

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

**ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULADO DA
CULTURA DA SOJA EM FUNÇÃO DE DIFERENTES
NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO**

TESE DE DOUTORADO

Ana Carla dos Santos Gomes

**Santa Maria, RS, Brasil
2011**

**ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULADO DA CULTURA DA
SOJA EM FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE
IRRIGAÇÃO**

por

Ana Carla dos Santos Gomes

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Doutorado 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 **Doutor em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Prof. Adroaldo Dias Robaina

**Santa Maria, RS, Brasil
2011**

G633e Gomes, Ana Carla dos Santos

Estudo experimental e simulado da cultura da soja em função de diferentes níveis de irrigação / por Ana Carla dos Santos Gomes. – 2011.

164 p. : il. ; 31 cm.

Orientador: Adroaldo Dias Robaina

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2011

1. Soja – Estratégias de irrigação 2. Soja – Modelo de produção I. Robaina, Adroaldo Dias II. Título.

CDU 633.34-167

Ficha catalográfica elaborada por
Alenir Inácio Goularte – CRB 10/990
Biblioteca Central da UFSM

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULADO DA CULTURA DA SOJA EM
FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO**

elaborada por
Ana Carla dos Santos Gomes

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

Adroaldo Dias Robaina, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Marcia Xavier Peiter
Dra. (UFSM)

Ricardo Luis Schons
Dr. (IF FARROUPILHA)

Ana Rita Costenaro Parizi
Dra. (IF FARROUPILHA)

Paulo Roberto da Costa
Dr. (CTISM - UFSM)

Santa Maria, 18 de março de 2011.

*Aos meus filhos **Beatriz** e **Gustavo** que souberam compreender a minha ausência, e mesmo em momentos difíceis demonstraram coragem e esperança, o que possibilitou minha caminhada até os dias de hoje.*

Pelo amor e carinho incondicionais...

*Em especial ao meu marido **Sandro** pelo carinho e pela sua cumplicidade no meu projeto de vida.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Adroaldo Dias Robaina, meus mais sinceros agradecimentos, pela compreensão, voto de confiança, dedicação, amizade, pelos ensinamentos que levarei comigo para toda a vida, pelo encorajamento antes, durante e posteriormente a esta trabalhosa, mas importantíssima fase. MEU RESPEITO E ADMIRAÇÃO!

A Prof^a Marcia Xavier Peiter, que desde a graduação ajudou-me a traçar meu caminho profissional. Agradeço muito por sua amizade, por seus ensinamentos e pelo apoio recebido ao longo destes anos. Fica aqui, o meu CARINHO e ADMIRAÇÃO!

A minha família, em especial aos meus amados pais Antonio Carlos Gomes e Ana Maria Gomes, pelo carinho, incentivo, exemplo de vida e educação que me proporcionaram.

Aos meus irmãos Eduardo e Fábio pela amizade, carinho, incentivo e principalmente por tê-los sempre presentes em minha vida.

A Tânia de Bem Madeira, minha querida sogra e amiga, que sempre me incentivou e me ajudou cuidando da minha filha para que eu pudesse estudar. A ela e ao meu marido Sandro Madeira Cardinal o meu muito obrigado pela disponibilização da área experimental e pelo apoio dado na realização deste trabalho.

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

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo aporte financeiro.

A minha grande amiga e colega Ana Rita Costenaro Parizi, pelo companheirismo durante todos estes anos de estudos e realização de experimentos, pela amizade incondicional, pelo estímulo constante e pela contribuição dada a este trabalho.

À Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI Campus de Santiago, em especial ao Prof. Olívio Bochi Brum pela disponibilidade do laboratório durante a realização do trabalho experimental.

Aos membros da Comissão Examinadora, que com muita competência, dedicação e carinho auxiliaram na qualidade deste trabalho.

Aos funcionários do PPGEA, em especial ao Estevão pela cordialidade e disposição.

Aos colegas e amigos do PPGEA e do laboratório de Engenharia de Irrigação pela parceria e amizade.

A todos os meus amigos, que me deram força e alegria para vencer esta etapa, em especial a minha amiga Leandra Dutra.

A Deus, que ilumina os meus caminhos, e que tenho certeza, esteve comigo em todos os momentos.

Muito obrigada!

*“A vida é curta,
A arte é longa,
A oportunidade fugaz,
A experiência falaciosa,
O julgamento difícil.”
(Hipócrates)*

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULADO DA CULTURA DA SOJA EM FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO

Autora: Ana Carla dos Santos Gomes
Orientador: Adroaldo Dias Robaina
Santa Maria, 18 de março de 2011.

A elaboração de modelos eficientes permite a previsão de safra, melhores estratégias de pesquisa e a alocação correta de determinada cultura em um ambiente, estando na dependência do conhecimento das condições climáticas. A partir da utilização de técnicas como a modelagem, é possível a criação de cenários futuros por intermédio de simulações, que utilizam um conjunto de equações que irão representar um processo. Para se alcançar altas produtividades agrícolas, há necessidade de se identificar os fatores de produção que limitam o crescimento das plantas. Na maior parte dos anos, a frequência e a intensidade das chuvas no período de desenvolvimento da soja, são insuficientes para que a cultura manifeste seu potencial produtivo. Desta forma, o presente trabalho propõe a aplicação de um modelo de simulação para a cultura da soja na região de Santiago, RS, permitindo conhecer a resposta da produção a diferentes lâminas de água aplicada. Para isto, foi necessário desenvolver procedimento experimental para geração de dados necessários para calibrar, testar e aplicar um modelo de simulação da extração da água do solo e a respectiva resposta em produção da cultura. Como resultados experimentais, obteve-se variações no crescimento e desenvolvimento da cultura da soja com a aplicação de diferentes estratégias de irrigação, resultando em produtividades distintas. O aumento nas lâminas de irrigação proporcionou incremento nos componentes de produção das cultivares estudadas. O modelo de produção aplicado foi capaz de simular satisfatoriamente o acúmulo de matéria seca total e a produção de grãos para a cultura da soja. Os componentes do balanço hídrico foram influenciados pelas diferentes estratégias de irrigação simuladas, e estas influenciaram na produtividade final da cultura em estudo. A eficiência do uso da água e a eficiência de aplicação da água diminuíram com o aumento da estratégia de irrigação. A aplicação do modelo de produção para funções de produção mostrou que, lâmina aplicada a partir de 800 mm causou redução na produção de grãos na cultura da soja. O modelo se mostrou uma importante ferramenta na previsão da produtividade em condições irrigadas, evidenciando as melhores estratégias de irrigação que resultem em elevadas produções de grãos.

Palavras-Chave: Estratégias de irrigação. Modelo de produção. Simulação.

ABSTRACT

Doctorate Thesis
Graduate Program in Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

SIMULATED AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE SOYBEAN CROP DUE TO DIFFERENT LEVELS OF IRRIGATION

Author: Ana Carla dos Santos Gomes
Advisor: Adroaldo Dias Robaina
Santa Maria, March 18th 2011.

The efficient model preparation allows a crop forecast, better research strategies and the correct allocation of a determinate crop in an environment, according to weather conditions. With the techniques uses as the modeling, it is possible to create future scenarios using simulations, which use equations to represent a process. To achieve the high agricultural productive, there is a necessity to identify the production factors that limit the plants growth. The most part of the years, the rain frequency and its intensity in the soybean development period aren't enough to a crop shows its productive potential. So, the present research has as a purpose the application of a simulation model to the soybean crop in the region of Santiago – RS, allowing to know the production response of many different water lengths. To accomplish the job it was necessary to develop an experimental proceeding to generate necessary datas to calibrate, test and apply a simulation model of water extraction from the soil and its respective response in the crop production. As experimental results, it was obtained variation in the growth and soybean crop development with the application of many different irrigation strategies, resulting in distinct productivities. The increase in the irrigation length provided an increment in the production components of the studied crops. The production model applied was able to simulate satisfactorily the total dry matter and the grain production to the soybean crop. The water balance components were influenced by different simulated irrigation strategies, and these influenced in the final productivity of the crop studied. The efficiency of the water use and the efficiency of the water application became less with the irrigation strategies increase. The production model application to the production functions showed that, the applied length since 800 mm caused a reduction in the production of soybean crop grains. The model showed itself as an important tool in the productive preview in irrigated conductions, showing the best strategies of irrigation that result in a high grain production.

Keywords: Irrigation strategies. Production model. Simulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Área plantada com a cultura de soja para o Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2009) – Período 2009/2010.....	30
FIGURA 2.2 – Produção de soja para o Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2009) - Período 2009/2010.....	31
FIGURA 2.3 – Representação esquemática dos componentes do balanço de água no solo (adaptado de ROBAINA, 1992).....	53
FIGURA 3.1 – Croqui da distribuição das parcelas e do sistema de irrigação na área experimental.....	65
FIGURA 3.2 – Fluxograma simplificado do modelo de extração de água (adaptado de ROBAINA, 1992).....	75
FIGURA 3.3 – Fluxograma simplificado do modelo de produção de cultura (adaptado de ROBAINA, 1992).....	79
FIGURA 4.1 – Curva de retenção dos valores médios de umidade do solo para cinco camadas de solo.....	86
FIGURA 4.2 – Índice de área foliar ($m^2.m^{-2}$) médio para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência para a cultivar de soja CD 219.....	92

FIGURA 4.3 – Índice de área foliar ($m^2.m^{-2}$) médio para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência para a cultivar de soja AL 55.....	94
FIGURA 4.4 – Matéria seca total ($g.planta^{-1}$) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência para a cultivar de soja CD 219.....	96
FIGURA 4.5 – Matéria seca total ($g.planta^{-1}$) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência para a cultivar de soja AL 55.....	98
FIGURA 4.6 – Profundidade do sistema radicular (cm) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência para a cultivar de soja CD 219.....	101
FIGURA 4.7 – Profundidade do sistema radicular (cm) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência para a cultivar de soja AL 55.....	103
FIGURA 4.8 – Programa computacional utilizado para a cultura de soja.....	110
FIGURA 4.9 – Valores de produção de matéria seca total ($kg.ha^{-1}$) obtida em experimento de campo e valores de matéria seca total ($kg.ha^{-1}$) estimados pelo modelo de produção para a cultura da soja CD 219 e AL 55.....	115
FIGURA 4.10 – Distribuição dos componentes do balanço hídrico (mm) simulados em cada estratégia de irrigação (EI) para a cultura da soja CD 219.....	117
FIGURA 4.11 – Armazenamento de água em cada estratégia de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas para a cultura da soja CD 219.....	118

FIGURA 4.12 – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) da cultura da soja CD 219.....	121
FIGURA 4.13 – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de matéria seca ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) da cultura da soja CD 219.....	121
FIGURA 4.14 – Evapotranspiração real (mm) para diferentes estratégias de irrigação (EI) e fração de chuva (%) para a cultura da soja CD 219.....	122
FIGURA 4.15 – Relação entre a eficiência de aplicação da água ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) e o total de água aplicada (mm) obtida para produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) na cultura da soja CD 219.....	125
FIGURA 4.16 – Distribuição dos componentes do balanço hídrico (mm) simulados em cada estratégia de irrigação (EI) para a cultura da soja AL 55.....	127
FIGURA 4.17 – Armazenamento de água em cada estratégia de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas para a cultura da soja AL 55.....	128
FIGURA 4.18 – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de grãos da cultura da soja AL 55.....	130
FIGURA 4.19 – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de matéria seca da cultura da soja AL 55.....	131
FIGURA 4.20 – Evapotranspiração real (mm) para diferentes estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) para a cultura da soja AL 55.....	132

FIGURA 4.21 – Relação entre a eficiência do uso da água (kg.m^{-3}) e o total de água aplicada (mm) obtida para a produção de grãos (kg.ha^{-1}) na cultura da soja AL 55..... 134

FIGURA 4.22 – Relação entre a produção de grãos (kg.ha^{-1}) simuladas pelo modelo para diferentes estratégias de irrigação e o total de água aplicado para a cultura da soja CD 219..... 135

FIGURA 4.23 – Relação entre a produção de grãos (kg.ha^{-1}) simuladas pelo modelo para diferentes estratégias de irrigação e o total de água aplicado para a cultura da soja AL 55..... 136

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Estratégias de irrigação (tratamentos), percentagens de irrigação e intensidade de aplicação de água em cada tratamento.....	66
TABELA 3.2 – Número de plantas por metro quadrado em função do número de plantas por metro linear na fileira e espaçamento de 0,45 m entre fileiras de plantas.....	70
TABELA 3.3 – Critério de interpretação dos valores do índice desempenho e as respectivas classes de desempenho.....	82
TABELA 4.1 – Características físicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta. Valores médios para três repetições.....	83
TABELA 4.2 – Valores da umidade volumétrica, nas diferentes camadas do solo no local do experimento, em função do potencia matricial da água no solo. Valores médios para três repetições.....	84
TABELA 4.3 – Coeficientes da curva de retenção da água no solo, condutividade hidráulica, expoente da função condutividade hidráulica e coeficiente de determinação r^2 do solo do local do experimento.....	85

TABELA 4.4 – Coeficientes da curva de retenção da água no solo, condutividade hidráulica, expoente da função condutividade hidráulica e coeficiente de determinação r^2 do solo do local do experimento.....	87
TABELA 4.5 – Características químicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta. Valores médios para três repetições.....	88
TABELA 4.6 – Valores de irrigação total (mm), precipitação pluvial (mm) e total de água aplicado (irrigação e precipitação) (mm) ao longo do ciclo da cultura de soja CD 219 e AL 55 nos seis tratamentos.....	89
TABELA 4.7 – Coeficientes a , b , c e o coeficiente de determinação r^2 para a variável índice de área foliar (IAF) em cada tratamento da cultivar de soja CD 219.....	91
TABELA 4.8 – Coeficientes a , b , c e o coeficiente de determinação r^2 para a variável índice de área foliar (IAF) em cada tratamento da cultivar de soja AL 55.....	93
TABELA 4.9 – Coeficientes a , b , c , d e o coeficiente de determinação r^2 para a variável matéria seca total (MST) em cada tratamento da cultivar de soja CD 219.....	95
TABELA 4.10 – Coeficientes a , b , c , d e o coeficiente de determinação r^2 para a variável matéria seca total (MST) em cada tratamento da cultivar de soja AL 55.....	97
TABELA 4.11 – Coeficientes a , b , c , d e o coeficiente de determinação r^2 para a variável profundidade do sistema radicular (Prz) em cada tratamento da cultivar de soja CD 219.....	100

TABELA 4.12 – Coeficientes <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i> , <i>d</i> e o coeficiente de determinação r^2 para a variável profundidade do sistema radicular (Prz) em cada tratamento da cultivar de soja AL 55.....	102
TABELA 4.13 – Valores médios dos componentes de produção, matéria seca total e índice de colheita (IC) para a cultivar de soja CD 219 aos 137 DAE.....	104
TABELA 4.14 – Produção de matéria seca total ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) em cada estratégia de irrigação para a cultivar de soja CD 219.....	105
TABELA 4.15 – Valores médios dos componentes de produção, matéria seca total e índice de colheita (IC) para a cultura da soja AL 55 aos 117 DAE.....	106
TABELA 4.16 – Produção de matéria seca total ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) em cada estratégia de irrigação para a cultura da soja AL 55.....	107
TABELA 4.17 – Radiação solar fotossinteticamente ativa R_c , taxa de produção potencial nos dias claros P_c e taxa de produção potencial nos dias nublados P_o	108
TABELA 4.18 – Coeficientes <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i> , <i>d</i> e o coeficiente de determinação r^2 para as variáveis R_c , P_c e P_o em função do dia do ano para a latitude 29° 09' 32" S.....	110
TABELA 4.19 – Calibração dos valores de produção de matéria seca e de grãos obtidos após a calibração do tratamento T0 para as duas cultivares de soja.....	111

TABELA 4.20 – Comparação dos valores de produção de matéria seca total e de produção de grãos obtidos pelo modelo de produção e no experimento de campo para as duas cultivares de soja.....	112
TABELA 4.21 – Valores do coeficiente linear <i>a</i> , coeficiente angular <i>b</i> , coeficiente de determinação r^2 , coeficiente de correlação <i>r</i> , índice de concordância e índice de desempenho obtidos na comparação entre a produção de matéria seca e de grãos obtidos em experimento de campo e pelo modelo de produção para os diferentes tratamentos na cultura da soja CD 219 e AL 55.....	114
TABELA 4.22 – Valores simulados dos componentes do balanço hídrico (mm) em diferentes estratégias de irrigação para a cultura da soja CD 219..	116
TABELA 4.23 – Total de água aplicada (irrigação e precipitação - mm), precipitação efetiva (mm), produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e produção de matéria seca ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) obtidos na simulação de diferentes lâminas de irrigação para a cultura da soja CD 219.....	119
TABELA 4.24 – Valores eficiência de uso da água obtidos para a produção de grãos (EUA/GR), eficiência de uso da água obtidos para a produção de matéria seca (EUA/MS), eficiência de aplicação da água obtidos para a produção de grãos (EAP/GR) e eficiência de aplicação da água obtidos para a produção de matéria seca (EAP/MS) encontrados para diferentes lâminas de irrigação na simulação para a cultura da soja CD 219.....	123
TABELA 4.25 – Valores simulados dos componentes do balanço hídrico (mm) em diferentes estratégias de irrigação para a cultura da soja AL 55.....	126
TABELA 4.26 – Total de água aplicada (irrigação e precipitação - mm), precipitação efetiva (mm), produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e produção de matéria seca ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) obtidos na simulação de diferentes lâminas de irrigação para a cultura da soja AL55.....	129

TABELA 4.27 – Valores eficiência de uso da água obtidos para a produção de grãos (EUA/GR), eficiência de uso da água obtidos para a matéria seca (EUA/MS), eficiência de aplicação da água para a produção de grãos (EAP/GR) e eficiência de aplicação da água para a produção de matéria seca (EAP/MS) encontrados para diferentes lâminas de irrigação na simulação da cultura da soja AL 55.....

LISTA DE SÍMBOLOS

$+Qz$	– Ascensão capilar (mm)
e	– Base de logaritmos naturais
L	– Calor latente de evaporação da água (MJ.kg^{-1})
CC	– Capacidade de campo
$C(\psi)$	– Capacidade específica ($\text{kPa.m}^{-3}.\text{m}^3$)
r	– Coeficiente de correlação
Kc	– Coeficiente da cultura
r^2	– Coeficiente de determinação
CV	– Coeficiente de variação (%)
Kp	– Coeficiente do Tanque Classe A
A	– Coeficiente da produção real diária (kg.hPa.mm^{-1})
ε	– Coeficiente da produção real diária
γ	– Coeficiente psicrométrico ($0,80 \text{ hPa}/^\circ\text{C}$)
K_{sat}	– Condutividade hidráulica do solo saturado
$K(\psi)$	– Condutividade hidráulica do solo não saturado
θ	– Conteúdo em volume de água no solo (umidade volumétrica)
Δe	– Déficit de pressão de vapor da água (hPa)
DAE	– Dias após a emergência das plantas
$-Qz$	– Drenagem profunda (mm)
EUA	– Eficiência de uso da água (kg.m^{-3})
EAP	– Eficiência de aplicação de água (kg.ha^{-3})
R	– Escoamento superficial (mm)
EI	– Estratégia de irrigação

ET_o	– Evapotranspiração de referência (mm)
ET_r	– Evapotranspiração real (mm)
ET_{max}	– Evapotranspiração máxima do solo ($mm \cdot dia^{-1}$)
ES	– Evaporação do solo (mm)
ES_{max}	– Evaporação máxima do solo (mm)
E_{TA}	– Evaporação do Tanque Classe A (mm)
TR	– Extração de água pelas raízes ou transpiração real (mm/dia)
λ	– Fator de respiração
α	– Fator de influência da temperatura
f_{TP}	– Função de redução da transpiração
f_{SR}	– Função de distribuição do sistema radicular
GD	– Graus dia acumulado ($^{\circ}C$)
IAF	– Índice de área foliar ($m^2 \cdot m^{-2}$)
IC	– Índice de colheita
I_w	– Índice de concordância de Willmott
I_d	– Índice de desempenho
I	– Irrigação (mm)
φ	– Latitude ($^{\circ}$)
MST	– Matéria seca total média das plantas ($kg \cdot ha^{-1}$)
PMP	– Ponto de murcha permanente
ψ_{CC}	– Potencial correspondente a capacidade de campo (kPa)
ψ_{pm}	– Potencial correspondente ao ponto de murcha permanente (kPa)
ψ_e	– Potencial de borbulhamento (kPa)
ψ	– Potencial matricial (kPa)
P	– Precipitação (mm)
GR	– Produção de grãos ($kg \cdot ha^{-1}$)
MS	– Produção de matéria seca ($kg \cdot ha^{-1}$)
Q_P	– Produção potencial acumulada ($kg \cdot ha^{-1}$)
q_p	– Produção potencial diária ($kg \cdot ha^{-1} \cdot dia^{-1}$)
Q_R	– Produção real acumulada ($kg \cdot ha^{-1}$)
q_r	– Produção real diária ($kg \cdot ha^{-1}$)

z	– Profundidade (cm)
P_{rz}	– Profundidade do sistema radicular (cm)
R_c	– Radiação fotossinteticamente ativa na ausência da atmosfera ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
R_s	– Radiação solar global média ao nível do solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
R_n	– Radiação solar líquida ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
β	– Relação entre a massa seca total da planta sem raízes e a massa seca total da planta com raízes
Δ	– Tangente à curva de saturação para a temperatura do ar ($\text{hPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$)
TP_{\max}	– Transpiração máxima (Lt^{-1})
P_o	– Taxa de fotossíntese para dias nublados ($\text{kg.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$)
P_c	– Taxa de fotossíntese para dias claros ($\text{kg.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$)
T_{LS}	– Temperatura do limite superior do fator de influência da temperatura sobre a produção potencial diária ($^{\circ}\text{C}$)
T_{LI}	– Temperatura do limite inferior do fator de influência da temperatura sobre a produção potencial diária ($^{\circ}\text{C}$)
t	– Tempo
ΔS	– Variação da armazenagem de água (mm)

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE I – Valores médios do índice de área foliar ($m^2.m^{-2}$) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura da soja CD 219.....	162
APÊNDICE II – Valores médios do índice de área foliar (m^2,m^{-2}) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura da soja AL 55.....	162
APÊNDICE III – Valores médios de matéria seca total (kg,ha^{-1}) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura da soja CD 219.....	163
APÊNDICE IV – Valores médios de matéria seca (kg,ha^{-1}) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura da soja AL 55.....	163
APÊNDICE V – Valores médios de profundidade do sistema radicular (cm) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura da soja CD 219.....	163
APÊNDICE VI – Valores médios de profundidade do sistema radicular (cm) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura da soja AL 55.....	164
APÊNDICE VII – Variação diária dos elementos agrometeorológicos durante o ciclo da cultura.....	164

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	28
2.1 Considerações sobre a cultura da soja	28
2.2 Importância da água para a cultura da soja	31
2.3 Importância da irrigação na cultura da soja	34
2.4 Modelagem na agricultura	36
2.4.1 Parâmetros de solo para modelagem das culturas	40
2.4.2 Parâmetros de clima para modelagem das culturas	40
2.4.3 Parâmetros de planta para modelagem das culturas	42
2.4.3.1 Índice de área foliar	44
2.4.3.2 Crescimento do sistema radicular.....	45
2.4.3.3 Produção de matéria seca	47
2.4.3.4 Índice de colheita	49
2.4.3.5 Produção de grãos	50
2.5 Balanço da água do solo	52
2.6 Modelagem da produção da cultura	54
2.6.1 Produção potencial e real da cultura da soja.....	55
2.7 Modelagem e simulação na cultura da soja	56
2.8 Funções de produção da cultura da soja	58
2.9 Eficiência do uso da água pela cultura da soja	60
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	62
3.1 Características gerais do estudo experimental.....	62
3.2 Distribuição das parcelas e do sistema de irrigação	63
3.3 Manejo da irrigação	64

3.4 Características físicas do solo	66
3.5 Elementos agrometeorológicos	67
3.6 Indicadores do crescimento e desenvolvimento da soja	68
3.7 Avaliação da produção de grãos da cultura da soja	69
3.8 Índice de colheita	71
3.9 Ajustamento dos dados observados (medidos).....	71
3.10 Modelo matemático do balanço hídrico	71
3.10.1 Estimativa da transpiração real	72
3.10.2 Estimativa da transpiração máxima	73
3.10.3 Solução da equação de Richards (1931)	74
3.11 Modelo de produção da cultura de soja	76
3.11.1 Sub-modelo para a estimativa da produção potencial.....	76
3.11.2 Sub-modelo para estimativa da produção real	77
3.12 Calibração e teste do modelo de simulação da produção	80
3.13 Análise das observações simuladas	80
3.14 Aplicação do modelo de simulação da produção	82
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
4.1 Características físicas dos solos.....	83
4.2 Características químicas dos solos.....	88
4.3 Irrigações e precipitações.....	89
4.4 Resultados experimentais.....	90
4.4.1 Índice de área foliar.....	90
4.4.2 Matéria seca.....	95
4.4.3 Profundidade do sistema radicular.....	99
4.4.4 Componentes de produção de grãos, produção de grãos e matéria seca total.....	104
4.4.5 Parâmetros necessários para o modelo de produção potencial.....	108
4.5 Modelo de produção da cultura da soja.....	110
4.5.1 Calibração do modelo.....	111
4.5.2 Teste do modelo.....	112
4.5.3 Aplicação do modelo de produção da soja.....	115
4.5.3.1 Simulação do balanço hídrico – Soja CD 219.....	115
4.5.3.2 Simulação da produção de matéria seca e grãos – Soja CD 219.....	118

4.5.3.3 Eficiência de uso da água – Soja CD 219.....	123
4.5.3.4 Simulação do balanço hídrico – Soja AL 55.....	126
4.5.3.5 Simulação da produção de matéria seca e grãos – Soja AL 55.....	128
4.5.3.6 Eficiência de uso da água – Soja AL 55.....	132
4.6 Funções de produção.....	135
5 CONCLUSÃO.....	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140
APÊNDICES.....	161

1 INTRODUÇÃO

Dentre as atividades agrícolas desempenhadas no Brasil, a cultura da soja é uma das mais importantes do agronegócio, pela destacada participação nas importações e exportações, contribuindo para o saldo positivo da balança comercial. O país ocupa a posição de segundo maior produtor mundial de soja, sendo responsável por aproximadamente 26,8% da oferta global do produto (FAO, 2008).

No Estado do Rio Grande do Sul, a soja é cultivada em 32 microrregiões geográficas e através do zoneamento agroclimático o seu cultivo é indicado em praticamente todo o Estado.

Para se alcançar altas produtividades agrícolas, há necessidade de se identificar os fatores de produção que limitam o crescimento das plantas. A região central do Estado, na maior parte dos anos, apresenta frequência e intensidade de chuvas no período de desenvolvimento da soja (outubro a março), insuficientes para que a cultura manifeste seu potencial produtivo. O conhecimento da disponibilidade hídrica é de particular importância em regiões onde a variabilidade interanual e sazonal das chuvas tem forte impacto sobre a agricultura. A quantidade de água no solo é uma informação fundamental, no sentido de uma melhor definição das datas de semeadura, necessidade de irrigação, produtividade agrícola e eleição do tipo de cultura mais adequada ao clima regional.

No caso da cultura da soja, quando ocorrem déficits hídricos prolongados, esses irão exercer grande influência na sociedade e na economia da região a qual ela se manifesta, uma vez que a redução na produção resultará em prejuízo para o produtor rural e conseqüentemente para todos os segmentos comerciais dos municípios atingidos. A irrigação de áreas agrícolas no Estado do Rio Grande do Sul é fator importante para o desenvolvimento econômico e social do Estado, isto ocorre com o aumento da produção e diminuição de perdas em períodos de estiagem. Dessa forma, o estabelecimento de modelos que permitam previsões de tendências de produtividade é de suma importância, trazendo consideráveis vantagens econômicas, possibilitando, sobretudo transações comerciais meses antes do início da safra.

Modelos de simulação agrícola podem ser entendidos como equações matemáticas, empíricas ou mecanísticas, que visam simplificar a realidade e representar o acúmulo de biomassa e o desenvolvimento das plantas, para antever sua produtividade em função dos fatores influentes (PEDERSEN e LAUER, 2002).

A elaboração de modelos eficientes permite a previsão de safra, o melhor planejamento do uso do solo, o controle de pragas e doenças, melhores estratégias de pesquisa e a alocação correta de determinada cultura em um ambiente, estando na dependência do conhecimento das condições climáticas (temperatura, radiação solar e precipitação pluvial, principalmente). A partir da utilização de técnicas como a modelagem, é possível a criação de cenários futuros por intermédio de simulações, que utilizam um conjunto de fatores que irão representar um processo.

O município de Santiago e região têm sua economia baseada na agropecuária, tendo a soja como principal cultura agrícola (IBGE, 2011), sendo esta região, considerada de produção significativa de soja no Rio Grande do Sul (MELO et al., 2004). Existe por parte da maioria dos produtores desta região um grande receio em investir em novas tecnologias devido à dificuldade de chegar até eles informações referentes à cultura da soja, a implantação e manejo de sistemas de irrigação, licenciamento ambiental para esta atividade, épocas de semeadura adequadas levando em consideração as características climáticas, etc.. O conhecimento antecipado de indicadores de resposta da soja à condição hídrica pode auxiliar o produtor rural na busca de estratégias mais seguras às tomadas de decisões, como por exemplo, o momento certo de irrigar, optar por cultivares que completem o ciclo em períodos com oferta hídrica adequada, seguir as recomendações de zoneamento agrícola para a cultura da soja (CUNHA et al. 2001), e adotar práticas de manejo capazes de aumentar os estoques de água no solo.

Neste sentido, o conhecimento de funções de produção da cultura da soja permite auxiliar no manejo de estratégias de irrigação, trazendo informações importantes para os produtores da região centro-oeste do Estado do Rio Grande do Sul, em especial a região de Santiago, RS, onde este estudo foi realizado.

O presente trabalho apresenta como objetivo geral, a aplicação de um modelo de simulação da produção para a cultura da soja na região de Santiago, RS, permitindo conhecer a resposta da produção de soja a diferentes lâminas de água aplicada e como objetivos específicos desenvolver procedimento experimental para geração dos dados necessários para calibrar um modelo de simulação da extração

da água do solo e a respectiva resposta em produção da cultura; comparar os resultados de produção de soja obtidos nos experimentos de campo com os resultados obtidos por simulação através de modelos de extração da água do solo e de produção; estabelecer a relação funcional entre a aplicação de água via irrigação, e a respectiva produção da cultura da soja e determinar a eficiência da aplicação da água sob diferentes estratégias de irrigação com a utilização de modelos matemáticos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais tópicos que fundamentaram este trabalho, através dos quais, foi possível conhecer as formas com que os parâmetros utilizados nesta pesquisa vêm sendo conduzidos pelos autores.

2.1 Considerações gerais sobre a cultura da soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma leguminosa de ciclo anual (90 a 160 dias) originária do extremo Oriente. Na China, a espécie é cultivada há milhares de anos. Originariamente, a soja é uma planta subtropical, mas, com o melhoramento genético, pode ser cultivada hoje até a latitude de 52° N. No Brasil, o grão foi introduzido no estado do Rio Grande do Sul por volta de 1960 e até meados de 1970, cerca de 80% da produção nacional de soja concentrava-se na região Sul (SCHNEPF et al., 2001).

O interesse do governo brasileiro pela expansão na produção da soja para atender à indústria fez com que a cultura ganhasse cada vez mais incentivos oficiais. Diversas estradas, ferrovias e hidrovias foram instaladas e portos foram modernizados para o escoamento da produção. A partir de então, houve um rápido crescimento na produção, com o desenvolvimento das primeiras variedades cultivadas comerciais (MELO, 2005), sendo atualmente a mais importante oleaginosa cultivada no mundo (BLACK, 2000).

A cultura da soja no Brasil assume grande valor socioeconômico, devido à importância de seus produtos, principalmente farelo, óleo vegetal e seus derivados, tanto para o mercado interno como externo. Isso representa considerável fonte de divisas para o país, além da geração de empregos nos diversos setores da economia. O grão, como produto de alto valor protéico, vem sendo cada vez mais utilizado na alimentação humana na forma de leite, farinhas e produtos fermentados e vem aumentando sua participação na obtenção de outros produtos como adubo,

revestimento, papel, tinta e combustível (biodiesel). Em nível mundial, a soja é a principal fonte de óleos vegetais, além de produzir mais proteínas por unidade de área que qualquer outra espécie cultivada (MANARA, 1988). Oferece proteção ao solo, durante o ciclo vegetativo, com sua massa verde cobrindo toda a superfície, e ainda, por ser uma leguminosa, tem alta capacidade de fixar nitrogênio atmosférico por simbiose, raramente havendo a necessidade de suplementação de nitrogênio por adubação (REICHARDT, 1990).

No país, o complexo agro-industrial da soja incontestavelmente caracteriza-se pelo dinamismo, evidenciado pela rápida incorporação de novas técnicas agricultáveis ao sistema de produção e, principalmente, pelo fato de que todos os anos surgem novas variedades resistentes às principais doenças e pragas, e com maior potencial de produção, abrangendo todas as regiões produtoras do país (MARION, 2004).

Canziani et al. (2006) relatam que a soja é a principal demandante de insumos agrícolas no Brasil, especialmente fertilizantes e herbicidas. A produção agrícola no país é bastante tecnificada, sendo que o nível tecnológico é relativamente homogêneo entre os produtores e as regiões brasileiras. Isso significa que na produção de soja há uma tecnologia ou sistema de produção “dominante”, que é adotada pela maioria dos produtores, tanto de soja convencional, como de soja transgênica.

A soja fundamenta, atualmente, assunto de intensa atividade de pesquisa dirigida para a obtenção de informações que possibilitem aumentos de produtividade. Considerando que o desenvolvimento da soja é influenciado por inúmeros fatores ambientais, entre estes a precipitação pluvial, a temperatura, a umidade relativa do ar, a umidade do solo e, principalmente o fotoperíodo, a época de semeadura exerce influência decisiva sobre a quantidade e a qualidade da produção, portanto, as variações em produção e produtividade são determinadas por microclimas, solos e diversidade de sistemas tecnológicos empregados (REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 2009).

Dentre as culturas de valor econômico a soja foi a que mais se expandiu no Brasil em dez anos, no período entre 1995 e 2006. Apresentou um aumento de 88,8% na produção, alcançando 40,7 milhões de toneladas em 15,6 milhões de hectares, com um aumento de 69,3% na área colhida. Em termos absolutos,

segundo o Censo Agropecuário 2006, houve aumento de 6,4 milhões de hectares de soja (IBGE, 2010).

A área plantada com a cultura da soja no Brasil na safra 2009/10 foi de 23.467.900,00 de hectares, com uma produção de 68.688.200,00 milhões de toneladas, sendo $2.927 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, gerando uma receita bruta de aproximadamente 38 bilhões de reais (CONAB, 2010). No Estado do Rio Grande do Sul, nesta mesma safra, a área colhida foi de 3.976.200,00 de hectares e a produção foi de 10.218.800,00 toneladas de grãos, $2.570 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, gerando uma receita de 5,6 bilhões de reais (CONAB, 2010), sendo cultivada em 32 microrregiões geográficas (MELO, 2005), respondendo por aproximadamente 20% da produção de grãos do Estado.

Nas Figuras 2.1 e 2.2 pode-se visualizar as áreas plantadas e a produção (toneladas) de soja no Estado do Rio Grande do Sul para o período de 2009 a 2010.

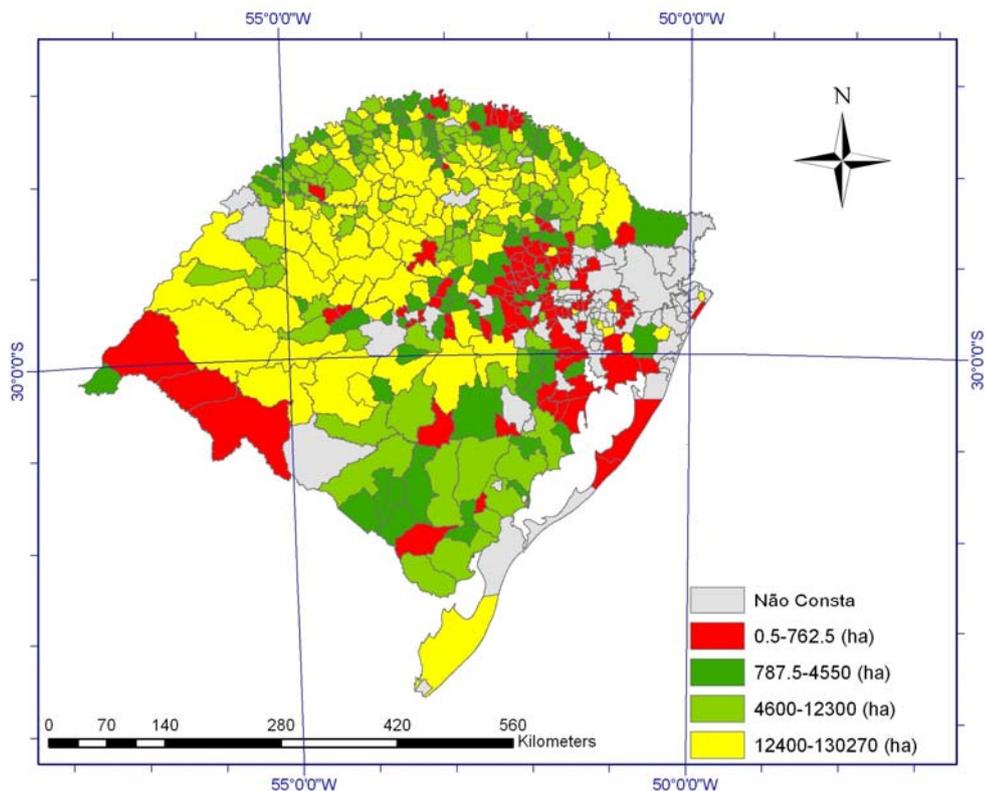


Figura 2.1 – Área plantada com a cultura de soja para o Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2010) – Período 2009/2010.

