008).

Os modelos de simulação operam através da resolução da equação do balanço hídrico do sistema solo-planta-atmosfera, onde a variação dos parâmetros de entrada de um destes fatores tem seu impacto nos valores de resposta dos modelos, quer seja em lâmina requerida, em produção esperada, matéria seca ou qualquer fator que esteja sob análise.

Estes modelos sob determinadas condições de clima, cultivo e operação possibilitam a previsão de produtividades decorrentes da aplicação de água, a serem utilizadas, por exemplo, em análises econômicas, sendo particularmente importantes em análises de produção agrícola quando a água é escassa. Em processos de planejamento, esses modelos constituem o elemento básico de decisão dos planos de desenvolvimento e de operação de projetos de irrigação, permitindo a tomada de decisões sobre planos ótimos de cultivo e ocupação de área para produção econômica com base na água disponível. Possibilitam, também, a escolha correta da época de semeadura, para que a cultura não fique exposta a déficits hídricos em momentos cruciais para a obtenção de boas produções (VAUX & PRUITT, 1983; HOWELL, CUENCA & SOLOMON, 1990; FRIZZONE et al., 2005).

Segundo Pereira et al. (1995), os modelos podem ser, essencialmente, de dois tipos: modelos de simulação do fluxo de água quando o balanço hídrico é computado através dos fluxos de entrada e saída e da retenção da água do solo na zona radicular e modelos de simulação volumétrica de balanço de água do solo, quando o balanço hídrico é obtido pela simulação dos volumes de água que entram e saem do reservatório do solo num pré-determinado intervalo de tempo.

Conforme relatam Pereira et al. (1995) os modelos de simulação do fluxo de água do solo são usados quando os fluxos são bem conhecidos ou quando as quantidades de solutos transportados devem ser determinadas. Em geral, estes modelos têm sua base teórica na equação de Richards e requerem uma completa definição das propriedades hidráulicas do solo, descritas, usualmente, pelas equações de Genuchten (GENUCHTEN, 1980), bem como requerem detalhadas características do dossel da cultura e outros parâmetros que influenciam a extração de água pelas raízes.

Por outro lado, Pereira et al. (1995) consideram que os modelos volumétricos de balanço hídrico são facilmente parametrizados e requerem apenas a caracterização hidráulica essencial do solo e dados básicos da cultura, além de adotar funções simplificadas da relação água-rendimento para avaliar os efeitos dos déficits hídricos nas reduções do rendimento.

Os modelos de simulação também permitem testes quanto às quantidades de água aplicadas e o momento de rega, possibilitando simular cenários e obter significativas reduções de custo, tempo e mão-de-obra, além do que a estimativa da produção não é influenciada por eventuais fatores externos, alheios ao tratamento aplicado (PEITER, 1998).

Vários fatores referentes ao solo, à planta e à atmosfera interagem entre si determinando a produtividade das culturas agrícolas. Certamente existe uma relação funcional entre esses fatores e a produção das culturas, característica de cada condição ambiental (FRIZZONE et al., 2005).

Desta forma, modelos agrometeorológicos consideram somente a influência de fatores climáticos sobre a produtividade da cultura, funcionando como um medidor de eficiência. Os métodos utilizados para estabelecer a relação planta-clima variam desde a simples correlação, até modelos complexos, ou seja, funções de produção que podem considerar diferentes parâmetros envolvidos no sistema produtivo (PICINI, 1998).

As principais críticas aos modelos agrometeorológicos referem-se às suas aplicações, consideradas muitas vezes específicas para uma localidade, ou incompletas, no sentido de omitir efeitos de outros fatores e suas interações com a água (FRIZZONE et al., 2005).

A partir da identificação dos modelos agrometeorológicos que melhor descrevem o comportamento da cultura a campo em uma determinada região, é possível inserir tais modelos em programas de simulação de produtividade, prever o impacto de mudanças climáticas e, caso os eventos meteorológicos se comportem próximo à média dos anos, indicar a melhor época de semeadura para cada região.

2.4 O Modelo WINISAREG

O WINISAREG é um modelo de balanço hídrico que visa à simulação e programação da irrigação para uma determinada combinação de dados de solo-clima-cultura, ou a avaliação de esquemas de irrigação selecionados (PEREIRA et al., 2003).

Este modelo foi desenvolvido por Teixeira & Pereira (1992) e simula o efeito do déficit hídrico e das estratégias de irrigação através dos termos da equação do balanço hídrico, evapotranspiração real, drenagem e armazenamento de água do solo.

Segundo Paz, Neira & Kastelao (1996), no WINISAREG, e em modelos do mesmo tipo, o balanço hídrico é baseado no método proposto por Doorenbos & Pruitt (1980) e Doorenbos & Kassan (1980), requerendo dados climáticos, edáficos e agrônômicos.

Nestes modelos, a equação do balanço hídrico aplica a lei da continuidade a um prisma de solo de área unitária cuja altura, em cada instante, é igual à profundidade do sistema radicular. Assim, o volume do solo que irá expressar a água disponível, poderá permanecer constante, como no caso de pastagem estabelecida, ou variar, quando modelando uma cultura anual. Além disso, a simulação do perfil do solo é desenvolvida em multicamadas, permitindo uma representação razoavelmente precisa dos compartimentos do solo no sistema (JOBIM, 2007).

O modelo WINISAREG é recomendado devido à sua simplicidade e suficiente acurácia na simulação e avaliação de projetos de irrigação. Tendo sido satisfatoriamente aplicado em várias regiões (PAZ, NEIRA & KASTELAO, 1996 na Espanha; TEIXEIRA, PAULO & PEREIRA, 1996 em Portugal; LIU et al., 1998 na China; FERNANDO, PEREIRA & LIU, 2001, no Egito). Este modelo vem sendo utilizado para gerar e avaliar projetos de irrigação com déficits hídricos controlados em horticultura e cultivos de cereais na região do Mediterrâneo (RODRIGUES et al., 2003; ZAIRI et al., 2003; OWEIS, RODRIGUES & PEREIRA, 2003), em pomares de citrus na Sicília (ALBA, RODRIGUES & PEREIRA, 2003), na Jordânia (SHATANAWI, AL-ZU'BI & AL-JAYOUSSI, 2003) e em terras altas na China (FABIAO et al., 2003).

2.5 Funções de rendimento para a cultura da soja

A produção de uma cultura agrícola está condicionada a vários fatores referentes ao solo, à planta e ao clima. Existe uma relação funcional entre estes fatores e a produção das culturas, característica de cada condição ambiental (HEXEM & HEADY, 1978).

Define-se uma função de produção como sendo as relações técnicas entre um conjunto específico de fatores envolvidos num processo produtivo qualquer e a produção física possível de se obter com a tecnologia existente (FERGUSON, 1988).

Muitas funções de produção obtidas pelos pesquisadores são relações lineares. Uma razão provável é que a produtividade é relacionada linearmente com a evapotranspiração (DOORENBOS & KASSAN, 1979).

Frizzone (1987) menciona que as variáveis da função de produção água-cultura podem ser expressas de diferentes maneiras: a variável independente água pode ser representada pela transpiração, evapotranspiração, lâmina de água aplicada durante o ciclo, dentre outras. Ao

usuário da irrigação é mais interessante utilizar como variável independente a lâmina de água aplicada à parcela, mesmo que apenas parte dela seja usada no processo de evapotranspiração.

Quando as necessidades hídricas da cultura não são atendidas plenamente o déficit hídrico na planta pode se desenvolver até o ponto em que o crescimento e o rendimento da cultura tornem-se afetados. A forma em que o déficit hídrico afeta o crescimento e rendimento da cultura varia de acordo com a espécie e seu estágio fenológico (DOOREMBOS & KASSAN, 1979).

As funções de produção água- cultura são particularmente importantes para as análises de produção agrícola quando a água é escassa. Para o processo de planejamento, essas funções constituem o elemento básico de decisão dos planos de desenvolvimento e, relativamente à operação de projetos de irrigação, permitem tomar decisões sobre planos ótimos de cultivo e ocupação de área para produção econômica com base na água disponível.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi conduzido tomando como base a microrregião de Passo Fundo, localizada no Planalto do Rio Grande do Sul, considerando o período entre safras de 93/94 a 06/07.

Esta microrregião pertencente ao estado brasileiro do Rio Grande do Sul, compoendo a mesorregião Noroeste Rio Grandense. Sua área total é de 7.076,999 km² dividida em 26 municípios, com uma população estimada de 321.332 habitantes (IBGE, 2007).

Os municípios que a compõem são: Água Santa; Camargo; Casca; Caseiros; Charrua; Ciríaco; Coxilha; David Canabarro; Ernestina; Gentil; Ibiraiaras; Marau; Mato Castelhano; Muliterno; Nicolau Vergueiro; Passo Fundo; Pontão; Ronda Alta; Santa Cecília do Sul; Santo Antônio do Palma; São Domingos do Sul; Sertão; Tapejara; Vanini; Vila Lângaro; Vila Maria.

A microrregião de Passo Fundo tem sua conjuntura econômica associada à agropecuária e à agroindústria, ocorrendo influência significativa de culturas para exportação como a soja e o trigo, aliados a predominância das pequenas propriedades produtoras de suínos, galináceos e outras culturas que dinamizam e engrandecem o sistema agro-exportador da microrregião. A Figura 04 apresenta a localização espacial da microrregião de Passo fundo no estado do Rio Grande do Sul.

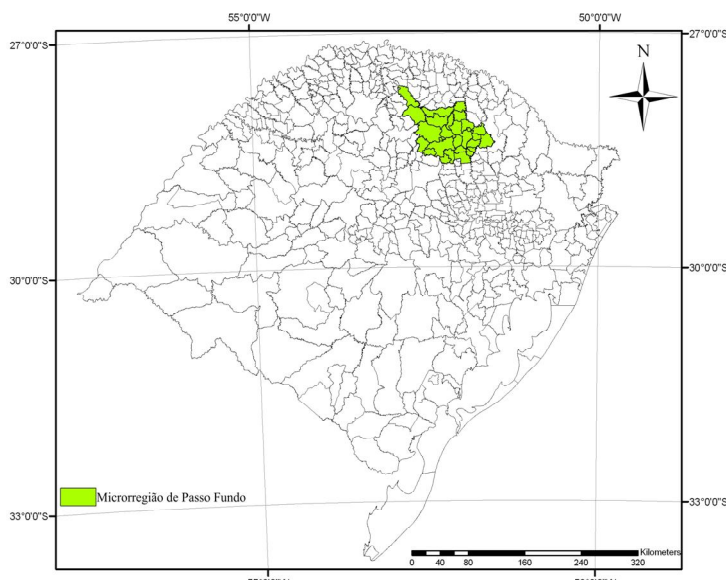


Figura 04. Localização espacial da área de estudo (Microrregião de Passo Fundo, RS, Brasil).

3.2 O Modelo WINISAREG

O WINISAREG é um modelo de simulação do balanço hídrico do solo desenvolvido por Teixeira & Pereira (1992) utilizado para o planejamento da irrigação, através da combinação entre os fatores ligados ao sistema solo-planta-atmosfera, podendo ser utilizado também para avaliação de projetos de irrigação já estabelecidos.

Na sua versão atual, o modelo apresenta-se combinado com outros dois programas, o EVAP56 que calcula a evapotranspiração de referência (ET_o) usando o método de Penman Monteith e o KCISA para cômputo dos parâmetros da cultura requeridos pela metodologia FAO (ALLEN et al., 1998). No modelo as simulações podem ser realizadas para períodos diários, decendiais ou mensais. As alternativas de irrigação disponíveis no modelo são:

- Programação da irrigação para obtenção do máximo rendimento, esta opção realiza as simulações de modo que se evitem déficit hídrico da cultura;
- Simulação de programação de irrigação adotando limites de dotação hídrica baseados em déficits controlados e variadas lâminas de irrigação;
- Avaliação de programa de irrigação aplicado em datas específicas, isto é, quando a frequência e as lâminas são pré-estabelecidas ou conhecidas;
- Estabelecimento do ponto ótimo de irrigação sob condições de suprimento hídrico limitado, com lâmina variável ou constante;
- Cálculo do balanço hídrico sem irrigação, a fim de se determinar qual a lâmina de irrigação suplementar seria necessária.

O modelo adota uma relação linear simplificada entre as perdas de rendimento relativo e os déficits de evapotranspiração sazonais relativos como proposto por Stewart, Hagen & Pruitt (1976) e melhorado por Doorenbos & Pruitt (1980), usando o fator de resposta do rendimento específico da cultura (K_y) selecionado pelo usuário, podendo ou não este ser utilizado.

3.2.1 Balanço hídrico do solo

O balanço da água do solo no modelo é computado para a profundidade total da zona radicular efetiva através de:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(P_i - Q_{r_i} + L_{l_i} - E_{t_a_i} - D_{p_i} + G_i)}{1000 \times Z_i} \quad (2)$$

onde: θ_i é umidade volumétrica média do solo na zona radicular ($\frac{mm^3}{mm^3}$) no dia i ; θ_{i-1} no dia prévio; P é a precipitação (mm) no dia i ; Q_{r_i} é o escoamento superficial, em mm, no dia i ; L_{l_i} é a lâmina líquida de irrigação (mm) no dia i ; $E_{t_a_i}$ é a evapotranspiração real (mm) no dia i ; D_{p_i} é a percolação profunda (mm) no dia i ; G_i é a contribuição da água subterrânea (mm) no dia i e Z_i é o comprimento radicular (m) no dia i .

A partir de θ_i o modelo calcula a lâmina líquida de irrigação requerida, L_{l_i} , quando o limite designado de restrição é atingido.

A evapotranspiração máxima é calculada com base no produto da evapotranspiração de referência, E_{T_o} , pelo coeficiente de cultura, K_c , conforme Allen et al. (1998).

A contribuição da água subterrânea (G_i) não foi considerada devido à profundidade do lençol freático do solo ser bastante superior a profundidade efetiva do sistema radicular. O escoamento superficial (Q_{r_i}) também foi desconsiderado.

O balanço hídrico é realizado considerando que a água do solo disponível para as plantas (R) em mm, está relacionada com três níveis de armazenamento: a zona da água em excesso (θ_s), acima da capacidade de campo (θ_{cc}) correspondente à água gravitacional que não está imediatamente disponível às plantas; a zona de rendimento ótimo, entre a (θ_{cc}) e o limite ótimo de água do solo (θ_p), onde a água realmente está disponível para a cultura e a zona de déficit hídrico, entre (θ_p) e o ponto de murcha permanente (θ_{pm}), onde ainda há água disponível para a planta, mas requer um gasto energético maior para sua extração pelas raízes.

O tamanho das três zonas do reservatório-solo varia de cultura para cultura, com o estágio de desenvolvimento, a profundidade radicular e a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico, expressado pela fração “p” de depleção sem estresse. Entretanto, o tamanho destas zonas depende, principalmente, das características hidráulicas do solo. O limite superior da zona de excesso de água é constante e corresponde ao ponto de saturação (θ_s), considerando a profundidade radicular máxima e resulta na capacidade total de armazenamento de água do solo.

O limite superior da zona de rendimento ótimo ($R_{máx.}$) em mm, corresponde à água total disponível do solo (CAD) à profundidade radicular da cultura considerada (z) é dado por:

$$R_{máx.} = 1000 \times z \times (\theta_{cc} - \theta_{pm}) \quad (3)$$

O limite inferior da zona de rendimento ótimo ($R_{\min.}$) é dado por:

$$R_{\min.} = (1 - p) \times R_{\max.} \quad (4)$$

onde: p é a fração de depleção de água disponível que permite evapotranspiração sem causar déficit hídrico na cultura. Este limite inferior da zona de rendimento ótimo define o limite do nível ótimo de água do solo, θ_p , isto é, o mínimo conteúdo de água do solo antes do déficit hídrico da cultura. A diferença entre $R_{\max.}$ e $R_{\min.}$ consiste na fração de água do solo realmente disponível ou utilizável, FAD, onde:

$$FAD = (\theta_{cc} - \theta_p) \times Z \quad (5)$$

A zona de estresse é limitada entre $R_{\min.}$ e $R = 0$, onde a reserva disponível de água do solo é nula ao atingir o ponto de murcha permanente, θ_{pm} .

Quando a água disponível está na zona de rendimento ótimo, a evapotranspiração real, ETa , é igual à evapotranspiração máxima, ETm , sendo:

$$ETm = Kc \times ETo \quad (6)$$

onde: Kc é o coeficiente de cultura e ETo é a evapotranspiração de referência (ALLEN et al., 1998).

Na zona de estresse hídrico, a evapotranspiração real (ETa) é restringida por $ETa < ETm$; porque $R < R_{\min.}$, isto é, a água disponível está abaixo do limite mínimo de água no solo para evitar o estresse hídrico da cultura. Assim:

$$Eta = \left(\frac{R}{R_{\min.}} \right) \times ETm \quad (7)$$

A variação da água disponível (R) não é linear quando $R < R_{\min.}$, mas segue uma curva parabólica cujo expoente é função de R e ETm (TEIXEIRA & PEREIRA, 1992).