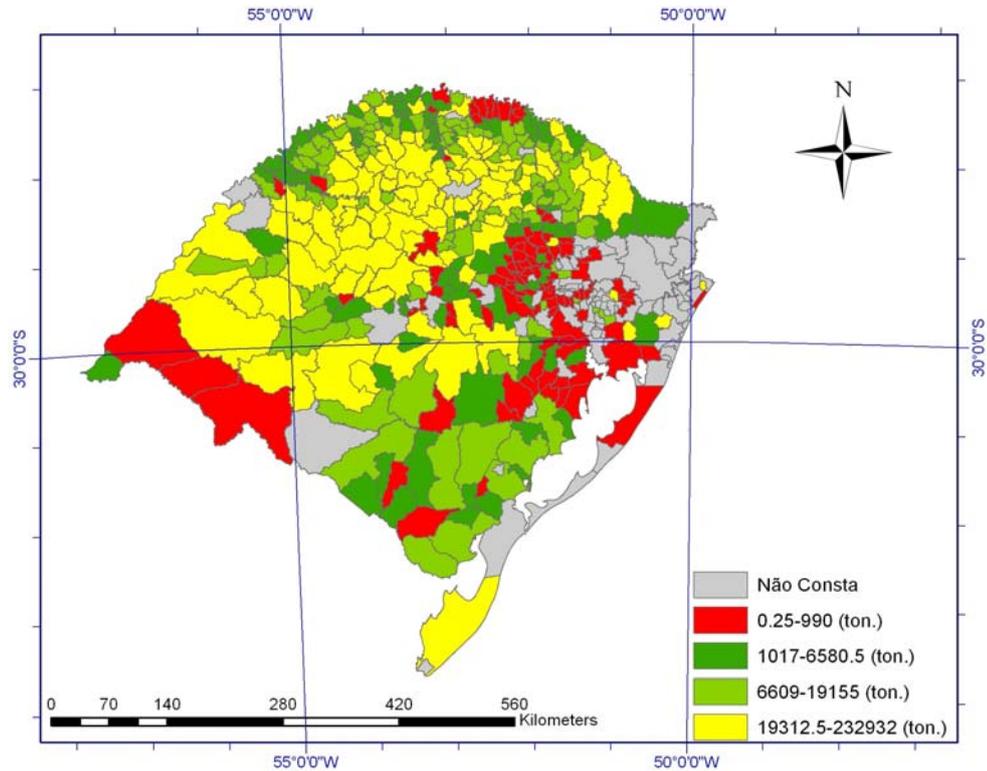


Figura 2.2 – Produção de soja para o Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2010) - Período 2009/2010.

2.2 Importância da água para a cultura da soja

A importância da água para as plantas deve-se à sua contribuição na manutenção e preservação de suas funções vitais. A água constitui aproximadamente 90% do peso da planta, atuando em praticamente todos os processos fisiológicos e bioquímicos do protoplasma. Seu movimento na planta, resultante de um gradiente de potencial, contribui para a translocação dos solutos absorvidos ou sintetizados pela raiz, dos compostos transportados até a folha e não utilizados, e de substâncias sintetizadas na folha (TAIZ e ZEIGER, 2004; EMBRAPA, 2006; FLOSS, 2008).

Segundo Floss (2008), dentro de limites, a soja quando comparada as outras culturas, mostra notável capacidade de adaptar-se a condições de deficiência hídrica, provavelmente pela alta capacidade de formação de flores ao longo do período de florescimento. Mundstock e Thomas (2005) acrescentam o fato da soja possuir sistema radicular pivotante, o qual atinge grandes profundidades em busca

de água, acrescido da rápida recuperação do metabolismo e grande quantidade de reservas temporárias nas estruturas vegetativas, permitem à planta manter o crescimento mesmo sob regime de estresse.

Schacker e Matzenauer (2003) estudaram a disponibilidade hídrica para a cultura da soja e sua relação com fenômenos climáticos no Rio Grande do Sul, concluindo que a cultura da soja apresenta uma resposta diferencial à deficiência hídrica, dependendo do estágio de desenvolvimento em que se encontra.

Mundstock e Thomas (2005) afirmam que a falta de água em qualquer estágio de desenvolvimento da soja altera a quantidade de massa produzida, conseqüentemente, afetando o balanço entre o crescimento vegetativo e o reprodutivo. Para Salinas et al. (1989), a soja tem dois períodos críticos bem definidos com relação à falta de água: da sementeira à emergência e no enchimento dos grãos. Durante a germinação, tanto o excesso como a falta de água são prejudiciais ao estabelecimento da cultura.

Marion (2004) afirma que muitos estudos têm verificado que a ocorrência de deficiência hídrica durante a germinação-emergência e floração-enchimento de grãos acarreta em perdas significativas na produtividade, porque estes estágios envolvem de forma direta a formação dos componentes primários do rendimento, que compreendem: número de plantas por área, número de legumes por planta, número de grãos por legume e peso médio de grãos.

A ocorrência de déficit hídrico durante o período de enchimento dos grãos é mais prejudicial do que durante a floração (DOSS et al., 1974; SIONIT e KRAMER, 1977; FARIAS et al., 2001).

A necessidade de água na cultura da soja vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm/dia), decrescendo após esse período (BERLATO et al., 1986). Déficit hídricos expressivos, durante a floração e o enchimento de grãos, provocam alterações fisiológicas na planta, como o fechamento estomático e o enrolamento de folhas e, como conseqüência, causam a queda prematura de folhas e de flores e abortamento de vagens, resultando, por fim, em redução do rendimento de grãos (KOZLOWSKI, 1994).

Para o Sul do Brasil, Berlato et al. (1986), obtiveram valores médios de evapotranspiração máxima (ET_m) ao redor de 6 mm/dia, sendo o menor consumo verificado no início do ciclo (2,7 mm/dia) e o maior ocorrendo do início da floração ao

início do enchimento de grãos (7,5 mm/dia). Para todo o ciclo da cultura, foi obtida uma ETm de 827 mm.

Em um experimento onde a cultura da soja foi submetida a pequenos períodos de deficiência hídrica, a partir do início da fase de enchimento de grãos, Bredan e Egli (2003) observaram que as plantas entraram em senescência mais cedo, e apresentaram menor produtividade e grãos menores, em relação às plantas sempre irrigadas. Observaram também que, uma vez iniciada a senescência das plantas devido à deficiência hídrica, não houve reversão do processo, mesmo com irrigação.

A translocação de fotoassimilados na planta de soja durante o período de deficiência hídrica é menor, devido à redução da fotossíntese nas folhas e à inibição do crescimento dos órgãos da planta (SIONIT e KRAMER, 1977; PEREIRA, 2002).

A necessidade total de água na cultura da soja, para obtenção do máximo rendimento, varia entre 450 a 800 mm/ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo (BERLATO et al., 1986). Bergamaschi et al. (1999) e Stewart e Nielsen (1990) afirmam que o consumo de água pela cultura da soja depende, além do estágio de desenvolvimento, da demanda evaporativa da atmosfera, e o seu valor absoluto pode variar, tanto em função das condições climáticas de cada região como em função do ano e época de semeadura (condições de tempo) na mesma região climática.

Oplinger (2004) ressalta que as plantas de soja tendem a se adaptar a maiores ou menores taxas de uso de água. Verificou que, uma vez iniciada a irrigação, qualquer interrupção no suprimento de água pode ocasionar maiores perdas em produtividade em plantas irrigadas, do que em plantas que não receberam irrigação.

A determinação das necessidades hídricas reais da soja em cada estágio de desenvolvimento pode contribuir para o planejamento da cultura e para a diminuição das perdas devido ao déficit ou excesso hídrico, visando-se melhorar a eficiência da produção e evitar o desperdício dos recursos hídricos.

Para minimizar os efeitos do déficit hídrico, indica-se semear apenas cultivares adaptadas à região e à condição de solo; semear em época recomendada e de menor risco climático; semear com adequada umidade em todo o perfil do solo; e adotar práticas que favoreçam o armazenamento de água pelo solo. A irrigação é indicada por vários autores como uma medida eficaz.

2.3 Importância da irrigação na cultura da soja

Sentelhas (2001) destaca a irrigação como uma prática agrícola de fornecimento de água às culturas, onde e quando as chuvas, ou qualquer outra forma natural de fornecimento, não são suficientes para suprir as necessidades hídricas das plantas.

A irrigação, quando utilizada de forma complementar à chuva, principalmente nas regiões onde o total de precipitação natural permite o desenvolvimento e a produção das culturas, proporciona melhor aproveitamento, aumentando a eficiência do uso da água aplicada pela chuva. A complementação da demanda hídrica da cultura pela irrigação, nos momentos corretos, proporciona o aproveitamento da água da chuva de modo a resultar em produção efetiva. Caso contrário, a presença da precipitação pluviométrica durante quase todo o ciclo da planta não seria uma garantia de ocorrência da produção final, da forma desejada, se faltasse água em momentos críticos do ciclo vegetativo (TESTEZLAF et al., 2002).

De acordo com Berlato (1992) no Estado do Rio Grande do Sul, irrigações suplementares são necessárias no período primavera-verão, devido à alta demanda evaporativa que ocorre nos meses de dezembro a fevereiro, tornando-se insuficiente para atender as exigências hídricas das culturas, principalmente no sul do Estado. De acordo com a Agência Nacional de Águas (2004), 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.

É importante considerar a precipitação pluvial quando utiliza-se a técnica da irrigação. Em algumas regiões a precipitação pluvial é bem distribuída durante todas as estações do ano, já em outras regiões torna-se insuficiente para atender a demanda evaporativa das culturas, geralmente ocorrendo nos meses mais quentes do ano. Quando considera-se a precipitação pluvial a irrigação é chamada de complementar, pois é aplicado o total requerido pelas plantas menos o menor índice pluviométrico da região. Já quando não se considera a precipitação pluviométrica, ou esta não é disponível, a irrigação é chamada de total.

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.

Conforme Cunha et al. (2001), a irrigação apresenta-se como solução principal para o problema de deficiência hídrica em soja. A demanda em investimentos, além da falta de condições adequadas da área e problemas de disponibilidade de mananciais hídricos em anos críticos, tem limitado a utilização no sul do Brasil. Villa Nova (1991) salienta que 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.

Não existe um sistema de irrigação ideal, capaz de atender satisfatoriamente todas essas condições e interesses envolvidos, o que determina a necessidade de selecionar o sistema de irrigação mais adequado para uma determinada condição, visando atingir os objetivos desejados. O manejo de irrigação da cultura da soja nada mais é do que estabelecer quando e quanto aplicar de lâmina de água durante cada estágio de desenvolvimento. A irrigação da soja durante o período vegetativo tem influência direta sobre a estatura da planta, área foliar e altura de inserção do primeiro legume, além de outros efeitos sobre a arquitetura da planta. Portanto ela tende a ser mais vantajosa em condições que podem ser limitantes ao desenvolvimento das plantas, como é o caso das semeaduras tardias (CUNHA e BERGAMASCHI, 1992).

De acordo com Queiroz et al. (1998), a irrigação durante a fase de crescimento vegetativo, se mostrou menos importante que durante os períodos de florescimento, formação de legumes e enchimento de grãos.

Os critérios de manejo de água normalmente utilizados são baseados em medidas no solo, na planta ou na atmosfera. Os baseados em medidas no solo se fundamentam na determinação direta ou indireta do teor de água presente no solo, enquanto os baseados em medidas na planta se estabelecem no monitoramento do potencial hídrico, da resistência estomática, da temperatura da folha por meio de

termômetro infravermelho e outros; já os baseados em medidas climáticas variam desde simples medidas de evaporação de água em um tanque, como o Classe A, até complexas equações para estimativa da evapotranspiração (ROCHA et al., 2003).

Uma questão importante é o manejo do sistema, sendo uma parcela que contribui significativamente para o sucesso do empreendimento. Muitos sistemas são bem dimensionados e apresentam déficit econômico em função da aplicação inadequada da água, sem consideração dos critérios de solo, planta e atmosfera que indicam o momento e a quantidade ideal da lâmina de irrigação.

Para Bernardo (2008), o quanto de água aplicar é normalmente calculado com base na quantidade de água consumida pela cultura, dividida pela eficiência de irrigação. A quantidade de água consumida pela cultura pode ser estimada por meio da evapotranspiração real ou por meio da variação do teor de água no solo. Sendo que a quantidade de água a ser aplicada por irrigação tem de ser compatível com a capacidade de retenção de água na zona radicular da cultura.

2.4 Modelagem na agricultura

Um modelo de simulação do crescimento e desenvolvimento de uma cultura é, basicamente, uma seqüência de equações, expressas numa linguagem de programação, que pretende descrever quantitativamente o crescimento e o desenvolvimento de determinada cultura a partir das condições climáticas, edáficas e culturais (BRAGA et al., 1997). Estes modelos de crescimento e previsão de produtividade de culturas permitem fazer simulações de longo prazo, sendo realizadas geralmente a um baixo custo, utilizando-se características do solo e práticas de manejo da cultura durante o período de dados climatológicos históricos disponíveis para determinado local (MUCHOV et al., 1991).

O uso de técnicas de simulação considerando a presença da planta está aumentando, servindo de suporte para pesquisas de campo e para o uso eficiente e sustentável da água e dos nutrientes no sistema produtivo. Pesquisadores de diversas partes do mundo vêm usando vários modelos de crescimento das culturas,

testando a habilidade na simulação de eventos fenológicos, produção de biomassa e produtividade de grãos.

A maioria dos atuais modelos disponíveis calcula, para um período de variável diariamente a fotossíntese líquida em função do índice de área foliar (estimado), da radiação solar global incidente, da eficiência de uso daquela radiação e da temperatura do ar. A partição da biomassa assim formada é, então, feita pelos diversos órgãos da planta em crescimento (raízes, caules, folhas e órgãos), segundo um padrão definido, basicamente, pelo estado fenológico em que a cultura se encontra. Deste modo, é possível obter tanto a evolução do peso dos diversos órgãos ao longo do ciclo como a produtividade final da cultura (RITCHIE, 1972). Estes processos fisiológicos podem ser associados à absorção dos nutrientes e às perdas causadas por pragas, doenças e plantas daninhas. A agregação destes conhecimentos através de equações matemáticas resulta em modelos que podem simular o crescimento e a produção das culturas (DE VRIES, 1989).

Assim, os modelos matemáticos sintetizam, apresentam e analisam diversos aspectos da produção agrícola, tais como arranjo espacial entre plantas, diversos tipos de interações entre as culturas e o ambiente, características físicas e químicas de solos, otimização do uso de equipamentos e máquinas, sistemas de transportes e ainda modelos sócio-econômicos.

O progresso obtido através do uso de modelos é mais rápido e de menor custo que a pesquisa experimental isolada, ainda que os principais resultados tenham que continuar a serem avaliados com experimentos. Também já demonstraram ser eficientes para a determinação de prioridades na alocação de fundos para pesquisas e na escolha da melhor cultura para programas de desenvolvimento agrícola (HANKS e RITCHIE, 1991). Os modelos já existentes podem ser associados a outros ou modificados para aproximá-los da realidade e da necessidade de informação (PEREIRA e MACHADO, 1987). A construção de modelos simplificados, ou sumarizantes, é interessante para torná-los mais acessíveis ao público não especializado. Tais modelos podem ser feitos extraindo-se todos os detalhes excessivos do modelo complexo, usando-se análises de sensibilidade e pela seleção da variável principal do sistema. Diferentes modelos simplificados podem ser construídos a partir de um mesmo modelo complexo, as diferenças entre eles irá depender dos diferentes objetivos de sua aplicação. (BERNARDES, 2000).

Barros (1998) classificou os modelos em matemáticos e de simulação. O primeiro se refere a representações matemáticas de um fenômeno, enquanto que o segundo engloba um ou mais modelos matemáticos, representando fenômenos mais complexos. Os modelos matemáticos referem a representações matemáticas de um fenômeno, podendo ser de três tipos: (i) empíricos, baseados em dados observados; (ii) estocásticos, em que o processo é descrito por intermédio das leis de probabilidade e (iii) mecanísticos, onde as leis da física, química e biologia influenciaram no processo, sendo os mais versáteis dentro dos tipos de modelos matemáticos (PAUSTIAN et al., 1992). A utilização de vários modelos matemáticos faz com que os modelos de simulação sejam mais completos (ADDISCOTT, 1996), sendo divididos em (i) determinísticos, em que um conjunto de eventos leva a resultados únicos e definidos; e (ii) estocásticos, em que a incerteza é considerada na estrutura, levando em consideração as leis da probabilidade e da estatística.

Modelos de geração de possíveis seqüências de demanda para irrigação na fase de planejamento requerem componentes estocásticos e determinísticos. A parte estocástica gera as entradas climáticas e a parte determinística relacionada aos aspectos morfo-fisiológicos da cultura e à dinâmica de água no solo, oferecem insumos necessários para o balanço hídrico que, por sua vez, indica a necessidade de água. A partir desta informação os volumes de água necessários para manter dado nível de umidade no solo podem ser calculados e as probabilidades correspondentes estabelecidas através de simulação de longo prazo. O cálculo destas probabilidades ou períodos de retorno para demandas de irrigação tem recebido atenção de diversos pesquisadores conforme ressaltado por Dean (1980), e Hoffman et al. (1992). A maioria destes trabalhos contentou-se por realizar estudos com base nos dados históricos o que introduz certa tendenciosidade nas previsões obtidas.

Conforme Dallacort et al. (2005), para a caracterização adequada de um modelo, ele deve abordar os aspectos mais relevantes da interação clima-planta-solo, de forma qualitativa e quantitativa, tendo em vista o resultado final procurado: rendimentos, fases fenológicas, etc. Para fins de produção agrícola, os modelos de previsão baseados em princípios agrometeorológicos mais significativos são os referentes às fases de desenvolvimento e de maturação das culturas, assim como os que tratam do rendimento das culturas, disponibilidade de umidade no solo e das reservas d'água e de irrigação. Grande parte das técnicas de previsão numérica

baseada na agrometeorologia fundamenta-se na relação estatística entre as variáveis dependentes que deverão ser estimadas (produtividade, data da floração e da maturação, etc.) e as variáveis agrometeorológicas independentes (precipitação, temperatura, etc.) ou ainda as variáveis reduzidas (índices de umidade do solo, influência da umidade atmosférica).

Para Boorges e Ritchie (1998), modelos podem ser utilizados para analisar os efeitos de diferentes estratégias, ajudando na determinação da melhor decisão, e apresentam uma série de vantagens para uma análise econômica, em relação aos dados provenientes de experimentação em campo. Entre essas vantagens destacam-se: um grande número de diferentes estratégias que podem ser avaliadas rapidamente e com baixo custo; cada estratégia pode ser avaliada em um amplo intervalo de condições incertas, como por exemplo, clima e dependendo do modelo de crescimento utilizado, pode-se avaliar complexas estratégias de manejo interagindo com diversas decisões como irrigação, fertilização e datas de semeadura. Pode-se ainda destacar a economia de tempo e recursos necessários para a pesquisa, mão-de-obra disponível e a resposta em curto prazo para a tomada de decisões, que em experimentos de campo implicaria em vários ensaios, tendo que ser repetidos por muitos anos.

Entre as vantagens de uso dos modelos de simulação, encontra-se a possibilidade de economizar tempo, esforço e recursos necessários para a tomada de decisões relacionadas ao manejo das culturas. De maneira similar, experimentos de campo detalhados e de longa duração podem ser melhor definidos, quando os modelos proporcionam alcances iniciais nas respostas esperadas (JAME e CURTFORTH, 1996). Já, uma das suas principais desvantagens é a grande quantidade de dados necessária para a sua execução, dado o grau de detalhe que apresentam.

Deve-se sempre levar em consideração que os modelos matemáticos utilizados para simulação são ferramentas imperfeitas devido aos erros decorrentes das simplificações feitas nos processos físicos, nos valores dos parâmetros de entrada e erros numéricos. Grande parte dos modelos apresenta falhas quando são testados, em razão da existência de variabilidade temporal e espacial da área onde estes são testados. Neste sentido, as informações obtidas em simulações devem ser verificadas com medições obtidas, em experimentos de campo, antes de serem aceitas como referência para o prosseguimento da pesquisa (LARCHER, 2000).

2.4.1 Parâmetros de solo para modelagem das culturas

O solo pode ser considerado um sistema trifásico, composto de uma fase sólida, constituída por partículas minerais e orgânicas de variada composição, tamanho e arranjo, definindo um sistema poroso. Outra fase, a líquida, constitui-se da solução do solo, cujo solvente principal é a água, que ocupa parte do volume do espaço vazio do arranjo poroso. O restante do espaço é ocupado pela fase gasosa, o ar do solo, do qual um componente de extrema importância é o vapor d'água (VILLA NOVA et al., 1996).

A função do solo ou do substrato é dar suporte para as plantas, podendo ainda regular a disponibilidade dos nutrientes e da água para as raízes. A inter-relação das partículas do solo em função do tamanho, da disposição e da forma dessas partículas, juntamente com a fase líquida do solo, determina a retenção de água e a composição do ar do solo, ocasionando o movimento de água no solo e a extração pela planta (CARLESSO e ZIMMERMANN, 2000). A máxima produtividade, devido aos fatores de solo, é atingida, quando ocorre um equilíbrio entre as fases, sólida, líquida e gasosa.

Em modelagem os parâmetros de solo são considerados por diversos autores de fundamental importância para a compreensão do crescimento, desenvolvimento e produção das culturas.

2.4.2 Parâmetros de clima para modelagem das culturas

O rendimento máximo de uma cultura é determinado, principalmente, por suas características genéticas e por uma boa adaptação do cultivo ao ambiente predominante. De acordo com Fancelli e Dourado Neto (2000), os processos de fotossíntese, respiração, transpiração e evaporação, são funções diretas de energia disponível no ambiente, comumente designada por calor, ao passo que o crescimento, desenvolvimento e translocação de fotoassimilados encontram-se ligados à disponibilidade hídrica do solo, sendo que seus efeitos são mais

pronunciados em condições de altas temperaturas onde a taxa de evapotranspiração é elevada.

Os estudos sobre zoneamento climático para a cultura da soja, no Brasil, têm incluído, como principais variáveis limitantes, a deficiência hídrica, a insuficiência térmica e a falta de uma estação seca na época da colheita (MOTA, 1983). Para Farias (1994), dentre os elementos do clima, os que mais afetam o comportamento e o desenvolvimento da cultura da soja são a temperatura, o fotoperíodo e a disponibilidade de água.

A temperatura, na cultura da soja, age sobre os processos de germinação, crescimento, floração, frutificação, nas reações químicas da respiração e da fotossíntese e, ainda, na absorção de água e de nutrientes. Dessa forma, a temperatura é uma variável meteorológica importante afetando não apenas o acúmulo de fitomassa como, também, a duração dos vários estádios de desenvolvimento da espécie, uma vez que, para completar cada subperíodo de desenvolvimento, as plantas necessitam um determinado acúmulo térmico (BERLATO, 1981).

O método mais satisfatório para determinar as etapas de desenvolvimento da cultura leva em consideração as exigências calóricas ou térmicas, designadas como unidades calóricas ($^{\circ}\text{C}$), unidades térmicas de desenvolvimento (U.T.D.) ou graus-dia (GD) (FANCELLI e DOURADO-NETO, 1997). Estima-se a soma das unidades diárias de calor, a partir da emergência para o material genético atingir um determinado estágio, pela diferença entre a temperatura média diária e as temperaturas base mínima ou máxima exigidas pela espécie vegetal.

Na cultura da soja, a radiação solar está relacionada com a fotossíntese, alongação de haste principal e ramificações, expansão foliar, pegamento de vagens e grãos e fixação biológica (CÂMARA, 2000). O total de fitomassa seca produzida pela soja, depende da percentagem de radiação fotossinteticamente ativa interceptada e da eficiência de utilização dessa energia pelo processo fotossintético (SHIBLES e WEBER, 1965). No entanto, Jiang et al. (2004) ressaltam que, altas intensidades de radiação solar absorvidas pelas plantas podem levá-las a saturação luminosa, diminuindo a eficiência no uso da radiação.

A cultura da soja, quando submetida a baixas intensidades luminosas, apresenta menores taxas de fitomassa, de crescimento, de assimilação líquida e, no entanto, um elevado estiolamento, condicionando o acamamento em condições de

campo. Isso demonstra a importância de se conhecer o clima da região de cultivo e a época de semeadura, que poderão ser fatores limitantes quando se almejam altas produtividades nessa cultura, acima de 3.000 kg ha^{-1} (MELGES et al., 1989; PEREIRA, 2002).

O fotoperíodo é definido como o tempo em horas entre o nascer e o pôr do sol (GOUDRIAAN e Van LAAR, 1994). O fotoperíodo controla a indução floral, com reflexo na duração do período vegetativo e do ciclo. Assim, o atraso na semeadura, em relação à melhor época (meados de outubro a meados de dezembro, na maior parte do Brasil) reduz o ciclo e dias curtos antecipam o florescimento (RODRIGUES et al., 2001); temperaturas baixas aumentam e temperaturas altas diminuem o número de dias entre a emergência e o florescimento (RODRIGUES et al., 2001; COOPER, 2003; EMBRAPA SOJA, 2010). Essas variações de ciclo influenciam o crescimento das plantas, variando sua intensidade conforme a duração do período juvenil, o hábito de crescimento e a sensibilidade das cultivares a esses fatores (EMBRAPA SOJA, 2010). Cultivares com a característica de período juvenil longo têm maior adaptabilidade a locais (latitudes) e a épocas de semeadura do que cultivares sem esta característica. Wallace e Yan (1998) criaram um modelo matemático baseado na interação genótipo x temperatura x fotoperíodo para calcular a duração dos subperíodos.

2.4.3 Parâmetros da planta para modelagem das culturas

O rendimento de grãos envolve uma série de processos relacionados ao crescimento e desenvolvimento da planta durante o ciclo da cultura. O termo crescimento se refere ao acúmulo de biomassa da planta, enquanto que o termo desenvolvimento se refere à diferenciação dos diferentes órgãos durante o ciclo da cultura (período entre a emergência e o ponto de maturidade fisiológica). Ainda, o termo fenologia se refere a estádios de crescimento e desenvolvimento identificáveis na planta. Ambos, crescimento e desenvolvimento são afetados pelo meio e por fatores genético. O termo estágio se refere a um determinado momento, caracterizado por algo observável da planta.

A análise de crescimento é uma ferramenta para melhor conhecimento da planta como entidade biológica e que permite manejar, racionalmente, as espécies cultivadas para expressão do seu potencial de produção (ANDRADE et al., 2009). Também permite avaliar o crescimento da planta como um todo e a contribuição dos diferentes órgãos para o crescimento total (BENINCASA, 2003).

O crescimento de plantas de soja é inicialmente lento, intensificando-se a partir dos 100 DAE da cultura. A taxa de crescimento da cultura e a eficiência fotossintética são índices morfofisiológicos importantes que representam e auxiliam o esclarecimento da dinâmica do acúmulo de matéria seca pelas plantas de soja (SCHIAVON et al., 2008).

Durante o desenvolvimento das plantas, a atividade fotossintética por área foliar aumenta com a idade da folha, até a sua expansão máxima, decrescendo após, até a sua senescência. A senescência é um mecanismo de fundamental influência na produção final das culturas, pois reduz a área fotossinteticamente ativa da planta. Scott e Batchelor (1979) obtiveram maior taxa de crescimento da cultura no início do estágio reprodutivo da cultura da soja. Os valores de taxa de crescimento relativo, taxa assimilatória líquida e razão de área foliar foram maiores no início do período vegetativo e decresceram com o decorrer do ciclo.

A associação do acúmulo de matéria seca com a escala fenológica da cultura da soja, permite a melhor observação do desempenho da planta. Francisco (2002) avaliou o efeito da antecipação da adubação da cultura da soja no acúmulo de matéria seca. Segundo o autor a matéria seca das folhas apresenta acúmulo gradual, com ponto de máximo no estágio reprodutivo R_5 , decaindo posteriormente, em função da queda acentuada das folhas ocorrida no final do ciclo, chegando a reduzir em 137% a sua massa em relação ao ponto de maior acúmulo. O caule atinge 48% de sua massa final no estágio R_2 , atingindo o ponto de maior acúmulo no estágio R_5 , com massa de $0,220 \text{ kg.m}^{-2}$, mantendo certa estabilidade até o final do ciclo. As raízes também apresentaram ponto de maior acúmulo de matéria seca no estágio R_5 , com massa de $0,077 \text{ kg. m}^{-2}$, tendo ocorrido intenso ganho de massa nos estádios iniciais de desenvolvimento.

Board e Harville (1996) verificaram que a maior taxa de crescimento da cultura ocorreu entre as fases fenológicas reprodutivas R_1 e R_5 , devido ao aumento no índice de área foliar. Constataram também, que a maior interceptação da radiação luminosa foi no final do período vegetativo, favorecendo a taxa de produção

de massa da matéria seca em etapa seguinte e que a produtividade foi correlacionada com a taxa de crescimento da cultura.

De forma geral o ciclo longo e a estatura elevada da planta de soja correlacionam-se positivamente com a produção de grãos (DYBING, 1994), pois tem relação com a maior quantidade de massa seca produzida, uma vez que a produção de fitomassa anterior a floração representa reserva potencial da planta para investir na formação de estruturas reprodutivas.

2.4.3.1 Índice de área foliar

A determinação das características de uma cobertura vegetal é fundamental para um estudo mais detalhado dos processos físicos e fisiológicos que ocorrem em seu interior. A estrutura e distribuição de uma cobertura vegetal têm uma relação direta com as condições climáticas regionais. O índice de área foliar (IAF) é considerado o melhor descritor da estrutura de dosséis vegetais, para definir trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera (ROSENBERG et al., 1983; RUNNING et al., 1989).

A razão da área foliar é também chamada quociente de área foliar, representa a relação entre a área foliar e a massa da matéria seca total da planta. A razão de área foliar declina enquanto a planta cresce, em função do autossombreamento, com a tendência da diminuição da área foliar útil ou fotossinteticamente ativa, para a produção de matéria seca. A taxa assimilatória líquida representa a taxa de incremento de massa de matéria seca por unidade de área foliar existente na planta, assumindo que tanto a matéria seca como a área foliar, aumentam exponencialmente (PEIXOTO, 1998; BRANDELERO, 2001; BENINCASA, 2003).

O índice de área foliar corresponde à área da superfície total das folhas da planta por unidade de superfície de solo, geralmente expresso em $m^2.m^{-2}$. A importância da área foliar de uma cultura é amplamente conhecida por ser um indicativo de produtividade, pois o processo fotossintético depende da interceptação de energia luminosa pelas folhas. Assim, a superfície foliar de uma planta é a base do rendimento potencial das culturas (WATSON, 1952). Como a fotossíntese depende da área foliar, o rendimento da cultura será maior quanto mais rápido a

planta atingir o IAF máximo e quanto mais tempo à área foliar permanecer ativa (PEREIRA e MACHADO, 1987).

Existe um valor ótimo para o IAF em relação à produção de fitomassa seca, o qual geralmente ocorre quando praticamente toda a radiação incidente é absorvida pela planta (LARCHER, 2000), momento no qual se verifica uma relação máxima entre fotossíntese e respiração.

De acordo com Schoffel e Volpe (2001); Pereira (2002) para a cultura da soja o valor crítico de IAF para interceptar 95% da radiação está em torno de 3,9.

A soja tem um crescimento inicial lento, que dura até a queda dos cotilédones. Em seguida, o IAF normalmente aumenta linearmente até o final do florescimento, atingindo valores entre 5,0 e 8,0. O valor do IAF decresce situando-se entre 4,0 e 6,0 próximo a maturidade fisiológica, a partir da qual observa-se um rápido amarelecimento da parte aérea das plantas, seguido de abscisão foliar (KOLLER et al., 1970).

2.4.3.2 Crescimento do sistema radicular

As raízes são imprescindíveis aos processos de absorção de água e nutrientes; os estudos sobre seu crescimento, concentração, distribuição e atividade (taxa de crescimento e longevidade) no perfil do solo, são fundamentais para o entendimento dos sistemas de produção das culturas (TAYLOR e ARKIN, 1981). O crescimento radicular da soja ocorre quando células da região meristemática sofrem divisão e alongamento, por meio da pressão de turgor nas células, que é a força direcional para se sobrepôr a qualquer resistência externa (CAMARGO e ALLEONI, 1997).

As operações de manejo utilizadas na agricultura modificam algumas condições físicas do solo associadas à estrutura, como a disponibilidade de água, a aeração e a resistência ao crescimento das raízes (LETEY, 1985), diretamente relacionadas ao crescimento das plantas e ao rendimento de grãos.

Segundo Gandolfi et al. (1983), o sistema radicular da soja é constituído de um eixo principal formado pela radícula e um grande número de raízes secundárias distribuídas em várias ordens ao longo desse eixo. Se não ocorrerem impedimentos

físico e químico, no início do estágio vegetativo, a raiz principal tem rápido crescimento, podendo atingir até a 60 cm de profundidade e as raízes laterais desenvolvem-se 20 a 25 cm de comprimento nos 15 cm superficiais do solo.

No início da fase reprodutiva, a raiz principal pode atingir até 75 cm de profundidade e o desenvolvimento das raízes laterais atingem mais de 25 cm de comprimento, concentrando-se nos 15 cm superficiais do solo. No enchimento de vagens, as raízes laterais, que inicialmente tem um crescimento variável, podem atingir 185 cm de profundidade (COALE e GROVE, 1986).

Aproximadamente 70 a 80% da massa das raízes de soja distribuem-se nos primeiros 15 cm do solo, em condições normais de cultivo (GREGORY, 1992), com o desenvolvimento radicular da soja ocorrendo através dos macroporos ou dos espaços vazios entre os agregados (ABREU et al., 2004). Em razão da grande concentração superficial e pelo efeito que o aprofundamento do sistema radicular tem sobre o aumento da quantidade de água disponível durante a estação de cultivo, as raízes da soja necessitam ser bem distribuídas nos 25 cm iniciais do perfil do solo, para que tenham condições de suportar os períodos de estresse hídrico que ocorrerem durante o seu ciclo (TORRES et. al., 1993).

A extensão e a quantidade de raízes desenvolvidas em cada condição de ambiente dependem das características físicas do solo, do controle exercido por fatores genéticos e do balanço da relação entre a parte aérea e as raízes (REICOSKY e HEATHERLY, 1990).

Se os solos são profundos, porém apresentam camadas de impedimento, são pobres em nutrientes, e o suprimento de água é irregular nas diversas fases de crescimento, o estoque de água e os nutrientes realmente disponíveis para as plantas passam a ser regulados, em grande parte, pelas características do sistema radicular da espécie cultivada (CINTRA et.al., 1997).

Em solos compactados, as raízes das plantas não utilizam adequadamente os nutrientes disponíveis, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes, responsáveis pela absorção de água e nutrientes, fica prejudicado (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000), portanto, pode-se esperar redução da extensão do sistema radicular (ANGHINONI e MEURER, 1999), embora a soja em cultivo irrigado tolere maiores níveis de compactação (BEUTLER et al., 2007).

Em solos bem drenados, tem sido observado que o crescimento das raízes pode atingir entre 120 a 150 cm de profundidade, porém a maior concentração situa-se entre 60 e 90 cm (MOREIRA, 1983).

Diversos fatores ligados ao solo, à planta e ao clima atuam modificando os hábitos radiculares. Segundo Porto (1993) a quantidade de água do solo utilizada pelas plantas varia com: (i) a demanda evaporativa da atmosfera; (ii) a habilidade da planta em regular o fluxo de água através do sistema radicular até a parte aérea; (iii) a exploração das reservas de água do subsolo pelo sistema radicular e (iv) condutividade hidráulica do solo.

A extração de água é influenciada pela distribuição geométrica das raízes viáveis e da disponibilidade de água no solo, sendo que nem toda a água que o solo armazena é disponível as plantas (CARLESSO, 1995). A planta determina a velocidade de extração de água do solo, a qual é variável ao longo do tempo em função do crescimento da área foliar e do sistema radicular. Já, o controle da taxa de extração é feito pela demanda evaporativa da atmosfera, que é função das condições meteorológicas, as quais apresentam grande variabilidade espaço-temporal (DENMEAD e SHAW, 1962).

Existem modelos que descrevem a extração da água no solo, classificados, segundo Faria (2009) em dois grupos: Modelos macroscópicos consideram o sistema radicular como um todo, não modelando o fluxo de água às raízes individuais, enquanto os modelos microscópicos descrevem o fluxo de água às raízes individuais, dando ênfase ao efeito das propriedades do solo na absorção de água.

2.4.3.3 Produção de matéria seca

A produção de toda massa seca é resultado do processo da fotossíntese (PEIXOTO, 1998), uma vez que de acordo com Santos Jr. et al. (2004), para o incremento da produção vegetal, é necessário melhor aproveitamento de energia solar e a ação de outros fatores ambientais favoráveis. Dessa forma, o acúmulo de matéria seca é, talvez, o parâmetro mais significativo, já que o mesmo é resultante da associação de vários componentes.

A fotossíntese é a atividade vital que as plantas realizam em função da luz solar, transformando a energia luminosa em energia química, sendo que as plantas são transformadoras primárias de energia solar e a sua eficiência é fator determinante na produtividade agrícola.

Neste processo, a planta utiliza CO₂ atmosférico, água e sais minerais e produz complexas moléculas orgânicas e oxigênio molecular, que é utilizado pela grande maioria dos seres vivos inclusive os vegetais, no processo de respiração.

A respiração pode ser dividida, teoricamente, em respiração de crescimento e de manutenção. A respiração relacionada ao crescimento corresponde à quantidade de carboidratos necessária para suprir energia às reações de síntese de nova fitomassa, enquanto a respiração de manutenção corresponde à quantidade de carboidratos necessária para suprir energia aos processos biológicos e bioquímicos da planta sem haver, no entanto, crescimento (TAIZ e ZEIGER, 2004).

Para Taiz e Zeiger (2004), o acúmulo de massa seca em comunidades vegetais apresenta curva sigmóide, com três fases: crescimento logarítmico, crescimento linear e senescência. Nos estádios iniciais das culturas, o acúmulo de matéria seca por dia é baixo. Porém, à medida que a planta cresce o ganho de biomassa por dia aumenta e tende a se estabilizar ao final do ciclo (CHARLES-EDWARDS, 1982).

Todo e qualquer fator que interfira na fotossíntese irá afetar o acúmulo de matéria seca. Fatores como nutrição mineral, radiação e disponibilidade hídrica, interferem significativamente na fotossíntese. Dentre estes, a disponibilidade de água desempenha papel preponderante, pois, além de propiciar a entrada de CO₂, ela promove o resfriamento do vegetal, interferindo, desta forma, na taxa de fotossíntese e de respiração (CHARLES-EDWARDS, 1982).

O crescimento da soja pode ser medido pela quantidade de massa acumulada na planta. Assim, com exceção da água, a massa seca consiste em tudo que se encontra na planta, incluindo carboidratos, proteína, óleos, e nutrientes.

A soja, por ser uma planta C3 é menos eficiente na utilização de radiação solar e água, quando submetida a baixas intensidades luminosas, apresenta menores taxas de fitomassa, de crescimento, de assimilação líquida e, no entanto, um elevado estiolamento, condicionando o acamamento em condições de campo. Isso demonstra a importância de conhecer o clima da região de cultivo e a época de semeadura, que poderão ser fatores limitantes quando se almejam altas

produtividades nessa cultura, acima de $3.000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (MELGES et al., 1989; PEREIRA, 2002).

O maior acúmulo de matéria seca vegetativa nos ramos da soja ocorre entre o início do florescimento e início do enchimento de grãos (BOARD & SETTIMI, 1986). Condições adequadas de nutrição e maior interceptação de luz neste período aumentam a produtividade potencial da soja, pois o maior número de nós nos ramos potencializa o número de gemas reprodutivas (BOARD et. al., 1990).

Conforme Thomas et al. (1998), existe uma relação linear entre a produtividade de grãos e a matéria seca acumulada pelas plantas de soja até o início do enchimento de grãos. Nesse estágio, com uma quantidade igual ou superior a 500 g m^{-2} de matéria seca de plantas de soja, a produtividade tende a estabilizar, ou seja, atinge seu teto máximo.

Herzog et al. (2004) avaliando a produção de biomassa total da cultura da soja, em experimentos com e sem irrigação, não observaram diferença entre as proporções de matéria seca de grãos, parte aérea e raízes (38%, 28% e 34%, respectivamente), independentemente do uso de irrigação. Porém, na média de todos os tratamentos, verificaram uma diferença em torno de $1,0 \text{ mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ na produção de biomassa a favor das parcelas que receberam irrigação.

A análise da variação temporal do acúmulo de biomassa pode ser utilizada como instrumento visando a descrição clara do padrão de crescimento da planta ou de partes dela, permitindo comparações entre situações distintas, podendo ser aplicada às mais diversas modalidades de estudos (LIEDGENS, 1993).

2.4.3.4 Índice de colheita

O índice de colheita (IC) e produtividade de grãos se referem à fração de matéria seca do órgão de interesse (grãos) colhida, em relação à matéria seca total.

Segundo Donald e Hamblin (1976), o rendimento de grãos das culturas, ou o IC, pode ser definido como o produto do número de grãos por planta, a população de plantas por área e a massa de cada grão, no caso de rendimento de grãos, ou o produto acima dividido pelo total de matéria seca produzida, no caso do IC.

Evidências indicam que o IC é um caráter relativamente estável de uma cultivar, e que a maior parte da variância genotípica na produção de grãos está associada a variações na produção de biomassa e não no IC (SPAETH et al., 1984).

Conforme dados relatados por Colasante (1980), o IC da soja varia de 0,43 a 0,50, dependendo da cultivar plantada. Pedro Júnior et al. (1985) verificaram índices de colheita de 0,40 a 0,50 para a cultura da soja. Segundo Brandelero et al. (2002) comparando cultivares de soja Curió e Tucano, observaram que apesar de ambos apresentarem os valores similares de massa da matéria seca total acumulada, seus índices de colheita são bem diferentes, sendo 0,50 para 'Curió' e 0,34 para 'Tucano'. Esse comportamento, segundo Colasante (1980), mostra que iguais acúmulos da massa da matéria seca total na planta, não resultam em aumentos proporcionais no IC, e conseqüentemente, no rendimento final de grãos.

Confalone e Dujmovich (1999) obtiveram valores de IC de 0,38, 0,40 e 0,45, para tratamentos irrigados, seca entre os estádios R1 e R4 e seca entre os estádios R4 e R6, respectivamente. Consideraram 0,45 um valor elevado e atribuíram isto a falta de água neste período, sobre a produção de matéria seca vegetativa.

Pereira e Machado (1987) fazem referência ao IC como um quociente freqüentemente utilizado para medir a eficiência de conversão de produtos sintetizados em material de importância econômica. Para Peixoto (1998) em relação a uma cultura madura, o IC é definido como a razão entre a massa da matéria seca da fração econômica produzida e a fitomassa seca total colhida.

A produtividade econômica tem aumentado continuamente em função do aumento do IC; seleção de plantas que alocam maior proporção de material em órgãos de importância econômica tem sido responsável por essa tendência (PEIXOTO, 1998; HEIFFIG, 2002).

2.4.3.5 Produção de grãos

A disponibilidade e aproveitamento da radiação solar pela cultura de soja são fatores determinantes na produtividade final de grãos. Entretanto, por ser uma espécie C₃, não é tão eficaz no aproveitamento da energia solar quando comparada

com as espécies C₄, compostas por algumas espécies competidoras por luz, nutrientes e água durante o seu ciclo de cultivo.

A produtividade da cultura é definida pela interação entre a planta, o ambiente e o manejo. Altos rendimentos somente são obtidos quando as condições ambientais são favoráveis em todos os estágios de crescimento da soja (GILIOLI et al., 1995).

A produção de grãos da cultura da soja é função direta de uma série de caracteres que são denominados de componentes de produção. Altos rendimentos de soja são obtidas quando ocorre um período de 50 a 55 dias de crescimento vegetativo e acúmulo de 400 a 500 g de matéria seca da parte aérea por m² de florescimento. Segundo Daroish (2005) as alterações na fonte de fotoassimilados sobre a produtividade da planta têm impacto dependente do estágio em que essas alterações ocorrem. A produtividade é mais influenciada pelas mudanças ocorridas entre os estádios R₁ e R₇, do que aquelas ocorridas anteriormente.

De acordo com Carpentieri Pípolo et al. (2005) o número de legumes por planta é visto como um dos principais componentes da produção, pela sua correlação com a produtividade e segundo Heiffig (2002), o que mais sofre influência da população de plantas, e varia inversamente ao aumento ou redução da população.

O peso médio de grãos é geneticamente determinado, mas influenciado pelo ambiente. A falta de água durante o enchimento de grãos limita o rendimento da soja (WRIGHT et al., 1984), principalmente pela redução no tamanho e peso do grão (SALINAS et al., 1996). Segundo Farias et al. (2007) a falta de água pode diminuir a acumulação de massa no grão e acelerar a maturação. Por outro lado, o aumento no período de enchimento de grãos promove aumento em sua massa individual (TEIXEIRA et al., 1985).

Conforme Herbert e Litchfield (1982), o número de legumes por planta e de grãos por legume são os dois componentes mais importantes do rendimento de grãos em soja, em razão da redução do número de grãos ser apenas parcialmente compensada pelo incremento no tamanho dos mesmos.

Maehler et al. (2003), avaliando o potencial de rendimento da soja, encontraram massa de grãos de 17,1 g e 13,8 g para plantas com e sem irrigação, respectivamente. As plantas que receberam irrigação produziram grãos mais

pesados. Tal diferença foi observada em grãos provenientes de legumes contendo um, dois e três grãos.

2.5 Balanço da água do solo

Os vários processos que envolvem fluxo de água (infiltração, redistribuição, evaporação e absorção pelas plantas) são interdependentes e, quase sempre, ocorrem simultaneamente. O balanço da água do solo ou balanço hídrico, conforme Pereira et al. (2002) e Reichardt e Timm (2004), é um sistema contábil de monitoramento da água do solo, e que resulta da aplicação do princípio de conservação de massa para a água num volume de solo vegetado. A variação do armazenamento de água, num intervalo de tempo, representa o balanço entre entradas e saídas de água do volume de controle.

Segundo Ferraz (1972), a variação da quantidade de água (ΔS) em um solo cultivado, é determinada pela soma algébrica das quantidades recebidas na precipitação (P), de irrigação (I) e ascensão capilar ($+Q_z$) e perdas no escoamento superficial (R), evaporação do solo (ES), extração de água pelas raízes das plantas ou transpiração real (TR) e drenagem profunda ($-Q_z$).

A equação que representa matematicamente o balanço hídrico de uma cultura é dada por:

$$\Delta S = P + I \pm Q_z - ES - TR \pm R \quad (2.1)$$

onde ΔS é a variação da armazenagem de água; P é a precipitação; I é a irrigação; Q_z é a drenagem interna; ES é a evaporação do solo; TR é a transpiração da planta e R é o escoamento superficial.

Necessita-se estimar o balanço hídrico devido à finalidade de se conhecer deficiência e/ou excedente hídricos durante o ciclo da cultura, constituindo-se uma ferramenta muito útil para a recomendação ou não do seu cultivo em determinada região. Os componentes do balanço hídrico estão representados esquematicamente na Figura 2.3.

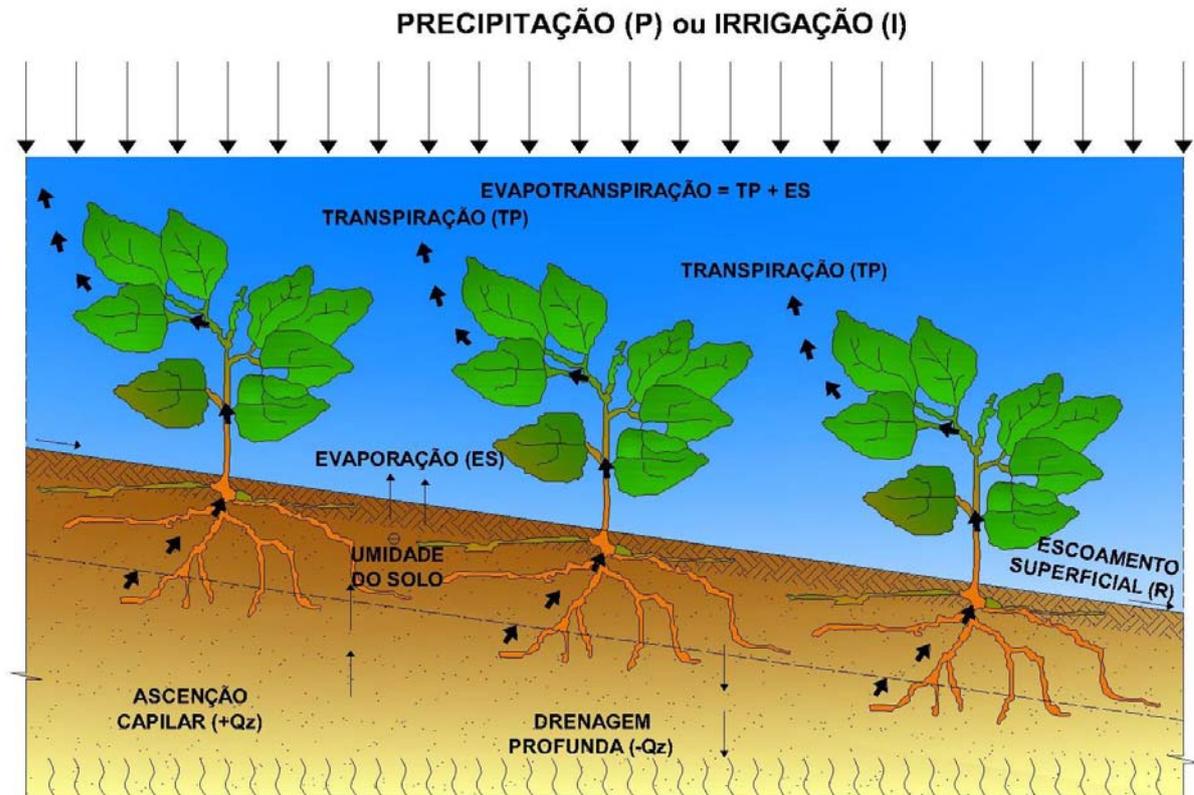


Figura 2.3 – Representação esquemática dos componentes do balanço de água no solo (adaptado de ROBAINA, 1992).

Os componentes P, I, R e ES são governados pelas condições da atmosfera e parcialmente pelas condições da superfície do solo.

As componentes $\pm Q_z$, que não ocorrem simultaneamente, são determinadas pelas características internas do solo e pelo contorno inferior do volume de solo.

A componente TR é regida pelas condições da atmosfera, capacidade da planta na extração da água e condições físicas e hidráulicas do solo.

A variação do conteúdo da água no solo, durante um intervalo de tempo dt , em um volume de solo, compreendido entre os planos horizontais Z_0 e Z_1 , pode ser determinado integrando-se as variações de umidade ($d\theta$) em relação à profundidade e ao tempo:

$$\Delta S = \int_{t_1}^{t_2} \int_{z_2}^{z_1} (d\theta / dt) . dz . dt \quad (2.2)$$

onde θ é o conteúdo em volume de água no solo (umidade volumétrica), t o tempo,

z a profundidade e os subscritos 0 e 1, representam a superfície do solo e a profundidade do solo considerada para o balanço hídrico, respectivamente.

Os componentes do balanço hídrico são expressos em dimensões lineares (L), normalmente em milímetros (mm) de água,

O solo funciona como um reservatório de água e seu limite máximo de retenção após drenagem livre é a capacidade de campo (CC) e o limite mínimo, o ponto de murcha permanente (PMP) (MANTOVANI et al., 2006). O conceito de balanço hídrico avalia o solo como um reservatório fixo, no qual a água armazenada até o máximo da capacidade de campo (THORNTHWAITE, 1948). O resultado é a quantidade líquida de água que nele permanece disponível às plantas.

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.

2.6 Modelagem da produção da cultura

As relações entre os elementos climáticos e a produção agrícola são bastante complexas, pois os fatores do ambiente podem afetar o crescimento e o desenvolvimento das plantas sob diferentes formas nas diversas fases do ciclo da cultura.

A produtividade está intimamente ligada aos componentes da produção da planta (número de vagens e grãos formados, assim como a massa dos grãos) que agregados à população de plantas, respondem pelo rendimento da área de produção e dependem diretamente do genótipo e da interação deste com o ambiente (BRANDELERO, 2002).

Os modelos de produção pressupõem que os elementos climáticos, associados às características do local exercem certo controle na produtividade agrícola, interferindo com sua eficiência produtiva, tentando demonstrar que a produção final é função da produtividade potencial da cultura e sua interação com os elementos meteorológicos.

2.6.1 Produção potencial e real da cultura da soja

Segundo Cooper (2003), os objetivos de estudar as produtividades máximas são: (i) tentar repetir nos campos de multiplicação as produtividades encontradas nas parcelas experimentais; (ii) detectar os fatores limitantes da produção de soja e (iii) identificar as produtividades máximas possíveis para soja.

A produtividade potencial é aquela passível de ser obtida quando todos os fatores manipuláveis do meio estão em nível ótimo. Nessas condições, a produtividade potencial é, diretamente, função dos fatores não-modificáveis do meio. Assim, a manutenção de um ou mais desses fatores modificáveis limitantes faz com que a produtividade potencial da cultura seja determinada pelo mais limitante deles (ARAUJO, 2008).

Por produtividade potencial, entende-se como a maior produtividade esperada para determinado cultivar na região, em condição de cultivo comercial, desde que não ocorra nenhuma restrição climática (CAMARGO, 1984). Depende, portanto, da região, do cultivar, da época de plantio e do nível tecnológico utilizado. Para este autor se essas variáveis forem fixas, de modo que se considere sempre o mesmo nível tecnológico, adubação, controle fitossanitário, mesmo cultivar, época de plantio e região, é possível estimar experimentalmente a produtividade potencial a partir de série de cultivos, em função apenas do clima.

A produtividade real pode ser obtida deflacionando-se a produtividade potencial em função do déficit de água. Para a cultura da soja, já existem estudos que utilizam as condições diárias de chuva, estimando assim as produtividades potenciais e deplecionadas, como o realizado para essa cultura por Martin (2007), para 28 localidades do Estado de São Paulo, utilizando metodologia semelhante indicada pelo fator de estresse hídrico da cultura.

A modelagem utilizando-se dados meteorológicos da região produtora tem se mostrado uma ótima ferramenta para a simulação das produtividades de grãos antes da colheita. Dentre os modelos disponíveis para tais simulações, os apresentados pela FAO para a estimativa da produtividade potencial, pelo Método da Zona Agroecológica, e da produtividade real, pela penalização da produtividade potencial pelo déficit hídrico ao longo do ciclo, tem se mostrado como um dos mais aplicáveis,

em razão da baixa exigência em termos de dados de entrada (DOORENBOS e KASSAM, 1994).

2.7 Modelagem e simulação na cultura da soja

Jones e Ritchie (1992) apresentam alguns dos modelos de simulação que foram desenvolvidos com o objetivo de prever o crescimento e a produção de uma cultura sob condições limitantes de água no sistema. Para a cultura da soja os autores destacam os seguintes modelos: (i) SOYGRO (WILKERSON et al., 1983; JONES et al., 1989); (ii) GLYCIM (ACOCK et al., 1983); (iii) REALSOY (MEYER,1985). Dentre os modelos de simulação encontrados na literatura, podemos citar ainda, SOYMOD (MEYER et al., 1979, 1981); SOYCROS (F. W. T. PENNING DE VRIES.); APSIM (ROBERTSON et. al., 1980); EPIC e ALMANAQUE (WILLIAMS et al., 1991); CROPGRO Soybean, entre outros.

Muitos pesquisadores utilizam deste recurso para simular o crescimento e desenvolvimento das culturas. Berlato (1987) parametrizou e validou, para a cultura da soja em condições de parcelas experimentais, no Rio Grande do Sul, o modelo multiplicativo de Jensen (1968), modificado para a estimativa do rendimento de grãos a partir do consumo relativo de água. São atribuídos pesos diferentes aos estádios de desenvolvimento da cultura de acordo com a sensibilidade relativa da planta ao déficit hídrico. O autor obteve bom ajuste, tendo o período reprodutivo como o de maior sensibilidade e que, portanto, assume maior peso.

Grimm et al (1993) desenvolveram trabalho de pesquisa cujo objetivo foi a determinação de parâmetros para a previsão da data de florescimento de soja, para os mais diversos climas do continente americano e como parte do modelo fisiológico denominado SOYGRO. A data de florescimento é predita pela acumulação de uma taxa diária de desenvolvimento, a qual depende do período de duração da noite e da temperatura até atingir uma base, um limite. A taxa de desenvolvimento diário é computada por uma relação multiplicativa de duas funções: uma que é a variação da taxa de desenvolvimento com duração da noite sobre condições otimizadas de temperatura e a outra, descrevendo a variação com a temperatura sobre duração da noite otimizada.

Ruiz-Nogueira et al. (2001) utilizaram o modelo Cropgro-soybean para prever o crescimento e a produção da soja em condições limitantes de água para três cultivares em três locais de diferentes condições climáticas do nordeste da Espanha, estabelecendo, assim, melhores datas de semeadura, conforme chuvas e manejos de irrigação.

Lazinski (1993) utilizou o modelo Cropgro-soybean para testar sua sensibilidade em relação aos parâmetros de entrada e verificar sua habilidade em estimar a produtividade da soja para a região de Londrina-PR, onde constatou que a profundidade de semeadura e a densidade de plantio foram pouco sensíveis em relação à produtividade. Encontrou grande sensibilidade em relação à variação de capacidade de campo e ponto de murcha permanente.

Dallacort et al. (2005) utilizaram o modelo de simulação de crescimento e desenvolvimento da cultura da soja (CROPGRO-soybean), ajustando os coeficientes genéticos do modelo para os cultivares de soja CD 202, CD 204, CD 206 e CD 210, cultivados na região de Palotina, PR. Os autores, fizeram a simulação da produtividade da soja para a semeadura em 1º de novembro, com objetivo de testar os coeficientes ajustados nas 25 safras compreendidas entre o período de 1974 a 1999. Por meio das análises realizadas nas simulações, verificou-se que o modelo apresentou alta sensibilidade à variação dos coeficientes genéticos dos cultivares estudados.

Mota (1983) desenvolveu modelos combinando dados agrometeorológicos e tendência tecnológica aplicada ao processo produtivo ao longo dos anos, os quais podem ser utilizados para previsão do rendimento das culturas de soja e milho com 60 dias de antecedência da época da colheita, bem como para o desenvolvimento da projeção da probabilidade de rendimentos. Este trabalho demonstrou que, com a série histórica de dados meteorológicos e de rendimentos disponíveis no Brasil é possível desenvolver modelos de tempo meteorológico-rendimento para estimativa de produção, em anos favoráveis ou não, com suficiente antecedência para proporcionar planejamento e tomada de decisões agrícolas adequadas.

Peiter (1998) selecionou o modelo de Stockle e Campbell (1985), destacando que este modelo quando comparado aos demais, apresenta: (i) boa acuracidade; (ii) rapidez de execução, (iii) facilidade de manejo. Calibrado para as condições de Santa Maria-RS, apresentou uma capacidade de previsão de massa seca para a

cultura do milho dentro da faixa aceitável para modelos de simulação de produção de culturas agrícolas.

Liu e Liu (1986) desenvolveram dois modelos de previsão de safras de soja no Estado de Minas Gerais, combinando dados meteorológicos de fases fenológicas importantes e índice de tendência tecnológica. Os modelos eram polinomiais com ajustamento dos coeficientes por regressão linear múltipla. O modelo simples foi construído baseado nos dados meteorológicos de três estações (Paracatu, Furnas e Uberaba) e o modelo integrado pela composição de três modelos das microrregiões: Chapadões do Paracatu, Mata da Corda e Uberaba. Os resultados mostram que ambos modelos funcionaram bem nas previsões de produtividade de soja no período de 1972 a 1986. O modelo simples teve erro médio de 5,9% e o modelo integrado de 6.9%.

2.8 Funções de produção da cultura da soja

O conceito econômico de função de produção, segundo Frizzone e Andrade Junior (2005), é a relação física entre as quantidades utilizadas de certo conjunto de insumos e as quantidades físicas máximas que podem ser obtidas do produto, para uma dada tecnologia conhecida.

De acordo com Frizzone (1987) 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 e KASSAN, 1979).

Peixoto et al. (2002), estudando a influência da deficiência hídrica em diferentes fases fenológicas da cultura da soja, apontam que os cultivares

apresentaram desempenho diferenciado para produtividade de grãos quando ocorreu falta de água no solo nas fases vegetativa, de florescimento e granação. A deficiência hídrica na fase de enchimento de grãos foi a que mais influenciou negativamente a produção de massa seca e a área foliar dos cultivares estudados.

Jensen (1968), Minhas et al. (1974) e Frizzone et al. (2005) propuseram uma função de produção na qual está presente o índice de sensibilidade ao fator hídrico. Trata-se de um índice que representa a sensibilidade relativa da planta ao déficit hídrico durante períodos decendiais, mensais ou estádios fenológicos.

O efeito da uniformidade de irrigação na produção das culturas é fator significativo a ser considerado em projetos de irrigação por aspersão. Vários modelos relacionam a uniformidade de irrigação e a produtividade de uma determinada cultura. Mantovani et al. (1995) desenvolveram um modelo de função de produção denominado Combinado, que considera a influência da uniformidade de aplicação de água na produtividade. Esses autores observaram que a lâmina de água necessária para se obter a produtividade máxima aumenta com a diminuição da uniformidade de aplicação; para obtê-la, foi necessário aplicar-se 500 mm, 700 mm e 1000 mm para valores de CUC de 95%, 75% e 55%, respectivamente. Outros autores relatam também que, conforme o coeficiente de uniformidade, o nível ótimo de irrigação dependerá da relação entre o preço do produto e o da água.

Li (1998) apresentou um modelo que relaciona a produção ao déficit de evapotranspiração a partir de uma função de produção. As simulações realizadas mostraram que a quantidade ótima de irrigação depende da uniformidade de aplicação de água e dos fatores econômicos, decrescendo com a uniformidade, mas aumentando com a razão do preço do produto e da água.

Seginer (1978) desenvolveu um modelo que gerou um diagrama da uniformidade de distribuição de água, por um sistema de irrigação por aspersão, e do preço da água como fatores que podem ser utilizados para determinar a lâmina ótima aplicada e o retorno econômico para uma cultura. O diagrama é baseado em uma simplificada forma de função de produção e de distribuição de água.

Pang et al. (1997) avaliaram as relações entre o manejo da irrigação e o de nitrogênio na produção da cultura do milho, utilizando o modelo Ceres-Maize para várias combinações de lâminas de água, uniformidade de irrigação e quantidade de nitrogênio. Os efeitos da irrigação foram simulados ao assumir o valor do coeficiente

de uniformidade de Christiansen (CUC) de 100, 90 e 75%. Os resultados foram pouco afetados para o CUC de 90%, quando comparado com o de 100%. O CUC de 75% causou redução na produção e também aumentou a perda de nitrogênio por lixiviação.

Em um estudo envolvendo diferentes arranjos de plantas (espaçamentos, número de plantas por área) e regime hídrico (com e sem irrigação), Rambo et al. (2003) concluíram que o estresse hídrico no final do ciclo da cultura da soja diminuiu sua produtividade, devido à redução da massa dos grãos.

A fertilidade do solo é outro fator que, em níveis não adequados, afeta o crescimento da soja e diminui a produtividade de grãos. Do ponto de vista fisiológico, as deficiências nutricionais ocasionam, primeiramente, a inibição do crescimento e utilização dos produtos da fotossíntese, e pode interferir na nodulação, e na fixação e assimilação de nitrogênio (COSTA, 1996).

Além de práticas culturais e do controle da interferência de plantas invasoras na cultura, é necessário adequar a população de plantas e seu arranjo, para se obter produtividades elevadas. A população de plantas influencia algumas características agrônomicas da cultura da soja como produtividade e sua estatura (URBEN FILHO e SOUZA, 1993), o que pode alterar a produção de grãos (LAM-SANCHEZ e VELOSO, 1974).

2.9 Eficiência do uso da água pela cultura da soja

A eficiência da irrigação é um parâmetro amplamente utilizado, tanto em projetos quanto no manejo de sistemas de irrigação e o conceito de eficiência pode ser dividido em dois aspectos básicos: uniformidade de aplicação e nas perdas de água que podem ocorrer durante a operação do sistema. Pois, quanto melhor for esses índices melhor irá ser a eficiência no uso da água pela cultura.

A eficiência do uso da água (EUA) é definida como a relação entre a produtividade da cultura ($t \cdot ha^{-1}$) e o volume total de água consumido nos processos de produção ($mm \cdot ha^{-1}$ ou $Kg \cdot ha^{-1}$ ou $m^3 \cdot ha^{-1}$). A EUA depende diretamente dos sistemas de irrigação, das condições físicas do solo, das características atmosféricas, do estado nutricional das plantas, de fatores fisiológicos, da natureza

genética e do seu estágio de desenvolvimento da cultura (CALVACHE et al., 1997). Portanto, para elevar a EUA, faz-se necessário manejar adequadamente os sistemas de irrigação e utilizar variedades mais responsivas ao uso da água de irrigação. O estágio real de desenvolvimento da cultura da soja deve ser considerado para que se obtenha maior eficiência na irrigação.

Segundo Bolton (1981), por sua característica C_3 , a cultura da soja apresenta baixa eficiência na utilização da água, ou seja, produz menos matéria seca por quantidade de água evapotranspirada, em relação a outras culturas tipo C_4 . Sabe-se que a cultura da soja possui grande plasticidade e reage diferentemente à deficiência hídrica, em fases distintas de seu ciclo (KORTE et al., 1983). A EUA difere, ainda, entre variedades de soja (BUTTERY et al., 1993), quando expostas a condições de estresse hídrico.

Em agricultura irrigada, a elevação e a determinação dos níveis da EUA são bastante complexos e requerem conhecimentos e considerações interdisciplinares; todavia, Dinar (1993) menciona que existem meios para se elevar os valores de EUA destacando-se, entre esses, o manejo adequado de irrigação.

Quando a EUA é determinada a partir da quantidade de água aplicada, Dinar (1993) e Letey (1993) destacam sua redução, porém sem diminuição da produção, como forma de aumentar a EUA. Neste aspecto, a escolha do sistema de irrigação (DINAR, 1993) e redução do período de irrigação no ciclo da cultura (RICHARDS et al., 1993) são pontos importantes.

A distribuição da água e a manutenção de níveis ótimos de umidade no solo durante todo o ciclo da cultura reduzem as perdas de água por drenagem e os períodos de estresse hídrico da cultura, o que aumenta a EUA. Isto pode ser atingido com aplicações de água com maior frequência e em pequenas quantidades (MISHRA et al., 1995).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo se refere à descrição do experimento de campo, abordando as características do solo, os elementos agrometeorológicos, os indicadores de crescimento e desenvolvimento da planta coletados ao longo do ciclo de duas cultivares de soja e os valores de produção de grãos e matéria seca coletados ao final do ciclo das mesmas.

Também neste capítulo foi apresentado o modelo matemático que foi utilizado para a simulação da produção das cultivares de soja, levando-se em consideração os dados obtidos no experimento de campo, necessários para validação do modelo matemático e a sua aplicação para outras condições não contempladas no experimento no campo.

3.1 Características gerais do estudo experimental

A região em estudo possui clima subtropical úmido, com média anual de temperatura do ar variando de 13 a 21°C, média térmica de 17,9°C e média anual de precipitação de 1.919 mm, sendo evidenciados déficits hídricos no período de novembro a março (GOMES, 2004). Moreno (1961) destaca que essa tipologia climática abrange a maior parte do Estado, exceto as áreas mais elevadas do Planalto, Serras do Nordeste e Sudeste.

O experimento de campo foi conduzido durante o ano agrícola 2008/2009 com a cultura da soja, na área experimental da Fazenda Liberdade, localizada no 4º distrito Tupantuba, no município de Santiago (29° 09' 50" de latitude sul, 54° 51' 32" de longitude oeste e 439 metros de altitude), na região Centro-Oeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

Foram utilizadas duas cultivares de soja: a cultivar Coodetec 219 RR (CD 219), desenvolvido pela Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola, e a cultivar AL 55 proveniente da Argentina.

A cultivar CD 219 foi caracterizada por hábito de crescimento determinado, ciclo total de 144 dias, rendimento de grãos médio de 2.684 kg.ha⁻¹, altura média de plantas 99 cm, recomendada para o Estado do Rio Grande do Sul (fertilidade de média a alta e regiões abaixo de 500 m de altitude), densidade de semeadura de 9 a 12 plantas.metro linear⁻¹ (espaçamento de 45 cm), época de semeadura de 10 de outubro a 15 de dezembro.

A cultivar AL 55 proveniente da Argentina possuiu ciclo total de 120 dias, com rendimento de grãos médio de 2730 kg.ha⁻¹ (FUNDACEP, 2004).

Em julho de 2008, aproximadamente 6 meses antes da semeadura, realizou-se a correção da acidez do solo, para que fosse incorporado duas toneladas por hectare de calcário ao solo. A semeadura foi realizada no mês de dezembro/2008, projetada para uma população de 180.000 plantas.ha⁻¹. O sistema de semeadura utilizado foi o de semeadura direta, utilizando-se uma semeadora-adubadora, com 8 linhas espaçadas de 45 cm, em sucessão a uma cultura de azevém dessecada em novembro de 2008.

As amostras para a determinação das características químicas foram retiradas em profundidades de 10 cm e 30 cm da área experimental, conforme critério da Comissão de Química e Fertilidade do Solo (2004), para amostragem de solo sob sistema de plantio direto em culturas de grãos e a adubação do solo foi feita com base nos resultados da análise química do solo realizada no Laboratório Central de Análises de Solos do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

3.2 Distribuição das parcelas e do sistema de irrigação

O croqui da distribuição das parcelas experimentais (tratamentos) e do sistema de irrigação na área do experimento pode ser visto na figura 3.1. Na mesma figura, pode-se ver a posição ocupada pelas culturas de feijão, da soja (AL 55), soja (CD 219) e do milho, salientando-se que as culturas de feijão e milho foram utilizadas em outro trabalho de pesquisa.

O sistema de aspersão convencional, constituído por uma linha principal e seis linhas laterais fixas, ambas de PVC e diâmetro de 50 mm.

Os aspersores foram conectados as linhas com espaçamento de 12 m e altura de 1,5 m em relação ao solo. Os aspersores de impacto utilizados, marca NAAN, modelo 5022, giro completo, apresentavam bocais de diferentes diâmetros em cada linha de aspersores, cuja razão do uso de bocais diferentes tamanhos era permitir a aplicação, simultaneamente, de diferentes lâminas de irrigação em diferentes parcelas da área experimental (tratamentos).

3.3 Manejo da irrigação

O momento de aplicação da irrigação foi baseado no turno de rega prefixado, com intervalo de 7 dias entre as irrigações quando não ocorria precipitação pluviométrica.

A determinação da quantidade de água a irrigar foi feito com a medida diária da evaporação da água, de um Tanque Classe A e o volume de água a ser aplicada na irrigação (V_I) sempre que o sistema era posto em funcionamento, foi calculado através da expressão:

$$V_I = Kp \cdot \sum_{i=1}^{n=7} E_{TA} \quad (3.1)$$

onde V_I é o volume de água para a irrigação (mm) é o somatório da evaporação diária do Tanque Classe A (mm) durante 7 dias, multiplicada pelo coeficiente do tanque Kp , cujo valor médio é igual a 0,7.

O tempo de funcionamento (h) do sistema de irrigação para aplicar a lâmina de água necessária foi determinado a partir da intensidade de aplicação de água (mm/h) do sistema de irrigação.

Para a determinação da intensidade de aplicação de água, o sistema foi posto para funcionar durante uma hora, sendo a chuva artificial recolhida por pluviômetros dispostos em toda a área.

Os volumes de água coletados nos pluviômetros, no intervalo de 1 hora, foram convertidos em lâminas d' água, no setor de irrigação (T5), que correspondia a

100% da água aplicada. Os registros colocados na entrada de cada linha lateral foram regulados para que distribuissem lâminas de 20, 40, 60, 80 e 100% da intensidade de aplicação de água.