Os dados requeridos pelo modelo para computar o balanço hídrico do solo são armazenados em vários arquivos comandados por menu principal. A Figura 05 apresenta a tela de inicialização do modelo.



Figura 05- Tela de inicialização do modelo Winisareg.

3.2.2 Dados de entrada no modelo

O modelo WINISAREG realiza suas rotinas de cálculo a partir de um conjunto de dados relacionados ao sistema solo-planta-atmosfera. Sendo estes a base para os procedimentos de cálculo computados. A Figura 06 apresenta visualização da página inicial do programa, apresentado as pastas com os dados se solo, clima e cultura.

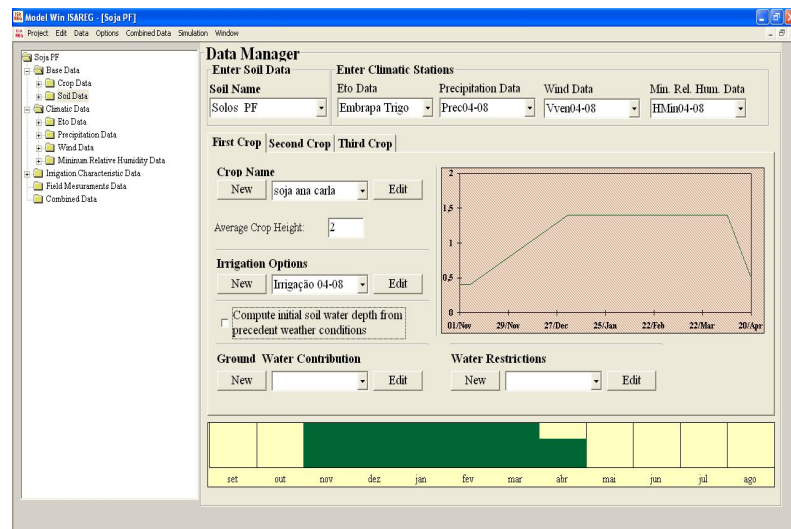


Figura 06 - Tela principal do modelo com a apresentação das pastas referentes aos dados de solo, clima e cultura e, série de dados inseridos para o início da simulação.

3.2.2.1 Dados climatológicos

Os dados climatológicos que constam de temperatura máxima e mínima, umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar e precipitação foram obtidos a partir da estação meteorológica convencional instalada na unidade da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS, latitude 28°15' S, longitude 52°24'W e altitude 687 m, ocorridas no período de janeiro de 1993 a dezembro de 2007. Os dados climáticos foram utilizados no modelo em base diária.

No apêndice C constam as médias mensais da série de dados para o período em estudo e no Apêndice D consta a série de gráficos representativos da variação temporal deste ao longo do período em estudo.

3.2.2.2 Dados de solo

Os dados de solo correspondem a características físico-hídricas do principal tipo de solo encontrado na microrregião, sendo este o Latossolo Vermelho distrófico típico, - LVd3 (STRECK et al. 2002). A Figura 07 apresenta mapa dos principais tipos de solo encontrados na microrregião de Passo Fundo.

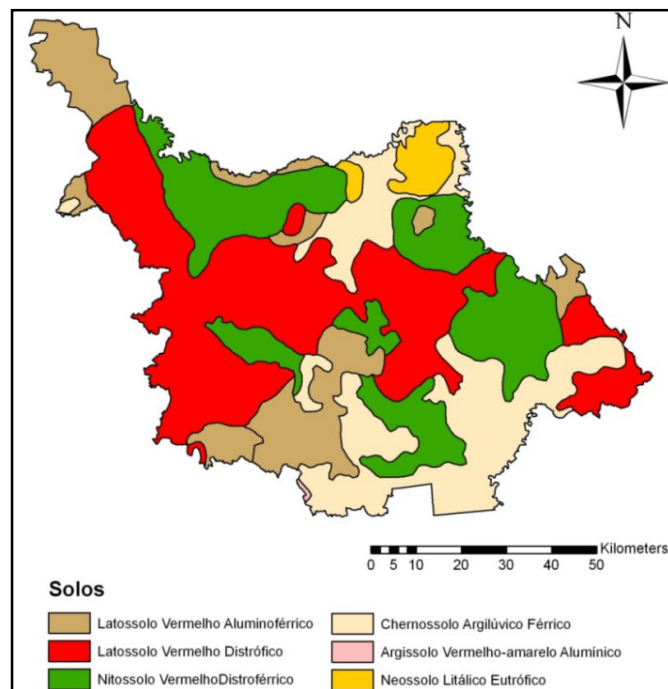


Figura 07 - Mapa dos principais tipos de solo encontrados na microrregião de Passo Fundo. Fonte: VIVAN (2010) Adaptado de IBGE (2010).

Os parâmetros de solo utilizados no modelo constam de: número de camadas, profundidade das camadas (m), capacidade de campo e ponto de murcha permanente em base de volume, além dos valores de textura relativos à camada superficial. A Tabela 1 apresenta a série de dados utilizados no modelo como parâmetros relativos às características do principal tipo de solo encontrado na microrregião.

No Apêndice A, constam os gráficos gerados a partir do modelo para a distribuição na umidade volumétrica e da água disponível no perfil de solo considerado no estudo.

Tabela 01- Dados de capacidade de campo e ponto de murcha permanente relativos a diferentes camadas de um Latossolo vermelho distrófico.

Fonte: Adaptado de MARCOLIN (2009).

| Camadas de solo | Espessura das Camadas (m) | Capacidade de Campo * m ³ /m ³ | Ponto de murcha permanente ** m ³ /m ³ |
|-----------------|---------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1 | 0.05 | 0.41 | 0.26 |
| 2 | 0.05 | 0.39 | 0.24 |
| 3 | 0.05 | 0.39 | 0.24 |
| 4 | 0.05 | 0.39 | 0.24 |
| 5 | 0.05 | 0.38 | 0.21 |
| 6 | 0.05 | 0.40 | 0.26 |

*10 KPA

**1500KPA

3.2.2.3 Dados da cultura

Os dados referentes à cultura da soja foram obtidos a partir de revisão em literatura de caráter técnico. Sendo estes: períodos referentes aos estádios de desenvolvimento da cultura; coeficiente de cultura (Kc); profundidade radicular efetiva (z), em m; fração de depleção da água disponível do solo (p) e fator de resposta do rendimento (Ky).

As datas de semeadura utilizadas foram de 15/10, 15/11 e 15/12. Onde segundo Queiroz, Kaster & Terasawa, 1971; Buss et al., 1972; Bergamaschi, Berlato & Westphalen, 1977; Queiroz, Neumaier & Torres, 1979 a época de semeadura mais aconselhada para a produção de soja está compreendida entre 15 de outubro e 15 de dezembro, com os mais altos rendimentos obtidos nas semeaduras realizados em novembro.

As durações dos estádios fenológicos foram adaptadas de Martins (2007), onde determinou-se para a simulação dos cenários propostos a duração de 110 dias para ciclo precoce, 125 dias para o ciclo médio e 140 dias para ciclo tardio. A Figura 08 mostra a

representação das durações de ciclo e as divisões dos estádios fenológicos da cultura da soja propostos por Martins (2007).

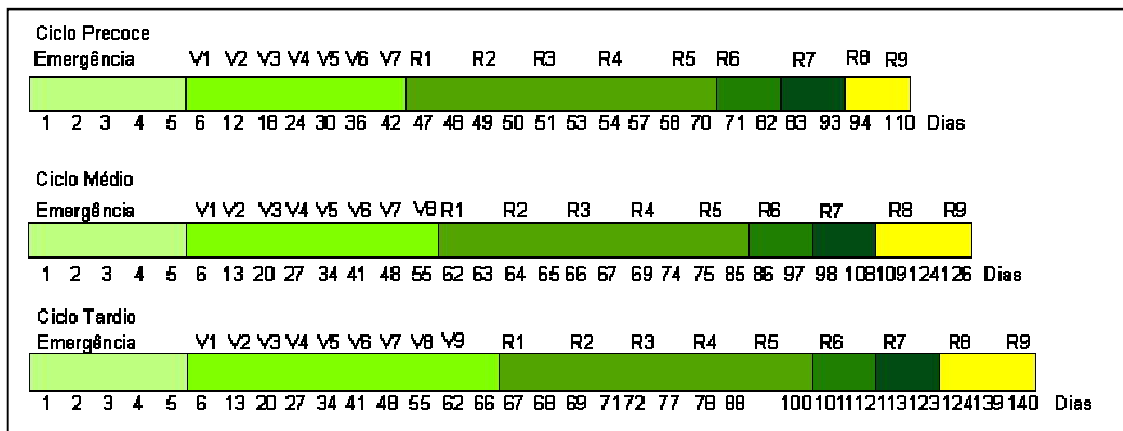


Figura 08- Determinação da duração dos estádios de desenvolvimento para a cultura da soja, em seus ciclos precoce, médio e tardio.

Fonte: Adaptado de MARTINS (2007).

Os valores de coeficiente de cultivo (K_c) utilizados no modelo de simulação foram de 0.35 (K_c inicial), 0.91 (K_c médio) e 0.75 (K_c final) adaptados de FIETZ (2002). O apêndice B apresenta a evolução dos coeficientes de cultivo para cada cenário simulado, obtidos a partir do modelo WINSAREG.

A Tabela 02 apresenta os períodos referentes aos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura da soja, considerando semeadura em 15/10, acompanhado dos valores da fração de depleção da água disponível do solo (p) e profundidades efetivas do sistema radicular (z).

Tabela 02 - Data de início dos estádios de desenvolvimento da cultura da soja, considerando semeadura em 15/10 para culturas de ciclo precoce médio e tardio e profundidades do sistema radicular e fração p para cada estádio.

| Estádio | Data de início dos estádios Ciclo Precoce | Data de início dos estádios Ciclo Médio | Data de início dos estádios Ciclo Tardio | Profundidades Efetivas do sistema radicular (m) | Fração p |
|----------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------|
| Semeadura | 15/10 | 15/10 | 15/10 | 0.15 | 0.75 |
| Início do crescimento vegetativo | 21/10 | 21/10 | 21/10 | 0.30 | 0.75 |
| Florescimento | 29/11 | 12/12 | 21/12 | 0.40 | 0.75 |
| Formação de Grão | 12/12 | 29/12 | 12/01 | 0.40 | 0.50 |
| Senescência | 06/01 | 22/01 | 05/02 | 0.40 | 0.75 |
| Colheita | 02/02 | 18/02 | 04/03 | 0.40 | 0.75 |

A Tabela 03 apresenta os períodos referentes aos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura da soja, considerando semeadura em 15/11, acompanhado dos valores da fração de depleção da água disponível do solo (p) e profundidades efetivas do sistema radicular (z).

Tabela 03 - Data de início dos estádios de desenvolvimento da cultura da soja, considerando semeadura em 15/11 para culturas de ciclo precoce médio e tardio e profundidades do sistema radicular e fração p para cada estágio.

| Estádio | Data de início dos estádios Ciclo Precoce | Data de início dos estádios Ciclo Médio | Data de início dos estádios Ciclo Tardio | Profundidades Efetivas do sistema radicular (m) | Fração p |
|----------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------|
| Semeadura | 15/11 | 15/11 | 15/11 | 0.15 | 0.75 |
| Início do crescimento vegetativo | 21/11 | 21/11 | 21/11 | 0.30 | 0.75 |
| Florescimento | 30/12 | 12/01 | 21/01 | 0.40 | 0.75 |
| Formação de Grão | 12/01 | 29/01 | 12/02 | 0.40 | 0.50 |
| Senescência | 06/02 | 21/02 | 08/03 | 0.40 | 0.75 |
| Colheita | 05/03 | 20/03 | 04/04 | 0.40 | 0.75 |

A Tabela 4 apresenta os períodos referentes aos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura da soja, acompanhado dos valores da fração de depleção da água disponível do solo (p) e profundidades efetivas do sistema radicular (z).

Tabela 04 - Data de início dos estádios de desenvolvimento da cultura da soja, considerando semeadura em 15/12 para culturas de ciclo precoce médio e tardio e profundidades do sistema radicular e fração p para cada estágio.

| Estádio | Data de início dos estádios Ciclo Precoce | Data de início dos estádios Ciclo Médio | Data de início dos estádios Ciclo Tardio | Profundidades Efetivas do sistema radicular (m) | Fração p |
|----------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------|
| Semeadura | 15/12 | 15/12 | 15/12 | 0.15 | 0.75 |
| Início do crescimento vegetativo | 21/12 | 21/12 | 21/12 | 0.30 | 0.75 |
| Florescimento | 29/01 | 11/02 | 20/02 | 0.40 | 0.75 |
| Formação de Grão | 11/02 | 28/02 | 14/03 | 0.40 | 0.50 |
| Senescência | 08/03 | 23/03 | 07/04 | 0.40 | 0.75 |
| Colheita | 04/04 | 19/04 | 04/05 | 0.40 | 0.75 |

3.2.3 Disponibilidade hídrica e rendimento da cultura

O modelo adota uma função simplificada de relação entre rendimento e água proposta por Stewart, Hagen & Pruitt (1976) para a avaliação de esquemas alternativos de irrigação em relação aos respectivos impactos nos rendimentos. Assim, a cada déficit hídrico

corresponde um déficit na evapotranspiração relativa, definido a partir da razão entre a evapotranspiração real da cultura (ETa) e a evapotranspiração máxima (ETm).

O correspondente déficit de rendimento relativo é então $\left(\frac{Y_a}{Y_m}\right)$ onde Y_a e Y_m são os rendimentos da cultura obtidos quando a evapotranspiração é igual a ETa e ETm, respectivamente. Todos os valores de evapotranspiração são expressos em mm e acumulados através do ciclo da cultura. Quando $\frac{E_{ta}}{E_{tm}} > 0.5$ foi empiricamente observado que os déficits relacionam-se linearmente por:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \times \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (8)$$

onde: K_y é o fator de resposta do rendimento, tabulado para diversas culturas por Doorenbos & Kassan (1979).

Várias alternativas de esquemas de irrigação com déficits podem ser comparadas, adotando esta função de redução do rendimento, não apenas pela diferença no volume de água ou na eficiência do consumo, mas através da evapotranspiração relativa e dos déficits de rendimento relativo (perdas) estimados devido às deficiências hídricas.

No presente estudo as simulações foram realizadas buscando o máximo rendimento relativo para a cultura, com o suprimento total de sua demanda hídrica, com isto a evapotranspiração real é igual à evapotranspiração máxima, sendo a relação $ET_a/ET_m = 1$.

3.2.4 Formulação dos cenários no WINISAREG

Para um determinado intervalo de tempo Δt (dias) a equação de balanço pode se escrita do seguinte modo:

$$\Delta R = (P - ET_c + R_g - E_s + A_c - D_r) \times \Delta t \quad (9)$$

onde: (ΔR) mm é a variação do volume de água armazenada no solo durante aquele intervalo de tempo. Os volumes afluentes (mm/dia) são: a precipitação (P); a irrigação (R_g); a ascensão capilar (A_c). E os volumes efluentes (mm/dia) são: a evapotranspiração cultural (ET_c); o escoamento superficial (E_s); as perdas por drenagem e percolação profunda (D_r).

Considerando que a precipitação efetiva (Pe) pode ser definida por:

$$Pe = P - Es \quad (10)$$

A equação pode ser rearranjada, da seguinte forma:

$$\Delta R = (Pe - ETc + Rg + Ac - Dr) \times \Delta t \quad (11)$$

No modelo WINISAREG, foram efetuados simultaneamente dois balanços:

- o primeiro, até à profundidade do sistema radicular, traduzido pela equação 11, quando entrada de água (Vr) é nulo (caso das culturas em que foi indicada uma profundidade do sistema radicular constante em todo o período de rega);
- o segundo, nas camadas inferiores do solo, expresso pela equação:

$$V = Dr - Vr - Drp \quad (12)$$

onde: V é o volume de água nas camadas no final do intervalo considerado e Drp é o volume de água perdido para as camadas abaixo da profundidade máxima (Zm). Vr é uma entrada de água no sistema, calculada, no início de cada intervalo, em função do crescimento radicular estimado para esse intervalo.

A sua inclusão na rotina que calcula o balanço hídrico faz-se conjuntamente com a precipitação. Assim, o volume de água que, com exceção da ascensão capilar, aflui ao sistema passa designado pela variável PV definido por:

$$PV = Pe + Vr \quad (13)$$

Desta forma o balanço hídrico, depois de introduzida esta variável, torna-se:

$$\Delta R = (PV - ETc + Rg + Ac - Dr) \times \Delta t \quad (14)$$

3.2.5 Intervalos de tempo

O período de irrigação é discretizado de modo que, num mesmo intervalo de tempo Δt , não haja variação nos parâmetros do modelo ou nas funções que os definem. Deste modo, para a definição dos valores de Δt , consideram os seguintes aspectos:

a) Os parâmetros meteorológicos, os coeficientes culturais e a ascensão capilar são considerados constantes durante os intervalos de tempo Δt (dia, decêndio ou mês). Os primeiros porque são diretamente fornecidos para este intervalo de tempo, os segundos porque, sendo aplicados a ET_0 , foram determinados por interpolação para os intervalos de tempo e a ascensão capilar por conveniência de programação;

b) Os parâmetros das funções lineares que traduzem o crescimento do sistema radicular e a variação da reserva de água utilizável (RFU), bem como os que definem a oportunidade e a quantidade de irrigação, mantêm-se constantes durante a mesma fase do ciclo vegetativo.