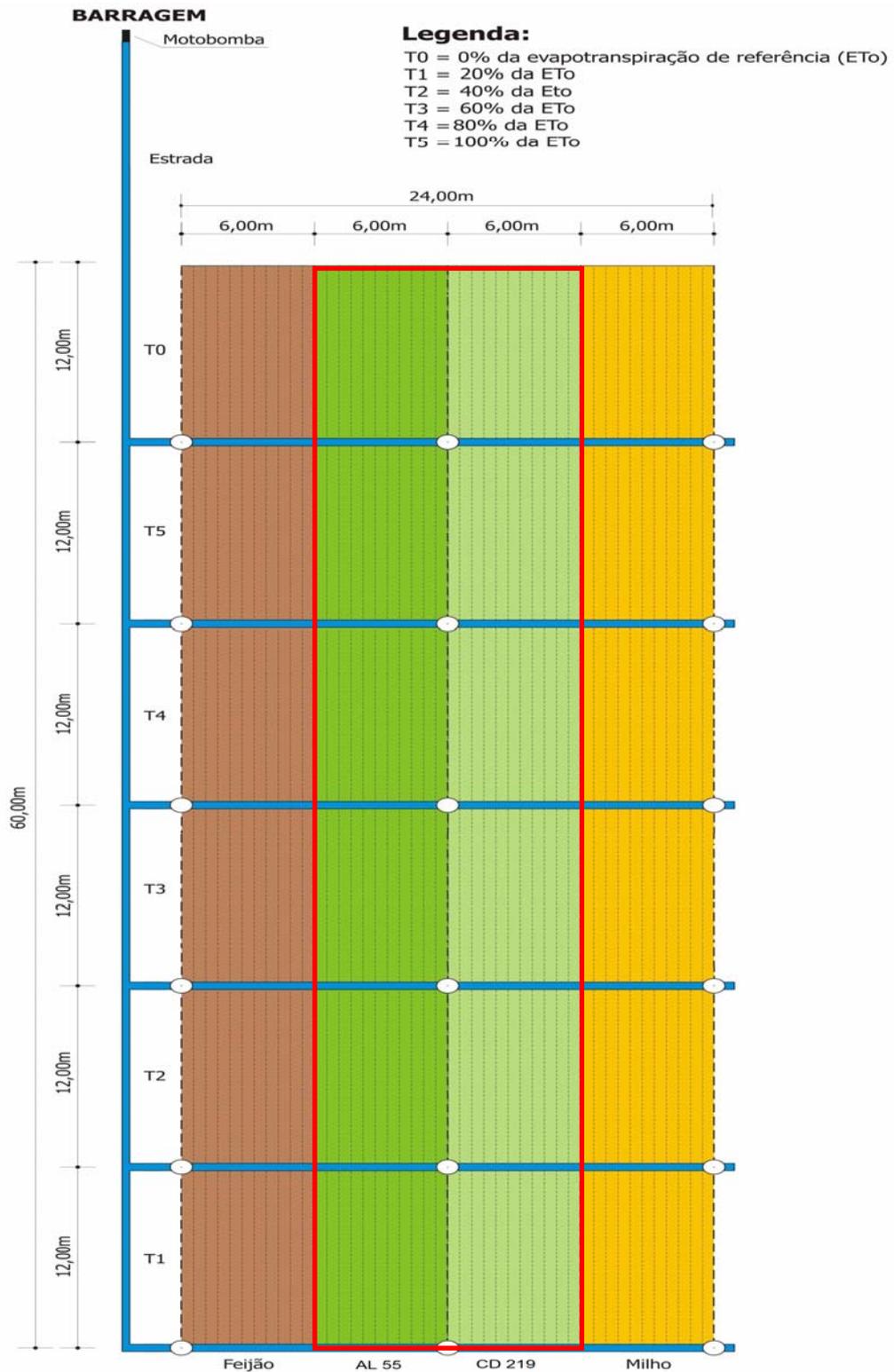


Figura 3.1 – Croqui da distribuição das parcelas e do sistema de irrigação na área experimental.

A partir do conhecimento dessa informação, foram definidas as diferentes estratégias de irrigação (tratamentos), o que pode ser visto na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Estratégias de irrigação (tratamentos), percentagens de irrigação e intensidade de aplicação de água em cada tratamento.

Tratamento	% de irrigação	Intensidade de aplicação mm/h
T0	0	0
T1	20	0,735
T2	40	1,470
T3	60	2,205
T4	80	2,940
T5	100	3,676

3.4 Características físicas do solo

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Típico, Unidade de Mapeamento Cruz Alta (EMBRAPA, 1999), com relevo entre plano e suave (57%), bastante adequado à agricultura mecanizada, ondulado (40%) e montanhoso (3%), apresentando horizonte B textural (GOMES, 2007).

As amostras para a determinação das características físicas do solo foram retiradas em uma trincheira aberta na área experimental.

Para a caracterização física do solo, no qual o experimento foi conduzido, foram coletadas amostras nas profundidades de 20 a 120 cm, em intervalos de 20 cm e em número de três por profundidade, as quais foram analisadas no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da UFSM. Em cada um dos pontos de amostragem foram coletadas amostras deformadas para a determinação da densidade de partícula, e as amostras indeformadas para determinação da densidade do solo, microporosidade, porosidade total e curva característica de água no solo.

Para a elaboração da curva característica das diferentes profundidades do solo, foram utilizados equipamentos padrão do Laboratório de Física dos Solos da UFSM. As amostras, após a saturação por 48 horas, foram submetidas aos

potenciais matriciais de -1 e -6 kPa (mesa de tensão), -33 e -100 kPa (panela de pressão), -500 e -1500 kPa (medidor de potencial WP4).

A relação entre a umidade volumétrica θ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) e o potencial matricial ψ (kPa) foi descrita pelo modelo de Brooks e Corey (1964), expressa pela equação:

$$\theta = \theta_{sat} \left(\frac{\psi_e}{\psi} \right)^b \quad (3.2)$$

na qual θ_{sat} é a umidade volumétrica do solo saturado de água ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), ψ_e o potencial de borbulhamento (kPa) e o expoente “ b ” é uma constante da curva de retenção da água no solo.

Uma outra relação importante para a descrição dos fluxos de água no solo é a relação entre a condutividade hidráulica do solo não saturado e o potencial matricial (ψ), que foi expressa pelo modelo de Campbell (1985):

$$K(\psi) = K_{sat} \left(\frac{\psi_e}{\psi} \right)^c \quad (3.3)$$

na qual K_{sat} é a condutividade hidráulica do solo saturado de água ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), ψ_e o potencial de borbulhamento (kPa) e o expoente “ c ” é uma constante.

3.5 Elementos agrometeorológicos

A área experimental conta com uma estação meteorológica, localizada a, aproximadamente, 200 m daquela área, é dotada de sensores automáticos, para o monitoramento das variáveis agrometeorológicas.

As variáveis monitoradas diariamente foram a precipitação pluvial (mm), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), radiação solar ($\text{w} \cdot \text{m}^{-2}$), fotoperíodo (horas) e velocidade do vento ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Além dessas variáveis atmosféricas foram

coletadas informações referentes a evaporação da água em um tanque de evaporação Classe “A”.

3.6 Indicadores do crescimento e desenvolvimento da soja

Os indicadores do crescimento e do desenvolvimento da cultura da soja avaliados foram: o índice de área foliar, a profundidade do sistema radicular e a matéria seca da parte aérea da planta.

As determinações de área foliar foram realizadas utilizando-se cinco plantas por tratamento, tendo início aos sete dias após a emergência (DAE), sendo realizadas em períodos semanais durante todo o ciclo da cultura.

As medidas, do comprimento (cm) e da largura da folha (cm) foram feitas em nove folhas de cada planta, sendo três folhas localizadas na parte inferior, três folhas na parte intermediária e três folhas na parte superior do dossel.

A área foliar das plantas foi calculada através do produto da medida do comprimento (cm) e da medida da maior largura de cada folha (m), multiplicada pelo coeficiente de 0,75 (STICKLER et al., 1961).

A estimativa do índice de área foliar (IAF) foi determinada através da média da área foliar (cm²), número de folhas por planta e do número de plantas por metro quadrado, sendo expressa por:

$$IAF = \frac{n^{\circ} \text{ plantas}}{m^2} \cdot \frac{n^{\circ} \text{ folhas}}{\text{planta}} \cdot \frac{\text{Área foliar média}}{10000} \quad (3.4)$$

onde o valor 10000 permite a conversão da área foliar média de centímetros quadrados para metros quadrados.

A profundidade do sistema radicular, durante o ciclo da cultura da soja foram realizadas nos dias 12, 26, 44, 70, 78 e 110 após a emergência das plantas (DAE). Para a determinação das medidas, realizou-se em cada tratamento, a abertura de trincheiras na lateral de plantas (três em cada tratamento), escolhidas aleatoriamente as quais eram retiradas (após a abertura da trincheira) de forma que o sistema radicular fosse preservado.

As determinações referentes à matéria seca foram realizadas em período semanal, com início aos sete dias após a emergência das plantas durante todo do ciclo da cultura. Foram coletadas cinco plantas de cada tratamento (amostragem destrutiva).

As plantas foram separadas (folha, haste e órgãos reprodutivos) e colocadas em estufa a 60° C durante 72 horas (tempo necessário para obtenção da massa constante). Decorrido o intervalo de tempo, citado anteriormente, foi determinada a massa das diferentes partes da planta.

No final do ciclo da cultura, foram coletadas 10 plantas de cada tratamento com a finalidade de determinar a média de massa total de matéria seca (MST) produzida para cada cultivar de soja. O final do ciclo da cultivar CD 219 ocorreu aos 144 DAE e o da cultivar AL 55 ocorreu aos 124 DAE.

3.7 Avaliação da produção de grãos da cultura de soja

As componentes da produção de grãos de uma cultura, como a soja, são a população de plantas, o número de legumes por planta, o número de grãos por legume e o peso médio do grão.

Para os diferentes tratamentos e para as duas cultivares (CD 219 e AL 55), foi adotada a mesma forma de determinação de cada componente da produção de grãos. As plantas foram cortadas rente ao solo e separadas em diversas partes, que foram identificadas e secas em estufa a 60°C durante 72 horas (tempo necessário para obtenção da massa constante) e posterior determinação da massa das diferentes componentes da produção.

A avaliação da população de plantas ou o número de plantas por metro quadrado de solo foi feita através da contagem do número de plantas contidas em um metro na fileira de plantas e a medida do espaçamento entre fileiras. Essa determinação foi feita no campo com o auxílio da tabela 3.2, que mostra o número de plantas por metro quadrado de solo, para um espaçamento entre fileiras de 0,45 m e o número de plantas por metro linear na fileira. A primeira coluna daquela tabela indica o número inteiro e a primeira linha da mesma tabela indica os décimos do número médio de plantas existentes, por metro linear, na fileira de plantas.

Tabela 3.2 – Número de plantas por metro quadrado em função do número de plantas por metro linear na fileira e espaçamento de 0,45 m entre fileiras de plantas.

N°	Décimos do número de plantas por fileira por metro linear									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
6	13,3333	13,5556	13,7778	14,0000	14,2222	14,4444	14,6667	14,8889	15,1111	15,3333
7	15,5556	15,7778	16,0000	16,2222	16,4444	16,6667	16,8889	17,1111	17,3333	17,5556
8	17,7778	18,0000	18,2222	18,4444	18,6667	18,8889	19,1111	19,3333	19,5556	19,7778
9	20,0000	20,2222	20,4444	20,6667	20,8889	21,1111	21,3333	21,5556	21,7778	22,0000
10	22,2222	22,4444	22,6667	22,8889	23,1111	23,3333	23,5556	23,7778	24,0000	24,2222
11	24,4444	24,6667	24,8889	25,1111	25,3333	25,5556	25,7778	26,0000	26,2222	26,4444
12	26,6667	26,8889	27,1111	27,3333	27,5556	27,7778	28,0000	28,2222	28,4444	28,6667
13	28,8889	29,1111	29,3333	29,5556	29,7778	30,0000	30,2222	30,4444	30,6667	30,8889
14	31,1111	31,3333	31,5556	31,7778	32,0000	32,2222	32,4444	32,6667	32,8889	33,1111
15	33,3333	33,5556	33,7778	34,0000	34,2222	34,4444	34,6667	34,8889	35,1111	35,3333

A avaliação do número médio de legumes por planta e do número médio de grão por legume, em cada tratamento, foi feita através da contagem do número de legumes e do número de grãos que apresentavam 10 plantas, que foram colhidas em cada tratamento.

A avaliação do peso médio do grão, em cada tratamento, foi feita através da determinação da massa de uma amostra de 100 grão retirados de dez plantas que foram colhidas em cada tratamento.

Uma vez conhecidos os quatro componentes da produção de grãos, a massa da produção de grãos (P_g) foi estimada pelo produto daqueles componentes e o fator de correção da produção de grãos secos para produção de grãos com 13% de umidade (umidade de padrão ou de referência), expressa por:

$$P_g = 11,5 \cdot \frac{n^\circ \text{ plantas}}{m^2} \cdot \frac{n^\circ \text{ legumes}}{\text{planta}} \cdot \frac{n^\circ \text{ grãos}}{\text{legume}} \cdot \text{peso médio do grão} \quad (3.5)$$

em que P_g ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), o peso médio do grão (g) e o valor 11,5 é o produto do fator de correção da produção para 13% de umidade do grãos igual a 1,15 e o fator de transformação da produção de grãos ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) para a produção de grãos ($\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).

3.8 Índice de colheita

A produção biológica se refere a produção de matéria seca total e a produção econômica se refere a produção de grãos da cultura da soja. A relação entre a produção econômica e a produção biológica é o coeficiente ou índice de colheita, que é obtido pelo valor da massa da produção de grãos dividido pelo valor da massa da produção de matéria seca total (grãos+haste+legumes).

A avaliação do índice de colheita é necessária para que o modelo computacional possa transformar matéria seca total produzida em produção de grãos.

3.9 Ajustamento dos dados observados (medidos)

Foi selecionada uma função que melhor representasse a variação do índice de área foliar, o aumento da profundidade das raízes, o acúmulo de matéria seca total da parte aérea da cultura da soja em função dos dias após a emergência. Este teste foi feito para as duas cultivares de soja e em todos os tratamentos utilizados no campo. Para realizar o ajustamento dos dados medidos foi utilizado o programa computacional *Table Curve 2D v.2.03* (Jandel Scientific).

Este programa também foi utilizado para encontrar a função que melhor descrevesse a relação entre a resposta da produção de grãos das cultivares de soja em função da quantidade de água aplicada nas diferentes estratégias de fornecimento de água.

3.10 Modelo matemático do balanço hídrico

Segundo Robaina (1992), o modelo matemático do sistema levou em consideração as características do solo, da atmosfera e da planta para acompanhar

a extração de água no solo (transpiração) e a resposta da produção da cultura sob diferentes estratégias de irrigação (tratamentos).

A variação do conteúdo da água no solo, que é a resposta ao balanço hídrico, é atribuído aos processos de entrada no solo (P , I e $+ Qz$) e de saída da água no solo (ES , TR e $- Qz$).

A resposta da cultura consistiu na produção de grãos e matéria seca sob diferentes estratégias de irrigação (tratamentos).

Para quantificar os componentes do balanço hídrico, em resposta aos fluxos de entrada e de saída de água do solo, foi utilizada a equação de Richards (1931) para descrever as variações do potencial matricial da água no solo, modificada com a inclusão de um termo representativo da transpiração, expressão por:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} C(\psi) = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} + k(\psi) - TR(\psi) \right] \quad (3.6)$$

em que $C(\psi)$ é a variação do potencial matricial em função da variação de umidade volumétrica do solo e $TR(\psi)$ é a transpiração da planta em função do potencial matricial, cujo valor varia na profundidade z do solo e no tempo t . No restante do texto, para simplificar a representação, o símbolo TR poderá substituir $TR(\psi)$.

3.10.1 Estimativa da transpiração real

A transpiração da planta ou extração de água pelas raízes (mm.dia^{-1}) foi estimada através da expressão:

$$TR(\psi) = TP_{\text{máx}} \cdot f_{TP} \cdot f_{SR} \quad (3.7)$$

em que $TP_{\text{máx}}$ é a transpiração máxima (mm.dia^{-1});

A redução da taxa de transpiração devido a redução do potencial matricial (ψ) na profundidade z e no tempo t , foi definida por $f_{TP} = \frac{\psi(z, t) - \psi_{pm}(z)}{\Psi_{cc}(z) - \Psi_{pm}(z)}$, na qual

os potenciais matriciais $\psi_{cc}(z)$ e $\psi_{pm}(z)$ são os que correspondem a umidade do solo em capacidade de campo e a umidade do solo no ponto de murcha permanente na camada z e f_{SR} é uma função que representa a distribuição do sistema radicular no tempo e em diferentes profundidades no perfil do solo.

A distribuição do sistema radicular, que representa a extração da água nas diferentes profundidades no perfil do solo, foi feita por $f_{SR} = \frac{g(z)}{\int_0^{Prz} g(z)}$, na qual f_{SR} é a

fração do sistema radicular de profundidade Prz até a profundidade z .

A função $g(z)$ é calculada por, $g(z) = \frac{c \cdot (2 \cdot z - Prz) + Prz}{Prz^2}$, sendo c uma constante que permite variar a forma de distribuição do sistema radicular. O valor dessa constante, adotado neste estudo, foi igual a $-0,8$, segundo Perrochet (1987).

A profundidade do sistema radicular, em determinado tempo t após a emergência das plantas, foi calculada por $Prz = a + \frac{b}{1 + e^{\frac{DAE-c}{d}}}$, onde as constantes (a, b, c, d) foram determinadas por ajustamento aos dados da profundidade das raízes medidos nas trincheiras abertas para essa finalidade no experimento no campo.

3.10.2 Estimativa da transpiração máxima

A transpiração máxima da planta ou a extração máxima de água pelas raízes foi estimada pela diferença entre a evapotranspiração máxima e a evaporação máxima da água do solo, isto é, $TP_{máx} = ET_{máx} - ES_{máx}$

A evapotranspiração máxima ($ET_{máx}$), em mm.dia^{-1} , foi obtida através da seguinte expressão:

$$ET_{m\acute{a}x} = Kc \cdot \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{Rn}{L} + \Delta e (0.26 + 0.14 V)}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (3.8)$$

na qual Kc é o coeficiente da cultura da soja, cujos valores foram obtidos de acordo com Klar (1991) e o segundo termo se refere a evapotranspiração de referência (método de Penman).

A estimativa da evaporação máxima do solo, segundo Ritchie (1972) pode ser feita por:

$$ES_{m\acute{a}x} = \frac{e^{-0.398 \cdot IAF}}{\frac{\gamma}{\Delta} + 1} \cdot \frac{Rn}{L} \quad (3.9)$$

onde $ES_{m\acute{a}x}$ é a evaporação máxima do solo ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$); Rn é a radiação líquida ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), estimada a partir da radiação global.

3.10.3 Solução da equação de Richards (1931)

A solução da equação 3.6 permite o cálculo da variação do conteúdo de água no solo em função dos componentes de entrada e de saída do balanço hídrico da cultura em estudo. A solução desta equação foi utilizado o método das diferenças finitas, descrito em Robaina (1992).

A figura 3.2 representa o fluxograma simplificado do modelo para simular a extração de água e as variações do seu conteúdo no solo. Como componentes do fluxograma tem-se: a leitura dos dados e condições iniciais, a leitura dos dados diários de entrada, estimativa da evaporação e transpiração máximas (condição de contorno superior), estimativa da profundidade e estimativa do sistema radicular, leitura da condição de contorno inferior, solução da equação diferencial com estimativa da extração da água pelas raízes e a impressão dos valores diários de saída, a transpiração da planta $TR(\psi)$, a evaporação do solo $q(0, t)$ e a drenagem

ou ascensão capilar $q(L, t)$ na profundidade considerada para balanço da água no solo.

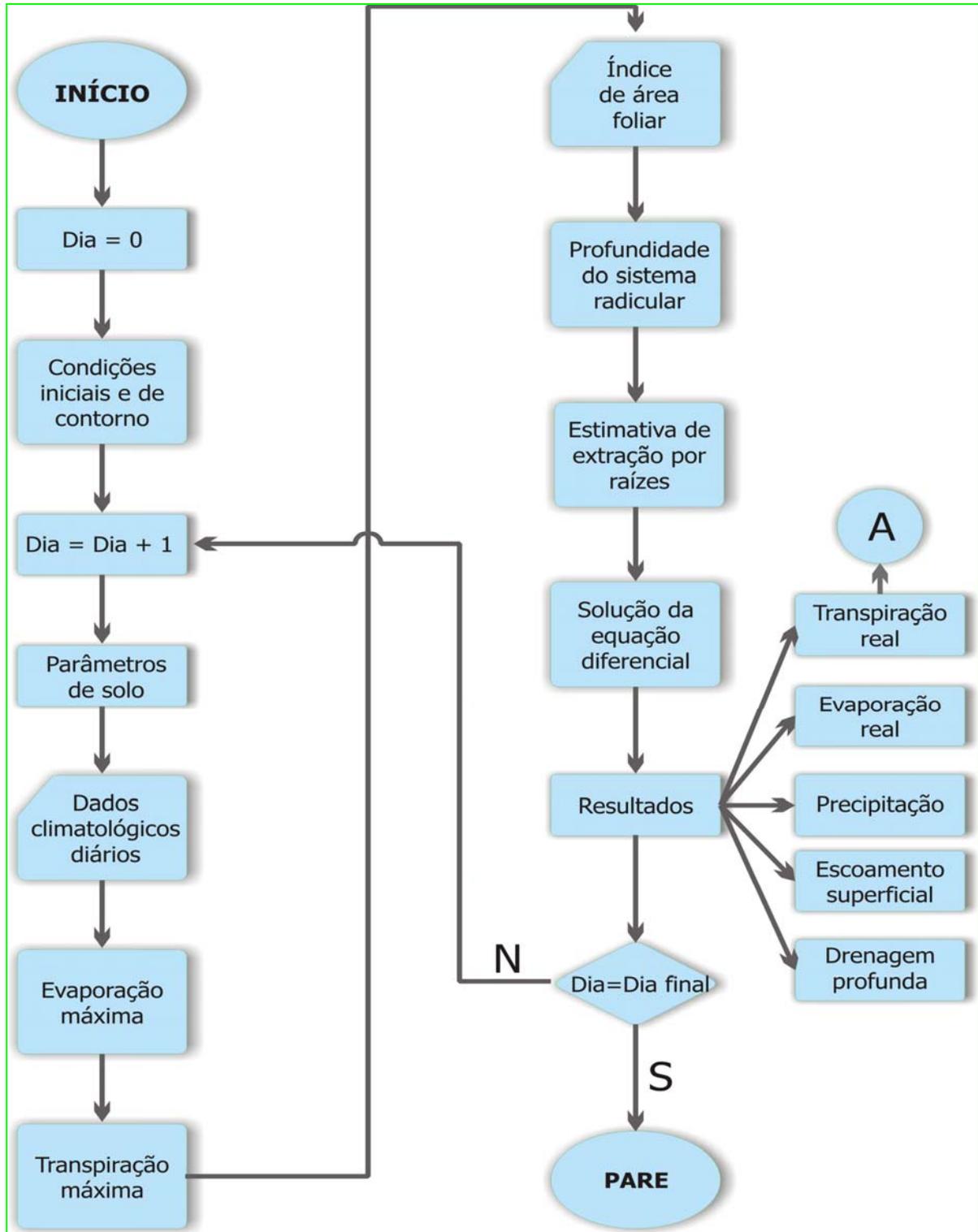


Figura 3.2 – Fluxograma simplificado do modelo de extração de água (adaptado de ROBAINA, 1992).

3.11 Modelo de produção da cultura de soja

A previsão de produção de grão da cultura de soja foi feita em função da produção de matéria seca da parte aérea da cultura (sem as raízes) e do índice de colheita.

Segundo Robaina (1992), o modelo de produção de matéria seca da parte aérea da cultura pode ser separado em um sub-modelo que permite a estimativa da produção potencial da cultura e outro sub-modelo que faz a estimativa da produção real da cultura, isto é, a produção da cultura quando submetida a diferentes magnitudes de regimes de fornecimento de água (estresse hídrico).

3.11.1 Sub-modelo para a estimativa da produção potencial

Segundo Doorenbos e Kassam (1994) a produção potencial diária de matéria seca (q_p), para um dia qualquer, em condições de campo, é afetada pelas características genéticas da cultura de soja e pelas condições ambientais.

Devido a esta afirmação, a estimativa da produção potencial diária de matéria seca (q_{pot}), para um índice de área foliar igual a 5, foi expressa por:

$$q_p = [\eta \cdot P_o + (1 - \eta) \cdot P_c] \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \lambda \cdot \frac{IAF}{5} \quad (3.10)$$

onde q_p ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$), η é a fração do dia em que o céu está nublado; P_o é a taxa de matéria seca para dias nublados e P_c é a taxa de matéria seca para dias claros, ambos expressos em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ e funções da latitude do local e da época do ano.

O valor da fração do dia em que o céu está nublado, segundo De Wit (1965), foi determinado por $\eta = 1,25 - 0,625 \cdot \frac{R_s}{R_c}$, na qual R_c é a radiação fotossinteticamente ativa na ausência da atmosfera ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), R_s é a radiação solar global média ao nível do solo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), determinada através da estação de coleta de dados agrometeorológicos.

O fator de influência da temperatura sobre a produção potencial diária, que foi obtido por $\alpha = 1 - \frac{T_m - T_{LI}}{T_{LS} - T_{LI}}$, na qual T_{LI} se refere a temperatura limite inferior, sendo considerada igual a 20 e T_{LS} se refere a temperatura limite superior, sendo igual a 35 para a soja.

O fator de redução da produção devido a respiração λ foi considerado, nesse estudo, igual a 0,30, conforme Feddes (1976).

A relação entre a massa seca total da planta sem as raízes e a massa seca total da planta com as raízes, simbolizado por β , foi considerado nesse estudo, igual a 0,92, segundo Feddes (1976).

O índice de área foliar (m^2 de folha. m^{-2} de solo), nos diferentes tratamentos, foi calculada pela expressão $IAF = a \cdot e^{-0.5 \left(\frac{DAE-b}{c} \right)^2}$, onde as constantes (a, b, c) foram determinadas por ajustamento aos dados do índice de área foliar medidos no campo

A produção potencial acumulada (Q_p) ao longo do ciclo de crescimento da cultura foi:

$$Q_p = \sum_1^n q_p \cdot \Delta t \quad (3.11)$$

em que Q_p é obtido em $kg \cdot ha^{-1}$, n é o período de dias até a maturação da cultura (colheita) e Δt o período de 1 dia.

3.11.2 Sub-modelo para a estimativa da produção real

A estimativa da produção real diária de matéria seca da parte aérea de uma cultura, em função do número de dias, segundo Robaina (1992), pode ser feita por:

$$q_R^i = \frac{q_P^i}{2} + A \frac{TR^i}{2\Delta e^i} - \frac{1}{2} \sqrt{\left(q_P^i + A \frac{TR^i}{\Delta e^i} \right)^2 - 4(1-\varepsilon) q_P^i A \frac{TR^i}{\Delta e^i}} \quad (3.12)$$

sendo o termo q_R expresso em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$.

O valor da produção potencial diária q_p foi estimado pela equação 3.10, Δe é o déficit de pressão de vapor da água (hPa) e TR é a transpiração real diária ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$), foi estimado com a equação 3.7.

Os valores de A e ε foram determinados na fase de calibração do modelo de simulação da extração da água do solo pelas raízes (transpiração) e da produção da cultura de soja.

A produção real acumulada (Q_R) foi calculada pela soma das produções diárias durante todo o período:

$$Q_R = \sum_1^n q_R \cdot \Delta t \quad (3.13)$$

sendo que Q_R é obtido em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, n é o período de dias até a maturação da cultura (colheita) e Δt o período de 1 dia.

A produção de grãos referida a grãos com 13% de umidade da cultura (Pgc), obtida pelo modelo computacional foi calculada por:

$$Pgc = 1,15 \cdot Q_R \cdot IC \quad (3.14)$$

onde Q_R é a produção de matéria seca ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) e IC é o índice de colheita, que foi determinado a partir dos dados dos valores obtidos no experimento de campo (modelo físico experimental) e 1,15 é o fator de correção da umidade do grão.

A Figura 3.3 mostra um fluxograma simplificado do modelo de produção foi composto por leitura dos dados iniciais (latitude, λ , A , ε), leitura dos dados diários de entrada ($Tm, Rs, Urel, IAF, \alpha, Rc, Pc, Po, TR$), estimativa da produção (potencial e real) diária de matéria seca da parte aérea da cultura e produção acumulada (potencial e real) de matéria seca da parte aérea da cultura da soja.

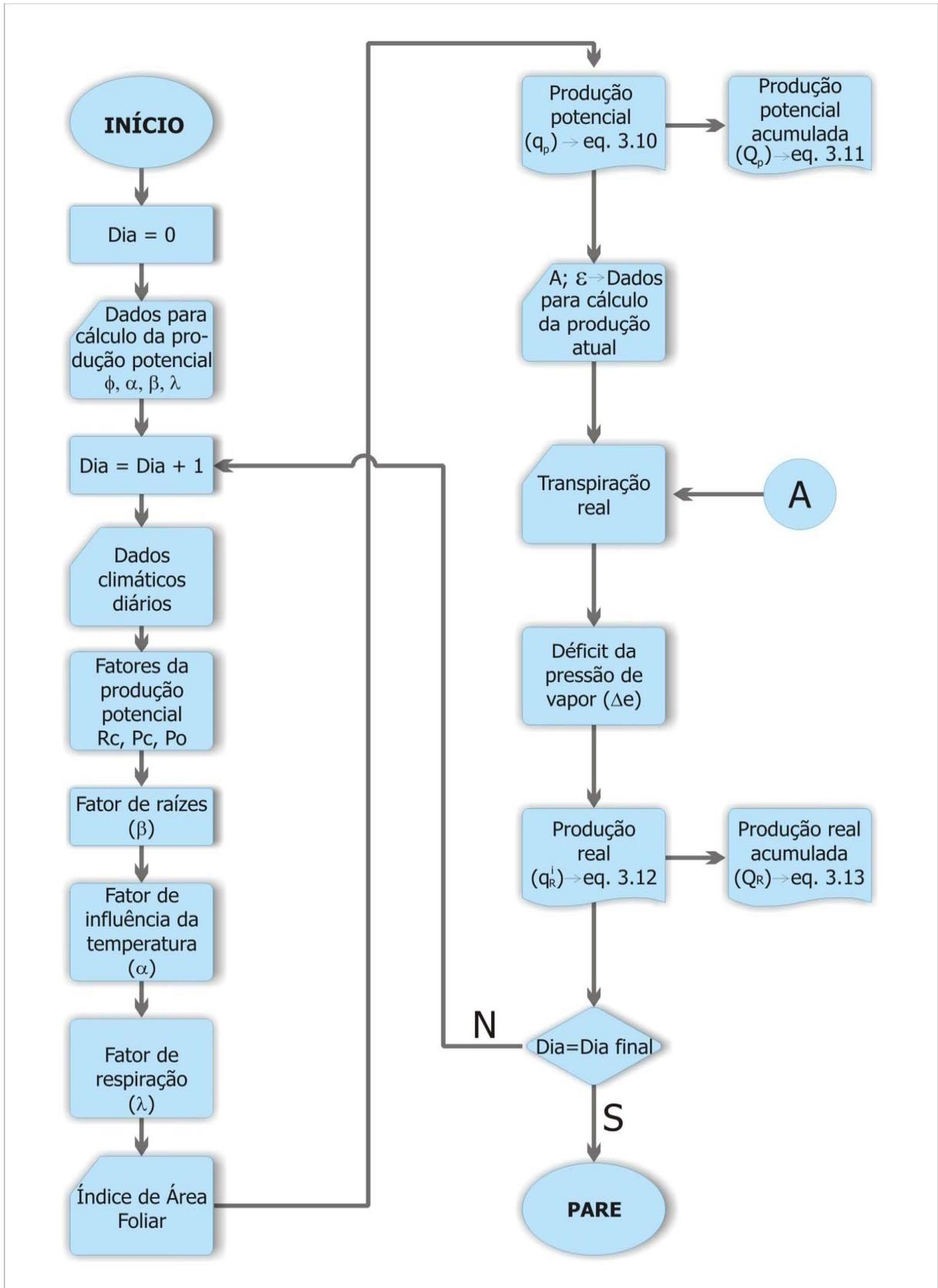


Figura 3.3 – Fluxograma simplificado do modelo de produção de cultura (adaptado de ROBAINA, 1992).

3.12 Calibração e teste do modelo de simulação da produção

A calibração do modelo de produção se refere a determinação dos coeficientes A e ε (equação 3.12). Foram utilizados os valores de produção obtidos no tratamento T0 para realizar esse procedimento.

O teste do modelo de simulação foi feito com os valores de produção obtidos no experimento de campo nos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5 e os valores de produção calculados com o modelo matemático calibrado.

3.13 Análise das observações simuladas

Os valores das observações simuladas foram comparados com os valores das observações medidas para verificar o desempenho do modelo em prever o comportamento do sistema.

Foi feita a regressão linear $Y = a + b \cdot X$, entre os valores simulados (X) e os valores obtidos no campo (Y), com a finalidade de se obter o coeficiente de correlação r , o coeficiente linear e o coeficiente angular.

O valor de $a = 0$ significou que a reta de regressão passa pela origem e o valor de $b = 1$ significa que a reta de regressão tem uma inclinação de 45° em relação ao eixo das abcissas, que contém os valores da variável a ser testada (X), que no presente estudo, são os valores fornecidos pelo modelo matemático.

Após a obtenção dos valores dos coeficientes (a, b) da regressão linear foi feito o teste t de Student, ao nível de confiança de 95%, do coeficiente linear que indicou se $a = 0$ e o teste t do coeficiente angular que indicou se $b = 1$.

Se o valor do teste t calculado com os dados experimentais for menor que o valor de t fornecido por uma tabela da distribuição de Student, indicou que as hipóteses testadas ($a = 0$ e $b = 1$) foram verdadeiras.

Desse modo pode-se afirmar que não existe, com um nível de confiança de 95% ou com uma probabilidade de erro de 5%, diferença significativa entre os procedimentos que foram comparados.

Com o mesmo conjunto de dados foi determinado o índice de concordância de Willmott, calculado por:

$$I_W = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\left| E_i - \bar{E} \right| + \left| O_i - \bar{O} \right| \right)^2} \right] \quad (3.15)$$

onde E_i é o valor da observação estimada, O_i é o valor da observação medida e \bar{E} é a média dos valores da observação estimada e \bar{O} é a média da observação medida.

O coeficiente de correlação (r) permitiu quantificar o grau de associação entre as duas variáveis envolvidas na análise (SCHNEIDER, 1998), pode ser estimado por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]}} \quad (3.16)$$

onde E_i são os valores estimados, O_i os valores observados, \bar{E} a média dos valores estimados e \bar{O} a média dos valores observados.

O campo de variação do coeficiente de correlação é de -1 a 1 e quanto maior o seu valor absoluto maior o grau de associação.

A avaliação do desempenho do modelo de produção da soja foi feita pelo índice de desempenho (I_d), proposto por Camargo e Sentelhas (1997) cujo valor é o produto do coeficiente de correlação e o índice de concordância ($I_d = r \cdot I_W$).

O critério de interpretação do índice de desempenho e das respectivas classes de desempenho utilizadas neste trabalho foi feito de acordo com Costa (2004), pode ser visto pela tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Critério de interpretação dos valores do índice desempenho e as respectivas classes de desempenho.

Critério de interpretação do índice de desempenho - I_d				Classes de desempenho	
0,85	>	d			Ótimo
0,76	<	d	\leq	0,85	Muito Bom
0,66	<	d	\leq	0,76	Bom
0,61	<	d	\leq	0,66	Mediano
0,51	<	d	\leq	0,61	Ruim
0,41	<	d	\leq	0,51	Muito Ruim
		d	\leq	0,41	Péssimo

3.14 Aplicação do modelo de simulação da produção

O modelo de produção proposto neste trabalho, após a sua validação, foi utilizado para simular a produção da cultura da soja (acúmulo de matéria seca total e produção de grãos) quando submetida a diferentes estratégias de irrigação (tratamentos), sendo T0, T1, T2, T3, T4 e T5, com percentagens de irrigação de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% da evapotranspiração de referência (ET_o), respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, foram apresentados os resultados de solo, clima e planta do experimento de campo para a cultura da soja. No caso das plantas, seguem os resultados e discussões sobre, o índice de área foliar (IAF), matéria seca total (MST) e profundidade do sistema radicular (Prz) ao longo do ciclo das cultivares.

Apresentou-se também os valores obtidos de componentes de produção, produção de grãos e matéria seca total no final do ciclo de ambas as cultivares.

Da mesma forma, os resultados obtidos no experimento simulado, apresentando a calibração e teste do mesmo, comparando-se com os resultados obtidos no experimento de campo e discutindo-se com base em outras pesquisas.

4.1 Características físicas dos solos

Os resultados das características físicas do solo (distribuição granulométrica, classe textural, densidade do solo e densidade da partícula dos solo), em função da profundidade, foram apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características físicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta. Valores médios para três repetições.

Prof. (cm)	Distribuição granulométrica (%)				Classe Textural	Densidade (g.cm ⁻³)	
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila		Solo	Partícula
0 - 20	32,37	17,43	25,63	24,60	Franco Argilo Arenoso	1,55	2,60
20 - 40	29,47	16,30	24,47	29,77	Franco Argiloso	1,39	2,60
40 - 60	27,90	12,47	21,57	34,77	Franco Argiloso	1,34	2,63
60 - 80	24,70	13,27	22,27	39,77	Franco Argiloso	1,35	2,62
80 - 100	18,37	13,10	20,10	48,40	Argila	1,33	2,63
Média	26,56	14,51	22,81	35,46		1,39	2,62
DP	5,35	2,20	2,23	9,18		0,09	0,02
CV(%)	20,15	15,18	9,77	25,88		12,51	0,76

O solo do local onde foi desenvolvido o experimento, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 1999) foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta, que representa grande parte do município de Santiago, RS.

Através da tabela 4.1 observou-se que o solo, do local em estudo, apresenta como textura predominante, a franco argiloso (aproximadamente 60% do perfil), com densidade de solo média de 1,39, densidade da partícula média de 2,62 e porosidade total média de 46,76%. Pode-se observar que se trata de um perfil uniforme quanto às características físicas determinadas.

A tabela 4.2 apresenta os resultados da umidade volumétrica, nas diferentes camadas do solo do local onde foi realizado o experimento, em função do potencial de retenção da água no solo.

Tabela 4.2 – Valores da umidade volumétrica, nas diferentes camadas do solo no local do experimento, em função do potencia matricial da água no solo. Valores médios para três repetições.