Nestas condições, o programa discretiza o período de irrigação em intervalos de tempo constantes e iguais a Δt . Em seguida, são identificados os intervalos em que há mudanças de fase do ciclo vegetativo, subdividindo-os em $n+1$ intervalos para n mudanças de fase.

3.2.6 Variação temporal do volume de água armazenada no solo

Entre duas irrigações consecutivas R_g é igual a 0, sendo a equação:

$$\Delta R = (PV - ET_c + A_c - D_r) \times \Delta t \quad (15)$$

Zona de rendimento máximo

Nesta zona $D_r=0$, porque se está abaixo da capacidade de campo; $ET_c=ET_m$, visto que a cultura está numa situação de conforto hídrico; e $A_c=0$, porque não se estabelece o gradiente necessário para provocar a ascensão capilar. Assim, a equação pode ser simplificada por:

$$\Delta R = (PV - ET_m) \times \Delta t \quad (16)$$

Tomando diferenciais e integrando em função do tempo, considerando as condições limites enunciadas para a zona de rendimento máximo, obtém-se:

$$R(t) = R_i + (PV - ETm) \times t \quad (17)$$

onde: R_i representa o volume de água armazenado pelo solo no início do intervalo.

3.2.7 Cálculo da evapotranspiração cultural

Para o cálculo da evapotranspiração diária são levadas em consideração as seguintes condições:

Zona de rendimento máximo-

Nesta zona a evapotranspiração cultural iguala-se a evapotranspiração máxima, visto que as culturas se encontram em situação de conforto hídrico sendo, portanto, $ET_c = ET_m$ e $A_c = 0$.

Zona de carência hídrica

Na zona de carência hídrica, a evapotranspiração cultural é inferior à máxima, considerando-se, no modelo proposto, esta varia linearmente com o teor de água no solo (R). A evapotranspiração durante um determinado intervalo de tempo Δt pode ser calculada por:

$$ETa = \int_{t=ti}^{t=tf} \frac{ETm}{Rmin} \times R(t) dt \quad (18)$$

onde: t_i e t_f são os valores de t no início e no fim do intervalo.

Quando R_{min} é independente do tempo, a variação de R é expressa pela equação e a solução do integral (TEIXEIRA, 1996):

$$ETa = \frac{ETm}{ETm+G} [(PV + G)\Delta t - \Delta R] \quad (19)$$

onde: ΔR representa a variação de R durante o intervalo de tempo considerado.

No trabalho para a determinação das necessidades de irrigação suplementar para a cultura da soja na microrregião de Passo Fundo as simulações foram realizadas para intervalos diários.

A Figura 09 apresenta o quadro na forma de diagrama de estrutura genérica do modelo, demonstrando os passos do processo de determinação da lâmina, com a entrada dos dados relativos ao solo, planta e atmosfera. Apresentando posterior a realização do balanço hídrico, escolha por um sistema de determinação de lâmina, sendo no presente estudo simulado o balanço baseado no suprimento hídrico total para atender as demandas da cultura e obtendo-se os resultados através das iterações de cálculo, onde estes constam de calendário de datas e quantidades de lâmina suplementar a serem aplicadas de modo a potencializar o máximo rendimento da cultura simulada, no caso soja.

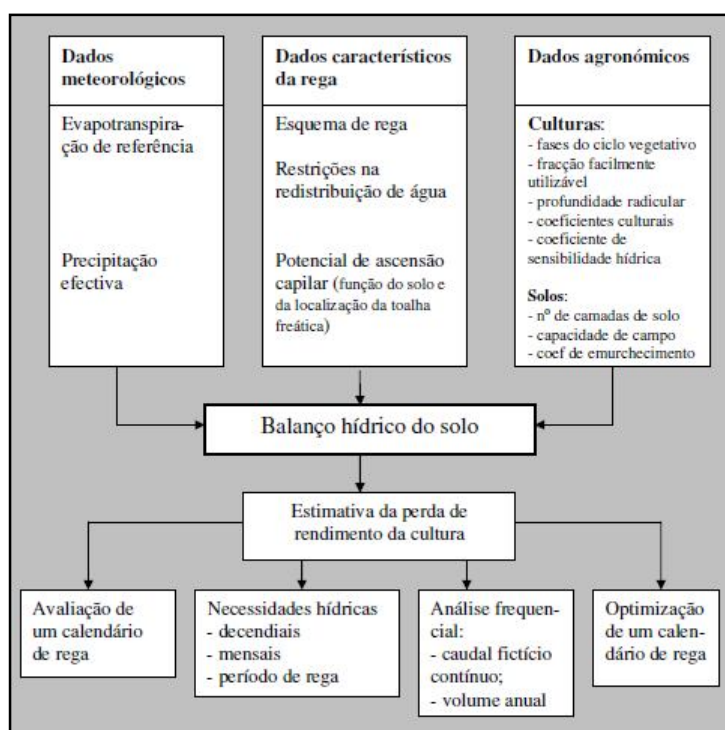


Figura 09. Estrutura genérica do modelo WINISAREG.
Fonte: PEREIRA et al. (1996).

3.3 Rendimento relativo em função das lâminas de irrigação suplementar

O rendimento das culturas é função do suprimento das demandas hídricas das mesmas. Assim, reduções nas lâminas de irrigação suplementar tendem a reduzir linearmente o rendimento relativo das culturas (DOOREMBOS & KASSAM, 1979).

3.3.1 Rendimentos máximos

O nível de rendimento máximo de uma cultura (Y_m) é determinado, principalmente, por suas características genéticas e grau de adaptação ao ambiente predominante. As exigências ambientais de clima, solo e água para crescimento e rendimento ótimos diferem com a cultura e a variedade.

O rendimento máximo de uma cultura (Y_m) é obtido a partir de uma variedade altamente produtiva e bem adaptada ao respectivo ambiente de crescimento, em condições tais que não ocorram limitações de fatores tais como: água, nutrientes, pragas e doenças, durante todo o período até seu amadurecimento. A indicação sobre rendimentos corresponde aos máximos obtidos nas condições agrícolas do momento com alto nível de manejo de cultura e água.

O rendimento máximo pode ser calculado para diferentes condições climáticas. Os métodos permitem a quantificação do potencial produtivo de diferentes áreas, identificando, desse modo, as mais aproximadas para a produção de determinada cultura.

No estudo, as simulações realizadas através do modelo WINISAREG possibilitaram a determinação das lâminas de irrigação suplementar relativa ao máximo rendimento da cultura, no que diz respeito ao suprimento de água. Assim objetiva-se uma relação de evapotranspiração que não representa-se reduções de rendimento.

3.3.2 Evapotranspiração

A demanda de água da cultura deve ser atendida pela água do solo, através do sistema radicular. A taxa real de absorção de água do solo pela cultura em relação a sua evapotranspiração máxima (ET_m) é determinada quer pelo fato que a água disponível no solo ou a cultura venham a sofrer estresse resultante de déficit hídrico.

Para se determinar a evapotranspiração real (ET_r) deve-se considerar o nível de água disponível no solo. A evapotranspiração real será igual a evapotranspiração máxima (ET_m) quando a água disponível no solo para a cultura for suficiente, ou seja, $ET_r = ET_m$. Entretanto, $ET_r < ET_m$ quando a água disponível no solo for limitada. Essa disponibilidade pode ser definida como a fração de depleção de água no solo (p) que pode ser deduzida da água total disponível no solo, sem que a ET_r se torne menor que a ET_m . A magnitude da ET_r pode ser quantificada para períodos entre irrigações ou chuvas intensas e para períodos mensais.

A água disponível no solo (S_a) é definida aqui como a lâmina de água por profundidade de solo $\left(\frac{mm}{m}\right)$, entre os teores de água do solo na capacidade de campo e no ponto de murchamento. A água total disponível no solo pode variar bastante, mesmo em solos que tenham texturas semelhantes. Além disso, a maioria dos solos apresenta estratificação, pelo que se deve escolher os valores integrados de (S_a) na profundidade do solo, as camadas densas limitam a distribuição de água.

3.3.3 Rendimento Real

Quando o suprimento de água não atende às necessidades hídricas da cultura, a evapotranspiração real é inferior a evapotranspiração máxima, ou seja, $E_{Tr} < E_{Tm}$. Nessa condição desenvolve-se um estresse hídrico na planta, o qual afetará adversamente o crescimento da cultura e, finalmente, seu rendimento.

O efeito do estresse hídrico sobre o crescimento e o rendimento depende, por um lado da espécie e da variedade da cultura e por outro, da magnitude e do tempo que ocorre o déficit hídrico. O efeito da magnitude e do tempo em que ocorre o déficit hídrico sobre o crescimento e rendimento da cultura é de grande importância na hora de se programar o suprimento de água disponível, porém limitado, ao longo dos períodos de crescimento das culturas durante o período de crescimento.

As culturas variam quanto ao efeito do déficit hídrico sobre seu crescimento e rendimento. Quanto às necessidades hídricas da cultura são atendidas plenamente mediante o suprimento de água disponível ($E_{Tr} = E_{Tm}$), a quantidade de matéria seca total e o rendimento produzido por unidade de água (kg/m^3) varia com a cultura.

3.3.4 Fator de resposta da cultura

A resposta do suprimento de água sobre o rendimento é quantificada através do fator de resposta da cultura (K_y) que relaciona a queda de rendimento relativo $\left[1 - \left(\frac{Y_r}{Y_m}\right)\right]$ com o déficit de evapotranspiração relativa $\left[1 - \left(\frac{E_{Tr}}{E_{Tm}}\right)\right]$. Um déficit de certa magnitude, expresso como a relação entre a evapotranspiração real (E_{Tr}) e a evapotranspiração máxima (E_{Tm}) pode ocorrer tanto de forma contínua durante todo o período de crescimento da cultura como

durante qualquer uma das fases específicas de crescimento. A magnitude do déficit hídrico refere-se, no primeiro caso ao déficit em relação as necessidades hídricas da cultura durante todo o seu período de crescimento e, no segundo, ao déficit relativo às necessidades hídricas da cultura em um determinado período de crescimento.

Os valores de K_y para a maioria das culturas são reduzidos, supondo-se que a relação entre o rendimento relativo $\left(\frac{Y_r}{Y_m}\right)$ e a evapotranspiração relativa $\left(\frac{ET_r}{ET_m}\right)$ é linear e válida para déficits hídricos até cerca de 50%, ou seja, $\left[1 - \left(\frac{ET_r}{ET_m}\right)\right] = 0.5$.

Para o presente estudo foi utilizado um valor de fator de resposta da cultura ao estresse hídrico de 0.85, valor que representa a média da resposta ao estresse hídrico considerando o ciclo como um todo, sendo este valor adaptado a partir de Doorembos & Kassam (1979).

3.3.5 Redução de rendimento em função do déficit de evapotranspiração relativo

Realizou-se a construção de planilhas de dados, onde se simulou diversas reduções de disponibilidade hídrica, as simulações foram realizadas em intervalos de 10 em 10% das lâminas líquidas a serem aplicadas para máximo rendimento, sendo que tais lâminas foram obtidas através das simulações dos cenários de data de semeadura e duração do ciclo da cultura, no modelo WINSAREG.

Assim, para cada cenário simulado obteve-se os valores médios de redução de rendimento relativo máximo em função das reduções de lâmina aplicada. Sendo posteriormente com o uso do programa SIGMAPLOT® ajustadas funções que determinassem as reduções de rendimento relativas às reduções de percentual de lâmina aplicada.

3.4 Análise de Variância

Objetivando a comparação das combinações de data de semeadura e duração de ciclo simuladas fez-se uso da análise de variância, que trata-se de um método para comparar tratamentos, possibilitando a conclusão sobre o comportamento dos tratamentos com margem de erro conhecida, sendo esta normalmente a de 5%.

Assim, os dados, no caso lâminas de irrigação suplementar requeridas pela cultura da soja nas diversas combinações de data de semeadura e duração do ciclo da cultura, foram considerados como obtidos de forma experimental.

Sendo realizado o delineamento bifatorial do tipo blocos ao acaso, onde se caracterizou a existência de conjuntos de unidades experimentais homogêneas, sendo estas as safras, isto é, os nove cenários foram simulados para cada safra, onde cada safra possui condições experimentais próximas, independente do cenário simulado, mas existem diferenças em termos climáticos, de solo e cultura de safra para safra, caracterizando a adequação para a realização do bloqueamento das safras.

No delineamento, os níveis do fator A são constituídos pelas três datas de semeadura estipuladas, isto é, 15/10, 15/ e15/12 e, os níveis do fator D, pelas durações de ciclo propostas, no caso, precoce (110 dias), médio (125dias) e tardio (140 dias).

Após a realização da análise de variância, e considerando os tratamentos qualitativos foi realizado teste Tukey, que se trata de um teste para a comparação de contrastes entre médias de tratamentos, sendo realizada a comparação de médias do fator A (Data de semeadura) dentro do fator D (Duração do ciclo da cultura).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os fatores analisados nas nove combinações resultantes de data de semeadura e duração de ciclo da cultura simuladas, considerando o período entre safras de 1993 a 2007 e a microrregião de Passo Fundo, RS.

4.1 Distribuição temporal das precipitações pluviiais

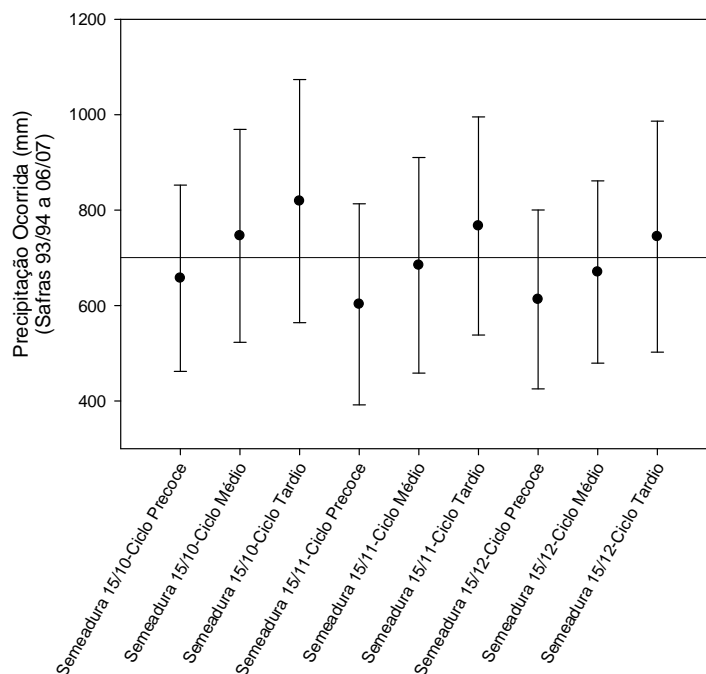


Figura 10 - Valores de precipitação média (mm) com seus desvios para o intervalo entre safras 1993-2007, para as combinações de data de semeadura e duração do ciclo da cultura.

Pode-se observar que comparando as possibilidades de semeadura em 15/10, 15/11 e 15/12, nas suas respectivas combinações de duração do ciclo da cultura, as realizadas em 15/10 demonstraram maiores valores para precipitação acumulada durante os ciclos da cultura.

Outro fato que pode ser observado é a variabilidade das precipitações anuais, que desde já apresenta-se expressiva, assim as modificações nas datas de semeaduras apresentam reflexos nas demandas de complementação hídrica para o suprimento das necessidades das culturas.

Verifica-se também que os desvios apresentam-se bastante expressivos em relação à média, caracterizando a grande variabilidade temporal dos níveis pluviométricos. Estas variabilidades vêm sendo estudadas e são relacionadas a diversos fenômenos atmosféricos, onde podem ser citados como principais o El Niño e a La Niña, que caracterizam-se por períodos de precipitações pluviométricas acima e abaixo da média, respectivamente, para o estado do Rio Grande do Sul.

Berlato et al. (2005) cita que o ENOS (El Niño Oscilação Sul) é um fenômeno de interação oceano-atmosfera que ocorre no Oceano Pacífico tropical sendo a principal causa da variabilidade climática em diversas regiões do Globo.

Estudos da climatologia estatística do ENOS no Rio Grande do Sul, com mais de 80 anos de dados, demonstram que no período de maior impacto (outubro-novembro-dezembro) há uma probabilidade de mais de 80% de eventos El Niño determinarem precipitação pluvial acima e 75% de eventos La Niña ocasionarem precipitação pluvial abaixo da média, respectivamente, para o estado, corroborando com os dados encontrados no atual estudo.