Prof.(cm)	Umidade Volumétrica (m ³ .m ⁻³)						
	Satur.	1 (kPa)	6 (kPa)	33 (kPa)	100 (kPa)	500 (kPa)	1500 (kPa)
0 - 20	0,42	0,39	0,34	0,29	0,28	0,19	0,16
20 - 40	0,47	0,40	0,34	0,30	0,28	0,20	0,17
40 - 60	0,50	0,44	0,36	0,30	0,28	0,19	0,17
60 - 80	0,51	0,44	0,37	0,31	0,29	0,22	0,21
80 - 100	0,51	0,45	0,39	0,34	0,32	0,23	0,21
Média	0,48	0,42	0,36	0,31	0,29	0,21	0,18
DP	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
CV (%)	8,33	7,14	5,55	6,45	6,90	9,52	11,11

Através da tabela 4.2 observou-se que o solo, do local em estudo, apresenta umidades volumétricas médias, variando entre 0,48 (saturação) e 0,18 (m³.m⁻³) (potencial matricial de 1500 kPa). Pode-se observar que se trata de um perfil uniforme quanto a relação umidade volumétrica em função do potencial matricial, o que pode ser verificado pela pequena variabilidade do coeficiente de variação, todos menores que 12%, o que pode ser explicado como um reflexo das características físicas que constam na tabela 4.1.

Na tabela 4.3, podem ser vistos os coeficientes da curva de retenção (equação 3.2) ajustada, pelo método de Brooks e Corey (1964) aos valores médios de umidade do solo para as cinco camadas de solo, ajustado com o auxílio do programa computacional Table Curve versão 2.0 (Jandel Scientifics) e seus respectivos coeficientes de determinação.

Tabela 4.3 – Coeficientes da curva de retenção da água no solo, condutividade hidráulica, expoente da função condutividade hidráulica e coeficiente de determinação r^2 do solo do local do experimento.

Profundidade cm	Θ_{sat} $m^3 \cdot m^{-3}$	ψ_e kPa	b	r^2	Ksat mm/h	c
0 - 20	0,42	0,71	0,1078	0,9368	-----	2,32
20 - 40	0,47	0,28	0,1050	0,9543	-----	2,31
40 - 60	0,50	0,41	0,1230	0,9751	-----	2,37
60 - 80	0,51	0,25	0,1027	0,9896	-----	2,31
80 - 100	0,51	0,37	0,0988	0,9611	-----	2,30
0 - 100	0,48	0,38	0,1073	0,9191	4,75	2,32

Na mesma tabela 4.3, na segunda, terceira e quarta colunas, podem ser encontrados os valores da umidade volumétrica na saturação (Θ_{sat}), o potencial de entrada de ar (ψ_e) e o expoente (b) da curva de retenção da água no solo em função da profundidade. Os valores dos coeficientes de determinação mostram a elevada qualidade do ajuste da curva de retenção da água no solo (modelo de BOOKS e COREY, 1964), uma vez que em todas as profundidades foram superiores a 90%.

Ainda na tabela 4.3, pode ser encontrado o valor da condutividade do solo em condição saturado, bem como o expoente da função condutividade hidráulica (equação 3.3), cujo valor é $c = 2 + 3 \cdot b$, de acordo com Campbell (1985), para a camada de 0 – 100 cm (perfil do solo).

A figura 4.1 representa a curva de retenção ajustada, segundo a equação 3.2, aos valores médios de umidade volumétrica para cada camada de solo (0-20; 20-40; 40-60; 60-80; 80-100 cm) e aos valores médios da umidade volumétrica para todas as camadas juntas (0-100 cm).

Observou-se muita semelhança na forma e nos valores da umidade volumétrica, de cada uma das camadas de solo quando comparadas com a curva englobando todas as camadas juntas, o que sugere a possibilidade desta última representar todo o perfil do solo.

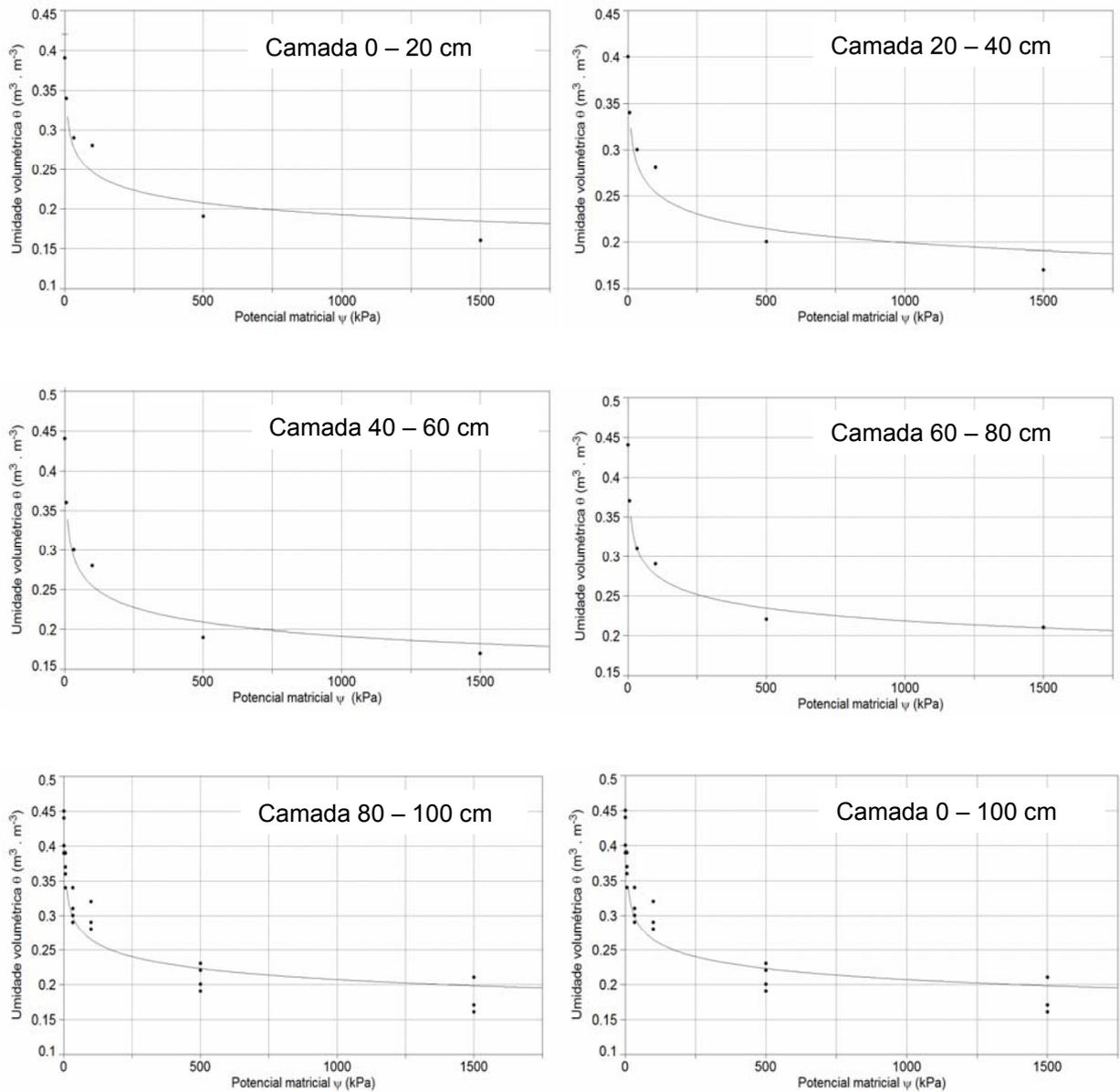


Figura 4.1 – Curva de retenção dos valores médios de umidade do solo para cinco camadas de solo.

Para investigar esta hipótese, foi construída a tabela 4.4, na qual pode ser visto, na segunda coluna, o valor de a (uma variável auxiliar) para cada camada de solo, a diferença desta variável em relação ao valor de a (variável auxiliar para a camada 0-100 cm, que nesse caso foi igual a 0,4337), o valor de t (distribuição de Student) para a variável auxiliar, o valor de b para camada de solo, a diferença desta variável em relação ao valor de b (para a camada de 0-100 cm, que nesse caso foi igual a 0,1074) e o valor de t para a variável b .

Tabela 4.4 – Coeficientes da curva de retenção da água no solo, condutividade hidráulica, expoente da função condutividade hidráulica e coeficiente de determinação r^2 do solo do local do experimento.

Tratamento	$a = \theta_{sat} \cdot \psi_e^b$	Δa	t_a	b	Δb	t_b
0 - 20	0,4048	0,0279	1,45	0,1078	0,0005	0,05
20 - 40	0,4112	0,0215	1,12	0,1050	0,0023	0,25
40 - 60	0,4481	0,0154	0,80	0,1230	0,0157	1,69
60 - 80	0,4423	0,0096	0,50	0,1027	0,0046	0,49
80 - 100	0,4623	0,0296	1,54	0,0988	0,0085	0,91

Como pode ser visto na tabela 4.4, a diferença entre os valores da variável auxiliar (segunda coluna) variaram de 0,0096 (menor valor) a 0,0296 (maior valor), valores estes próximos de zero, o que indica a pequena variação entre os valores da variável auxiliar (terceira coluna) e o valor da variável auxiliar que representou todo o perfil (0-100 cm), cujo valor é 0,4337 (conforme o parágrafo anterior).

Ainda na tabela 4.4, pode ser visto, a diferença entre os valores da variável Δb (sexta coluna) variaram de 0,0005 (menor valor) a 0,0157 (maior valor), valores estes próximos de zero, o que indica a pequena variação entre os valores do expoente b da curva de retenção da água, segundo o modelo de Brooks e Corey (1964), (quinta coluna) e o valor do expoente da curva de retenção da água no solo, que representa todo o perfil (0-100 cm), cujo valor é 0,1074 (conforme o parágrafo anterior).

O programa computacional Table Curve forneceu, quando do ajustamento da curva de retenção (camada de 0-100 cm), o desvio padrão de a ($s_a = 0,0192$) e o de b ($s_b = 0,0093$), que permitiram determinar o valor de $t_a = \frac{\Delta a}{s_a}$ e o valor de $t_b = \frac{\Delta b}{s_b}$

O valor de t da distribuição de Student, para 28 graus de liberdade e 5% de probabilidade de erro (ou 95% de confiança) é igual 1,70, de acordo com uma tabela daquela distribuição, que pode ser encontrado em vários livros de estatística básica, como, por exemplo em Costa Neto (1977).

Uma vez que, todos os valores da t_a e de t_b foram menores do que o valor crítico (1,70), pode-se adotar, com um nível de confiança de 95%, que o modelo da curva característica da água no solo (curva de retenção), segundo o modelo de Brooks e Corey (1964), ajustado para todas as camadas de solo (0-100 cm) pode representar todo o perfil do solo.

4.2 Características químicas dos solos

Os resultados das características químicas do solo (pH, matéria orgânica, capacidade de troca de cátions, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, soma hidrogênio e alumínio, índice SMP, fósforo, valor V e teor de argila), em função da profundidade, foram apresentados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Características químicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta – Valores médios para três repetições.

Prof. (cm)	pH		M.O		Teor Trocável em g/100g Terra						Satur.		Arg.
	H ₂ O (1:1)	%	CTC	K mg/d m ³	Ca	Mg	Al	H + Al	Índ. SMP	P Mg.d m ⁻³	Al	V%	%
0-10	5,9	2,7	12,0	304	5,9	3,1	0	2,2	6,6	11,8	0	82	34
0-10	6,1	2,5	11,7	360	6,0	3,0	0	2,0	6,7	19,9	0	83	32
0-10	5,5	2,0	9,8	248	4,4	2,3	0	2,5	6,5	6,0	0	75	34
0-30	5,8	2,2	10,7	120	5,1	2,5	0	2,8	6,4	10,1	0	74	36
0-30	5,6	1,9	9,1	172	4,3	2,2	0	2,2	6,6	4,6	0	76	23
Média	5,8	2,3	10,7	241	5,1	2,6	0	2,3	6,6	10,5	0	78,0	31,8
DP	0,2	0,3	1,2	97	0,8	0,4	0	0,3	0,1	6,0	0	4,2	5,1
CV(%)	4,1	14,9	11,5	40	15,6	15,6	0	13,4	1,7	57,5	0	5,4	16,1

De acordo com Comissão de Química e Fertilidade do Solo (2004), pode-se interpretar as características do Latossolo conforme segue:

O pH é médio em todas as repetições (valores de 5,5 - 6,0), com exceção da segunda repetição que foi considerado alto (valores maiores de 6,0). A matéria orgânica foi média na primeira repetição e baixa nas quatro últimas repetições (apresenta valores menores e igual a 2,5), sendo este parâmetro indicador de disponibilidade de nitrogênio.

A CTC classifica-se como média (valores de 5,1 - 15,0), com teores de argila médios e teores de fósforo médio, alto, baixo, médio, médio e baixo (segundo da primeira linha superior até a última linha da tabela). Os teores de potássio foram altos na primeira repetição (valores de 61-120) e muito altos nas três repetições de 0-10 cm e na segunda repetição de 0-30 cm (valores maiores que 120).

Quanto aos teores de cálcio a interpretação foi muito alta para todas as repetições (valores maiores que 4,0). O magnésio foi alto em todas as repetições (valores maiores que 1,0).

4.3 Irrigações e precipitações

A tabela 4.6 apresenta a irrigação total (mm), a precipitação pluvial (mm) e total de água aplicado (irrigação e precipitação) (mm) ao longo do ciclo da cultura de soja (cultivares CD 219 e AL55) para os seis tratamentos.

Tabela 4.6 – Valores de irrigação total (mm), precipitação pluvial (mm) e total de água aplicado (irrigação e precipitação) (mm) ao longo do ciclo da cultura de soja CD 219 e AL 55 nos seis tratamentos.

Tratamento	Irrigação Total (mm)		Precipitação Pluvial (mm)		Total de água aplicada (Irrigação e Precipitação (mm))	
	CD 219	AL 55	CD 219	AL 55	CD 219	AL 55
0	0,00	0,00	413,00	398,00	413,00	398,00
1	43,44	36,84	413,00	398,00	456,44	434,84
2	86,89	73,69	413,00	398,00	499,89	471,69
3	130,33	110,53	413,00	398,00	543,33	508,53
4	173,77	147,37	413,00	398,00	586,77	545,37
5	217,22	184,22	413,00	398,00	630,22	582,22

Observa-se conforme a tabela 4.6, que a precipitação pluvial ocorrida durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja foi de 413 e 398 mm para as cultivares CD 219 e AL 55, respectivamente. Segundo Doorenbos e Kassan (1979) e Reichardt (1990), a soja 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. Considerando o valor mínimo de necessidade hídrica da cultura, isto é, 450 mm, a necessidade de irrigação suplementar variou de 43,44 a 217,22 mm para a cultivar CD 219 e de 36,84 a 184,22 mm para a cultivar AL 55. Assim, a lâmina suplementar máxima para as cultivares CD 219 e AL 55, representou acima de 48 e 41% da lâmina requerida pela cultura, respectivamente.

O que foi expressivo, considerando-se reduções de rendimento devido a déficits hídricos.

4.4 Resultados experimentais

A seguir são apresentados os resultados experimentais de índice de área foliar (IAF), matéria seca total (MST), profundidade do sistema radicular (Prz), componentes de produção e produção de grãos das cultivares de soja CD 219 e AL 55.

4.4.1 Índice de área foliar

Os valores experimentais médios obtidos na determinação do índice de área foliar (IAF) para as cultivares de soja CD 219 e AL 55 são apresentados em apêndice I e II.

A partir dos valores médios de IAF nos diferentes tratamentos determinou-se o modelo de ajuste para cada tratamento, relacionando-os com o acúmulo térmico do período. A equação que representou a relação entre o índice de área foliar IAF e o número de dias após a emergência (DAE) é expressa por

$$IAF = a \cdot e^{-0.5\left(\frac{DAE-b}{c}\right)^2} \quad (4.1)$$

na qual a , b , c são coeficientes determinados pelo método dos mínimos quadrados.

A tabela 4.7 apresenta os coeficientes a , b , c , d e o coeficiente de determinação r^2 do modelo ajustado com o auxílio do programa computacional Table Curve versão 2.0 (Jandel Scientifics).

Tabela 4.7 – Coeficientes *a*, *b*, *c* e o coeficiente de determinação r^2 para a variável índice de área foliar (IAF) em cada tratamento da cultivar de soja CD 219.

Tratamento	a	b	c	r^2
0	5,6472	72,5104	23,3289	0,9923
1	5,7414	73,1733	24,3385	0,9904
2	5,8206	73,1247	24,7898	0,9897
3	5,9214	73,0140	25,1532	0,9889
4	5,5768	73,7266	25,5336	0,9858
5	6,9255	75,8997	25,8941	0,9712

Através dos resultados obtidos na tabela 4.7, observou-se que o modelo ajustou-se com elevado coeficiente de determinação para todos os tratamentos analisados.

A figura 4.2 mostra a variação do IAF nas diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência das plantas para a cultivar de soja CD 219.

De acordo com os valores obtidos para o IAF (apêndice I e figura 4.2), observou-se que a evolução do IAF aumentou de forma, aproximadamente, linear até atingir o valor máximo aos 78 DAE, decrescendo a partir daí, caracterizando uma tendência parabólica para todos os tratamentos (apêndice I), com inexpressiva diferença entre as estratégias de irrigação. Até este período foram acumulados 1040,6 graus-dia, sendo que para, todo o ciclo apresentou uma soma térmica de 1613,45 °C (graus-dia). Em todos os tratamentos o IAF máximo ocorreu no estágio R_2 , correspondendo à plena floração da cultura. O maior IAF foi verificado no tratamento T3 com o valor de 7,36 $m^2 \cdot m^{-2}$ aos 78 DAE, sendo que o menor IAF deste período foi 5,72 $m^2 \cdot m^{-2}$ para o tratamento T0 (apêndice I).

Porras et al. (1997) constataram IAF máximo no estágio fenológico correspondente à formação das vagens (R_3). Gazzoni (1974) afirma serem os estádios de R_2/R_3 como os de máximo IAF. A partir de 86 DAE, quando as plantas se encontravam em início da formação de legumes (R_3), o IAF entrou em declínio devido ao processo natural de senescência das folhas. Fontana et al. (1992) encontrou declínio de IAF aos 80 DAE para a cultivar Bragg para condições irrigadas e não irrigadas.

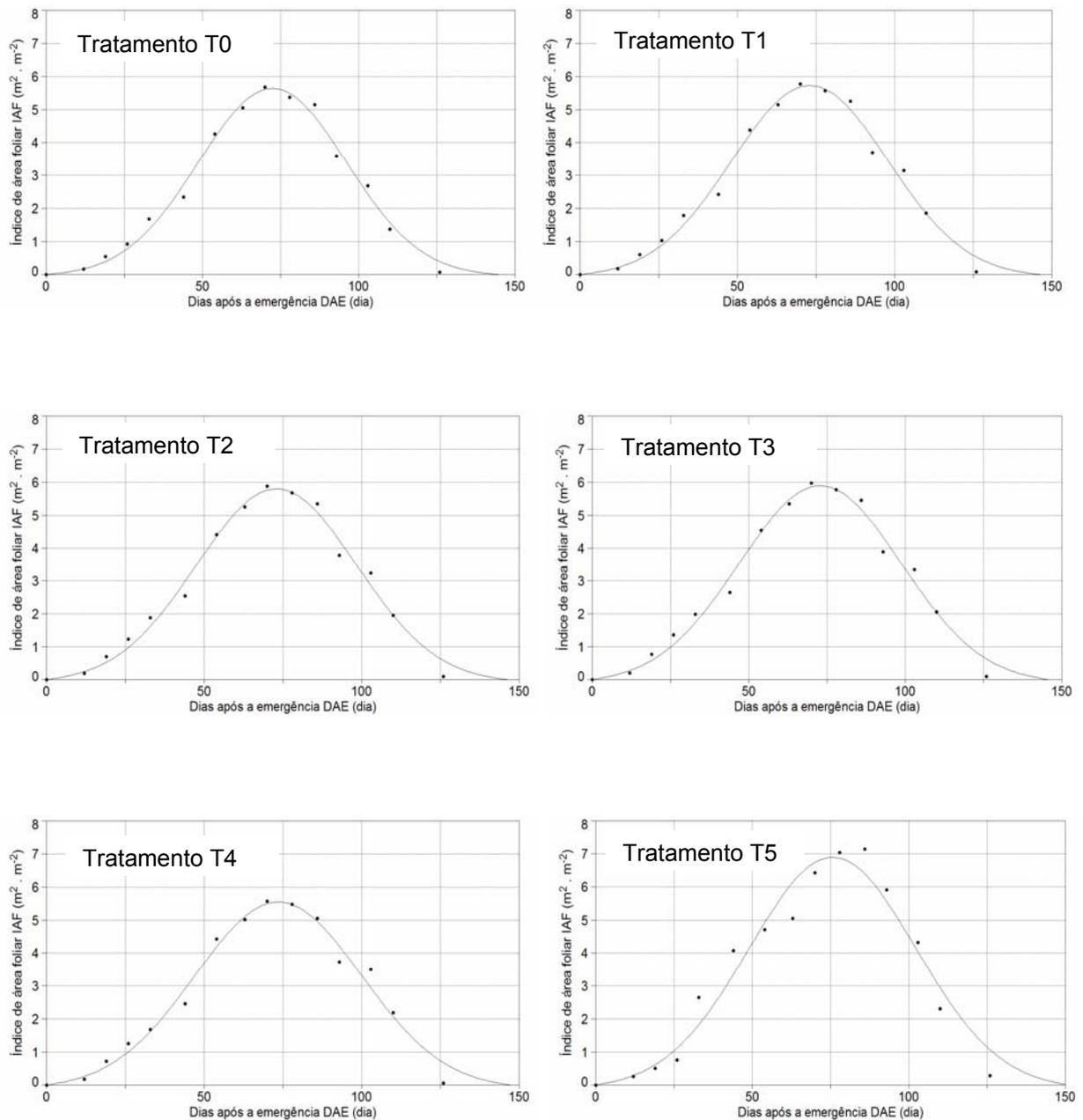


Figura 4.2 – Índice de área foliar ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) médio para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência para a cultivar de soja CD 219.

Martorano (2007) demonstrou que as estimativas de IAF máximo de uma variedade de soja foram atingidas com $806 \text{ }^\circ\text{C}$ por dia acumulados até o florescimento e $1.945 \text{ }^\circ\text{C}$ por dia acumulados, em todo o ciclo. Os valores de IAF máximo nos tratamentos irrigados foram superiores a $6,0$, e nos não irrigados $5,6$. Em todos os tratamentos o IAF máximo ocorreu no estágio R_2 , correspondendo à plena floração da cultura.

A tabela 4.8 apresenta os coeficientes *a*, *b*, *c*, *d* e o coeficiente de determinação r^2 do modelo ajustado com o auxílio do programa computacional Table Curve versão 2.0 (Jandel Scientifics).

Tabela 4.8 – Coeficientes *a*, *b*, *c* e o coeficiente de determinação r^2 para a variável índice de área foliar (IAF) em cada tratamento da cultivar de soja AL 55.

Tratamento	a	b	c	r^2
0	6,9071	74,3781	19,9380	0,9773
1	7,9026	75,7121	19,7470	0,9852
2	7,9979	75,6071	20,3889	0,9836
3	8,2705	73,6816	21,5749	0,9720
4	8,5155	75,1237	21,2698	0,9785
5	7,9279	75,5381	20,5188	0,9827

A tabela 4.8 demonstrou que a equação ajustou-se a valores de coeficiente de determinação superiores a 0,995.

A figura 4.3 ilustra o comportamento do índice de área foliar em cada tratamento e sua relação com o número de dias após a emergência das plantas para a cultivar de soja AL 55.

Através da figura verificou-se um crescimento acentuado até 78 DAE para os todos os tratamentos. Este período correspondeu ao estágio reprodutivo, caracterizado pela floração e acumulou 1.040,6 °C por dia (apêndice II). Os valores de graus-dia acumulados se assemelham com os resultados obtidos por Camargo et al. (1987) para semeaduras realizadas de outubro a dezembro, nas quais obtiveram que os graus-dia acumulados da cultivar de soja “Santa Rosa” de ciclo médio, variaram entre 1.565 a 1.035 graus-dia. Resultado similar foi mencionado por Martorano (2007), com valor de 1.047 °C por dia acumulados aos 80 DAE.

O máximo IAF alcançado para está cultivar foi de 8,14 $m^2.m^{-2}$ no tratamento T4 (apêndice II). No caso da cultura da soja, o IAF máximo obtido por Câmara e Heiffing (2000), em Piracicaba, SP, variou de 5,0 a 8,0. Souza et al. (2008) obteve-se IAF máximo de 7,17 aos 70 DAS, um dia antes da fase de enchimento de grãos. Resultados semelhantes foram relatados por Confalone et al. (2002), onde o IAF máximo deu-se na floração, com valores de 7,2 em tratamentos irrigados e de 4,9 sob condição não irrigada.

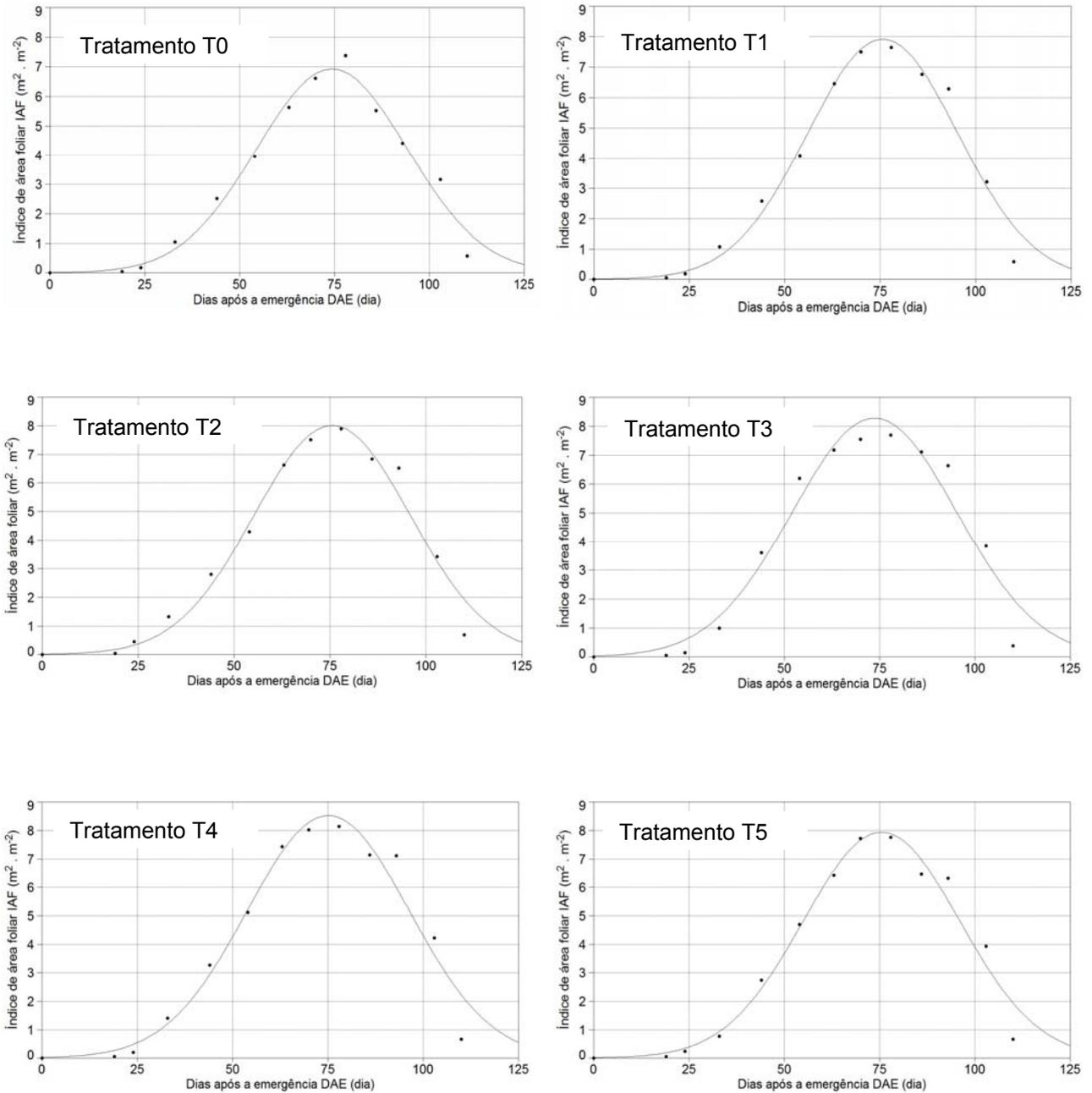


Figura 4.3 – Índice de área foliar ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) médio para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência para a cultivar de soja AL 55.

O valor do IAF variou de acordo com o clima, o estágio de desenvolvimento da planta e a estação do ano, sendo maior para maiores intensidades luminosas e quando a proporção de radiação direta na radiação incidente aumenta, além de ser dependente da arquitetura e composição botânica/morfológica da planta (FRANCISCO et al., 2007).

4.4.2 Matéria seca

Os valores experimentais médios obtidos na determinação da matéria seca total (MST) para as cultivares de soja CD 219 e AL 55 em cada tratamento foram apresentados em apêndice III e IV.

Os valores médios de MST nos diferentes tratamentos, foram relacionados com o número de dias após a emergência das plantas a fim de ser determinado o modelo de ajuste para cada cultivar e os respectivos coeficientes em cada tratamento. A equação que representou a relação entre as variáveis é expressa por

$$MST = a \cdot \left(1 - e^{\frac{-(DAE + 0,6931 c / d + b)}{c}} \right)^d \quad (4.2)$$

onde a , b , c , d são coeficientes determinados pelo método dos mínimos quadrados.

A tabela 4.9 apresenta os coeficientes a , b , c , d e o coeficiente de determinação r^2 do modelo ajustado com o auxílio do programa computacional Table Curve versão 2.0 (Jandel Scientifics).

Tabela 4.9 – Coeficientes a , b , c , d e o coeficiente de determinação r^2 para a variável matéria seca total (MST) em cada tratamento da cultivar de soja CD 219.

Tratamento	a	b	c	d	r^2
0	41,8414	71,3972	216,0973	12,3835	0,9996
1	46,6651	70,9107	49,9628	2,2589	0,9994
2	50,1048	73,8809	45,8841	2,1845	0,9992
3	51,1003	79,1775	251,8103	13,6145	0,9997
4	53,0412	73,1188	110,4213	5,1782	0,9996
5	54,3402	71,4014	217,6011	12,4809	0,9996

De acordo com os valores obtidos na tabela 4.9, observou-se que o modelo ajustou-se satisfatoriamente com coeficiente de determinação acima de 0,99.

A figura 4.4 mostra a variação da matéria seca nas diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência das plantas para a cultivar de soja CD 219.

Verificou-se que a curva de produção experimental de MST em função dos dias após a emergência, apresenta a tendência sigmoideal característica esperada para as médias obtidas ao longo das avaliações no tempo. Essas projeções das curvas são características de culturas anuais, semelhantes às encontradas por Brandelero et al. (2002), avaliando nove cultivares de soja nas condições agroecológicas do Recôncavo Baiano.

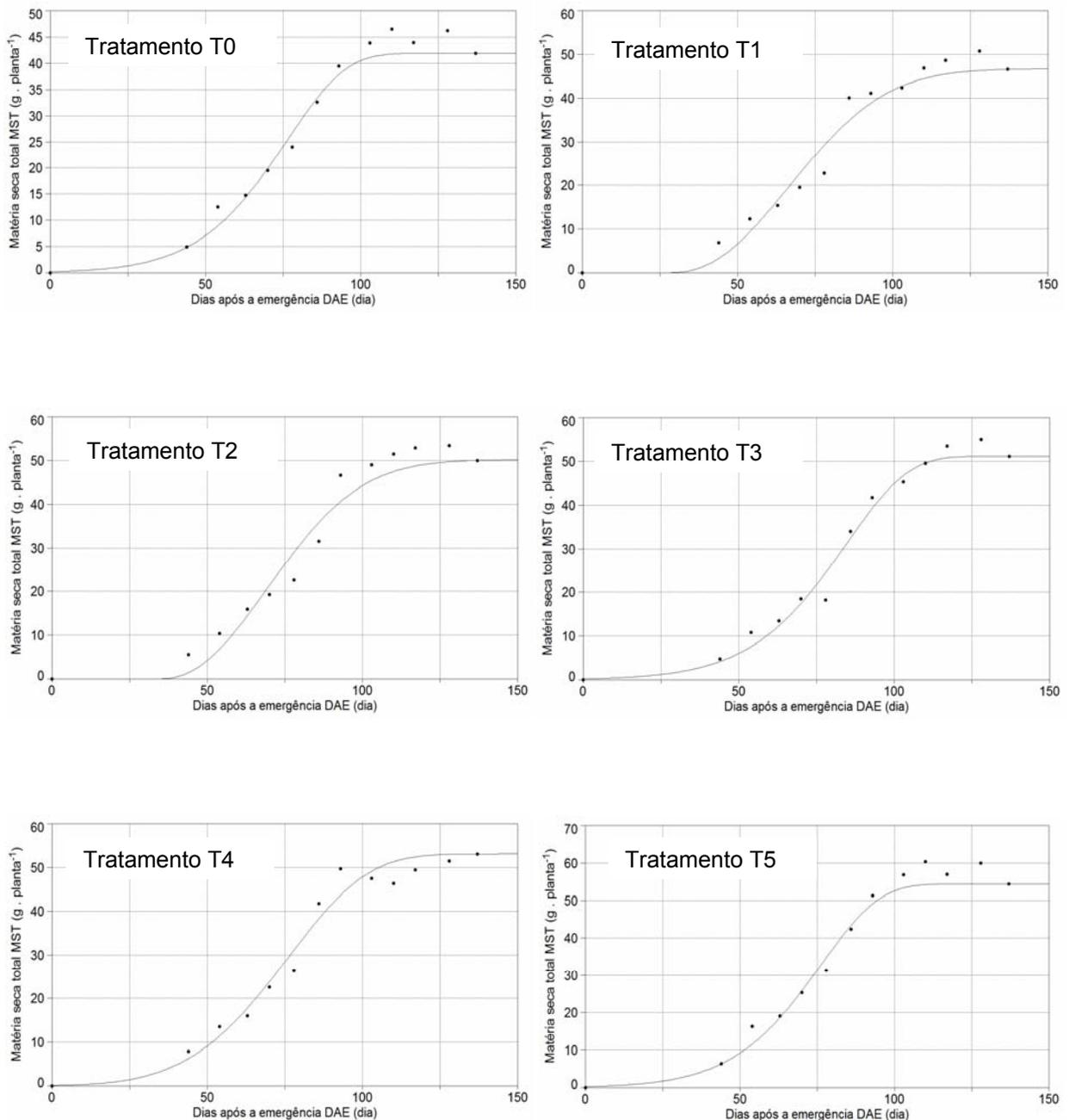


Figura 4.4 – Matéria seca total (g.planta⁻¹) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência para a cultivar de soja CD 219.

A deficiência hídrica ocorrida no período (tratamento T0) acarretou em reduzido acúmulo de MST em relação aos demais tratamentos. O acúmulo de MST nas fases iniciais é baixo, e notou-se que há similaridade entre os tratamentos irrigados no decorrer do ciclo.

Analisando ainda a figura 4.4, verificou-se que a partir dos 75 DAE a diferenciação foi expressiva, demonstrando que o aumento da dose de irrigação acarretou em maior acúmulo da MST. Brandelero et al. (2002) observaram que os maiores acúmulos de massa de matéria seca ocorreram entre 75 e 90 DAE, havendo um pequeno decréscimo após esse período.

Nesta figura observou-se também, que o acúmulo de MST praticamente estabiliza a partir dos 100 DAE, aproximadamente, para todos os tratamentos. O tratamento T5 atingiu o rendimento máximo com $60,33 \text{ g.planta}^{-1}$, conforme apêndice III.

A tabela 4.10 apresenta os coeficientes *a*, *b*, *c*, *d* e o coeficiente de determinação r^2 do modelo ajustado com o auxílio do programa computacional Table Curve versão 2.0 (Jandel Scientifics).

Tabela 4.10 – Coeficientes *a*, *b*, *c*, *d* e o coeficiente de determinação r^2 para a variável matéria seca total (MST) em cada tratamento da cultivar de soja AL 55.

Tratamento	A	b	c	d	r^2
0	56,7013	86,2934	106,9972	2,3698	0,9992
1	56,8392	85,1377	431,2176	15,4152	0,9973
2	64,0734	93,7746	108,9386	4,0964	0,9999
3	62,3152	90,8307	109,8073	3,5219	0,9998
4	53,9379	80,0208	78,2284	2,8834	0,9990
5	60,6156	79,0470	156,8026	5,8514	0,9996

De acordo com a tabela 4.10, observou-se que a equação ajustou-se com elevados valores de coeficiente de determinação para todos os tratamentos testados.

A figura 4.5 mostra o comportamento da MST em cada tratamento e sua relação com o número de dias após a emergência durante o ciclo da cultivar de soja AL 55.

Observou-se que o comportamento da MST, em função do número de dias após a emergência, pode ser demonstrado através de uma curva sigmóide, aproximadamente.