Analisando as diversas combinações de duração do ciclo de cultura e data de semeadura pode-se observar que para uma mesma combinação as variações anuais continuam a ser elevadamente expressivas, o que vem a apontar diferenças em escala anual das necessidades de suprimento de água às culturas, visto as alterações na entrada de água, precipitação pluvial ou irrigação, influenciam no balanço hídrico do solo.

A Figura 11 apresenta a distribuição temporal das precipitações pluviais (mm) em cada safra para as combinações de data de semeadura e duração do ciclo da cultura.

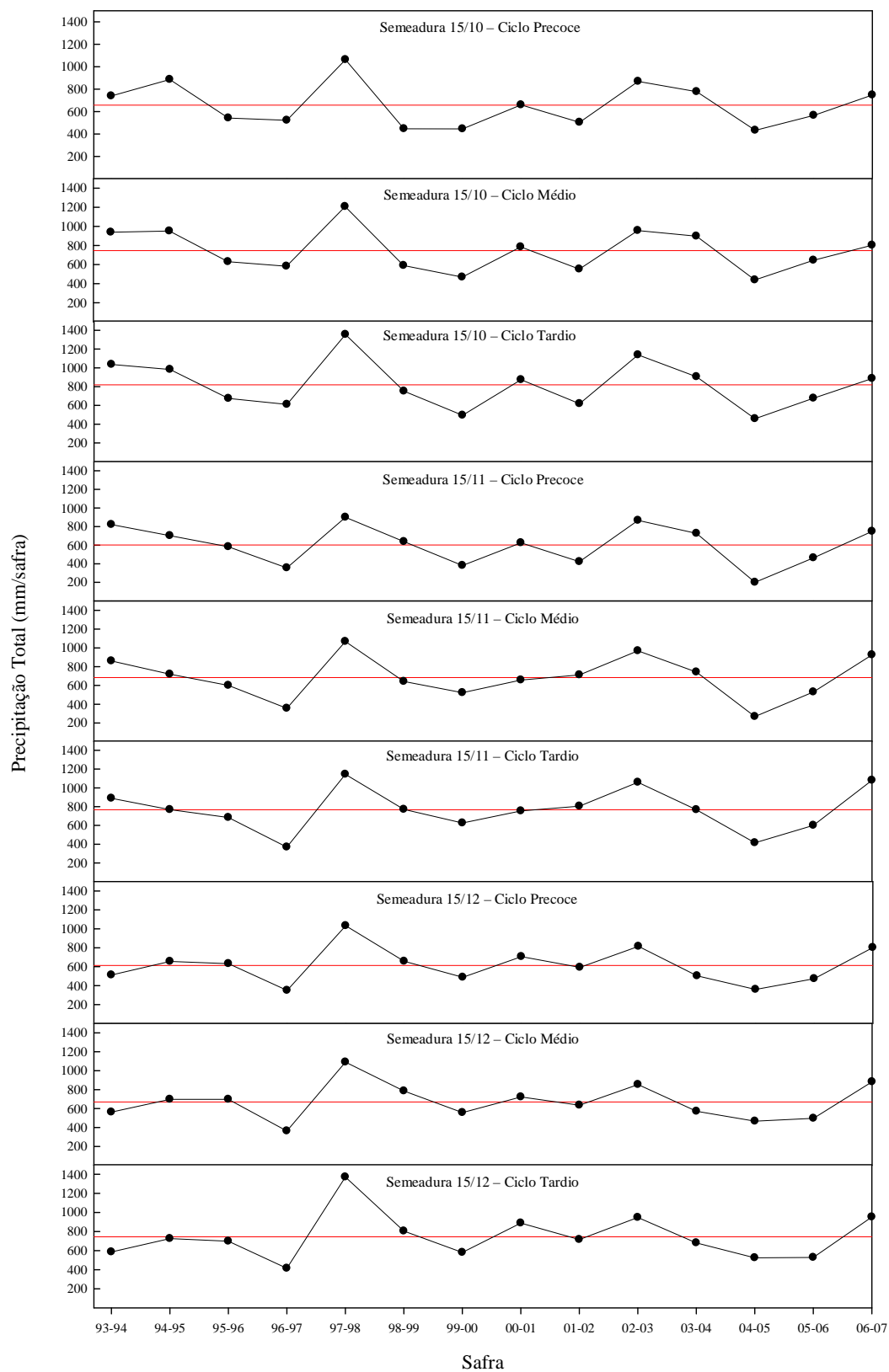


Figura 11 - Distribuição temporal da precipitação total ocorrida (mm) em cada safra para a combinação de data de semeadura e duração do ciclo da cultura.

Através da Figura 11, observa-se que entre os ciclos de cultura analisados, os maiores desvios relacionam-se aos maiores períodos de exposição da cultura a campo, isto é, maiores desvios ocorrem em culturas de duração de ciclo tardio, seguidos pelo ciclo médio e precoce.

Outro fato relevante é a existência de safras críticas, isto é, safras que independentemente das combinações data de semeadura e duração do ciclo de cultura, apresentam o suprimento pluviométrico expressivamente reduzido. Dentre estas podem ser citadas as safras de 1996/1997, 1999/2000 e em especial safra de 2004/2005.

A estiagem de 2004/2005 ocasionou uma quebra na safra de grãos, no Brasil, da ordem de 20 milhões de toneladas. No Rio Grande do Sul, somente as culturas de soja, milho e feijão tiveram uma redução de rendimento de 8,5 milhões de toneladas, correspondendo a 42% da perda total brasileira de grãos (BERLATO et al., 2005).

4.2 Necessidades de lâmina de irrigação suplementar

Devido às elevadas flutuações dos índices pluviométricos no período de desenvolvimento da cultura da soja, pode-se apontar que existe a necessidade de determinação dos déficits hídricos ocorridos nas últimas safras e de quantificação das lâminas de irrigação suplementar, de modo a atender tais restrições hídricas na cultura da soja na microrregião estudada.

4.2.1 Análise temporal das necessidades de lâmina suplementar

A variabilidade temporal e espacial no rendimento de grãos das principais culturas agrícolas no estado do Rio Grande do Sul está associada, entre outros fatores, à ocorrência de déficits hídricos. Os déficits hídricos ocorrem, normalmente, durante os meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro, como consequência da aleatoriedade temporal e espacial da precipitação pluvial.

Como citado, a precipitação no estado é relativamente elevada e bem distribuída nas quatro estações do ano. No entanto, os valores normais no verão, em geral, são insuficientes para atender às demandas hídricas das culturas, determinando rendimentos inferiores aos que se conseguiriam com suprimento adequado de lâmina. A Figura 12 apresenta as lâminas suplementares médias requeridas para a cultura da soja, durante o período do estudo,

juntamente com seus desvios para cada cenário analisado, simuladas a partir do modelo WINISAREG.

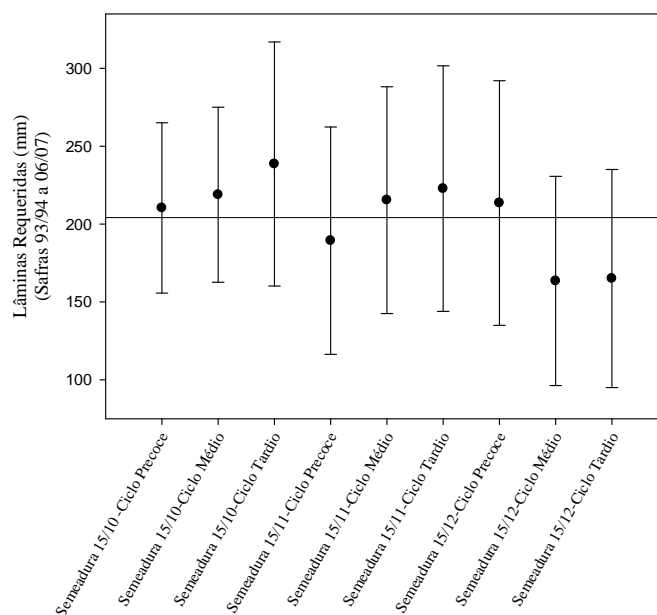


Figura 12 - Valores simulados a partir do modelo WINISAREG de lâmina suplementar média (mm) requerida para a cultura da soja nas safras de 1993 a 2007 considerando a combinação de data de semeadura e duração do ciclo da cultura.

Nota-se que para os cenários simulados a semeadura em 15/10, nas culturas com duração de ciclos precoce, médio e tardio, semeadura em 15/11 nos ciclo de cultura médio e tardio e 15/12 no ciclo de cultura precoce, as lâminas de irrigação suplementares médias são superiores a 200 mm, o que vem a ser um valor bastante representativo em relação à necessidade total de água da cultura da soja.

O exposto está de acordo com Mota & Agendes (1989), que encontraram a necessidade de irrigação variando entre 142.2 a 300.2 mm, em 80% do tempo, em razão dos limites inferiores de disponibilidade hídrica adotados na irrigação, por aspersão, em solo Passo Fundo.

Aponta-se também a ocorrência de desvios expressivos em relação à lâmina média de irrigação suplementar requerida para cada cenário, indicando a existência de diferenças quanto às necessidades de irrigação a cada safra, o que, analisando economicamente, expõe que a implantação de sistema de suprimento de água artificial pode vir a interferir significativamente nos custos envolvidos para a aplicação da lâmina.

A Tabela 05 apresenta os valores de lâmina média de irrigação suplementar requeridos para a cultura da soja nas diferentes combinações de duração de ciclo da cultura e data de semeadura, seguidos de seus desvios. Observa-se que, em média, estes valores encontram-se entre 163.48 e 238.60 mm, valores estes bastante expressivos considerando a necessidade hídrica para a cultura da soja, onde, segundo Doorenbos & Kassan (1979) e Reichardt (1987), esta apresenta necessidades hídricas, para obter uma produtividade elevada, entre 450 a 850 mm por ciclo, dependendo do clima e da duração do período de crescimento.

Assim, considerando o valor mínimo de necessidade hídrica da cultura, isto é, 450 mm, a lâmina suplementar de aproximadamente 204 mm, que é a média geral considerando todos os cenários propostos, representa acima de 45 % da lâmina requerida pela cultura. O que é expressivo, considerando-se reduções de rendimento devido a déficits hídricos.

Tabela 05- Valores de lâmina média de irrigação suplementar (mm) requeridas para a cultura da soja em cada combinação de duração do ciclo da cultura e data de semeadura, seguidos de seus desvios.

| Cenário Simulado | Lâmina Média Requerida (mm) | Desvio Padrão (mm) |
|------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|
| Semeadura 15/10 (Ciclo Precoce 110 dias) | 210.39 | 54.72 |
| Semeadura 15/10 (Ciclo Médio 125 dias) | 218.80 | 56.20 |
| Semeadura 15/10 (Ciclo Tardio 140 dias) | 238.60 | 78.37 |
| Semeadura 15/11 (Ciclo Precoce 110 dias) | 189.35 | 73.01 |
| Semeadura 15/11 (Ciclo Médio 125 dias) | 215.39 | 72.83 |
| Semeadura 15/11 (Ciclo Tardio 140 dias) | 222.79 | 78.83 |
| Semeadura 15/12 (Ciclo Precoce 110 dias) | 213.55 | 78.57 |
| Semeadura 15/12 (Ciclo Médio 125 dias) | 163.48 | 67.20 |
| Semeadura 15/12 (Ciclo Tardio 140 dias) | 165.04 | 70.03 |
| Média Geral | 204.15 | 69.97 |

Analisando as combinações de duração de ciclo da cultura e data de semeadura são perceptíveis as variabilidades anuais de necessidade de complementação hídrica para a cultura em dado período. A Figura 13 apresenta a distribuição temporal das necessidades de aplicação de lâmina de irrigação suplementar considerando as combinações data de semeadura e duração de ciclo da cultura para as safras 93/94 a 06/07.

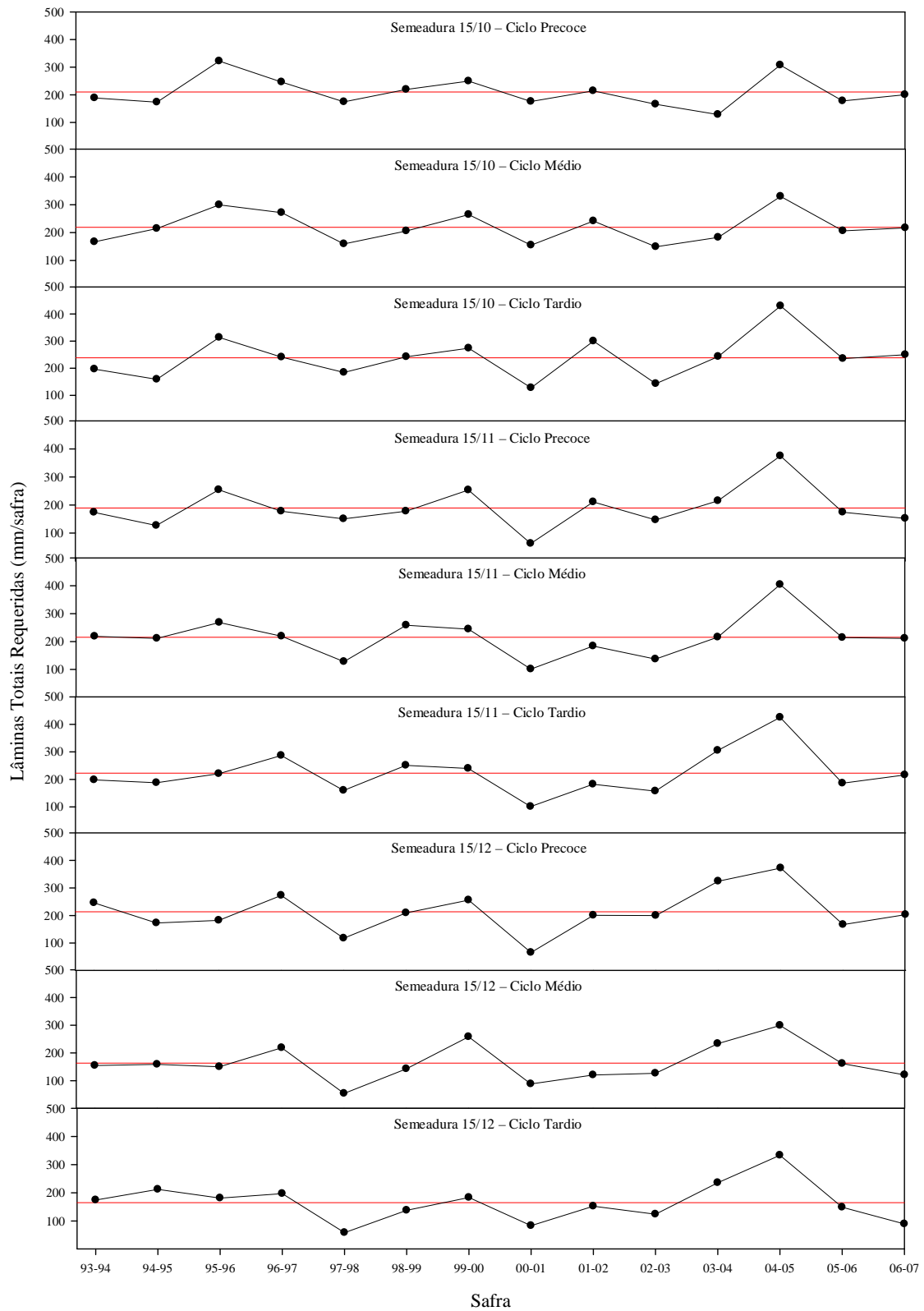


Figura 13 - Distribuição temporal das necessidades de aplicação de lâmina de irrigação suplementar considerando a combinação data de semeadura e duração do ciclo da cultura para as safras de 93/94 a 06/07.

Nota-se que para o período em estudo, as safras críticas em termos de suprimento da demanda hídrica para a cultura da soja foram as de 95/96, 99/00, 01/02 e 04/05, sendo que as demandas mais elevadas estão presentes na safra 04/05, onde as necessidades hídricas chegaram a aproximadamente 430 mm para o cenário mais crítico (semeadura em 15/10 com duração de ciclo da cultura tardio). Para a mesma safra a necessidade de irrigação suplementar mínima foi de aproximadamente 300 mm, para o cenário de semeadura em 15/12 e duração de ciclo médio.

Analisando as safras do período em estudo (93/94 a 06/07), verificou-se que todos os cenários simulados apresentaram necessidade de irrigação suplementar, sendo a mínima e máxima lâmina requerida entre aproximadamente 54 e 430 mm, para safra 97/98 semeadura em 15/12 ciclo médio e safra 04/05 semeadura em 15/10 para culturas de ciclo tardio, respectivamente.

Observa-se que para as safras citadas como críticas, devido as suas reduzidas precipitações pluviométricas, as lâminas de irrigação suplementar apresentam elevado sobressalto em relação às tendências médias. Este fato é consideravelmente expressivo em termos de custos com a implantação de sistemas de irrigação, visto a necessidade de super dimensionamentos (diâmetro de tubulações, motores, barragens...) para suprir tais demandas.