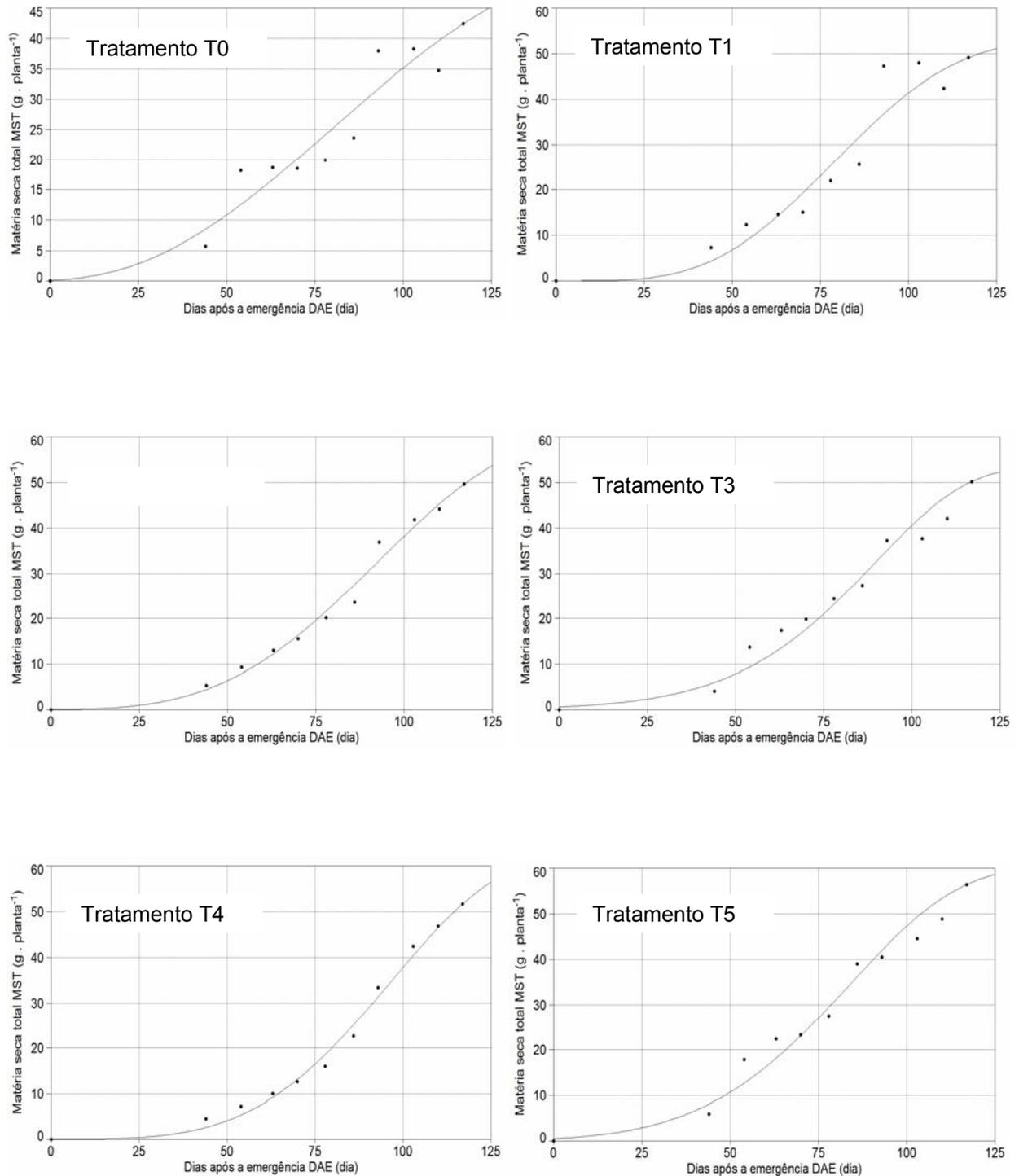


Figura 4.5 – Matéria seca total (g.planta⁻¹) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência para a cultivar de soja AL 55.

O maior acúmulo de MST ocorreu nos tratamentos T4 e T5 (51,59 e 56,34 g.planta⁻¹), respectivamente, aos 117 DAE, coincidindo no Tratamento T4 com o máximo valor de IAF. Cruz et al. (2010) ao avaliar o desempenho vegetativo e produtivo de cinco cultivares de soja com diferentes ciclos de maturação obteve valores para o acúmulo de massa de matéria seca variando entre 91,95 a 35,16 g planta⁻¹. Para Francisco et al. (2007) o máximo acúmulo de matéria seca ocorreu aos 98 DAE, com um valor de 45 g.planta⁻¹. Esse valor foi próximo aos menores valores obtidos neste trabalho, nos tratamentos T0 e T1 (42,36 e 49,01 g.planta⁻¹), que pode ser confirmado em apêndice IV.

Observou-se ainda na figura 4.5, que da mesma forma como ocorreu na cultivar de soja CD 219, as estratégias de irrigação ocasionaram diferenças expressivas no acúmulo de MST nos diferentes tratamentos analisados, em especial nos Tratamentos T0 (sem irrigação) e T1 (20% da ETo).

4.4.3 Profundidade do sistema radicular

Os valores experimentais médios obtidos na determinação da profundidade do sistema radicular (cm) para as cultivares de soja CD 219 e AL 55 em cada tratamento são apresentados em apêndices V e VI.

Os valores médios da profundidade do sistema radicular Prz nos diferentes tratamentos foram relacionados com o número de dias após a emergência das plantas, de modo a permitir ser determinado o modelo de ajuste para cada cultivar e os respectivos coeficientes em cada tratamento. A equação que representou a relação entre as variáveis é expressa por

$$\text{Prz} = a + \frac{b}{1 + e^{\frac{\text{DAE}-c}{d}}} \quad (4.3)$$

onde *a*, *b*, *c*, *d* são coeficientes determinados pelo método dos mínimos quadrados.

A tabela 4.11 apresenta os coeficientes *a*, *b*, *c*, *d* e o coeficiente de determinação r^2 do modelo ajustado com o auxílio do programa computacional Table Curve versão 2.0 (Jandel Scientifics).

Tabela 4.11 – Coeficientes *a*, *b*, *c*, *d* e o coeficiente de determinação r^2 para a variável profundidade do sistema radicular (Prz) em cada tratamento da cultivar de soja CD 219.

Tratamento	a	b	c	d	r^2
0	5,0000	20,3659	32,2458	-1,8700	0,9930
1	5,0000	21,4944	34,3394	-2,3674	0,9947
2	5,0000	26,6110	35,2099	-2,0713	0,9975
3	5,0000	26,0973	33,0228	-1,8336	0,9896
4	5,0000	56,2012	114,8653	-1,2292	0,9816
5	5,0000	28,8208	46,4317	-1,5871	0,9916

De acordo com os valores obtidos na tabela 4.11, observou-se que o modelo ajustou-se satisfatoriamente com coeficiente de determinação acima de 0,99.

A figura 4.6 mostra a variação da profundidade do sistema radicular (Prz) nas diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência para a cultivar de soja CD 219.

A curva de crescimento do sistema radicular da cultivar de soja CD 219 apresentou padrão sigmoidal. O crescimento foi acentuado até os 110 DAE, aproximadamente (apêndice V). Este período correspondeu ao estágio reprodutivo, no período de enchimento de grãos. Após esta fase, ocorreu uma tendência de estabilização.

Os tratamentos T3 e T4 apresentaram uma Prz maior, com relação aos demais tratamentos (33,23 e 35,36 cm, respectivamente). Resultados aproximados foram encontrados por Bordin et al. (2008), onde as profundidades efetivas do sistema radicular da soja variaram de 43,00 a 54,00 cm. Deve-se considerar que nestes tratamentos não ocorreu déficit hídrico durante o ciclo da cultura. Não havendo limitação de água e nutrientes, a planta concentra suas raízes nas camadas onde o crescimento é mais fácil, procurando não prejudicar o processo de absorção (MARSCHNER, 1986).

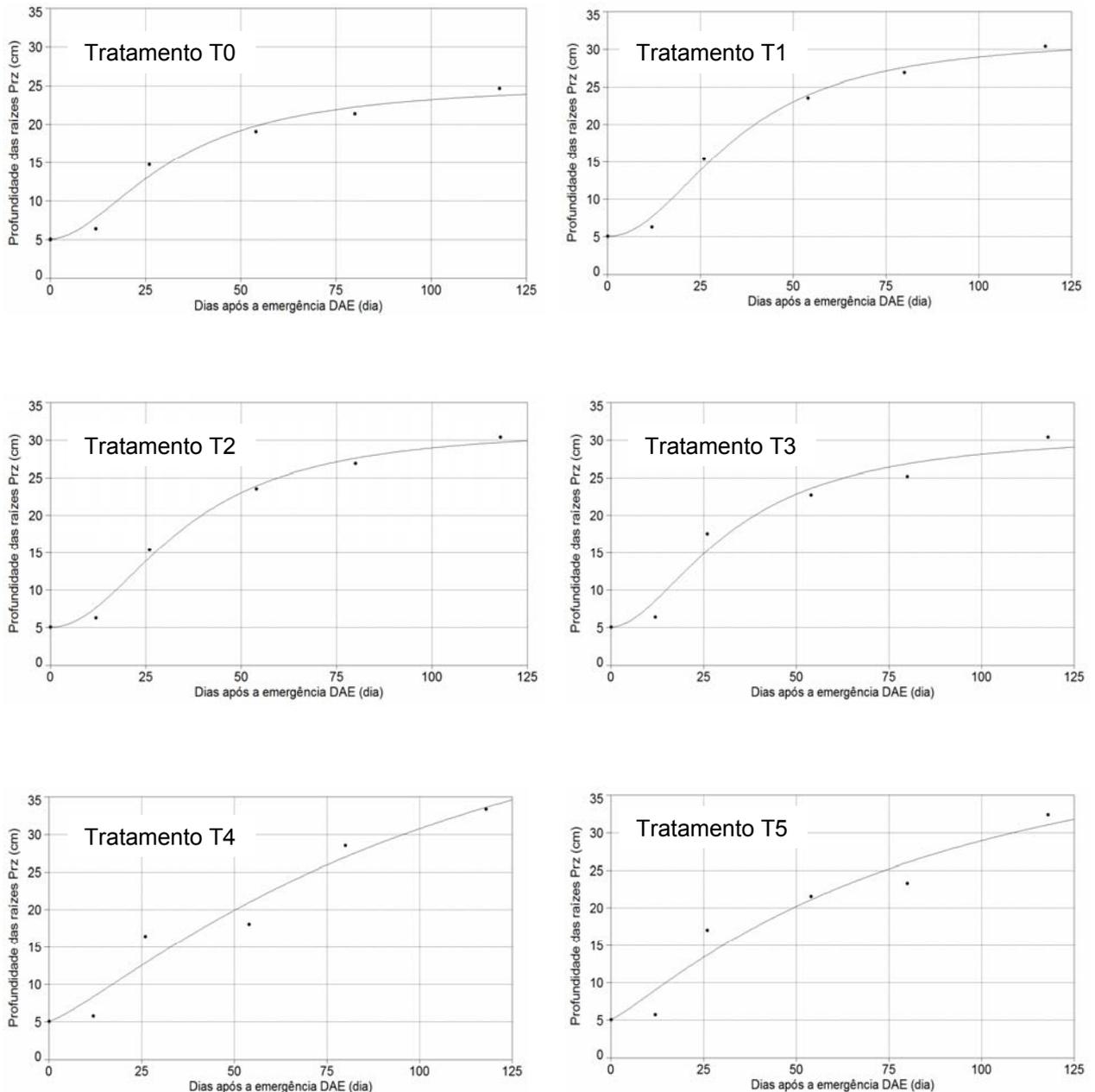


Figura 4.6 – Profundidade do sistema radicular (cm) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência para a cultivar de soja CD 219.

Nos tratamentos T0 e T1 a profundidade do sistema radicular foi reduzida, com relação aos demais. Isto demonstrou que deficiências hídricas ocasionam redução na profundidade do sistema radicular. Conforme Torres et al. (1993) as raízes de soja necessitam ser bem distribuídas nos 25 cm iniciais do perfil do solo, para que tenham condições de suportar os períodos de estresse hídrico que ocorrem durante seu ciclo.

A tabela 4.12 apresenta os coeficientes a , b , c , d e o coeficiente de determinação r^2 do modelo ajustado com o auxílio do programa computacional Table Curve versão 2.0 (Jandel Scientifics).

Tabela 4.12 – Coeficientes a , b , c , d e o coeficiente de determinação r^2 para a variável profundidade do sistema radicular (Prz) em cada tratamento da cultivar de soja AL 55.

Tratamento	A	b	c	d	r^2
0	5,0000	18,9822	27,0032	-3,1716	0,9822
1	5,0000	19,3216	27,7060	-5,2073	0,9987
2	5,0000	24,0249	23,3395	-4,5247	0,9975
3	5,0000	26,9741	23,2266	-4,2784	0,9976
4	5,0000	29,1638	23,5052	-3,7441	0,9970
5	5,0000	26,8341	22,3139	-4,1630	0,9974

Pela tabela 4.12, observou-se boa aderência do modelo ajustado para expressar a relação funcional entre o número de dias após a emergência e a variação da profundidade do sistema radicular. Os valores do coeficiente de determinação para cada tratamento mostraram a adequada correlação do modelo aos dados observados.

A figura 4.7 ilustra a variação da Prz nas diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência para a cultivar de soja AL 55.

Analisando a figura 4.7, observou-se que o sistema radicular da cultivar de soja AL 55 apresentou um crescimento acentuado até 78 DAE, aproximadamente (apêndice VI). Após esta fase, ocorreu uma tendência de estabilização. Os tratamentos T2, T3, T4 e T5 apresentaram uma Prz maior, com relação aos demais tratamentos.

Notou-se ainda, que a profundidade média máxima foi de 35,36 cm aos 110 DAE (apêndice VIII). Richter et al. (1990), trabalhando com diferentes culturas, observaram que, de maneira geral, há uma maior produção radicular em plantio direto que no preparo convencional, no entanto, a maior quantidade de raízes encontrada no plantio direto se concentrou nos primeiros 15 cm de solo.

De acordo com Moreira (1983), apesar do sistema radicular da soja poder atingir de 120 a 150 cm de profundidade, torna-se bastante superficial (70% a 80% nos primeiros 15 cm). Desta forma o autor destaca a resposta da cultura a freqüentes irrigações.

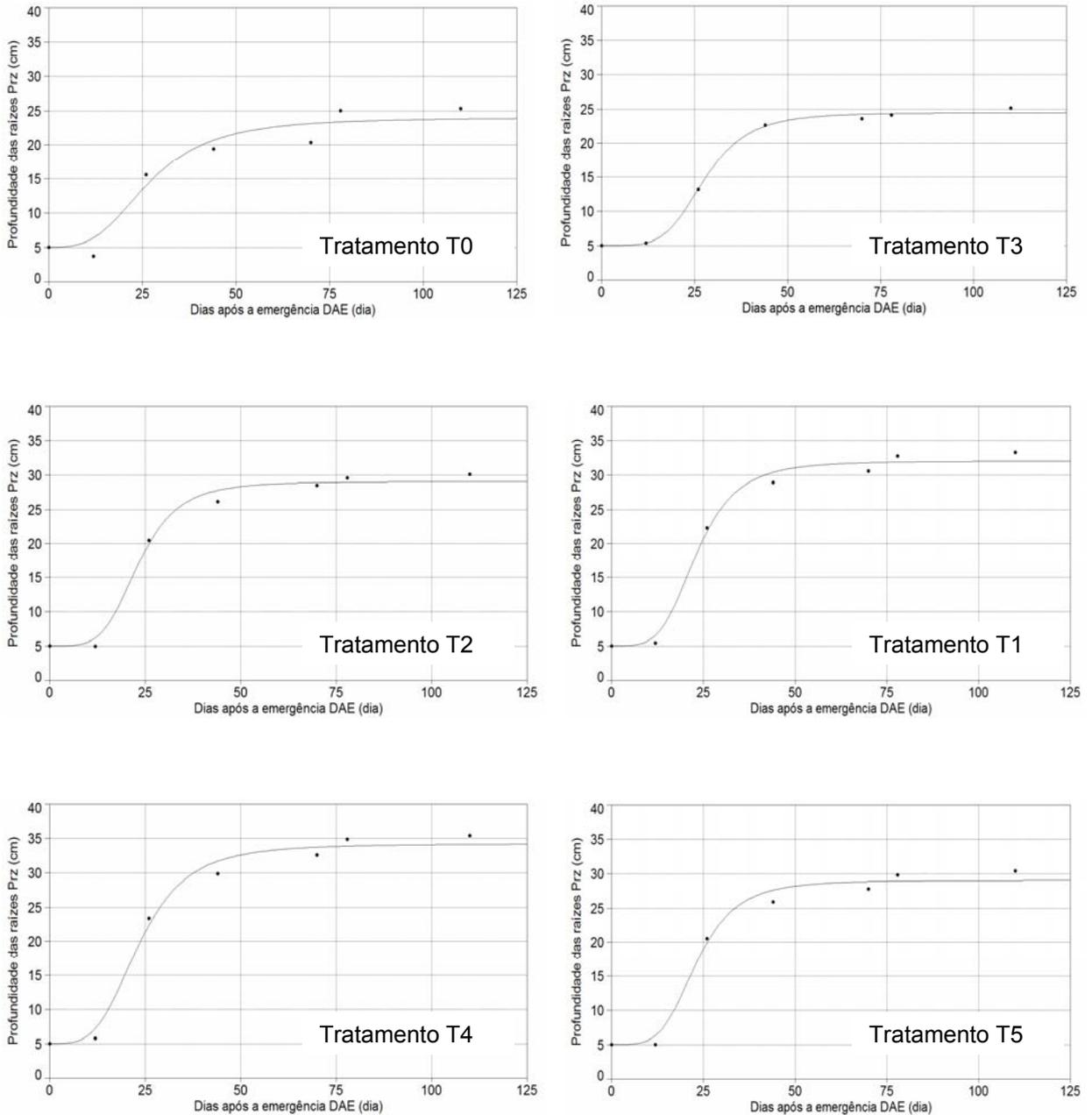


Figura 4.7 – Profundidade do sistema radicular (cm) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com o número de dias após a emergência para a cultivar de soja AL 55.

Cardoso et al. (2006) em estudo sobre profundidade do sistema radicular de duas cultivares de soja encontraram profundidade de 15 cm para a cultivar BR-16 e 25 cm para a cultivar Embrapa-4. Segundo Gandolfi et al. (1983) e Coale e Grove (1986) tanto na fase vegetativa quanto na fase reprodutiva embora a raiz principal e secundárias atinjam profundidades de até 185 cm, a maior parte das raízes se concentra nos 15 cm superficiais de solo.

4.4.4 Componentes de produção de grãos, produção de grãos e matéria seca total

Foram utilizados para os cálculos 10 plantas de cada tratamento ao final do ciclo de 137 dias após a emergência (DAE) para a cultivar de soja CD 219 e 110 dias após a emergência (DAE) para a cultivar de soja AL 55.

A tabela 4.13 apresenta os valores médios dos componentes de produção, matéria seca total e índice de colheita (IC) para a cultivar de soja CD 219 aos 137 DAE em cada estratégia de irrigação.

Tabela 4.13 – Valores médios dos componentes de produção, matéria seca total e índice de colheita (IC) para a cultivar de soja CD 219 aos 137 DAE.

<i>Tratamento</i>	<i>n°de legumes planta</i>	<i>n°de grãos legume</i>	<i>massa do grão g</i>	<i>massa de grãos planta</i>	<i>mat.seca total planta</i>	<i>IC</i>
0	35,64	2,43	0,127	11,00	41,84	0,26
1	40,96	2,50	0,137	14,03	46,52	0,30
2	42,46	2,51	0,137	14,60	49,94	0,29
3	42,15	2,50	0,143	15,07	51,10	0,29
4	41,87	2,52	0,143	15,09	53,03	0,28
5	46,09	2,53	0,142	16,56	54,34	0,30
Média	41,53	2,50	0,14	14,39	49,46	0,29
D. Padrão	3,38	0,04	0,01	1,86	4,61	0,02
CV (%)	8,14	1,42	4,45	12,94	9,32	5,25

Através da tabela 4.13, observou-se, que o aumento da lâmina de irrigação elevou os valores dos componentes de produção, com máximos valores encontrados nos tratamentos T3 e T4.

De acordo com a tabela 4.13, observou-se que o tratamento T5 apresentou os valores mais elevados para a maioria dos componentes de produção, com exceção do peso médio do grão. Os menores valores de componentes de produção foram evidenciados nos tratamentos T0 e T1.

O número de legumes por planta apresentou um valor médio de 41,53. Resultados similares foram obtidos por Navarro Júnior e Costa (2002) que encontraram este componente variando de 41 a 62 para seis cultivares de soja.

Neste trabalho obteve-se um valor médio de 2,50 grãos por legume. Segundo Mac Blain e Hume (1981) este componente é fortemente influenciado pelo fato que a maioria das cultivares modernas é selecionada para formar três óvulos por legume. Gubiane (2005) em estudo sobre o crescimento e rendimento da soja em Eldorado do Sul, RS para semeaduras em outubro, novembro e dezembro, obteve 1,96, 2,13 e 2,03 grãos por legume, respectivamente.

A massa seca do grão foi máxima nos tratamentos T3 e T4 (0,143 g) e mínima no tratamento T0 com 0,127 g. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Kuss (2006), na região de Santa Maria, RS, com valores médios de 0,15 e 0,14 para plantas irrigadas em todo o ciclo e irrigadas nos períodos críticos, respectivamente.

Pode-se observar superioridade no acúmulo de massa da matéria seca total nos tratamentos irrigados, principalmente nos tratamentos T3, T4 e T5 (51,10 g, 53,03 g e 54,34 g, respectivamente). Brandelero (2002) encontrou o valor de 51,6 g para a mesma época de semeadura (dezembro).

O IC médio encontrado foi 0,29. Os maiores valores de IC foram encontrados nos tratamentos 1 e 5 (0,30). Martorano (2007) trabalhando com diferentes manejos de irrigação em soja encontrou valores de IC que variaram de 0,36 a 0,55, para plantio direto não irrigado e plantio direto irrigado, respectivamente.

A partir dos dados da tabela 4.14, para cada estratégia de irrigação, foi estimada a produção de grãos e de matéria seca total, através das equações 3.5 e 3.6. A tabela 4.14 apresenta estes valores.

Tabela 4.14 – Produção de matéria seca total ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) em cada estratégia de irrigação para a cultivar de soja CD 219.

Tratamento	Volume Total de Água (precipitação e Irrigação) (mm)	Produção ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	
		Matéria Seca	Grãos (13%)
0	413,00	7748,5	2526,1
1	456,44	8374,8	2905,0
2	499,89	8989,0	3123,9
3	543,33	9197,8	3470,5
4	586,77	9546,2	3522,3
5	630,22	9781,9	3784,1
Média		8939,7	3222,0
D. Padrão		759,5	460,9
CV (%)		8,5	14,3

De acordo com a tabela 4.14 observou-se que a menor produção de grãos verificada foi de 2.526,1 kg.ha⁻¹, que corresponde ao tratamento T0, onde não ocorreu irrigação suplementar. A maior produção de grãos foi de 3.784,1 kg.ha⁻¹, que corresponde ao tratamento T5 onde foi aplicado 217,22 mm de irrigação suplementar, tendo um total de 630,22 mm de água com a precipitação mais a irrigação. A mesma tendência foi observada na produção de matéria seca total. As menores produções obtidas evidenciam a deficiência hídrica ocorrida nestes tratamentos (T0 e T1). Thomas e Costa (1994) observaram que o maior índice de área foliar e o maior período de enchimento de grãos proporcionaram maior produtividade de grãos por planta de soja no tratamento irrigado, em relação ao tratamento não irrigado. A produção de grãos nos tratamentos irrigados ficaram próximos aos de Herzog et al.(2004) para a cultivar Fepagro-RS10, que foram de 3.334 kg.ha⁻¹, sob condição irrigada.

A maior produção de grãos encontrada está acima da média nacional e da média do Estado do Rio Grande do Sul. As diferenças existentes entre os rendimentos de grãos obtidos em condições experimentais e as médias registradas nas lavouras comerciais no Estado, são atribuídas na sua maioria à ocorrência de deficiência hídrica durante o período crítico de desenvolvimento da cultura. Portanto, há necessidade de buscar estratégias para fugir de períodos de limitação hídrica, caso o objetivo seja aumentar o rendimento de grãos na sojicultura da região.

A tabela 4.15 apresenta os valores médios dos componentes de produção, matéria seca total e índice de colheita (IC) para a soja AL55 aos 117 DAE.

Tabela 4.15 – Valores médios dos componentes de produção, matéria seca total e índice de colheita (IC) para a cultura da soja AL 55 aos 117 DAE.

<i>Tratamento</i>	<i>n° de legumes</i>	<i>n° de graos</i>	<i>massa do grao</i>	<i>massa de graos</i>	<i>mat.seca total</i>	<i>IC</i>
	<i>planta</i>	<i>legume</i>	<i>g</i>	<i>planta</i>	<i>planta</i>	
0	54,21	2,33	0,109	13,77	42,36	0,33
1	63,87	2,00	0,117	14,95	49,01	0,31
2	46,02	2,80	0,123	15,85	49,53	0,32
3	49,70	2,48	0,124	15,28	50,11	0,31
4	46,57	2,86	0,122	16,25	51,59	0,32
5	52,26	3,00	0,106	16,62	56,34	0,30
Média	52,11	2,58	0,12	15,45	49,82	0,31
D.Padrão	6,58	0,38	0,01	1,03	4,52	0,01
CV (%)	12,63	14,64	6,57	6,65	9,07	3,58

Através da tabela 4.15, observou-se que o Tratamento T5 apresentou os valores mais elevados de número de grãos por legume (3,0), peso médio dos grãos por planta (16,25 g) e matéria seca total da planta (56,34 g).

Os menores valores de componentes de produção foram evidenciados nos Tratamentos T0 e T1, com exceção do número de legumes por planta e do peso médio do grão. O fato do peso médio do grão ser maior no tratamento não irrigado e irrigado 20% da Eto, pode ser atribuído a uma certa tolerância de alguns genótipos ao déficit hídrico.

O índice de colheita (IC) apresentou uma média de 0,31. Os valores encontrados foram semelhantes em todos os tratamentos o que demonstra que a deficiência de umidade no tratamento sem irrigação não influenciou na eficiência de translocação dos produtos da fotossíntese para os grãos, quando comparado com os tratamentos irrigados, apesar das produtividades distintas. Estes valores estão de acordo com os encontrados por Gomes (2007), que apresentou IC médios para as cultivares de soja transgênicas 8100 e Anta, de 0,30 e 0,34, respectivamente.

A partir dos dados na Tabela 4.15 foi estimada a produção de grãos e de matéria seca total, através das equações 3.5 e 3.6 para cada estratégia de irrigação. A tabela 4.16 apresenta estes valores.

Tabela 4.16 – Produção de matéria seca total ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) em cada estratégia de irrigação para a cultura da soja AL 55.

Tratamento	Volume Total de Água (precipitação e Irrigação) (mm)	Produção ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	
		Matéria Seca	Grãos (13%)
0	398,00	7625,2	2234,2
1	434,84	8821,0	2690,4
2	471,69	8914,8	2852,7
3	508,53	9019,6	2751,0
4	545,37	9285,8	2925,0
5	582,22	10140,3	2991,4
Média		8967,8	2740,8
D. Padrão		813,1	271,5
CV (%)		9,1	9,9

Em relação ao efeito da irrigação suplementar sobre a produtividade de grãos da soja, observou-se que nos tratamentos irrigados, foi crescente a produção (grãos e matéria seca), sendo os tratamentos T4 e T5, os que apresentaram os maiores

valores (tabela 4.16). Ainda analisando a tabela 4.16, notou-se que a produtividade média de grãos foi de 2.740,8 kg ha⁻¹, ou 46 sacos de soja.ha⁻¹, produtividade esta superior aos resultados encontrados para esta cultivar (AL 55) em experimento realizado em Cruz Alta, RS, nas safras de 2001/2002 e 2003/2004 com produção de grãos de 1.887 kg.ha⁻¹ e 1.665 kg.ha⁻¹, respectivamente e inferior ao resultado obtido na safra 2002/2003 que foi de 3.636 kg.ha⁻¹ (61 sacos de soja.ha⁻¹) (FUNDACEP, 2004). Este valor não difere da produtividade média do Estado do Rio Grande do Sul, que é de 2.570 kg.ha⁻¹ (43 sacos de soja.ha⁻¹), segundo estatísticas da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2010).

4.4.5 Parâmetros necessários para o modelo de produção potencial

Para a utilização do modelo de produção potencial das culturas foi necessário determinar para cada dia de cálculo os vários parâmetros que compõem o modelo proposto.

Tabela 4.17 – Radiação solar fotossinteticamente ativa Rc, taxa de produção potencial nos dias claros Pc e taxa de produção potencial nos dias nublados Po.

Dia	Rc (W.m⁻²)	Pc (kg .m⁻².dia⁻¹)	Po (kg .m⁻².dia⁻¹)
15	199,3	482,3	257,8
46	186,2	457,3	243,6
74	162,3	412,6	216,8
105	130,8	353,6	181,2
135	105,0	305,4	151,7
166	91,8	280,8	136,8
196	96,4	289,2	141,9
227	117,5	328,3	165,9
258	148,0	385,3	200,5
288	176,9	439,4	233,1
319	196,2	476,1	254,5
349	198,7	481,5	256,7

A tabela 4.17 demonstrou os valores radiação solar fotossinteticamente ativa, R_c , taxa de produção potencial nos dias claros P_c e taxa de produção potencial nos dias nublados P_o , para a localidade em estudo ($\varphi = 29^\circ 09' 32''$ S). Estes valores foram obtidos a partir dos dados de Doorenbos e Kassam (1994).

Analisando a tabela 4.17, observou-se que os valores de cada uma das variáveis que participa do modelo de produção proposto (R_c , P_c e P_o) em função do dia do ano diminuem a medida que se aproximam da metade do ano e voltam a crescer a partir da metade do ano de modo a se aproximarem do valor do início do ano, sugerindo que uma função do tipo senoidal se ajustaria adequadamente aos dados, de modo a permitir o cálculo dos valores de qualquer variável e em qualquer dia do ano.

A partir dos valores da distribuição da radiação solar fotossinteticamente ativa nos dias claros R_c , da taxa de produção potencial diária nos dias claros P_c e nublados P_o e dos dias do ano, apresentados na tabela 4.17, foram determinados os coeficientes de ajuste do modelo senoidal das variáveis R_c , P_c e P_o em função do dia do ano (calendário Juliano), expresso por:

$$y = a + b \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi t}{d} + c \right) \quad (4.4)$$

na qual a , b , c , d são coeficientes determinados pelo método dos mínimos quadrados.

A tabela 4.18 apresenta os coeficientes a , b , c , d e o coeficiente de determinação r^2 do modelo ajustado com o auxílio do programa computacional Table Curve versão 2.0 (Jandel Scientifics).

Na tabela 4.8, pode ser visto que os coeficientes de determinação (r^2) da distribuição da radiação solar fotossinteticamente ativa nos dias claros R_c , da taxa de produção potencial diária nos dias claros P_c e nublados P_o e dos dias do ano, são bastante elevados, o que indica a qualidade alta do ajuste entre as variáveis correlacionadas, o que pode se confirmado pelos valores dos coeficientes de determinação encontrados, em todos os casos superiores a 99,5%.

Tabela 4.18 – Coeficientes a , b , c , d e o coeficiente de determinação r^2 para as variáveis R_c , P_c e P_o em função do dia do ano para a latitude $29^\circ 09' 32''$ S.

y	a	b	c	d	r^2
R_c	145,596	54,243	1,241	330,282	0,998
P_c	381,597	101,742	1,430	331,546	0,996
P_o	197,204	61,010	1,397	328,148	0,997

4.5 Modelo de produção da cultura da soja

A figura 4.8 ilustra uma visualização do programa computacional utilizado para a cultura da soja (ROBAINA, 2009).

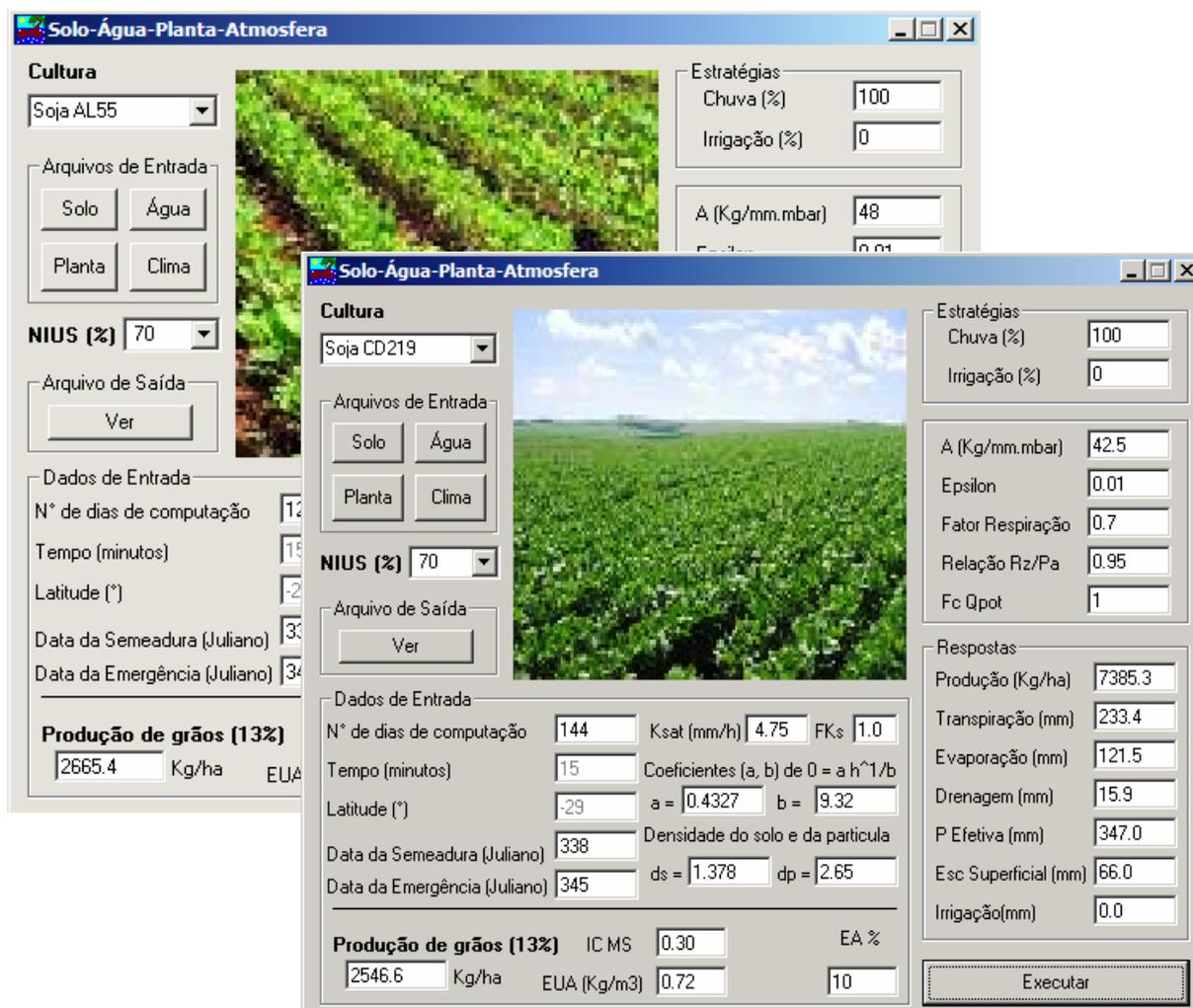


Figura 4.8 – Programa computacional utilizado para a cultura de soja.

Este programa permitiu a determinação dos componentes do balanço hídrico, tendo com base a solução da equação de Richards (1931) (equação 3.16) e a determinação da produção da matéria seca total (equação 3.12) e produção de grãos (equação 3.14).

4.5.1 Calibração do modelo

Para a calibração do modelo foram utilizados os valores de produção de matéria seca total e os valores de produção de grãos obtidos no tratamento T0, das duas cultivares de soja.

O processo de calibração do modelo de produção de soja foi baseado no processo de tentativa e erro, no qual foram atribuídos diferentes valores para os parâmetros coeficientes A e ε (equação 3.12) e o processo de calibração foi concluído quando a diferença entre os valores de produção de matéria seca obtidos através do modelo e os valores de produção de matéria seca obtidos através no experimento de campo foi a menor possível.

O resultado final do processo de calibração apresentou o valor $A = 42,5$, para a cultivar CD 219, e o valor de $A = 48,0$ para a cultivar AL 55. O valor de $\varepsilon = 0,01$ foi obtido para as duas cultivares.

A tabela 4.19 apresenta os resultados obtidos, com o tratamento T0 (100 % de chuva e 0% de irrigação), após a calibração, para as duas cultivares de soja.

Tabela 4.19 – Calibração dos valores de produção de matéria seca e de grãos obtidos após a calibração do tratamento T0 para as duas cultivares de soja.

Soja	Matéria Seca (kg.ha ⁻¹)			Grãos (kg.ha ⁻¹)		
	Experimento	Modelo	Δ %	Experimento	Modelo	Δ %
CD 219	7748,5	7490,7	3,4	2277,0	2247,2	1,3
AL 55	7625,2	7984,5	-4,5	2478,6	2753,3	-9,9

Na tabela 4.19, observou-se que a diferença na produção de matéria seca e de grãos, para a cultivar de soja CD 219, foi de 3,4% e 1,3%, respectivamente.

Pode-se observar ainda na tabela 4.19, que para a cultivar de soja AL 55, a diferença na produção de matéria seca e de grãos foi de -4,5% e -9.9%, respectivamente.

4.5.2 Teste do modelo

O teste do modelo se refere à avaliação da capacidade de fornecer a previsão da produção de matéria seca e de grãos.

Após a calibração do modelo pelo Tratamento T0, realizou-se o teste da capacidade do mesmo em reproduzir os valores de produção para os demais tratamentos. Para verificar o desempenho do modelo de produção das duas cultivares de soja (CD 219 e AL 55), os valores da produção de matéria seca e da produção de grãos, obtidos com a utilização do modelo de produção, foram comparados com os valores da produção de matéria seca e da produção de grãos obtidos em experimento de campo.

Os resultados encontrados através dos dois procedimentos para cada cultura e em cada tratamento podem ser encontrados na tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Comparação dos valores de produção de matéria seca total e de produção de grãos obtidos pelo modelo de produção e no experimento de campo para as duas cultivares de soja.

Cultivar	Tratamento	Matéria Seca (kg . ha ⁻¹)			Grãos (kg . ha ⁻¹)		
		Experimento	Modelo	Δ %	Experimento	Modelo	Δ %
CD 219	1	8374,4	7918,2	5,8	2904,2	2730,4	6,4
	2	8988,6	8393,3	7,1	3022,2	2894,2	4,4
	3	9198,0	8794,5	4,6	3119,5	3032,6	2,9
	4	9545,5	9073,9	5,2	3123,6	3128,9	-0,2
	5	9781,1	9272,4	5,5	3427,9	3197,4	7,2
AL 55	1	8821,0	8398,1	7,4	2751,0	2895,9	-5,0
	2	8914,8	8801,7	5,5	2925,0	3035,1	-3,6
	3	9019,6	9124,7	-2,3	2852,7	3146,4	-9,3
	4	9285,8	9364,1	-5,8	2690,4	3229,0	-16,7
	5	10140,3	9530,4	6,4	2991,4	3286,4	-8,9

Analisando os valores que constam na tabela 4.20, observou-se que a diferença entre os valores da produção de matéria seca variaram entre -2,3 a 7,4%, sendo que os valores de produção de grãos apresentaram variação de -0,2 a -16,7%. O Tratamento T3, para a produção de matéria seca, foi o que apresentou menor variação, tanto para a cultivar CD 219 como para a AL 55 (4,6 e -2,3%, respectivamente).

No que se refere, a produção de grãos da cultivar CD 219, o tratamento T4 foi o que apresentou menor variação (-0,2%) e para a cultivar AL 55, a menor variação ocorreu no tratamento T2 (-3,6%).

Fontana et al. (2001) parametrizaram e validaram o modelo multiplicativo de Jensen modificado para a estimativa do rendimento da cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul, em condições de lavoura. Utilizaram o modelo completo (abrange todo o ciclo da cultura) e o modelo reduzido (somente o período crítico da cultura à água). Ambos apresentaram desempenho muito bom e semelhante, com diferenças médias do estimado em relação ao observado de 8% e 6%, respectivamente.

Ferreira et al. (2007) testaram um modelo agrometeorológico de simulação dinâmico, mecanístico e determinístico para verificar o efeito do clima sobre a cultura da soja. A produtividade da soja, representada pela produtividade de grãos, para os anos agrícolas 1995/96 e 1996/97, apresentou diferenças em relação aos dados observados de, respectivamente, -14,4% e -7,3%.

Moraes et al. (1998), ao avaliar o desempenho de modelos agrometeorológicos, baseados na penalização da produtividade por deficiência hídrica para algumas safras de soja na região de Ribeirão Preto, SP, constataram que o modelo proposto por Doorenbos e Kassam (1979), o mesmo incorporado ao SPSoja - Agritempo, também tendeu a superestimar a produtividade medida em campo. Assad et al. (2007), utilizaram este modelo na safra 2003/2004 e concluíram que houve subestimativa de 12,5%, na Região Sul, ano em que o SPSoja-Agritempo apresentou sensibilidade excessiva à deficiência hídrica, o que penaliza em demasia a produtividade.

Para reforçar a validação do modelo de produção foram determinados os coeficientes linear e angular da reta de regressão dos valores de matéria seca e de grãos obtidos por simulação (x) e os valores de matéria seca obtidos no experimento

de campo (y). Os resultados podem ser observados na tabela 4.21, onde constam também o coeficiente de determinação r^2 .

Tabela 4.21 – Valores do coeficiente linear a , coeficiente angular b , coeficiente de determinação r^2 , coeficiente de correlação r , índice de concordância e índice de desempenho obtidos na comparação entre a produção de matéria seca e de grãos obtidos em experimento de campo e pelo modelo de produção para os diferentes tratamentos na cultura da soja CD 219 e AL 55.

	Produção (kg.ha ⁻¹)	a	b	r ²	r	lw	ld	Desempenho
CD 219	Matéria Seca	563,29	0,9912	0,9828	0,9914	0,7435	0,74	Bom
	Grãos	351,53	0,9237	0,7939	0,8910	0,9998	0,89	Ótimo
AL 55	Matéria Seca	602,63	0,9547	0,6553	0,8095	0,9987	0,81	Muito Bom
	Grãos	780,71	0,6610	0,7045	0,8393	0,9989	0,84	Muito Bom

De acordo com a tabela 4.21 verificou-se que os valores do coeficiente de correlação foram todos maiores que 80%, evidenciando a forte correlação entre as duas formas de obtenção dos parâmetros que foram comparados (matéria seca total e de grão) para as duas cultivares de soja.

Os valores do índice de concordância variaram entre 74 e 100%, aproximadamente. Este índice mostra uma concordância muito forte entre os valores da produção de matéria seca e de grãos para a cultivar AL 55 e para a produção de grãos para a cultivar CD 219. Para essa cultivar, o índice de concordância apresentou o menor resultado (0,7435).

Os valores do índice de desempenho variaram entre 74 e 89%, evidenciando que os valores de matéria seca e de grão, para as duas cultivares de soja, obtidos pelo modelo de simulação apresentaram uma forte aderência aos valores de matéria seca e de grãos obtidos no experimento de campo.

As classes de desempenho obtidas foram de bom a ótimo, sendo bom para matéria seca e ótimo para a produção de grãos da cultivar CD 219 e muito bom para a produção de matéria seca e de grãos para a cultivar de soja AL 55.

A figura 4.9 mostra, na forma gráfica, a correlação entre os dois procedimentos de obtenção da produção de matéria seca e da produção de grãos, para as duas cultivares de soja.

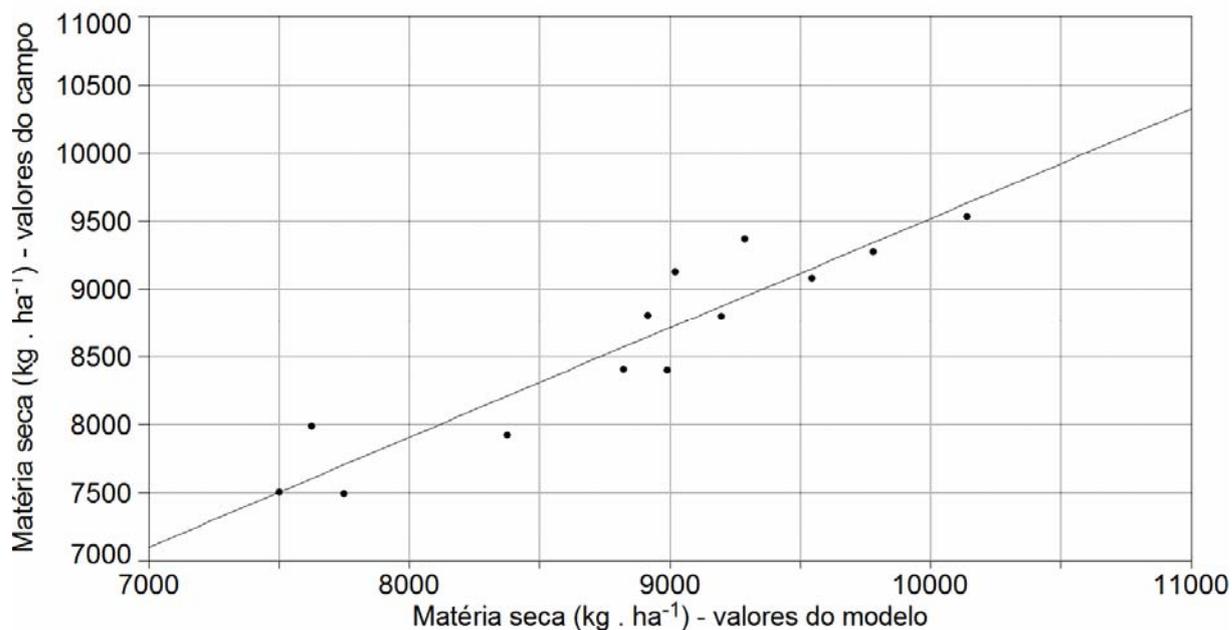


Figura 4.9 – Valores de produção de matéria seca total (kg.ha⁻¹) obtida em experimento de campo e valores de matéria seca total (kg.ha⁻¹) estimados pelo modelo de produção para a cultura da soja CD 219 e AL 55.

4.5.3 Aplicação do modelo de produção da soja

O modelo de produção da soja foi utilizado para determinar a resposta da produção de matéria seca e de grão a diferentes estratégias de irrigação e regime de chuvas (condições simuladas). Para efetuar a simulação do balanço hídrico, considerou-se o perfil de solo de 0,50 m, por ser a profundidade média aproximada, onde se encontrava o maior volume de raízes, tanto para a cultivar CD 219 como a AL 55. Foram levados em consideração os valores de capacidade de campo (*CC*) e ponto de murcha permanente (*PMP*) obtidos na curva de retenção média do perfil do solo.

4.5.3.1 Simulação do balanço hídrico – Soja CD 219

A tabela 4.22 apresenta os valores encontrados para os componentes do balanço hídrico nas diferentes estratégias de irrigação estudadas.

Tabela 4.22 – Valores simulados dos componentes do balanço hídrico (mm) em diferentes estratégias de irrigação para a cultura da soja CD 219.

Fração de Chuva (%)	I (%)	P (mm)	I (mm)	ES (mm)	ER (mm)	TR (mm)	ETr (mm)	Dr (mm)	ΔS (mm)	CC (%)
100	0	347,0	0,0	66,0	122,7	240,5	363,2	15,7	118,1	78,7
	25	347,0	54,3	66,0	146,1	268,8	414,9	18,1	118,3	78,9
	50	347,0	108,6	66,0	157,6	293,6	451,2	23,3	131,1	87,4
	75	347,0	162,9	66,0	166,8	309,0	475,8	31,8	152,3	101,5
	100	347,0	217,2	66,0	172,9	317,7	490,6	45,8	177,8	118,5
75	0	289,1	0,0	20,6	109,9	209,5	319,4	11,2	108,5	72,3
	25	289,1	54,3	20,6	133,9	238,8	372,7	12,4	108,3	72,2
	50	289,1	108,6	20,6	145,9	266,7	412,6	15,2	119,9	79,9
	75	289,1	162,9	20,6	155,9	286,1	442,0	20,2	139,8	93,2
	100	289,1	217,2	20,6	163,3	298,2	461,5	28,9	165,9	110,6
50	0	198,2	0,0	8,3	84,8	154,2	239,0	8,8	100,4	66,9
	25	198,2	54,3	8,3	109,6	184,3	293,9	9,1	99,5	66,3
	50	198,2	108,6	8,3	122,7	215,6	338,3	10,1	108,4	72,3
	75	198,2	162,9	8,3	133,6	238,6	372,2	12,0	126,9	84,6
	100	198,2	217,2	8,3	142,9	255,0	397,9	15,8	151,7	101,1
25	0	101,6	0,0	1,7	57,4	88,8	146,2	8,4	97,0	64,7
	25	101,6	54,3	1,7	82,5	119,0	201,5	8,5	95,9	63,9
	50	101,6	108,6	1,7	96,3	153,0	249,3	8,9	102,0	68,0
	75	101,6	162,9	1,7	107,7	179,3	287,0	9,8	117,7	78,5
	100	101,6	217,2	1,7	117,9	197,6	315,5	11,8	141,5	94,3

A figura 4.10 mostra a distribuição dos componentes do balanço hídrico obtidos na simulação de cada estratégia de irrigação.

Observou-se que os componentes do balanço hídrico foram influenciados pelas diferentes estratégias de irrigação simuladas e as diferentes frações de chuva.

A precipitação e o escoamento superficial mantiveram-se constantes em cada fração de chuva analisada, mas aumentaram à medida que aumentou a fração de chuva. Já a irrigação, evaporação do solo, transpiração e drenagem aumentaram à medida que aumentou a estratégia de irrigação e a fração de chuva.

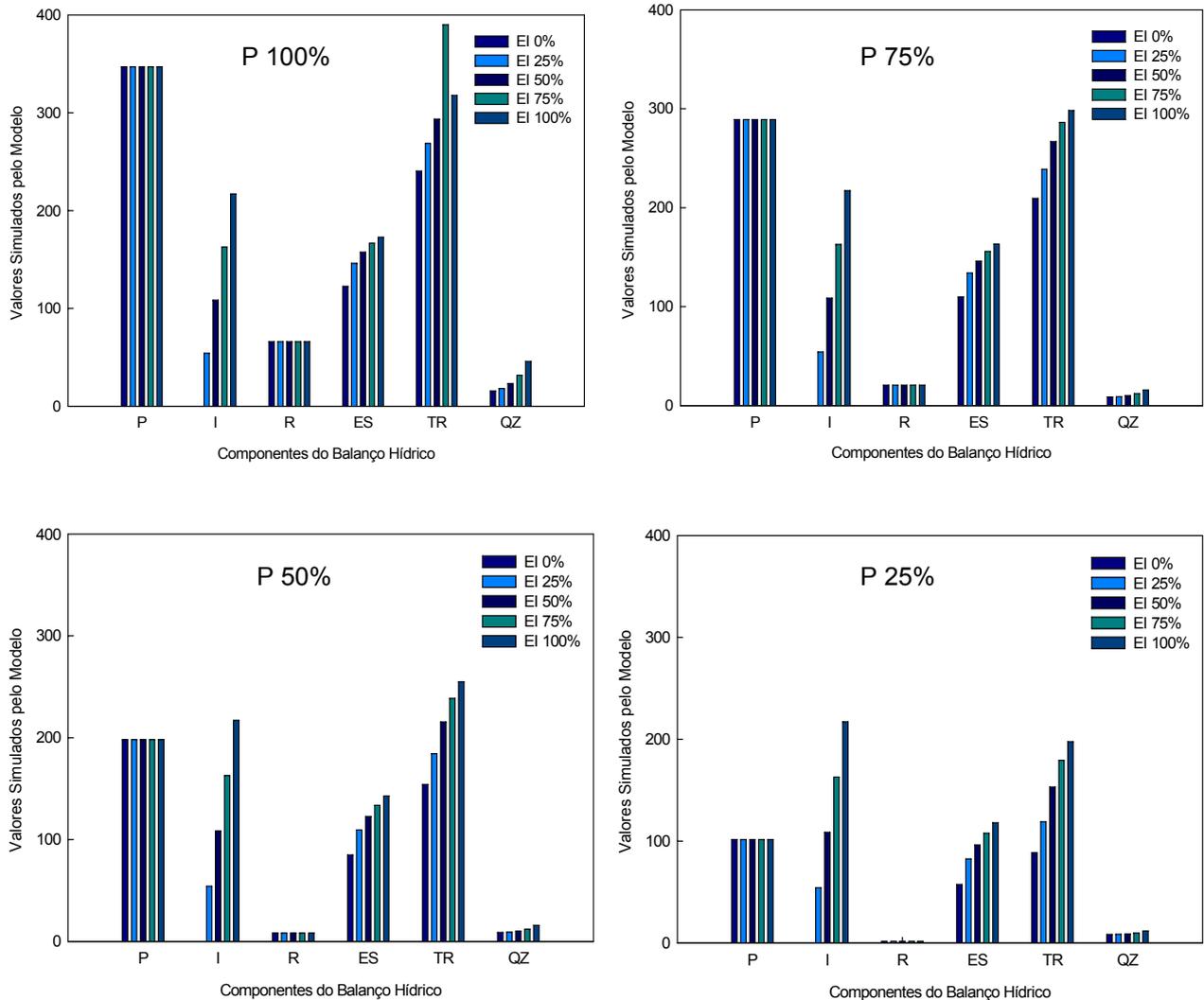


Figura 4.10 – Distribuição dos componentes do balanço hídrico (mm) simulados em cada estratégia de irrigação (EI) para a cultura da soja CD 219.

Analisando ainda a figura 4.10, verificou-se a elevada precipitação ocorrida em 100% de chuva (precipitação ocorrida no experimento de campo). O valor de 347 mm ocorrido está dentro da faixa aceitável descrita por diversos autores, para a obtenção de produtividade satisfatória na cultura da soja, como cita Mota e Agendes (1989), levando sempre em consideração as características climáticas ocorridas (Doorenbos e Kassan, 1994).

A figura 4.11 ilustra o armazenamento de água em cada estratégia de irrigação e frações de chuva simuladas.

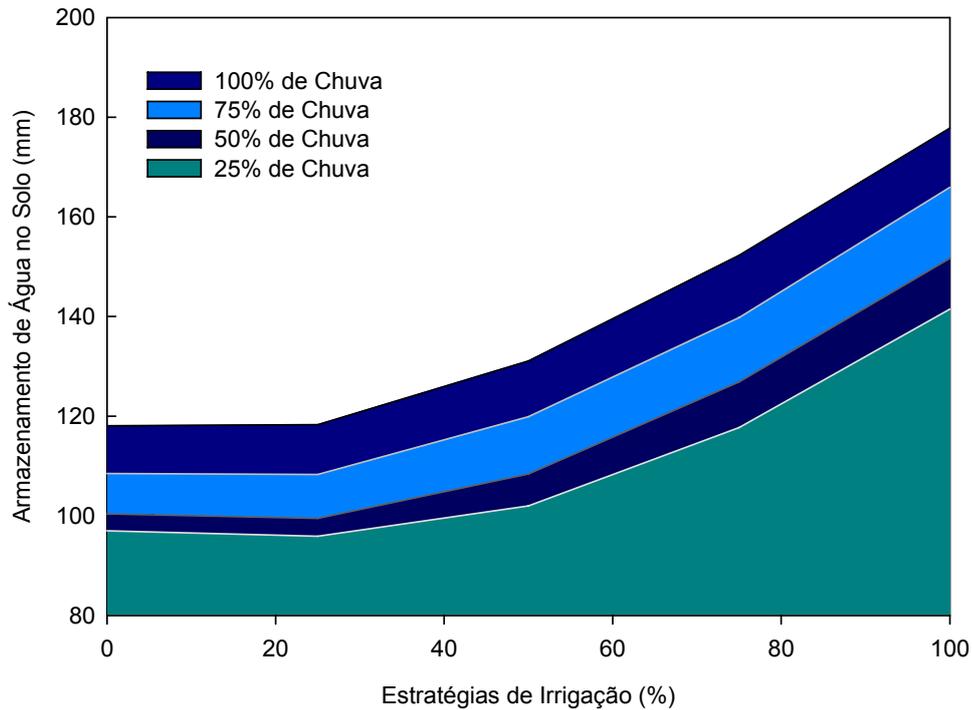


Figura 4.11 – Armazenamento de água em cada estratégia de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas para a cultura da soja CD 219.

De acordo com a figura 4.11 observou-se que o aumento nas lâminas de irrigação e frações de chuva, resultou em aumento no armazenamento de água no solo. As estratégias de irrigação de 0% e 25% expressaram semelhança no armazenamento de água, sendo que as demais responderam em acréscimos no armazenamento. Esta mesma tendência pode ser observada nos valores de *CC* (%), necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo, isto faz com que aumente a quantidade de água disponível às plantas, fato de extrema importância. As menores frações de chuva e de irrigação ocasionaram baixa disponibilidade de água às plantas, com relação a *CC*.

4.5.3.2 Simulação da produção de matéria seca e grãos – Soja CD 219

A tabela 4.23 apresenta os valores de total de água aplicada (mm), precipitação efetiva (mm), produção de matéria seca ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) para a cultivar de soja CD 219, obtidos em função da transpiração diária fornecida pelo modelo de extração de água no solo pelas raízes das plantas.

Tabela 4.23 – Total de água aplicada (irrigação e precipitação - mm), precipitação efetiva (mm), produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e produção de matéria seca ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) obtidos na simulação de diferentes lâminas de irrigação para a cultura da soja CD 219.

Fração de Chuva (%)	Irrigação (%)	Total de água aplicada (mm)	Precipitação efetiva (mm)	Prod. MS ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Prod. Grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
100	0	347,0	347,0	7670,9	2645,1
	25	401,3	347,0	8492,2	2928,4
	50	455,6	347,0	9233,0	3183,8
	75	509,9	347,0	9708,1	3347,6
	100	564,2	347,0	9981,9	3442,0
	Média			9017,2	3109,4
	D.P.			941,1	324,5
	CV (%)		10,4	10,4	
75	0	289,1	289,1	6699,6	2310,2
	25	343,4	289,1	7555,2	2605,2
	50	397,7	289,1	8379,4	2889,4
	75	452,0	289,1	8976,4	3095,3
	100	506,3	289,1	9360,2	3227,6
	Média			8194,2	2825,5
	D.P.			1077,9	371,7
	CV (%)		13,2	13,2	
50	0	198,2	198,2	4947,4	1706,0
	25	252,5	198,2	5827,6	2009,5
	50	306,8	198,2	6751,6	2328,1
	75	361,1	198,2	7443,9	2566,9
	100	415,4	198,2	7958,4	2744,3
	Média			6585,8	2271,0
	D.P.			1215,2	419,1
	CV (%)		18,5	18,5	
25	0	101,6	101,6	2849,1	982,5
	25	155,9	101,6	3731,0	1286,5
	50	210,2	101,6	4735,8	1633,0
	75	264,5	101,6	5521,7	1904,0
	100	318,8	101,6	6087,2	2099,0
	Média			4585,0	1581,0
	D.P.			1313,3	452,8
	CV (%)		28,6	28,6	

De acordo com a tabela 4.23, verificou-se, que as frações de chuva de 100%, 75%, 50% e 25% apresentaram coeficiente de variação de 10,4%, 13,2%, 18,5% e 28,6%, respectivamente. Segundo a classificação de Pimentel-Gomes e Garcia (2002), os valores são considerados baixos quando inferiores a 10%, médios entre 10 a 20%, altos quando os valores encontram-se entre o intervalo de 20 a 30% e, muito alto quando superior a 30%. Portanto, as estratégias de irrigação, independente da fração de chuva apresentaram variabilidade inferior a 20% nas produções simuladas, exceto na fração de chuva de 25%, que apresentou alta variabilidade. Estes resultados demonstram que o rendimento da soja é variável em função das diferentes estratégias de irrigação.

Verificou-se que os rendimentos encontrados foram acima da média do Estado do Rio Grande do Sul quando aplicou-se um total de 198,2 mm e acima da média Nacional quando o total de água aplicada foi 289,1 mm. No entanto, a produtividade foi máxima foi de 3.442 kg.ha⁻¹ quando se aplicou-se 564,2 mm. Este resultado está em conformidade com os obtidos por Franke e Dorfman (2000), que verificaram necessidade de irrigação suplementar para a cultura da soja atingir o seu potencial produtivo variando entre 317,9 e 572,1 mm na região das Missões. Estes autores relatam ainda que essa ampla variação é dependente da época de semeadura e do nível de manejo da irrigação, pois quanto maior a coincidência entre o período de máxima exigência hídrica da cultura e o período de máxima demanda evaporativa do ambiente, maiores são as necessidades de irrigação suplementar, e vice-versa.

As figuras 4.12 e 4.13 mostram o comportamento das estratégias de irrigação e frações de chuva simuladas, na produção de grãos e na produção de matéria seca da cultivar de soja CD 219.

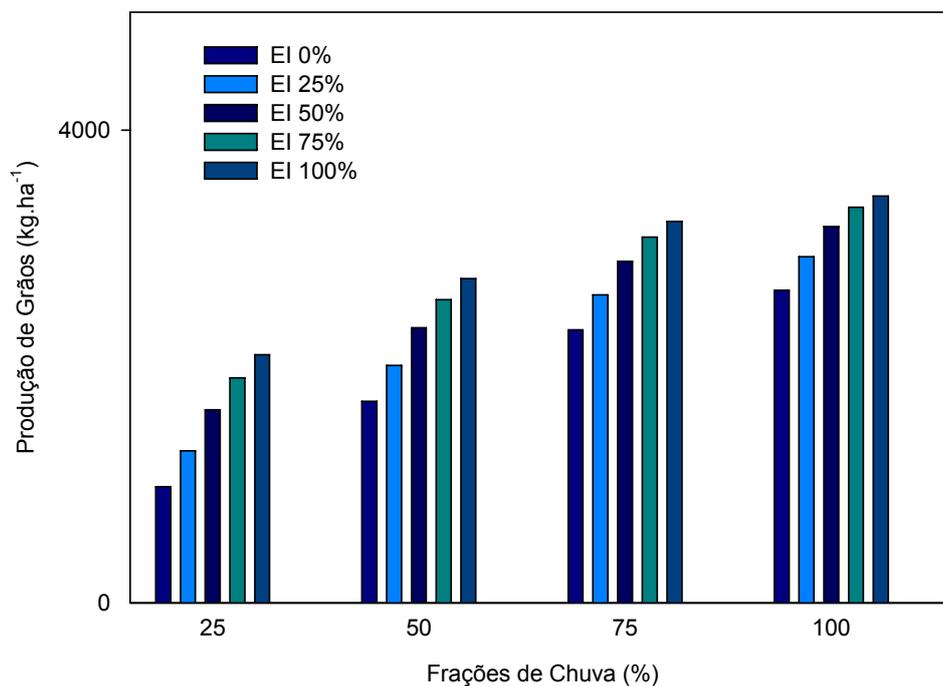


Figura 4.12 – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de grãos (kg.ha⁻¹) da cultura da soja CD 219.

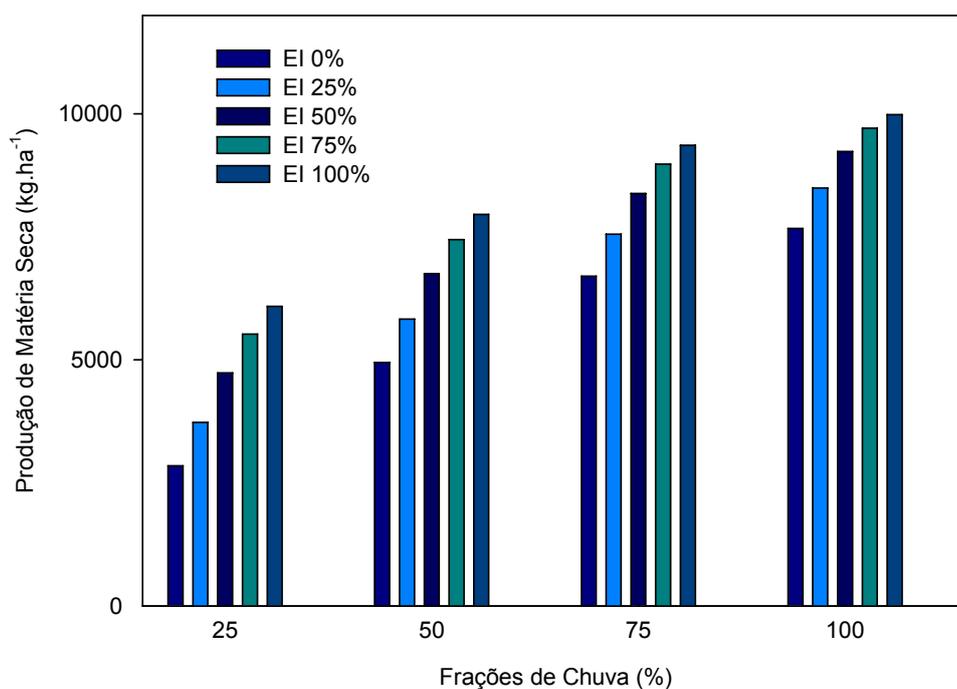


Figura 4.13 – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de matéria seca (kg.ha⁻¹) cultura da soja CD 219.

Através das figuras 4.12 e 4.13, observou-se que o aumento nas frações de chuva e estratégias de irrigação ocasionaram um aumento na produtividade de grãos e matéria seca para a cultivar de soja CD 219, ou seja, quando diminui a umidade do solo, diminuíram os valores das produções, pois diminuiu a água disponível no solo em relação à capacidade de campo (CC) (tabela 4.23).

A figura 4.14 representa a relação entre a produção de grãos e a evapotranspiração real (ETr) calculada a partir da simulação dos componentes do balanço hídrico para a cultivar de soja CD 219 nas diferentes estratégias de irrigação e a fração de chuva.

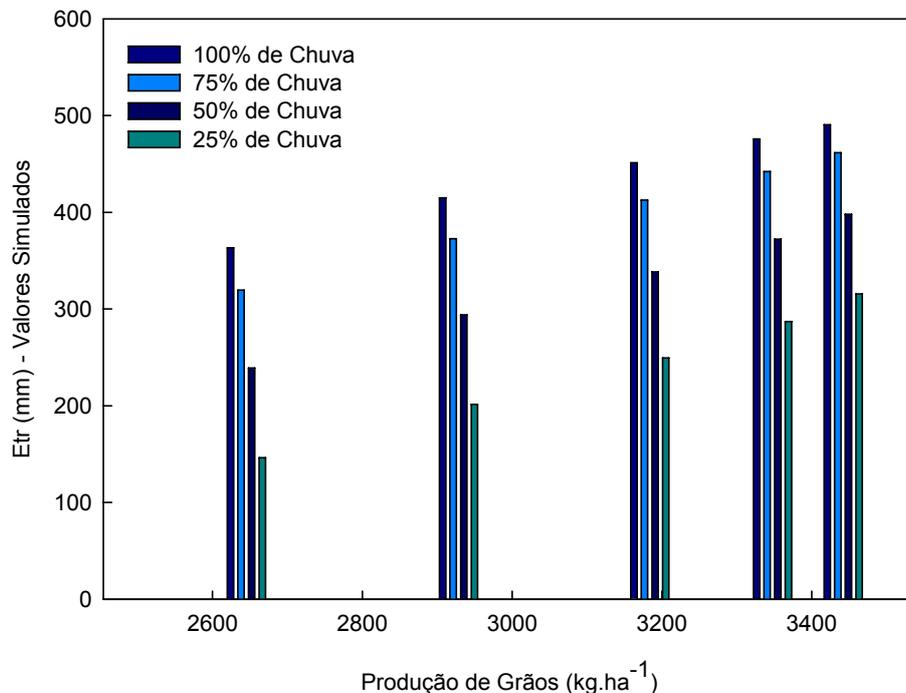


Figura 4.14 – Evapotranspiração real (mm) para diferentes estratégias de irrigação (EI) e fração de chuva (%) para a cultura da soja CD 219.

Através da figura 4.14, constatou-se um expressivo aumento da produção de grãos com o aumento da ETr. Este fato pode ser explicado pelo aumento da disponibilidade hídrica, que elevou os valores de evaporação do solo e transpiração pelas plantas. O rendimento de uma cultura sempre será aumentado quando a evapotranspiração for inferior a fração de água disponível no solo, em qualquer fase de desenvolvimento da planta.

4.5.3.3 Eficiência de uso da água – Soja CD 219

A tabela 4.24 apresenta os valores de eficiência do uso da água (EUA) e eficiência de aplicação de água (EAP), obtidos com relação à produção de grãos e a produção de matéria seca nas diferentes estratégias de irrigação simuladas para a cultura da soja CD 219.

Tabela 4.24 – Valores eficiência de uso da água obtidos para a produção de grãos (EUA/GR), eficiência de uso da água obtidos para a produção de matéria seca (EUA/MS), eficiência de aplicação da água obtidos para a produção de grãos (EAP/GR) e eficiência de aplicação da água obtidos para a produção de matéria seca (EAP/MS) encontrados para diferentes lâminas de irrigação na simulação para a cultura da soja CD 219.

Fração de Chuva (%)	Irrigação (%)	Eficiência de uso (Kg/m ³)		Eficiência de aplicação (Kg/m ³)	
		Matéria Seca	Grãos	Matéria Seca	Grãos
100	0	3,19	1,10	2,21	0,76
	25	3,16	1,09	2,12	0,73
	50	3,14	1,08	2,03	0,70
	75	3,14	1,08	1,90	0,66
	100	3,14	1,08	1,77	0,61
75	0	3,20	1,10	2,32	0,80
	25	3,16	1,09	2,20	0,76
	50	3,14	1,08	2,11	0,73
	75	3,14	1,08	1,99	0,68
	100	3,14	1,08	1,85	0,64
50	0	3,21	1,11	2,50	0,86
	25	3,16	1,09	2,31	0,80
	50	3,13	1,08	2,20	0,76
	75	3,12	1,08	2,06	0,71
	100	3,12	1,08	1,92	0,66
25	0	3,21	1,11	2,80	0,97
	25	3,14	1,08	2,39	0,83
	50	3,10	1,07	2,25	0,78
	75	3,08	1,06	2,09	0,72
	100	3,08	1,06	1,91	0,66

Na tabela 4.24, verificou-se que os valores de EUA apresentaram variações de 1,06 a 1,11 kg.m⁻³ para a produção de grãos e de 3,08 a 3,21 kg.m⁻³ para a produção de matéria seca. A eficiência do uso da água (EUA) representa a quantidade de CO₂ fixado para a produção de matéria seca em função da quantidade de água transpirada. Desse modo, as plantas que conseguem realizar elevada taxa fotossintética transpirando pouca água é considerada uma planta eficiente no uso desse recurso (FLOSS, 2008).

Gomes (2007) trabalhou com diferentes estratégias de irrigação na região de Santiago, RS, com a cultura da soja, cultivar Anta, no ano agrícola 2004/2005. Encontrou valores de eficiência do uso da água para matéria seca com média de 0,94. Esta autora encontrou os maiores valores obtidos de EUA para a cultura, foram nos tratamentos que obtiveram maior produção de grãos, com valores de 1,06 e 1,09. Os menores valores foram de 0,78 e 0,87, para o tratamento não irrigado e para a maior lâmina de água aplicada (120%). Observou-se que a máxima EUA correspondeu à maior produção de grãos.

O melhor desempenho para a EUA foi observado para o total de água aplicada em torno de 500 mm e produção de grãos acima de 3.000 kg.ha⁻¹. Os piores resultados para EUA foram encontrados nas situações extremas, ou seja, com o total de água aplicada abaixo de 400 mm.

Bergonci et al. (2001) relataram aumento na EUA (redução de custos), se a irrigação for feita somente no período crítico, com doses de rega entre 60 e 80% daquela necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo.

Já a EAP, variou entre 0,61 a 0,97 kg.m⁻³ para a produção de grãos e 1,77 a 2,80 kg.m⁻³ para a produção de matéria seca. Para Zocoler et al. (2001) a eficiência de aplicação é definida pela relação entre a quantidade de água incorporada ao solo até a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura e a quantidade de água aplicada. Esse índice incorpora a eficiência de distribuição e a eficiência em potencial de aplicação, dando idéia das perdas de água por percolação e evaporação.

A EAP apresentou um crescimento até a estratégia de irrigação de 50%, tanto para a produção de grãos, como para a produção de matéria seca. Em todas as frações de chuva, observou-se que as estratégias de irrigação de 75% e 100%, estratégias estas que apresentaram os maiores valores de total de água aplicado

(irrigação e precipitação – mm), obtiveram os menores valores de EAP (tabelas 4.23 e 4.24).

A figura 4.15 mostra o comportamento da eficiência de aplicação de água (EAP) obtida para a produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) em relação ao total de água aplicada (mm) para a cultivar de soja CD 219.

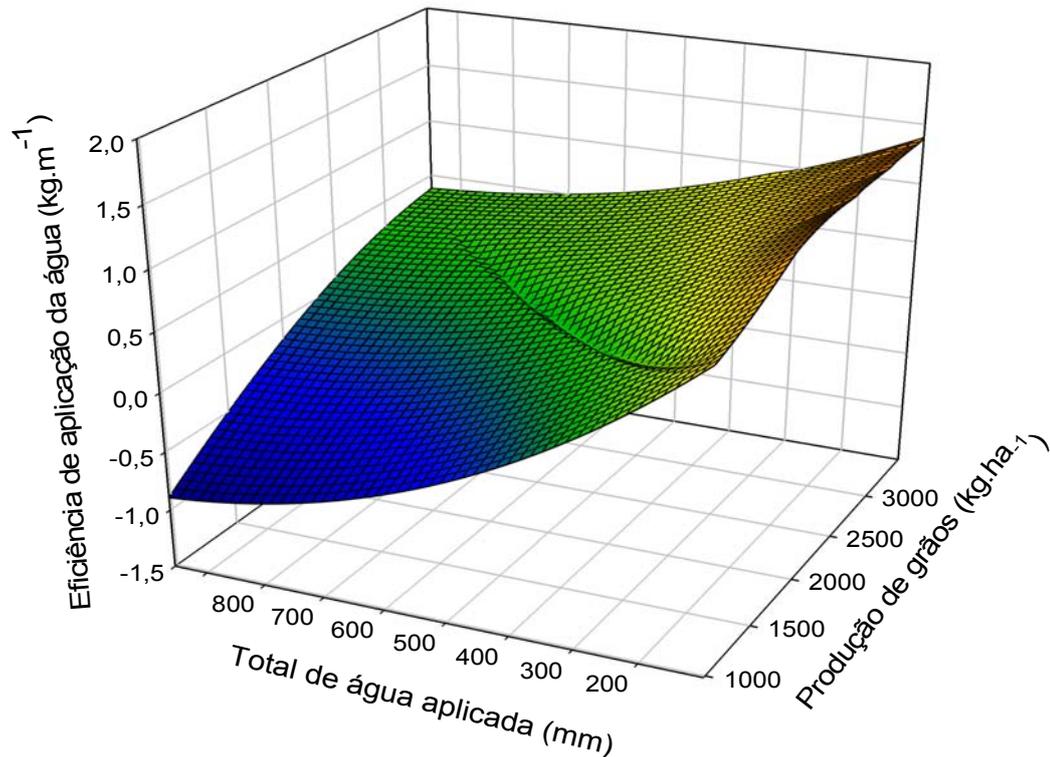


Figura 4.15 - Relação entre a eficiência de aplicação da água ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) e o total de água aplicada (mm) obtida para produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) na cultura da soja CD 219.