4.2.2 Análise das lâminas de irrigação suplementar

A partir dos dados simulados realizou-se a análise de variância do experimento a um nível de probabilidade de erro de 5%, sendo utilizado o delineamento bifatorial do tipo bloco ao acaso, com bloqueamento para o fator safras.

Sendo os níveis do fator A constituídos pelas três datas de semeadura estipuladas, isto é, 15/10, 15/ e 15/12 e, os níveis do fator D, pelas durações de ciclo propostas, no caso, precoce (110 dias), médio (125 dias) e tardio (140 dias).

A Tabela 06 apresenta a análise de variância para os dados de lâmina de irrigação suplementar requerida para a cultura da soja para cada cenário de combinação de data de semeadura e duração do ciclo da cultura simulado.

Verifica-se na Tabela 06 que a hipótese H_0 foi rejeitada para os blocos (safras), e neste caso, conclui-se em um nível de 5% de probabilidade de erro, que os blocos são heterogêneos, sendo o delineamento blocos ao acaso eficiente.

Também se verifica a rejeição da hipótese H_0 para a interação AD, neste caso, conclui-se em um nível de 5% de probabilidade de erro a ocorrência de interação entre a combinação de data de semeadura e duração de ciclo da cultura, sendo necessária a realização de teste de comparação de médias dos níveis do fator A dentro do fator D.

O coeficiente de variação encontrado para o experimento simulado foi de 17.46%, o que pode ser considerado baixo para experimentos que envolvam dados obtidos a partir de simulação.

Tabela 06 - Análise da Variância para um experimento bifatorial, sendo Fator A (Data de semeadura) e Fator D (Duração do ciclo da cultura). Sendo CV causa de variação, GL graus de liberdade, SQ soma de quadrados, QM quadrado médio, Fc fator F calculado e F5% valor teórico de f em que $P(F>f) = 5\%$.

| | CV | GL | SQ | QM | Fc | F5% |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Blocos | | 13 | 449328.26 | 34563.71 | 27.16886 | 1.82 |
| Fator A | | 2 | 38512.193 | 19256.1 | 15.13628 | 3.09 |
| Fator D | | 2 | 1922.5454 | 961.2727 | 0.75561 | 3.09 |
| Interação AD | | 4 | 35278.127 | 8819.532 | 6.932606 | 2.46 |
| Erro | | 104 | 132306.85 | 1272.181 | --- | --- |
| Coeficiente de variação: 17.46 % | | | | | | |

A Tabela 07 apresenta a os resultados para comparação de médias, considerando os níveis do fator A (data de semeadura) dentro do fator D (duração do ciclo da cultura).

Tabela 07- Teste Tukey para comparação de médias, considerando os níveis do fator D (Duração do ciclo da cultura) dentro do fator A (Data de semeadura), sendo A1 (15/10), A2 (15/11) e A3 (15/12).

| Nível do Fator D | | | | | | |
|-------------------------|----------|--------------|------------|---------------|------------|--|
| Precoce | | Médio | | Tardio | | |
| A3 | 213.56 a | A1 | 218.89 a | A1 | 238.61 a | |
| A1 | 210.39 a | A2 | 215.39 a b | A2 | 222.79 a b | |
| A2 | 189.35 a | A3 | 163.49 b | A3 | 165.04 b | |

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Observa-se através da Tabela 07 que o teste de comparação de médias não apontou diferenças entre as datas de semeadura para culturas com duração de ciclo precoce. Já para as culturas de duração de ciclo médio e tardio, verificou-se que a semeadura em 15/10 difere da semeadura em 15/12, sendo que para o período em estudo, considerando as condições utilizadas no experimento seria mais adequado optar por semeadura em 15/12, considerando a menor demanda de lâmina de irrigação suplementar.

4.2.3 Análise de frequência dos eventos de aplicação de lâmina suplementar

As diferenças das necessidades hídricas das plantas a serem supridas através de aplicação de lâmina artificial, como é o caso do uso da irrigação suplementar, influenciam elevadamente nos custos envolvidos com a instalação, operação e manutenção dos sistemas utilizados. A Figura 14 apresenta os diagramas relativos às frequências absolutas de eventos de aplicação de lâminas de irrigação suplementar considerando as diferentes combinações de data de semeadura e duração do ciclo da cultura para o período entre safras entre 1993 a 2007.

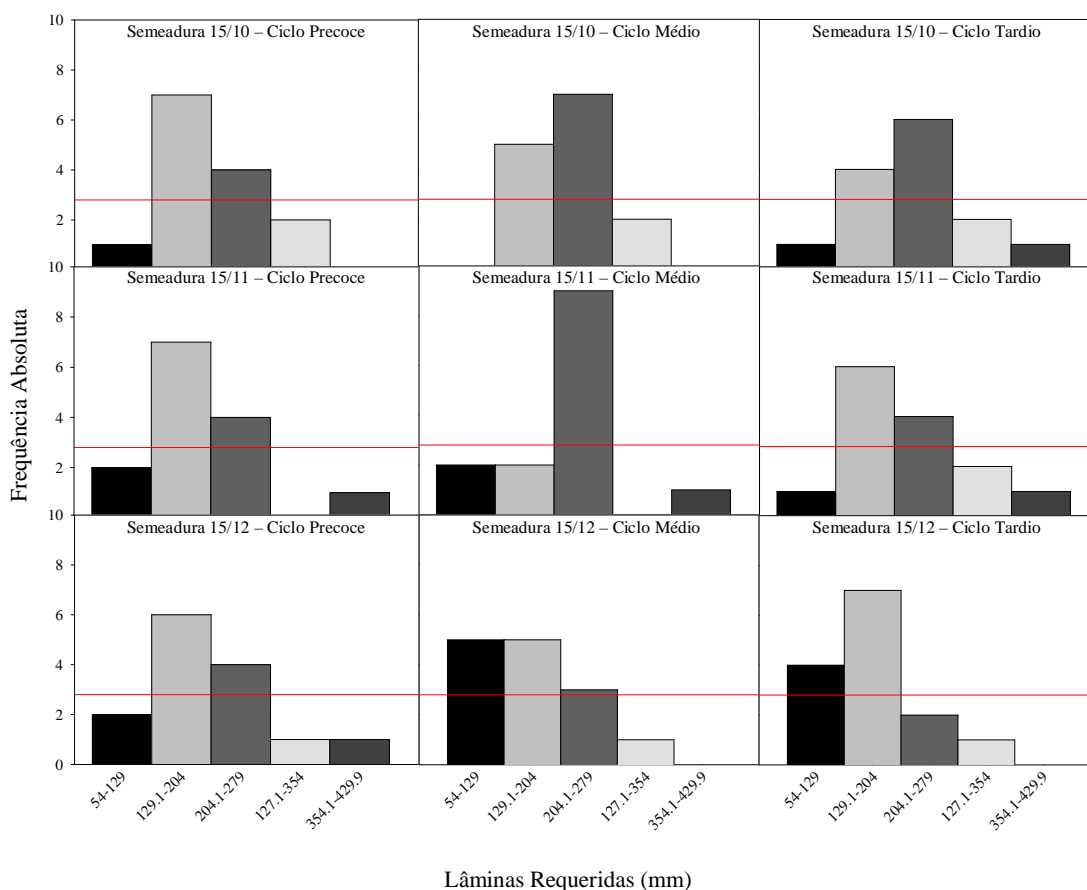


Figura 14 - Diagramas relativos às frequências absolutas de eventos de aplicação de lâminas de irrigação suplementar considerando as diferentes combinações de data de semeadura e ciclo da cultura para o período entre safras entre 1993 a 2007.

Nota-se que para semeaduras em 15/10, os três cenários simulados apresentam as maiores frequências absolutas de eventos de irrigação associados às classes 2 e 3, com

predomínio da classe 3, apontando que na maioria dos anos estudados os valores de lâmina de irrigação requerida pela cultura estão entre os valores extremos destas classes, isto é, entre 129.1 a 279 mm. Para sementeiras em 15/11, observa-se comportamento próximo, mas com predomínio da classe 2.

Para sementeira em 15/12 observa-se que as maiores freqüências absolutas estão associadas aos valores extremos das classes 1 e 2, que situam-se entre 54.1 a 204 mm. Conseqüentemente necessitando em média menores necessidades de aplicação de lâminas de irrigação suplementar médias comparando com as demais datas de sementeira.

4.3 Número de eventos de irrigação

O interesse pela irrigação, no Brasil, emerge nas mais variadas condições de clima, solo e cultura, sendo, em determinadas regiões, a única forma de cultivo viável. Sendo a irrigação uma forma de aporte a maiores garantias de rendimentos e lucratividade na atividade agrícola. A Figura 15 apresenta a representação do número de eventos de irrigação necessários para as combinações de data de sementeira e duração do ciclo da cultura.

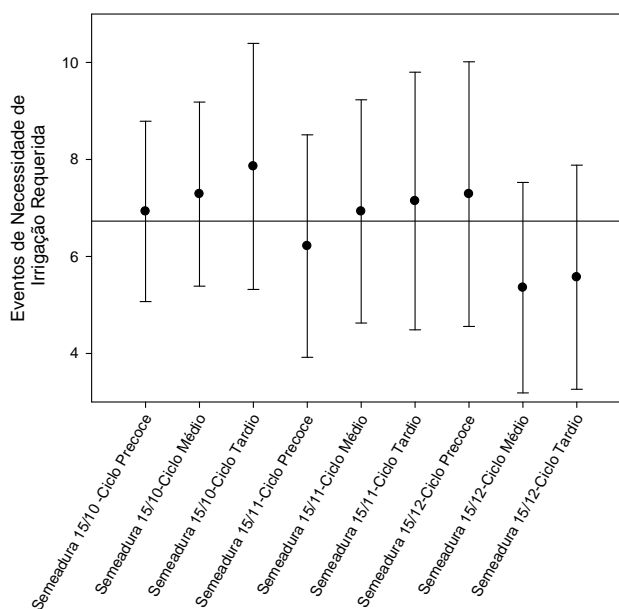


Figura 15 - Representação do número de eventos de irrigação necessários para a combinação de data de sementeira e duração do ciclo da cultura para o período entre safras 93/94 a 06/07.

Nota-se que para as sementeiras realizadas em 15/10 e 15/11 o número de eventos de irrigação eleva-se à medida que a duração do ciclo da cultura é incrementada. Já para a

semeadura em 15/12 esta tendência não pode ser verificada, sendo as culturas de duração do ciclo precoce as que apresentam maiores necessidades de eventos de irrigação. Em média, o número de eventos de irrigação suplementar necessários para atender as necessidades hídricas da cultura, sem déficits, situa-se próximo a 7 eventos.

Ao longo das safras estudadas pode ser verificado que o número de eventos de irrigações suplementares necessários ao suprimento hídrico da cultura também apresenta elevada variação.

A Figura 16 apresenta a distribuição temporal do número de eventos de irrigação necessários para cada combinação data de semeadura e duração de ciclo da cultura para o período entre safras estudado.

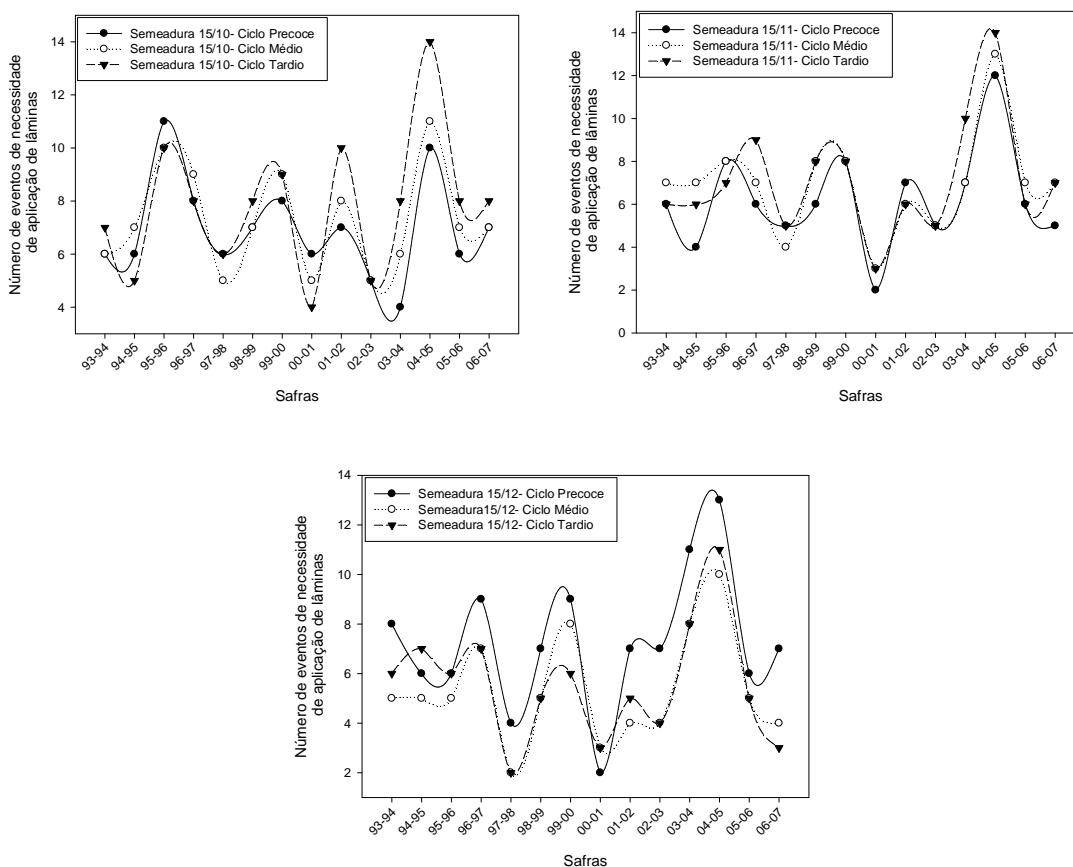


Figura 16 - Distribuição temporal do número de eventos de irrigação necessários para a aplicação da lâmina requerida na cultura da soja considerando as combinações de data de semeadura e duração do ciclo da cultura para o período entre safras 93/94 a 06/07.

Verifica-se que as tendências para o número de irrigações nos diferentes ciclos mantêm-se próxima independentemente da duração do ciclo. Observam-se também situações extremas, onde são necessários 14 eventos de irrigação para o suprimento das necessidades hídricas da cultura, o que ocorre para semeadura em 15/10 e duração de ciclo de cultura tardio e de dois eventos de irrigação para semeadura em 15/11 e 15/12 na duração de ciclo precoce.

Estas elevadas variações apontam dificuldades para o dimensionamento e adequação do sistema a atender as demandas da cultura, visto que existe a necessidade de adequação em termos de demanda energética e hídrica, fato que muitas vezes remete ao produtor trabalhar com elevadas faixas de variação, muitas vezes elevando os custos com produção.

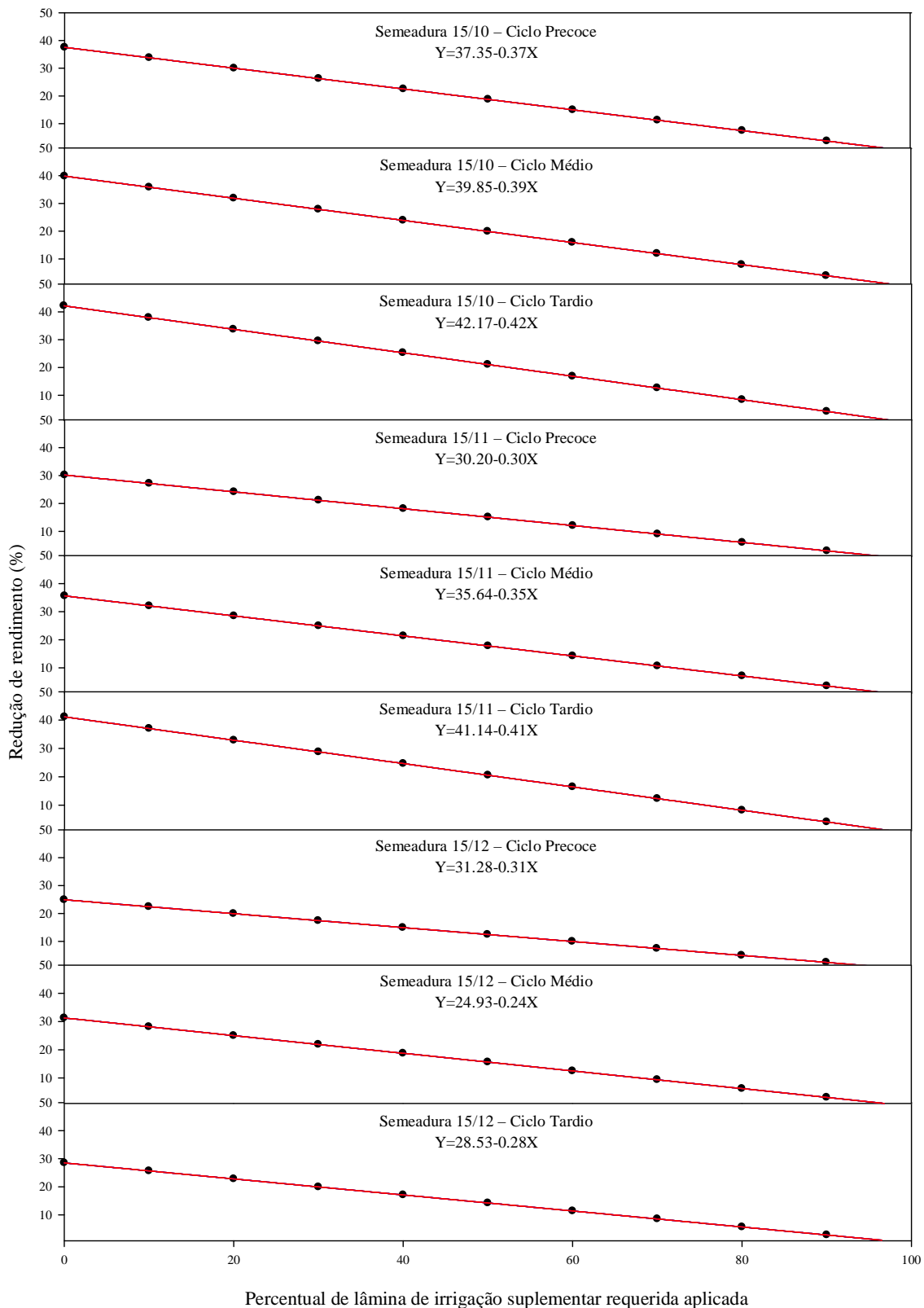
4.4 Rendimentos relativos em função das lâminas aplicadas

Muitas vezes não apresenta-se viável econômica e tecnicamente a realização da aplicação total da lâmina de irrigação suplementar requerida pelas culturas. Assim, torna-se importante o estudo de pontos marginais e funções que tornem possível a determinação das reduções de rendimento relativas à aplicação de lâminas de irrigação parcial às culturas.

A Figura 17 apresenta as funções de rendimento relativo em relação ao percentual de lâmina média de irrigação aplicada para o período em estudo, nas diferentes combinações de data de semeadura e duração de ciclo da cultura.

Onde pode ser notado que à medida que se eleva o percentual de lâmina aplicado, isto é, aproxima-se a lâmina requerida da lâmina de irrigação fornecida, suprimindo as necessidades da cultura, ocorrem quedas nas reduções de rendimento. Assim, a cultura tende a expressar seu máximo potencial produtivo, no que diz respeito ao atendimento da disponibilidade hídrica.

Do contrário, quando devido a motivos técnicos ou econômicos, não é possível suprir as necessidades hídricas totais da cultura passam a ocorrer reduções de rendimento, que se tornam mais expressivos à medida que menores percentuais de lâmina são fornecidos.



Percentual de lâmina de irrigação suplementar requerida aplicada

Figura 17 - Rendimento relativo em função do percentual de lâmina média de irrigação simulada aplicada para o período em estudo, nas diferentes combinações data de semeadura e duração do ciclo da cultura.

Para os cenários propostos é possível perceber menores reduções de rendimento em função do percentual de lâmina aplicado para culturas de ciclo precoce com semeadura em 15/11, para culturas de ciclo médio com semeadura em 15/12 e para cultura de ciclo tardio com semeadura em 15/12.

Analisando o fator data de semeadura, verifica-se que para semeaduras em 15/10 são menores as reduções de rendimento em culturas de ciclo precoce; para semeadura em 15/11 também são menores as reduções de rendimento para culturas de ciclo precoce; já para semeadura em 15/12 são menores as reduções de rendimento para as culturas de ciclo médio.

No geral, as menores reduções de rendimento em função dos percentuais fornecidos das lâminas de irrigação requeridas, obtidos a partir dos dados médios de lâmina requerida simulados para o período em estudo, são observadas para semeadura em 15/12 para culturas de ciclo médio, onde as reduções de rendimento podem aproximar-se de 25% do rendimento relativo máximo, enquanto as mais elevadas reduções de rendimentos são observadas para semeadura em 15/10 em culturas de ciclo tardio, onde as reduções de rendimento podem ultrapassar 42% do rendimento relativo máximo.

5 CONCLUSÕES

De acordo com a metodologia utilizada e nas condições em que o trabalho foi realizado pode-se concluir que:

✓ Foi observada a ocorrência de variabilidade na distribuição das precipitações pluviais na microrregião de Passo Fundo para o período em estudo. Os volumes de precipitação pluvial, nas três durações de ciclos de cultura simulados, são decrescentes com o atraso da data de semeadura;

✓ Existe necessidade de aplicação de lâmina de irrigação suplementar, independentemente do cenário simulado para todo o período em estudo, sendo que estas variam de 54.1 a 429.9 mm;

✓ As combinações de duração de ciclos de cultura médio e tardio e semeadura em 15/12 necessitam de menores lâminas de irrigação suplementar quando comparadas com os demais cenários simulados;

✓ As menores reduções de rendimento em função do percentual de lâmina aplicado foram encontradas para semeadura em 15/12 em culturas de duração de ciclo médio;

✓ As maiores reduções de rendimentos em função do percentual de lâmina aplicado foram encontradas para semeadura em 15/10, para culturas de duração do ciclo tardio, onde estas podem chegar a 42% do rendimento relativo máximo.

6 SUGESTÕES

A partir dos estudos realizados, julga-se interessante a continuidade do trabalho, realizando a análise da viabilidade econômica da implementação de irrigação suplementar para a cultura da soja na microrregião em estudo, juntamente com estudos com outras culturas e em outras microrregiões.

Também se recomenda o uso de cenários que simulem custos relativos a equipamentos, terra, água, energia, tributos, entre outros, determinando os pontos marginais e a combinação de fatores que apresentem relação custo-benefício, taxa interna de retorno, valor presente líquido e tempo de retorno de capital mais atrativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBA, I.; RODRIGUES, P. N.; PEREIRA, L. S. Irrigation scheduling simulation for citrus in Sicily to cope with water scarcity. In: ROSSI, G.; CANCELLIERE, A.; PEREIRA, L. S.; OWEIS, T.; SHATANAWI, M.; ZAIRI, A. (Eds.). Tools for drought mitigation in Mediterranean regions. Dordrecht: Kluwer Academic. **Water Science and Technology Library**, v. 44, 2003, p.223-242.

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and drainage**, 56, Rome, 1998. 300p.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Principais sistemas aquíferos do Brasil**. Brasília, 2004. 14 p.

AYOADE, J. O. **Introdução a Climatologia para os Trópicos**. São Paulo: Difel, 1986.

BEGG, J. E.; TURNER, N. C. Crop water deficits. *Advances Agronomy*. **Criando**, v.28, 1976, p.161-217.

BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; WESTPHALEN, S. L. Época de semeadura de soja no Rio Grande do Sul: avaliação e interpretação dos ensaios ecológicos de soja. **IPAGRO Informa**, Porto Alegre, v.18, 1977, p.7-4.

BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul e impactos das estiagens na produção agrícola. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da Universidade - UFRGS, 1992. p.11-24.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Variabilidade interanual de precipitação pluvial e rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, 1999, n.1, p. 119-125.

BERLATO, M. A. et al. Associação entre El Niño oscilação Sul e a produtividade de milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2005, v.40, p.423-432.

BLACKBURN, P. Safra brasileira de soja 2005/06 deve atingir 59,2 milhões de toneladas. In: **Yahoo Notícias**. Brasil: Yahoo! Internet do Brasil LTDA, 2005.

BOARD, J. E.; KAMAL, M.; HARVILLE, B. G. Temporal importance of greater light interception to increased yield in narrow-row soybean. **Agronomy Journal**, v.84, 1992, p.575-579.

BOARD, J. E.; TAN, Q. Assimilatory capacity effects on soybean yield components and pod number. **Crop Science**, v.35, 1995, p.846-851.

BOARD, J. E.; HARVILLE, B. G. Late-planted soybean yield response to reproductive source/sink stress. **Crop Science**, v.38, 1998, p.763-771.

BUSS, A.; QUEIROZ, E. F.; TERASAWA, F.; KASTER, M.; MENOSSO, O. G. **Soja 72**. Curitiba: IPEAME, 1972. 24p. (IPEAME. Circular, 14).

CARLESSO, R. et al. Manejo da irrigação do milho a partir da evapotranspiração máxima da cultura. **Eng. Agric., Jaboticabal**, v. 20, n. 1, 2000, p. 15-23.

CHRISTOFIDIS, D. Irrigação, a fronteira hídrica e a produção de alimentos. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, n. 54, 2002, p. 46-55.

COSTA, J. A. 1996. **Cultura da soja**. Porto Alegre: ed. Evangraf, 233 p.

COUTO, L. Como iniciar e conduzir um sistema produção agrícola sob irrigação. **Apostila de Mincurso**, CONIRD, 2003, 23p.

CUNHA, G. R. et al. Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica. *Revista de Agrometeorologia, Santa Maria*, v.6, n.1, 1998, p.111-119.

DARDANELLI, J. L.; et al. An empirical model for root water uptake. **Field Crop. Res.**, 2004, p.59-71.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma, **Riego y drenage** 33, 1980. 212p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Las necesidades de água de los cultivos. Roma, **Riego y drenage** 24, 1980. 194p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Roma, **Irrigation and Drainage Paper** 33, 1979. 306p.

DOSS, B. D. & THURLOW, D. L. Irrigation, row width, and plant population in relation to growth characteristics of two soybean varieties. **Agronomy Journal**, v.66, n.5, 1974, p.620-623.

DOSS, G. S.; PEARSON, R. W.; ROGGERS, H. T. Effect of soil water stress at various growth stages on soybeans yield. **Agronomy Journal**, v.66, n.2, 1974, p.297-299.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1981. **Programa nacional de pesquisa de soja**. Brasília. 115 p.

EMBRAPA SOJA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil 1999/2000**. Londrina: Embrapa/CNPSO, 1999. p. 2226. (Documentos, 132).

EMBRAPA SOJA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja: Região Central do Brasil**. 2007 225p.

EITZINGER, J.; et al. A simulation study of the effect of soil water balance and water stress on winter wheat production under different climate change scenarios. **Agric. Water Manag.**, 2003, p.195-217.

FABIAO, M. S. et al. Water Saving in the Yellow River Basin, China. 2. Assessing the Potential for Improving Basin Irrigation, *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Manuscript LW, 2003.

FARIAS, J. R. et al. Caracterização do risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, 2001, p. 415-421.

FERGUSON, C. E. Teoria micro-econômica. 11ed. Rio de Janeiro, **Forense Universitária**, 1988. 609p.

FERNANDES, E. J.; TURCO, J. E. P. Evapotranspiração de referência para manejo da irrigação em cultura de soja. **Irriga**, v. 8, n. 2, 2003, p. 132-141.

FERNANDO, R. M.; PEREIRA, L. S.; LIU, Y. Simulation of capillarity rise and deep percolation with ISAREG. In: International Conference on Agricultural Science and Technology. **Information technology for agriculture**. Beijing, ICAST, v.6, 2001, p.421-426.

FIETZ, C. R.; URCHEI, M. A. Deficiência hídrica da cultura da soja na região de Dourados, MS. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** [online], v.6, n.2, 2002, p. 262-265.

FRIZZONE, J. A. **Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso de nitrogênio e lâmina de irrigação**. Piracicaba, 133p. Tese (Doutorado em Agronomia, área de concentração em solos e nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. USP. 1986.

FRIZZONE, J. A. Funções de resposta do feijoeiro ao uso do nitrogênio e lâmina de irrigação. In: Simpósio sobre o manejo de água na agricultura. Campinas, 1987. **Anais...**, Campinas, 1987. p. 123-133.

FRIZZONE, J. A. et al. Funções de produção água-cultura. In: **Planejamento de irrigação: Análise e decisão de investimento**. Brasília: Embrapa, 2005. p. 283-314.

FUNDAÇÃO CARGILL. A soja no Brasil Central. 3.ed. Campinas: **Fundação Cargill**, 1986. 444p.

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

GOMES, A. C. S. **Efeito de diferentes estratégias de irrigação sob a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) na região de Santiago, RS**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2007. 132p.

HERNANDEZ, F. B. T. Manejo da irrigação por pivô central na cultura do milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24, 1994, Viçosa - MG. Anais... Viçosa - MG: **Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola**, 1994. 13 p.

HEXEM, R. W.; HEADY, E. O. **Water production functions for irrigated agriculture**. Ames, Iowa: The Iowa University Press, 1978, 215p.

HOWELL, T. A.; CUENCA, R. H.; SOLOMON, K. H. Chapter 5 - Crop Yield Response, in Management of Farm Irrigation Systems, T. Howell and K. Solomon (editors). American Society of Agricultural Engineers Monograph. 1990, p. 93 - 122.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Safra deve ser 12,20% maior em 2006. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**, Brasília: Comunicação Social, 2005.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contagem da população 2007**. Rio de Janeiro, 2007.

IBGE - SIDRA. Sistema do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística de recuperação de dados automática. SIDRA. Disponível em: <www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric/default.asp>. Acesso em: abr. 2010.

JI, X. B.; et al. A mathematical model for simulating water balances in cropped sandy soil with conventional flood irrigation applied, **Agricultural Water Management**, Amsterdam v.87,n.3, 2007, p.337-346.

JOBIM, C. **Análise de viabilidade econômica da irrigação em face de cenários econômicos: aplicação ao feijão irrigado no RS**, Porto Alegre, 2007. 150 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2007.

KUDREV, T. G. **Água: vida das plantas**. São Paulo: Cone, 1994. 178 p.

LEO, L. F. R.; HERNANDEZ. F. B. T. O futuro da irrigação nos países de terceiro mundo. **A Voz do Povo**, Ilha Solteira, Ano I, n. 35, 2001, p.7.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: P.L. Libardi, 2000.

LIU, Y. et al. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain, **Agricultural Water Management**, Amsterdam. 1998, v.36, n.3, p.233-246.

LOUZADA, J. A. S. **Simulação da irrigação por inundação e da drenagem nos solos de várzea do Rio Grande do Sul**. 2004. 202p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Unidade - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, p. 204.

MAROUELLI, W. A. **Análise de distribuição das probabilidades de chuva, visando ao manejo de irrigação suplementar**. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 1993. p.123.

MARTINS, M. C. et al. Épocas de semeadura, densidades de plantas e desempenho vegetativo de cultivares de soja. **Scientia Agricola**, 1999, v. 56, n. 4. p. 851-858.

MELO, R. W. **Parametrização de modelo para estimação da produtividade da soja nas regiões do Planalto Médio, das Missões e do Alto Vale do Uruguai, Rio Grande do Sul**. 2005. 196 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

MICHELON, C. J. **Qualidade física de solos irrigados do Rio Grande do Sul e do Brasil Central**. 2005. 92f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Santa Maria, 2005.

MOTA, F. S. da; AGENDES, M. O. de O. Informação climática para planejamento da irrigação da soja no Rio Grande do Sul. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 1989, Maceio. **Anais**. Maceio: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1989. p.348-354.

MOTA, F. S. et al. Risco de seca para a cultura da soja em diferentes regiões climáticas e umidades de solo do Estado do Rio Grande do Sul. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.44, n.394, 1991, p.11-30.

MOTA, F. S. et al. Análise agroclimatológica da necessidade de irrigação da soja do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agroclimatologia**, Santa Maria, v.4, n.1, 1996, p.133-138.

MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **Soja: fatores que afetam o crescimento e rendimento de grãos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 31 p.

NEHMI, I. M. D. et al. Soja: mercado e perspectivas. In: **Agriannual 2005**: anuário da agricultura brasileira. 10.ed. São Paulo: FNP, 2004. p.455-490.

OKUYAMA, L. A.; FEDERIZZI, L. C. & BARBOSA NETO, J. F. Correlation and path analysis of yield and its components and plant traits in wheat. **Ciência Rural**, 2004, p. 1701-1708.

OWEIS, T.; RODRIGUES, P. N.; PEREIRA, L. S. Simulation of supplemental irrigation strategies for wheat in Near East to cope with water scarcity. In: ROSSI, G.; CANCELLIERE, A.; PEREIRA, L.S; OWEIS, T.; SHATANAWI, M.; ZAIRI, A. (Eds.). Tools for drought mitigation in Mediterranean regions. Dordrecht: Kluwer Academic, **Water Science and Technology Library**, 2003, p.259- 272.

PAZ, A.; NEIRA, A.; CASTELAO, A. Soil water regime under pasture in the humid zone of Spain: validation of an empirical model and of irrigation prediction requirements, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.29, n.2, 1996, p.147-161.

PEITER, M. X. **Estudo do manejo da irrigação via modelo de simulação**. 1998. 183 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1998.

PEREIRA, L. S. et al. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. In: ROSSI, G.; CANCELLIERE, A.; PEREIRA, L.S; OWEIS, T.; SHATANAWI, M.; ZAIRI, A. (Eds.). Tools for drought mitigation in Mediterranean regions. Dordrecht: Kluwer Academic, **Water Science and Technology Library**, 2003, p.161-180.

PEREIRA, L. S. et al. Crop-water simulation models in practice. **Wageningen Pers**, Wageningen, 1995.

PICINI, A. G. **Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) a partir do monitoramento da disponibilidade hídrica do solo**. Piracicaba, 1998. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

QUEIROZ, E. F.; KASTER, M.; TERASAWA, F. **Soja no Paraná**. Curitiba: IPEAME, 1971. 24p. (IPEAME. Circular, 9).

QUEIROZ, E. F.; NEUMAIER, N.; TORRES, E. Ecologia e manejo da cultura. In: EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Soja (Londrina, PR). **Ecologia, manejo e adubação da soja**. Londrina, 1979. 91p. (Embrapa-CNPSO. Circular, 2).

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 178p.

REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 2005, Passo Fundo. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2005/2006**. Passo Fundo: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2005. 157p.

RODRIGUES, P. N. et al. Feasibility of deficit irrigation with center-pivot to cope with limited water supplies in Alentejo, Portugal. In: ROSSI, G.; CANCELLIERE, A.; PEREIRA, L.S; OWEIS, T.; SHATANAWI, M.; ZAIRI, A. (Eds.). Tools for drought mitigation in Mediterranean regions. Dordrecht: Kluwer Academic, **Water Science and Technology Library**, 2003. Cap.3, p. 203-222.

RODRIGUES, M. **Manejo da irrigação da soja a partir da evapotranspiração máxima da cultura**. 2001. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria. 2001.

SANTOS, J. R. M. Irrigar é preciso. **Agroanalysis**. Rio de Janeiro, 1998, v. 18, p. 34-36.

SHAW, R. H.; LAING, D. R. Moisture stress and plant response. In: PIERRE, W. H.; KIRKHAM, D.; PESEK, J.; SHAW, R. (Eds.). *Plant environment and efficient water use*. Madison: **American Society of Agronomy**, 1965, p.73-92.

SHATANAWI, M.; AL-ZU'BI, Y.; AL-JAYOUSSI, O. Irrigation management dynamics in the Jordan Valley under drought conditions. In: ROSSI, G.; CANCELLIERE, A.; PEREIRA, L.S; OWEIS, T.; SHATANAWI, M.; ZAIRI, A. (Eds.). *Tools for drought mitigation in Mediterranean regions*. Dordrecht: Kluwer Academic, **Water Science and Technology Library**, 2003. Cap.3, p.243-258.

SIONIT, N.; KRAMER, P. J. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. **Agronomy Journal**, Madison, Mar./Apr. 1977, v.69, n.2, p.274-278.

SOUZA, J. L. M. de. **Modelo de análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro**. Piracicaba, 2001. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2001.

SOUZA, J. L. M.; GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, 2008, v. 30, n. 2, p. 153-163.

STEWART, J. L.; HAGEN, R. M.; PRUITT, W. O. **Water production functions and predicted irrigation programs for principal crops as required for water resources planning and increased water use efficiency**. Davis: University of California / Dep. Land, Air and Water Resources, 1976.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, EMATER/RS; UFRGS, 2002. 126p.

TEIXEIRA, J. L., PEREIRA, L. S. ISAREG- **An irrigation scheduling model**. ICID Bulletin, New Delhi, v.41, n.2, 1992, p.29-48.

TEIXEIRA, J. L.; PAULO, A. M.; PEREIRA, L. S. Simulation of irrigation demand hydrographs at sector level. **Irrigation and Drainage Systems**. Amsterdam, 1996, v10, n 2, p 159-178.

VAUX, H. J.; PRUITT, W. Crop-water production funciones. In: HILLEL, D. (ed.). **Advances in irrigation**. New York: Academic Press, 1983, v. 2, p. 61-97.

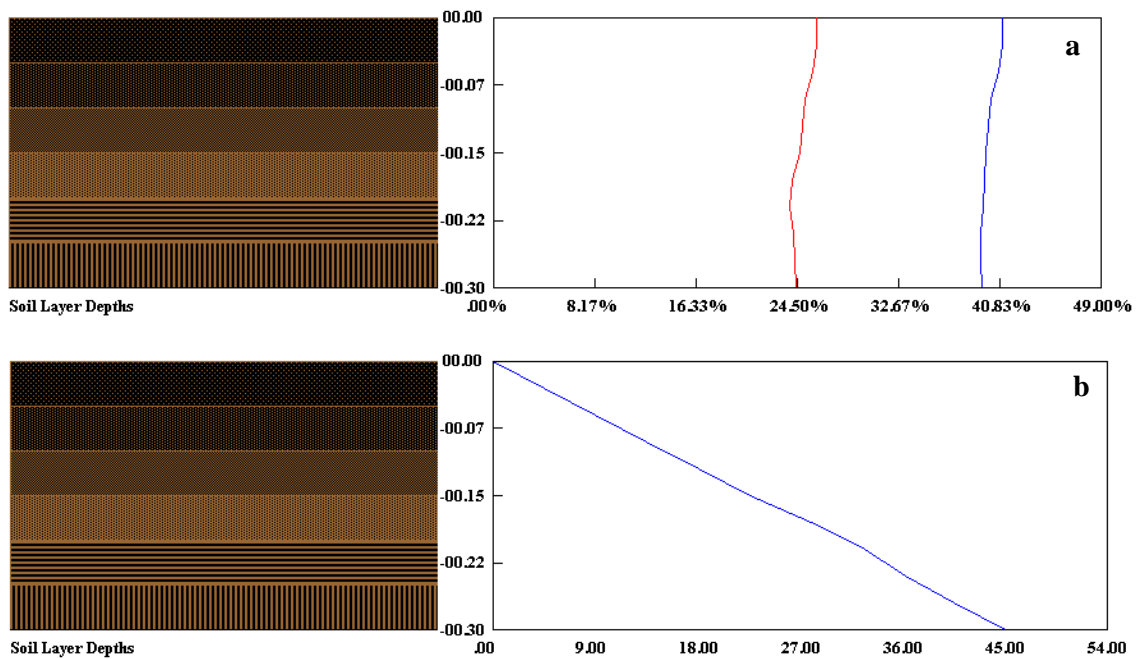
VILLA NOVA, M. S. **Avaliação do desempenho do tensiômetro de bolha de ar na medida do potencial matricial de água no solo.** 1991. 69 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

VIVAN, G. A. et al. Avaliação das variáveis referentes à produção de soja no Rio Grande do Sul para o período agrícola 2004-2007. *Geomática* (Santa Maria. Online), 2010. (Aceito para publicação)

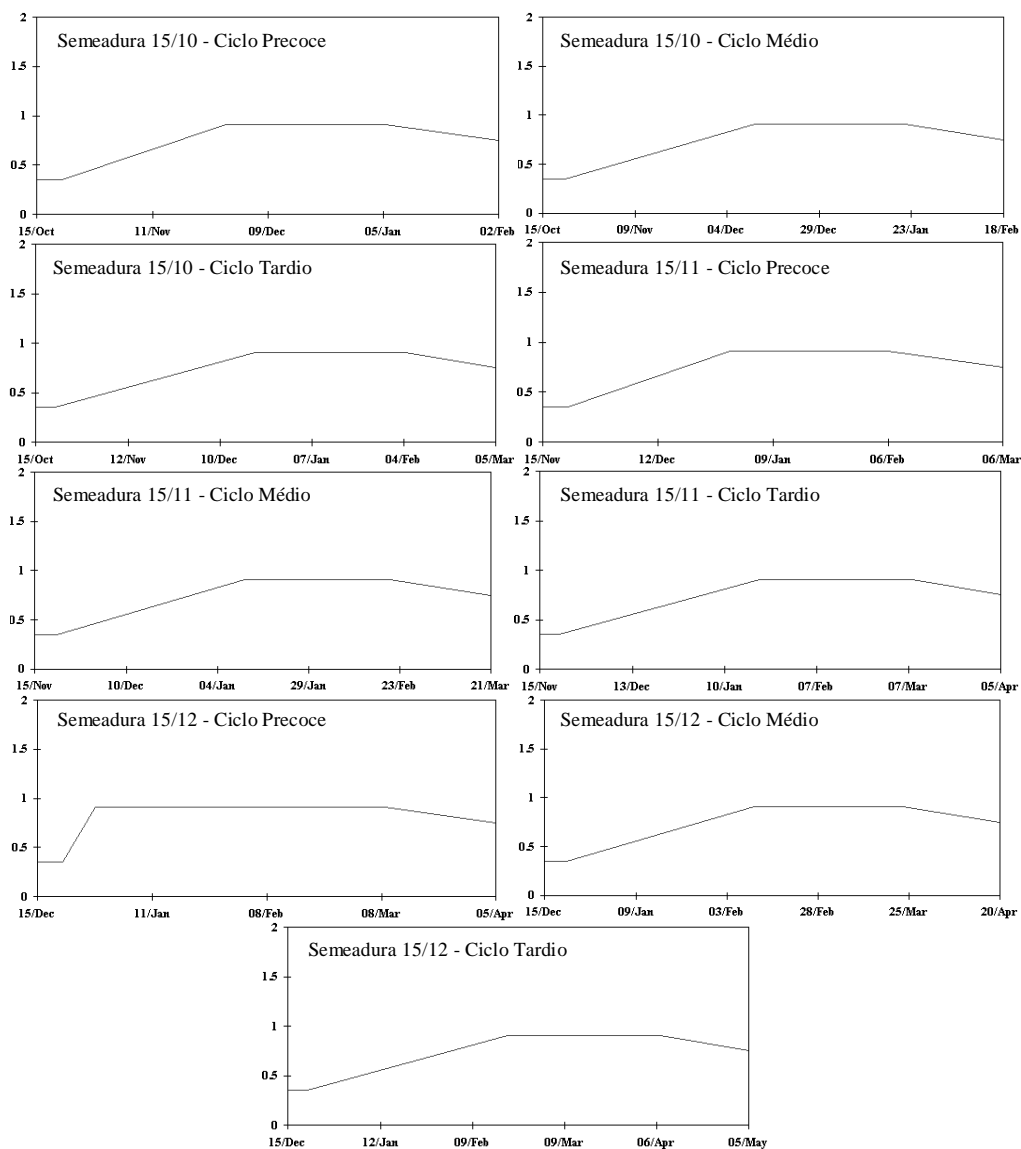
ZAIRI, A. et al. Coping with drought: déficit irrigation strategies for cereal and field horticultural crops in Central Tunisia. In: ROSSI, G.; CANCELLIERE, A.; PEREIRA, L.S; OWEIS, T.; SHATANAWI, M.; ZAIRI, A. (Eds.). Tools for drought mitigation in Mediterranean Regions. Dordrecht: Kluwer Academic, **Water Science and Technology Library**, 2003, p.181-201.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Representação da distribuição da umidade nas camadas do perfil do solo (a) e da distribuição da água disponível nas camadas do perfil de solo (b), obtido a partir do modelo WINISAREG.



APÊNDICE B - Evolução temporal do coeficiente de cultivo (K_c), para as combinações de duração de ciclo da cultura e data de semeadura simuladas, obtidos a partir do modelo WINISAREG.



APÊNDICE C - Dados climáticos de saldo de radiação, umidade relativa média, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação e velocidade do vento em base diária para o período entre safras 1993-2007.

| Data | Saldo Rad. (Mj) | UR (%) | T. Máx. (°C) | T. Min. (°C) | Prec. (mm) | Vel. Vento (m/s) |
|-----------|--------------------|-----------|-----------------|-----------------|---------------|---------------------|
| 1/1/1993 | 20.668 | 76.123 | 28.077 | 18.484 | 8.242 | 3.339 |
| 1/2/1993 | 20.071 | 75.879 | 26.011 | 16.054 | 5.454 | 3.664 |
| 1/3/1993 | 13.703 | 81.371 | 25.726 | 16.523 | 6.355 | 3.065 |
| 1/4/1993 | 13.817 | 76.433 | 25.080 | 15.037 | 2.500 | 3.350 |
| 1/5/1993 | 12.632 | 74.823 | 20.877 | 10.561 | 5.684 | 3.829 |
| 1/6/1993 | 9.787 | 76.807 | 18.153 | 8.833 | 4.573 | 4.000 |
| 1/7/1993 | 8.848 | 78.348 | 17.084 | 7.874 | 9.161 | 4.136 |
| 1/8/1993 | 13.842 | 63.558 | 21.323 | 9.113 | 0.490 | 3.565 |
| 1/9/1993 | 13.777 | 73.100 | 19.750 | 10.170 | 4.550 | 4.227 |
| 1/10/1993 | 17.919 | 71.119 | 25.207 | 15.013 | 4.974 | 4.032 |
| 1/11/1993 | 20.040 | 67.170 | 26.173 | 14.973 | 9.130 | 3.817 |
| 1/12/1993 | 23.555 | 69.845 | 27.823 | 16.997 | 8.355 | 3.881 |
| 1/1/1994 | 23.352 | 67.513 | 28.052 | 16.829 | 1.781 | 3.761 |
| 1/2/1994 | 15.550 | 83.479 | 26.082 | 17.900 | 11.914 | 3.186 |
| 1/3/1994 | 18.658 | 73.468 | 25.761 | 15.145 | 2.252 | 3.832 |
| 1/4/1994 | 12.930 | 75.847 | 23.927 | 13.307 | 6.453 | 3.733 |
| 1/5/1994 | 10.039 | 81.581 | 21.900 | 13.426 | 4.910 | 3.681 |
| 1/6/1994 | 9.873 | 78.363 | 17.893 | 8.803 | 6.627 | 3.917 |
| 1/7/1994 | 9.148 | 74.907 | 18.842 | 9.797 | 7.839 | 4.855 |
| 1/8/1994 | 12.487 | 68.426 | 21.465 | 9.919 | 1.484 | 4.155 |
| 1/9/1994 | 14.197 | 70.987 | 23.067 | 11.857 | 5.390 | 4.803 |
| 1/10/1994 | 15.000 | 76.407 | 24.226 | 14.897 | 9.958 | 4.194 |
| 1/11/1994 | 18.920 | 68.193 | 25.090 | 14.483 | 4.603 | 4.060 |
| 1/12/1994 | 21.523 | 66.594 | 29.777 | 18.539 | 7.587 | 3.661 |
| 1/1/1995 | 20.366 | 77.900 | 28.052 | 18.532 | 9.707 | 3.323 |
| 1/2/1995 | 18.739 | 77.954 | 26.314 | 16.736 | 3.000 | 3.482 |
| 1/3/1995 | 17.573 | 72.536 | 26.613 | 15.629 | 2.371 | 3.407 |
| 1/4/1995 | 14.242 | 71.037 | 23.590 | 11.980 | 2.270 | 3.747 |
| 1/5/1995 | 11.225 | 72.652 | 20.494 | 9.716 | 0.690 | 2.871 |
| 1/6/1995 | 9.394 | 76.940 | 20.003 | 9.710 | 5.823 | 4.207 |
| 1/7/1995 | 10.043 | 76.581 | 20.890 | 11.494 | 4.384 | 4.668 |
| 1/8/1995 | 11.852 | 68.858 | 22.161 | 10.903 | 2.455 | 4.281 |
| 1/9/1995 | 12.638 | 70.580 | 21.667 | 10.977 | 4.513 | 4.813 |
| 1/10/1995 | 19.251 | 64.697 | 22.871 | 11.697 | 6.407 | 4.003 |
| 1/11/1995 | 25.243 | 58.827 | 28.180 | 15.663 | 2.607 | 3.957 |
| 1/12/1995 | 25.048 | 57.058 | 30.171 | 17.126 | 1.019 | 3.907 |
| 1/1/1996 | 19.923 | 75.097 | 28.297 | 18.184 | 11.461 | 4.026 |
| 1/2/1996 | 20.704 | 78.129 | 27.461 | 17.346 | 4.321 | 3.375 |
| 1/3/1996 | 18.129 | 77.581 | 26.019 | 16.403 | 3.829 | 3.881 |
| 1/4/1996 | 15.183 | 74.560 | 25.273 | 14.730 | 2.530 | 4.067 |
| 1/5/1996 | 13.458 | 72.036 | 22.287 | 10.948 | 0.626 | 2.977 |
| 1/6/1996 | 9.823 | 77.427 | 17.067 | 7.363 | 6.503 | 3.300 |

| Data | Saldo Rad. (Mj) | UR (%) | T. Máx. (°C) | T. Min. (°C) | Prec. (mm) | Vel. Vento (m/s) |
|-----------|--------------------|-----------|-----------------|-----------------|---------------|---------------------|
| 1/7/1996 | 10.855 | 72.897 | 15.994 | 6.071 | 4.068 | 3.532 |
| 1/8/1996 | 12.877 | 65.884 | 21.923 | 10.719 | 4.316 | 4.271 |
| 1/9/1996 | 14.273 | 73.320 | 19.660 | 9.930 | 6.653 | 3.960 |
| 1/10/1996 | 16.100 | 73.007 | 22.819 | 13.397 | 4.910 | 4.187 |
| 1/11/1996 | 21.517 | 68.747 | 26.837 | 15.710 | 3.767 | 4.170 |
| 1/12/1996 | 19.739 | 69.700 | 28.013 | 17.581 | 3.974 | 3.390 |
| 1/1/1997 | 23.048 | 70.752 | 29.287 | 18.439 | 5.042 | 4.026 |
| 1/2/1997 | 18.939 | 80.629 | 27.471 | 18.554 | 4.636 | 3.575 |
| 1/3/1997 | 20.710 | 65.926 | 27.158 | 15.071 | 1.071 | 3.561 |
| 1/4/1997 | 16.117 | 64.077 | 24.997 | 12.243 | 2.317 | 3.280 |
| 1/5/1997 | 12.487 | 67.581 | 21.710 | 10.642 | 3.345 | 3.658 |
| 1/6/1997 | 8.777 | 76.497 | 17.530 | 9.283 | 3.813 | 4.300 |
| 1/7/1997 | 10.297 | 74.029 | 20.268 | 10.703 | 3.736 | 4.239 |
| 1/8/1997 | 12.636 | 69.961 | 21.074 | 10.926 | 8.307 | 4.194 |
| 1/9/1997 | 14.380 | 73.557 | 21.890 | 11.657 | 5.067 | 3.693 |
| 1/10/1997 | 13.348 | 79.023 | 22.342 | 13.832 | 17.755 | 4.484 |
| 1/11/1997 | 17.747 | 75.987 | 26.097 | 16.050 | 11.330 | 4.080 |
| 1/12/1997 | 21.432 | 68.913 | 28.745 | 17.800 | 7.597 | 4.339 |
| 1/1/1998 | 20.274 | 77.145 | 28.458 | 18.452 | 7.452 | 3.394 |
| 1/2/1998 | 16.929 | 82.882 | 26.421 | 17.414 | 12.771 | 3.368 |
| 1/3/1998 | 15.113 | 81.126 | 24.861 | 15.990 | 7.416 | 3.442 |
| 1/4/1998 | 12.060 | 79.953 | 22.193 | 13.737 | 11.407 | 4.130 |
| 1/5/1998 | 10.413 | 79.032 | 19.855 | 10.807 | 6.484 | 3.265 |
| 1/6/1998 | 9.867 | 77.120 | 18.297 | 8.530 | 2.757 | 3.753 |
| 1/7/1998 | 9.552 | 80.171 | 19.077 | 10.455 | 6.161 | 3.987 |
| 1/8/1998 | 8.816 | 84.568 | 18.742 | 11.236 | 8.303 | 3.510 |
| 1/9/1998 | 10.347 | 80.430 | 19.020 | 10.733 | 6.807 | 4.127 |
| 1/10/1998 | 15.539 | 73.716 | 24.229 | 13.752 | 3.836 | 3.984 |
| 1/11/1998 | 22.120 | 62.473 | 27.123 | 14.433 | 2.283 | 3.873 |
| 1/12/1998 | 20.774 | 67.452 | 27.300 | 16.223 | 3.952 | 3.548 |
| 1/1/1999 | 21.248 | 71.694 | 28.442 | 17.639 | 4.042 | 3.226 |
| 1/2/1999 | 20.196 | 77.971 | 27.379 | 17.086 | 4.086 | 3.111 |
| 1/3/1999 | 18.713 | 72.677 | 28.677 | 17.923 | 2.110 | 3.068 |
| 1/4/1999 | 11.913 | 78.803 | 22.710 | 13.443 | 6.277 | 3.130 |
| 1/5/1999 | 11.045 | 74.926 | 19.016 | 9.374 | 3.507 | 3.213 |
| 1/6/1999 | 8.903 | 80.237 | 17.517 | 8.620 | 3.143 | 2.923 |
| 1/7/1999 | 8.419 | 81.300 | 16.700 | 8.177 | 5.703 | 3.832 |
| 1/8/1999 | 12.565 | 67.165 | 21.084 | 8.832 | 0.626 | 3.813 |
| 1/9/1999 | 14.947 | 68.793 | 22.260 | 11.540 | 4.983 | 4.383 |
| 1/10/1999 | 14.961 | 71.613 | 21.419 | 12.181 | 5.713 | 4.236 |
| 1/11/1999 | 20.543 | 63.427 | 25.097 | 13.113 | 3.953 | 3.283 |
| 1/12/1999 | 21.423 | 65.226 | 28.616 | 16.971 | 4.229 | 3.607 |
| 1/1/2000 | 21.739 | 70.694 | 28.526 | 17.555 | 4.632 | 3.326 |
| 1/2/2000 | 20.411 | 72.371 | 27.307 | 17.129 | 2.511 | 3.075 |
| 1/3/2000 | 17.287 | 77.671 | 26.068 | 15.842 | 9.765 | 3.361 |
| 1/4/2000 | 14.310 | 74.010 | 24.630 | 14.233 | 2.540 | 2.697 |
| 1/5/2000 | 11.132 | 74.777 | 19.813 | 9.987 | 2.477 | 3.390 |
| 1/6/2000 | 7.577 | 79.433 | 19.313 | 10.927 | 4.213 | 3.987 |

| Data | Saldo Rad. (Mj) | UR (%) | Tmax. (°C) | Tmin. (°C) | Prec. (mm) | Vel. Vento (m/s) |
|-----------|--------------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------------|
| 1/8/2000 | 13.516 | 67.987 | 20.377 | 9.113 | 2.574 | 3.571 |
| 1/9/2000 | 14.543 | 74.587 | 20.623 | 10.450 | 5.780 | 4.600 |
| 1/10/2000 | 16.136 | 77.490 | 24.413 | 14.923 | 10.945 | 3.674 |
| 1/11/2000 | 21.780 | 64.833 | 26.947 | 14.810 | 5.473 | 3.963 |
| 1/12/2000 | 20.748 | 70.929 | 27.652 | 16.674 | 5.158 | 3.658 |
| 1/1/2001 | 18.152 | 81.458 | 27.371 | 18.603 | 6.855 | 3.839 |
| 1/2/2001 | 17.557 | 83.025 | 28.361 | 19.439 | 7.018 | 2.389 |
| 1/3/2001 | 17.068 | 77.765 | 28.203 | 18.019 | 3.565 | 3.042 |
| 1/4/2001 | 12.227 | 77.873 | 25.710 | 16.160 | 3.947 | 3.630 |
| 1/5/2001 | 9.513 | 81.097 | 18.619 | 10.190 | 5.310 | 3.429 |
| 1/6/2001 | 9.310 | 77.927 | 19.203 | 9.740 | 3.543 | 3.353 |
| 1/7/2001 | 9.603 | 76.365 | 19.332 | 9.032 | 3.339 | 4.581 |
| 1/8/2001 | 12.861 | 73.013 | 22.626 | 12.445 | 0.907 | 4.097 |
| 1/9/2001 | 12.357 | 77.840 | 20.187 | 11.953 | 8.000 | 4.617 |
| 1/10/2001 | 17.487 | 70.268 | 24.687 | 13.881 | 8.887 | 4.332 |
| 1/11/2001 | 21.400 | 66.630 | 27.487 | 15.830 | 3.897 | 3.883 |
| 1/12/2001 | 22.994 | 68.626 | 27.610 | 15.665 | 6.261 | 3.439 |
| 1/1/2002 | 21.632 | 71.126 | 27.865 | 16.839 | 3.097 | 3.684 |
| 1/2/2002 | 21.621 | 71.193 | 27.357 | 15.925 | 2.739 | 2.975 |
| 1/3/2002 | 16.784 | 79.410 | 28.897 | 18.587 | 11.510 | 3.261 |
| 1/4/2002 | 13.620 | 77.303 | 25.743 | 15.563 | 4.530 | 3.517 |
| 1/5/2002 | 9.707 | 79.936 | 22.419 | 12.865 | 6.207 | 3.203 |
| 1/6/2002 | 7.430 | 81.507 | 18.560 | 9.300 | 8.063 | 3.967 |
| 1/7/2002 | 8.687 | 80.977 | 18.200 | 8.552 | 4.716 | 3.768 |
| 1/8/2002 | 10.861 | 77.907 | 20.400 | 11.345 | 7.542 | 3.926 |
| 1/9/2002 | 14.040 | 72.797 | 20.017 | 9.067 | 8.453 | 3.637 |
| 1/10/2002 | 12.197 | 81.287 | 24.065 | 14.829 | 12.010 | 4.339 |
| 1/11/2002 | 17.373 | 71.317 | 26.507 | 15.120 | 6.833 | 4.220 |
| 1/12/2002 | 17.281 | 74.323 | 27.294 | 16.781 | 10.629 | 3.739 |
| 1/1/2003 | 21.936 | 72.310 | 28.836 | 17.368 | 5.684 | 3.368 |
| 1/2/2003 | 17.811 | 77.889 | 28.329 | 17.775 | 9.464 | 3.011 |
| 1/3/2003 | 15.777 | 79.358 | 26.739 | 16.239 | 4.139 | 3.090 |
| 1/4/2003 | 13.040 | 72.290 | 24.497 | 12.867 | 3.810 | 3.117 |
| 1/5/2003 | 10.887 | 71.084 | 21.126 | 10.090 | 3.461 | 3.171 |
| 1/6/2003 | 7.020 | 82.407 | 20.927 | 11.817 | 5.087 | 3.103 |
| 1/7/2003 | 9.381 | 76.487 | 19.771 | 8.842 | 3.245 | 3.213 |
| 1/8/2003 | 13.097 | 68.007 | 19.107 | 7.523 | 1.855 | 3.442 |
| 1/9/2003 | 14.583 | 69.930 | 22.593 | 10.700 | 2.133 | 3.563 |
| 1/10/2003 | 18.100 | 69.413 | 25.310 | 13.210 | 7.648 | 3.594 |
| 1/11/2003 | 20.497 | 64.603 | 26.590 | 13.700 | 5.607 | 3.683 |
| 1/12/2003 | 20.039 | 72.090 | 26.552 | 15.300 | 12.629 | 3.803 |
| 1/1/2004 | 22.181 | 72.665 | 28.332 | 16.539 | 3.145 | 3.413 |
| 1/2/2004 | 22.975 | 69.054 | 27.071 | 14.968 | 4.393 | 3.468 |
| 1/3/2004 | 18.074 | 67.732 | 28.261 | 14.913 | 0.861 | 3.426 |
| 1/4/2004 | 13.750 | 68.450 | 27.377 | 15.097 | 4.097 | 3.247 |
| 1/5/2004 | 8.052 | 83.713 | 18.245 | 9.671 | 7.800 | 2.981 |
| 1/6/2004 | 8.690 | 78.837 | 20.033 | 10.040 | 4.450 | 3.317 |
| 1/8/2004 | 12.007 | 72.319 | 20.407 | 8.874 | 1.858 | 3.355 |

| Data | Saldo Rad. (Mj) | UR (%) | T. Máx. (°C) | T. Mín. (°C) | Prec. (mm) | Vel. Vento (m/s) |
|-----------|--------------------|-----------|-----------------|-----------------|---------------|---------------------|
| 1/9/2004 | 12.453 | 75.220 | 23.343 | 12.883 | 7.810 | 3.900 |
| 1/10/2004 | 18.597 | 66.126 | 24.255 | 11.726 | 6.019 | 3.874 |
| 1/11/2004 | 17.400 | 68.313 | 25.623 | 14.260 | 4.283 | 3.640 |
| 1/12/2004 | 21.387 | 64.716 | 28.155 | 16.129 | 2.171 | 3.842 |
| 1/1/2005 | 22.107 | 65.516 | 30.355 | 18.068 | 3.371 | 3.629 |
| 1/2/2005 | 21.450 | 61.989 | 30.150 | 17.504 | 0.932 | 3.400 |
| 1/3/2005 | 18.132 | 62.990 | 29.432 | 17.010 | 2.848 | 3.200 |
| 1/4/2005 | 11.357 | 80.297 | 23.243 | 14.303 | 9.730 | 2.983 |
| 1/5/2005 | 10.013 | 78.939 | 21.361 | 12.548 | 10.226 | 3.523 |
| 1/6/2005 | 7.740 | 83.687 | 20.293 | 12.683 | 9.103 | 3.127 |
| 1/7/2005 | 9.929 | 75.665 | 17.661 | 7.977 | 2.700 | 3.971 |
| 1/8/2005 | 10.890 | 73.794 | 21.361 | 10.674 | 4.368 | 4.558 |
| 1/9/2005 | 11.013 | 78.593 | 17.357 | 8.870 | 5.090 | 4.573 |
| 1/10/2005 | 12.571 | 77.426 | 23.661 | 14.136 | 12.413 | 3.745 |
| 1/11/2005 | 19.423 | 64.003 | 27.727 | 15.227 | 4.627 | 3.850 |
| 1/12/2005 | 20.742 | 63.745 | 27.958 | 15.787 | 2.632 | 3.610 |
| 1/1/2006 | 19.523 | 73.755 | 29.184 | 18.487 | 4.265 | 3.323 |
| 1/2/2006 | 19.236 | 74.261 | 27.968 | 17.293 | 3.968 | 3.075 |
| 1/3/2006 | 15.758 | 74.994 | 26.790 | 16.742 | 5.310 | 3.068 |
| 1/4/2006 | 14.607 | 70.827 | 23.870 | 12.593 | 1.833 | 2.980 |
| 1/5/2006 | 11.458 | 74.768 | 19.419 | 8.855 | 1.187 | 3.358 |
| 1/6/2006 | 8.990 | 79.487 | 20.020 | 10.723 | 5.583 | 3.813 |
| 1/7/2006 | 9.490 | 79.581 | 19.990 | 10.961 | 4.771 | 3.181 |
| 1/8/2006 | 12.423 | 69.836 | 20.145 | 9.284 | 4.265 | 3.829 |
| 1/9/2006 | 15.137 | 68.747 | 21.253 | 9.833 | 3.760 | 4.140 |
| 1/10/2006 | 18.537 | 68.723 | 26.845 | 14.381 | 3.061 | 3.784 |
| 1/11/2006 | 19.541 | 66.707 | 26.370 | 14.837 | 10.397 | 4.237 |
| 1/12/2006 | 22.870 | 65.829 | 30.036 | 18.094 | 3.429 | 3.200 |
| 1/1/2007 | 21.017 | 77.290 | 27.777 | 18.065 | 8.410 | 3.577 |
| 1/2/2007 | 20.828 | 75.661 | 27.546 | 17.464 | 4.529 | 3.464 |
| 1/3/2007 | 16.668 | 77.819 | 28.219 | 18.142 | 6.410 | 3.036 |
| 1/4/2007 | 14.148 | 75.993 | 25.400 | 15.273 | 8.483 | 3.193 |
| 1/5/2007 | 10.538 | 79.774 | 17.632 | 9.126 | 9.526 | 3.784 |
| 1/6/2007 | 7.980 | 76.390 | 19.143 | 10.247 | 2.273 | 3.500 |
| 1/7/2007 | 10.201 | 76.907 | 16.232 | 6.426 | 10.507 | 3.942 |
| 1/8/2007 | 11.287 | 78.081 | 19.248 | 8.739 | 4.152 | 4.742 |
| 1/9/2007 | 14.431 | 71.667 | 23.437 | 13.517 | 8.953 | 4.203 |
| 1/10/2007 | 14.556 | 77.194 | 24.032 | 14.729 | 9.481 | 4.300 |
| 1/11/2007 | 19.772 | 63.467 | 25.330 | 13.530 | 6.217 | 3.417 |
| 1/12/2007 | 21.750 | 65.645 | 29.561 | 16.645 | 7.045 | 3.310 |
| 1/1/2008 | 23.330 | 71.000 | 28.168 | 16.839 | 2.671 | 4.097 |
| 1/2/2008 | 21.055 | 71.643 | 28.225 | 16.464 | 4.014 | 3.214 |
| 1/3/2008 | 17.900 | 75.548 | 27.448 | 16.290 | 5.413 | 3.555 |
| 1/4/2008 | 14.118 | 73.667 | 24.150 | 12.960 | 9.873 | 2.937 |
| 1/5/2008 | 11.812 | 73.258 | 20.865 | 10.100 | 3.336 | 3.387 |
| 1/6/2008 | 8.662 | 79.333 | 16.647 | 7.657 | 7.693 | 3.383 |
| 1/7/2008 | 11.410 | 75.161 | 21.700 | 10.932 | 1.923 | 3.597 |
| 1/9/2008 | 15.490 | 73.133 | 19.483 | 8.457 | 3.097 | 4.173 |

| Data | Saldo Rad. (Mj) | UR (%) | T. Máx. (°C) | T. Min. (°C) | Prec. (mm) | Vel. Vento (m/s) |
|-----------|--------------------|-----------|-----------------|-----------------|---------------|---------------------|
| 1/10/2008 | 15.837 | 78.871 | 22.623 | 13.819 | 11.494 | 3.768 |
| 1/11/2008 | 22.622 | 66.933 | 27.140 | 14.773 | 7.913 | 4.167 |
| 1/12/2008 | 23.568 | 64.290 | 29.065 | 16.136 | 2.342 | 3.403 |

APÊNDICE D - Evolução temporal dos valores de saldo de radiação, umidade relativa média, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação e velocidade do vento para o período entre safras 1993-2007 em escala mensal.