Através da figura 4.15, verificou-se que o melhor desempenho da EAP observado foi quando além da precipitação se adicionou uma irrigação suplementar de 25%, com valores de total de água aplicado variando entre 250 a 400 mm. O gráfico demonstra existir uma área central com EAP que inclui todos os valores de total de água aplicados e produtividades de grãos. O mesmo comportamento foi observado em EAP para a produção de matéria seca. (tabelas 4.23 e 4.24). Os maiores valores de total de água aplicado que resultaram em produtividade de grão elevada não representaram a maior eficiência de aplicação de água.

4.5.3.4 Simulação do balanço hídrico - Soja AL 55

A tabela 4.25 apresenta os valores encontrados para os componentes do balanço hídrico nas diferentes estratégias de irrigação estudadas para a cultivar de soja AL 55.

Tabela 4.25 – Valores simulados dos componentes do balanço hídrico (mm) em diferentes estratégias de irrigação para a cultura da soja – AL 55.

Fração de Chuva (%)	I (%)	P (mm)	I (mm)	ES (mm)	ER (mm)	TR (mm)	ETR (mm)	Dr (mm)	ΔS (mm)	CC %
100	0	336,2	0,0	61,8	121,7	222,8	344,5	13,7	128,0	85,3
	25	336,2	46,1	61,8	140,1	238,9	379,0	15,4	137,9	91,9
	50	336,2	92,1	61,8	148,5	253,4	401,9	19,5	156,9	104,6
	75	336,2	138,2	61,8	155,0	263,5	418,5	26,2	179,7	119,8
	100	336,2	184,2	61,8	159,9	269,9	492,8	36,9	203,7	135,8
75	0	280,2	0,0	18,3	107,9	196,5	304,4	10,2	115,6	77,1
	25	280,2	46,1	18,3	127,5	213,1	340,6	11,1	124,6	83,1
	50	280,2	92,1	18,3	136,9	229,5	366,4	13,2	142,7	95,1
	75	280,2	138,2	18,3	144,1	242,6	386,7	17,1	164,6	109,7
	100	280,2	184,2	18,3	150,0	252,1	402,1	23,7	188,6	125,7
50	0	191,5	0,0	7,5	82,0	146,9	228,9	8,3	104,3	69,5
	25	191,5	46,1	7,5	102,9	164,0	266,9	8,6	112,1	74,7
	50	191,5	92,1	7,5	114,0	181,6	295,6	9,3	128,7	85,8
	75	191,5	138,2	7,5	122,7	197,0	319,7	10,9	149,1	99,4
	100	191,5	184,2	7,5	129,7	209,7	339,4	13,8	172,5	115,0
25	0	97,8	0,0	1,7	54,9	85,3	140,2	8,1	99,5	66,3
	25	97,8	46,1	1,7	76,6	103,0	179,6	8,1	106,2	70,8
	50	97,8	92,1	1,7	88,9	122,0	210,9	8,4	120,6	80,4
	75	97,8	138,2	1,7	98,7	138,4	237,1	9,2	139,7	93,1
	100	97,8	184,2	1,7	106,6	152,1	258,7	10,2	163,1	108,7

A tabela 4.25 mostrou a distribuição dos componentes do balanço hídrico simulados em cada estratégia de irrigação.

A figura 4.16 mostra a distribuição dos componentes do balanço hídrico obtidos na simulação de cada estratégia de irrigação.

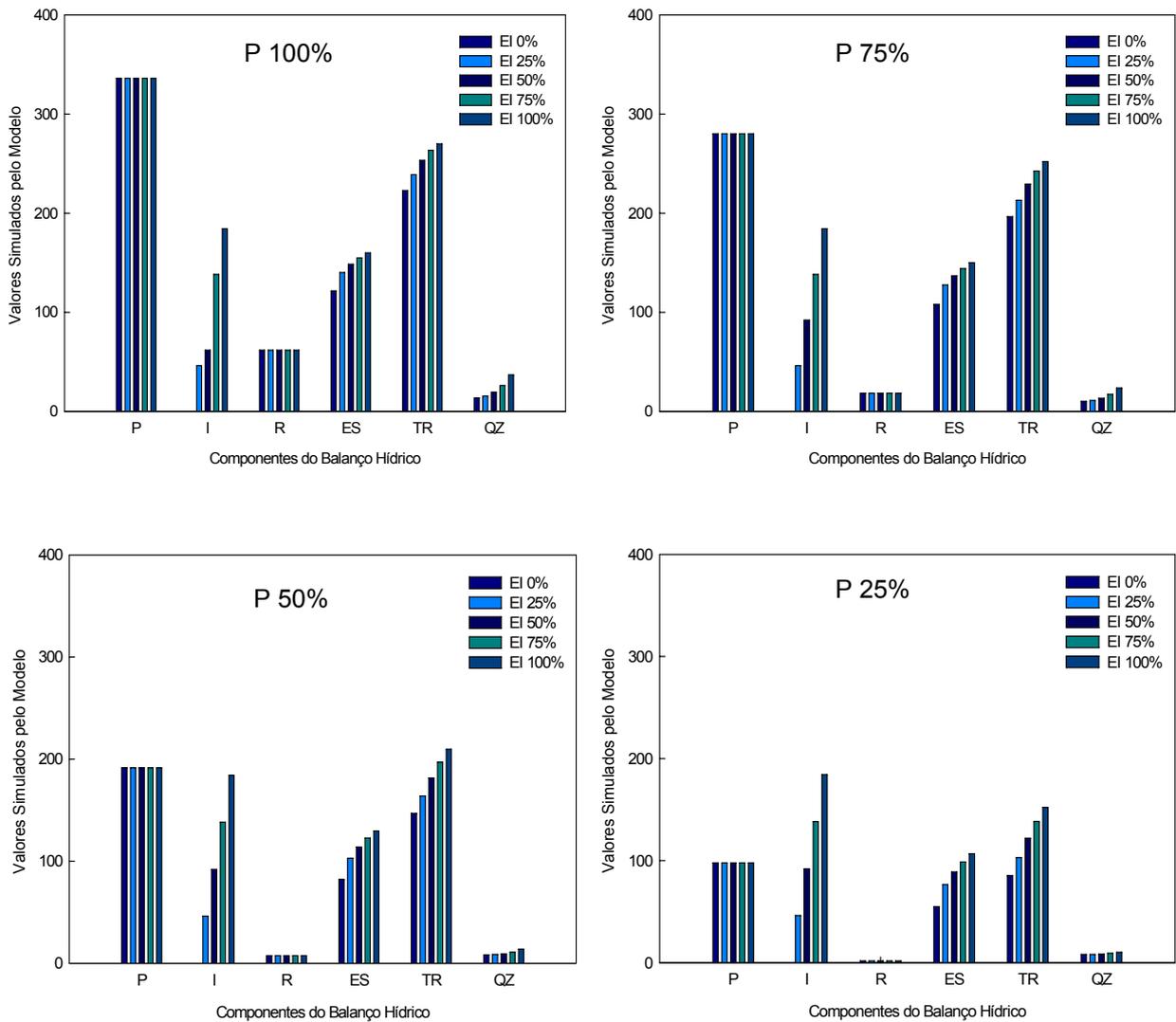


Figura 4.16 - Distribuição dos componentes do balanço hídrico (mm) simulados em cada estratégia de irrigação (EI) para a cultura da soja AL 55.

Observou-se que da mesma forma que ocorreu com a cultivar de soja CD 219, as diferentes estratégias de irrigação simuladas e as diferentes frações de chuva influenciaram nos componentes do balanço hídrico. A precipitação e o escoamento superficial mantiveram-se constantes em cada fração de chuva analisada individualmente, mas aumentaram nas diferentes frações de chuva. Já a irrigação, evaporação do solo, transpiração e drenagem aumentaram à medida que aumentou a estratégia de irrigação e a fração de chuva.

A figura 4.17 mostra o armazenamento de água em cada estratégia de irrigação e fração de chuva simuladas para a cultivar de soja AL 55.

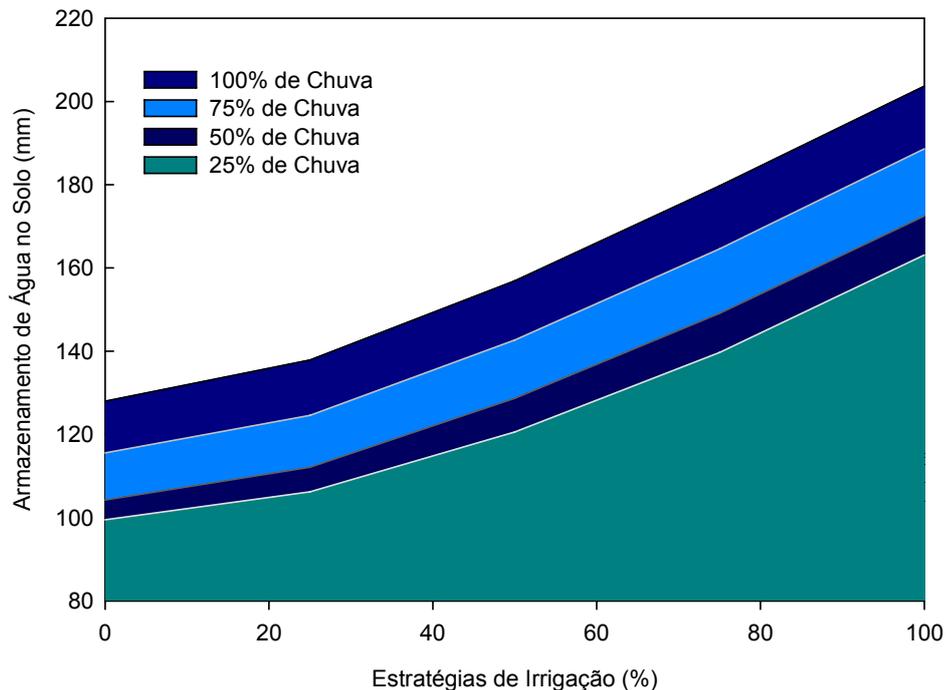


Figura 4.17 – Armazenamento de água em cada estratégia de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas para a cultura da soja AL 55.

Através da figura 4.17 observou-se que o aumento nas lâminas de irrigação e frações de chuva ocasionou em aumento no armazenamento de água no solo em todas as estratégias de irrigação e fração de chuva. Nos valores de CC (%) necessário para elevar a umidade do solo à capacidade de campo (tabela 2.35) observa-se que, quanto maior o volume de água aplicada, maior é a disponibilidade de água as plantas.

4.6.3.5 Simulação da produção de matéria seca e grãos – Soja AL 55

A tabela 4.26 apresenta os valores de total de água aplicada (mm), precipitação efetiva (mm), produção de matéria seca ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) para a cultivar de soja AL 55, obtidos em função da transpiração diária fornecida pelo modelo de extração de água no solo pelas raízes das plantas.

Tabela 4.26 – Total de água aplicada (irrigação e precipitação - mm), precipitação efetiva (mm), produção de grãos (kg.ha⁻¹) e produção de matéria seca (kg.ha⁻¹) obtidos na simulação de diferentes lâminas de irrigação para a cultura da soja AL55.

Fração de Chuva (%)	Irrigação (%)	Total de água aplicada (mm)	Precipitação efetiva (mm)	Prod. MS. (kg.ha ⁻¹)	Prod. Grãos. (kg.ha ⁻¹)
100	0	336,2	336,2	7984,5	2753,3
	25	382,3	336,2	8503,4	2932,3
	50	428,3	336,2	8973,9	3094,5
	75	474,4	336,2	9310,8	3210,6
	100	520,4	336,2	9530,4	3286,4
	Média			8860,6	3055,4
	D.P.			624,4	215,3
	CV (%)			7,0	7,0
75	0	280,2	280,2	7087,8	2444,1
	25	326,3	280,2	7624,2	2629,0
	50	372,3	280,2	8159,1	2813,5
	75	418,4	280,2	8598,3	2964,9
	100	464,4	280,2	8925,1	3077,6
	Média			8078,9	2785,8
	D.P.			738,5	254,6
	CV (%)			9,1	9,1
*50	0	191,5	191,5	5326,8	1836,8
	25	237,6	191,5	5884,8	2029,2
	50	283,6	191,5	6466,4	2229,8
	75	329,7	191,5	6976,9	2405,8
	100	375,7	191,5	7415,7	2557,2
	Média			6414,1	2211,8
	D.P.			834,4	287,8
	CV (%)			13,0	13,0
25	0	97,8	97,8	3112,6	1073,3
	25	143,9	97,8	3690,8	1272,7
	50	189,9	97,8	4314,2	1487,7
	75	236,0	97,8	4855,5	1674,3
	100	282,0	97,8	5328,0	1837,2
	Média			4260,2	1469,0
	D.P.			885,8	305,4
	CV (%)			20,8	20,8

De acordo com a tabela 4.26, verificou-se, que as estratégias de irrigação, independente da fração de chuva, apresentaram alta variabilidade nas produções simuladas. Este comportamento mostrou que a utilização de diferentes estratégias de irrigação na cultura da soja resultou em rendimento de grãos diferenciados.

Cabe ressaltar, que os rendimentos encontrados foram acima da média nacional e da média do Estado do Rio Grande do Sul quando aplicou-se um total de água a partir de 382,3 mm. No entanto, superou a média de produtividade de cultivares transgênicas introduzidas em trabalho desenvolvido por Zobot (2009) sobre a caracterização agrônômica destas variedades cultivadas no Rio Grande do Sul, quando aplicou-se um total de 520,4 mm ($3.286,4 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Estes resultados também foram relatados por Steckling et al. (2006), que fizeram uma análise de cultivares transgênicas na safra de 2005/2006 em Cruz Alta/RS, e encontraram valores médios de rendimento de grãos para cultivares introduzidas (A 6444 RG e A 6001 RG) de $2013 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e para as nacionais de $2362 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, enquanto que para a mesma safra, porém com as cultivares A 8000 RG e AL 83 RR, o rendimento de grãos médio foi de $2520 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

As figuras 4.18 e 4.19 mostram o comportamento das diferentes estratégias de irrigação e frações de chuva simulada, na produção de grãos e na produção de matéria seca da cultivar da soja AL 55.

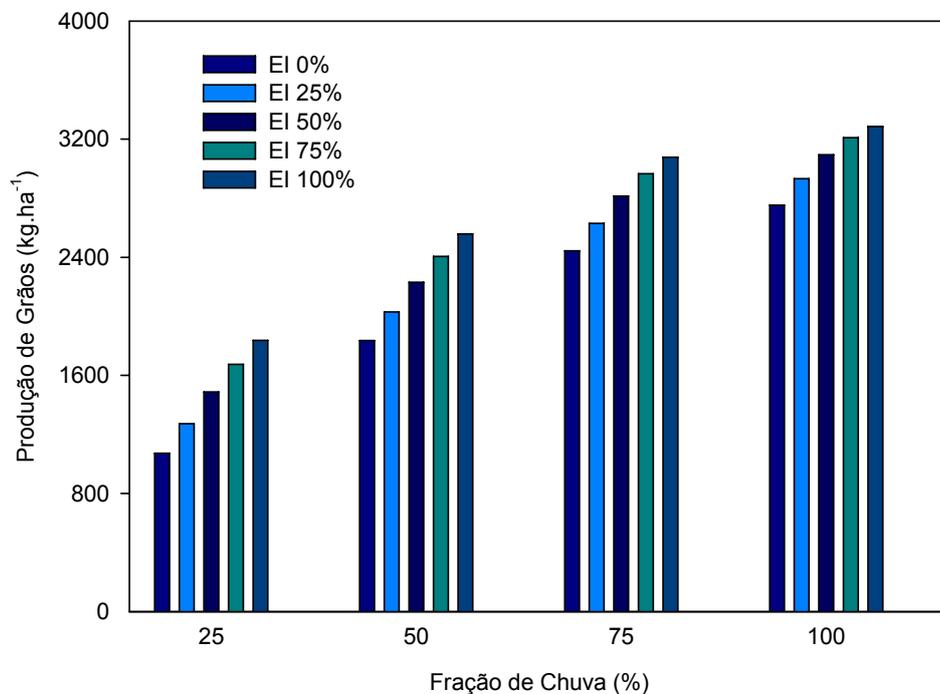


Figura 4.18 – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de grãos da cultura da soja AL 55.

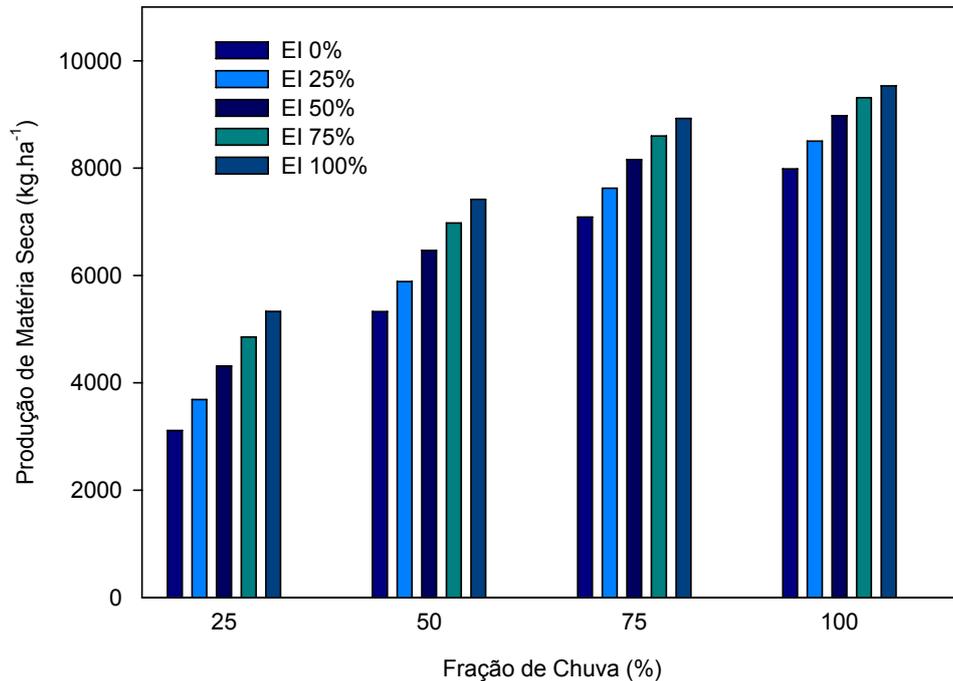


Figura 4.19 – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de matéria seca da cultura da soja AL 55.

Através das figuras 4.18 e 4.19, observou-se que da mesma forma como ocorreu na cultivar de soja CD 219, o aumento nas frações de chuva e estratégias de irrigação ocasionaram em aumento da produtividade de grãos e matéria seca para a cultivar de soja AL 55, ou seja, quando diminuiu a umidade do solo, diminuíram os valores das produções, pois diminuiu a água disponível no solo em relação à capacidade de campo (CC) (tabela 4.26).

A figura 4.20 apresenta a evapotranspiração real (E_{Tr}) calculada a partir da simulação dos componentes do balanço hídrico para a cultura da soja AL 55 nas diferentes estratégias de irrigação e frações de chuva.

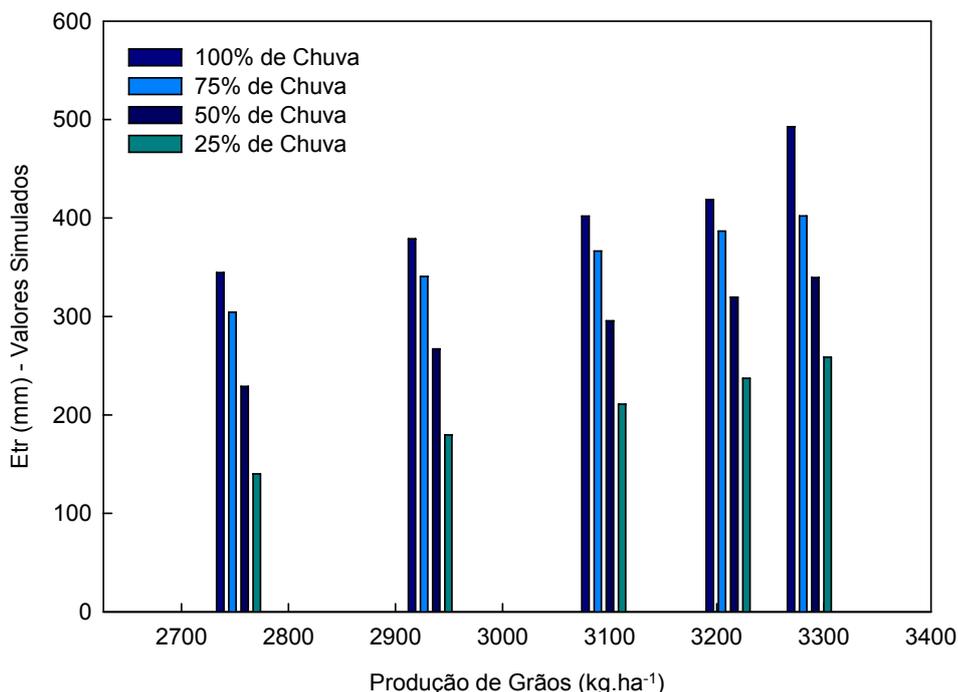


Figura 4.20 – Evapotranspiração real (mm) para diferentes estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) para a cultura da soja AL 55.

Através da figura 4.20, pode-se observar um aumento expressivo na produção de grãos com o aumento da ETr ocasionada pelo aumento a disponibilidade hídrica.

4.6.3.6 Eficiência de uso da água – Soja AL 55

A tabela 4.27 apresenta os valores de eficiência do uso da água (EUA) e eficiência de aplicação de água (EAP), obtidos com relação à produção de grãos e a produção de matéria seca nas diferentes estratégias de irrigação simuladas para a cultivar de soja AL 55.

Os valores de eficiência do uso da água (EUA) demonstraram variações de 1,21 a 1,26 kg.m⁻³ para a produção de grãos e de 3,50 a 3,65 kg.m⁻³ para a produção de matéria seca. Em todas as frações de chuva os valores de EUA foram maiores nos tratamentos não irrigados. Estes resultados estão de acordo com Chaves et al.

(2002) e Kron et al. (2008). Para estes autores plantas sob deficiência hídrica moderada frequentemente apresentam um aumento na eficiência do uso da água, uma vez que uma redução apenas parcial da abertura estomática limita mais fortemente a transpiração do que a entrada de CO₂.

Tabela 4.27 – Valores eficiência de uso da água obtidos para a produção de grãos (EUA/GR), eficiência de uso da água obtidos para a matéria seca (EUA/MS), eficiência de aplicação da água para a produção de grãos (EAP/GR) e eficiência de aplicação da água para a produção de matéria seca (EAP/MS) encontrados para diferentes lâminas de irrigação na simulação da cultura da soja AL 55.

Fração de Chuva (%)	Irrigação (%)	Eficiência de uso (Kg/m ³)		Eficiência de aplicação (Kg/m ³)	
		Matéria Seca	Grãos	Matéria Seca	Grãos
100	0	3,58	1,24	2,37	0,82
	25	3,56	1,23	2,22	0,77
	50	3,54	1,22	2,10	0,72
	75	3,53	1,22	1,96	0,68
	100	3,53	1,22	1,83	0,63
75	0	3,61	1,24	2,53	0,87
	25	3,58	1,23	2,34	0,81
	50	3,56	1,23	2,19	0,76
	75	3,54	1,22	2,06	0,71
	100	3,54	1,22	1,92	0,66
50	0	3,63	1,25	2,78	0,96
	25	3,59	1,24	2,48	0,85
	50	3,56	1,23	2,28	0,79
	75	3,54	1,22	2,12	0,73
	100	3,54	1,22	1,97	0,68
25	0	3,65	1,26	3,18	1,10
	25	3,58	1,24	2,56	0,88
	50	3,54	1,22	2,27	0,78
	75	3,51	1,21	2,06	0,71
	100	3,50	1,21	1,89	0,65

Costa et al. (1999) encontrou valores de eficiência do uso da água variando entre 0,43 a 2,35 kg.m⁻³ durante este a fase vegetativa e após o florescimento, respectivamente. Para este mesmo período Procópio et al. (2004) encontrou valores na faixa de 0,168 a 2,088 kg.m⁻³.

Observou-se que o aumento no total de água aplicada respondeu em aumento, tanto na produção de grãos, quanto na produção de matéria seca (tabela 4.26). Constatou-se na tabela 4.27 que os valores de EUA foram decrescentes nas frações de chuva e estratégias de irrigações. Neste caso, o tratamento não irrigado mostrou maior EUA, porém, isto não refletiu em maior produção (grão e matéria seca).

A EAP variou de 0,63 a 1,10 kg.m^{-3} para a produção de grãos e 1,83 a 3,18 kg.m^{-3} para a produção de matéria seca. Parizi (2010) trabalhando com simulação de diferentes estratégias de irrigação para a cultura do feijão, em condições idênticas, encontrou valores de EAP entre 0,06 a 0,77 para a produção de grãos e 0,31 a 2,28 para a produção de matéria seca.

A figura 4.21 mostra o comportamento da eficiência de aplicação de água (EAP) obtida para a produção de grãos (kg.ha^{-1}) em relação ao total de água aplicada (mm) para a cultivar de soja AL 55.

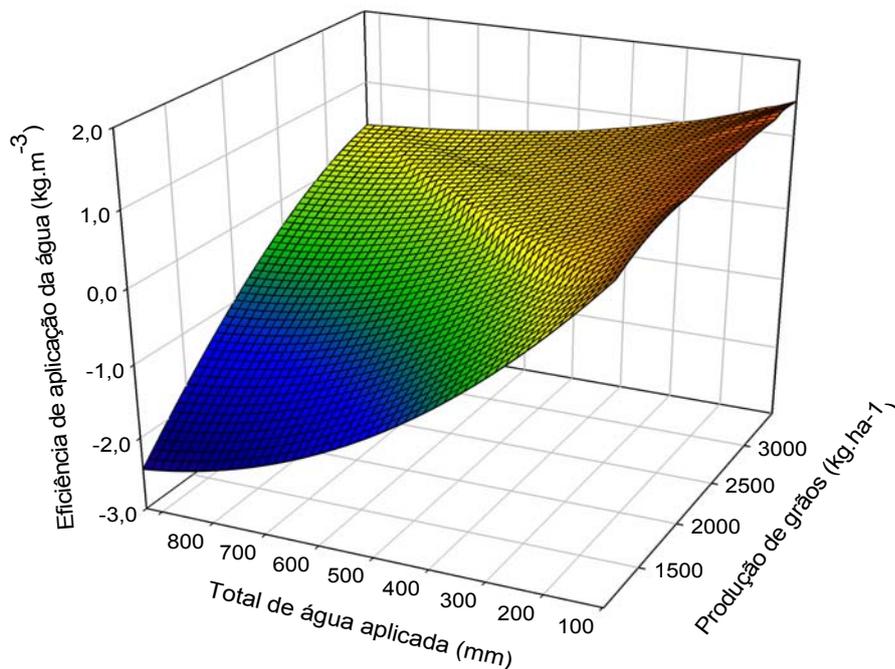


Figura 4.21 – Relação entre a eficiência de aplicação de água (kg.m^{-3}) obtida para produção de grãos (kg.ha^{-1}) com o total de água aplicada na cultura da soja AL 55.

De acordo com a figura 4.21, verificou-se que o aumento no total de água aplicada (mm) respondeu em maiores produtividades, tanto para grãos, quanto para matéria seca (tabela 4.26), porém não refletiram em melhor EAP.

4.6 Funções de produção

A figura 4.22 apresenta a relação entre a produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) simuladas pelo modelo para diferentes estratégias de irrigação e o total de água aplicado para a cultura da soja (CD 219). Para o ajuste, simulou-se uma fração de chuva e lâmina de irrigação superiores as testadas acima, para verificar o ponto de decréscimo na produção.

A curva da função de produção ajustou-se a uma equação cúbica, expressa por $y = a + bx + cx^2 + dx^3$, cujos coeficientes são: $a = 0$, $b = 9,7514$, $c = - 0,0070$, $d = 2,248 \cdot 10^{-7}$ e o coeficiente de determinação $r^2 = 0,9982$.

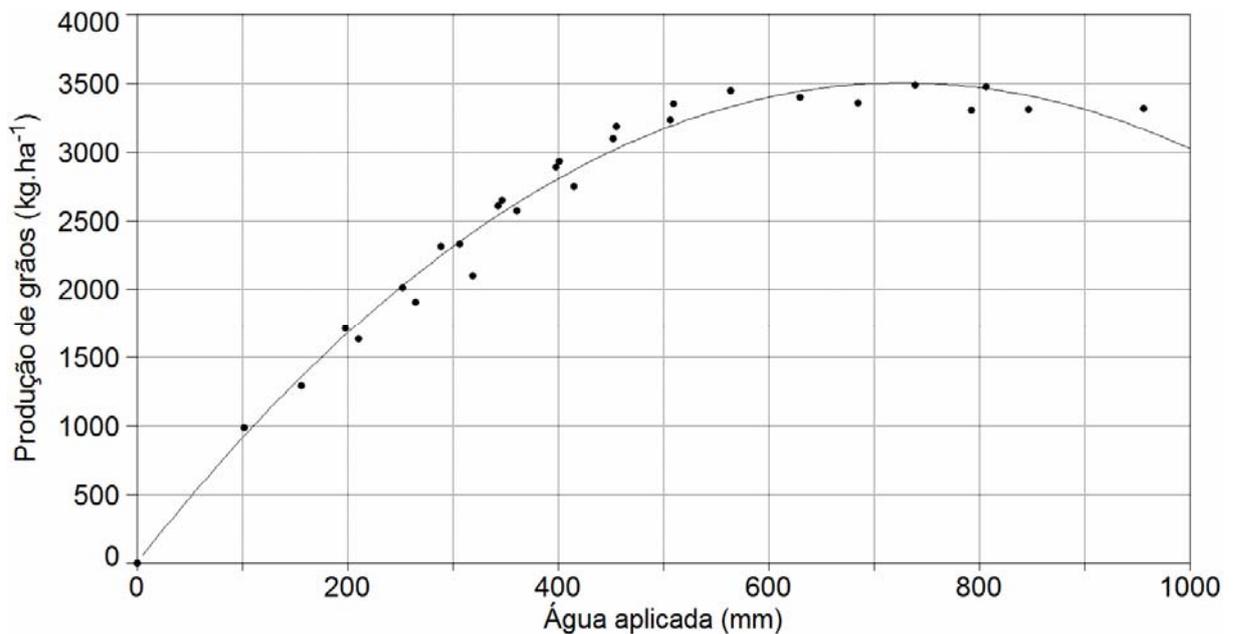


Figura 4.22 - Relação entre a produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) simuladas pelo modelo para diferentes estratégias de irrigação e o total de água aplicado para a cultura da soja CD 219.

Através da figura 4.22 observou-se que o aumento da lâmina aplicada a partir de 800 mm causou redução na produção de grãos na soja (CD 219). Estes valores estão de acordo aos relatados na literatura para o adequado requerimento hídrico da cultura (RUNGE e ODDEL, 1960; CAMARGO et al., 1986).

A figura 4.23 apresenta a relação entre a produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) simuladas pelo modelo para diferentes estratégias de irrigação e o total de água aplicado para a cultura da soja (AL 55).

A curva da função de produção ajustou-se a uma equação cúbica, expressa por $y = a + bx + cx^2 + dx^3$, cujos coeficientes são: $a = 0$, $b = 10,5325$, $c = - 0,0094$, $d = 1,9170 \cdot 10^{-6}$ e o coeficiente de determinação $r^2 = 0,9969$.

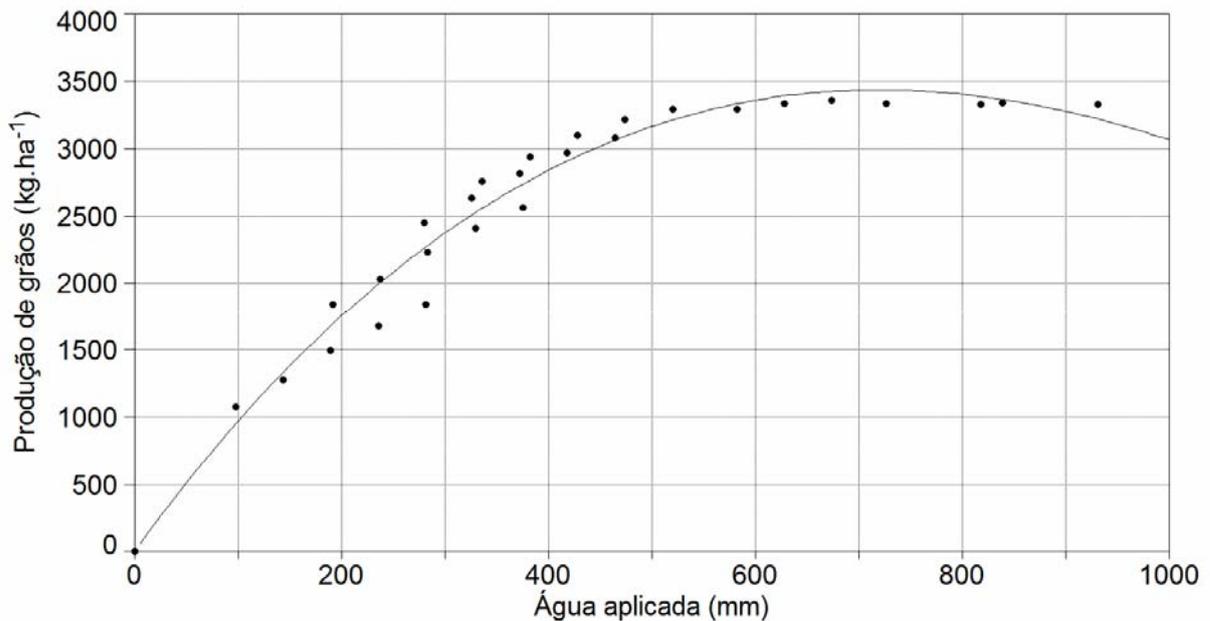


Figura 4.23 - Relação entre a produção de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) simuladas pelo modelo para diferentes estratégias de irrigação e o total de água aplicado para a cultura da soja AL 55.

Através da figura 4.23 observou-se que o aumento da lâmina aplicada a partir de 800 mm causou redução na produção de grãos na soja (AL 55). Estes valores estão de acordo aos relatados na literatura para o adequado requerimento hídrico da cultura (RUNGE e ODDEL, 1960; CAMARGO et al., 1986).

5 CONCLUSÃO

Nas condições em que o presente trabalho foi realizado, conforme as informações obtidas e analisadas para a cultura da soja (cultivares CD 219 e AL 55) na região de Santiago, RS, considerando os resultados obtidos no experimento no campo e os resultados obtidos no experimento simulado pode-se concluir que:

a) Experimento no campo

A evolução do IAF aumentou linearmente até atingir o valor máximo aos 78 DAE, decrescendo a partir daí, caracterizando uma tendência parabólica para todos os tratamentos, com inexpressiva diferença entre as estratégias de irrigação. Para a cultivar CD 219, o tratamento T3 (60% da evapotranspiração) alcança máximo IAF, sendo $7,363 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$. Já a cultivar AL 55, o tratamento T4 (80% da evapotranspiração) alcança máximo IAF, sendo $8,14 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$, ambas no estágio reprodutivo caracterizado pela floração.

A MST inicialmente apresenta pequenas taxas de variações, com o crescimento da planta estas taxas aumentam e tendem a estabilização no final do ciclo. Seu acúmulo foi reduzido nos tratamentos com baixa oferta hídrica, demonstrando que a produção de MST é influenciada pela deficiência hídrica.

A Prz apresentou crescimento acentuado até o estágio reprodutivo caracterizado pelo enchimento de grãos, com tendência a estabilização após esta fase. Deficiências hídricas ocasionam redução na profundidade do sistema radicular. Ambas as cultivares, apresentam profundidade máxima do sistema radicular de aproximadamente 35,36 cm (tratamento T4).

O aumento nas lâminas de irrigação proporcionou incremento nos componentes de produção das cultivares estudadas.

O índice de colheita (IC) foi bastante semelhante em todos os tratamentos, apesar de produtividades distintas.

A utilização de irrigação suplementar na cultivar CD 219 através do sistema de irrigação convencional aumenta a produção de grãos em 15,0%, 24,0%, 37,4%, 39,4% e 50,0%, para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente, em

relação ao tratamento testemunha sem irrigação suplementar; já para a cultivar AL 55, os acréscimos são de 20,4%, 27,7%, 23,1%, 31,0% e 34,0%, para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente, em relação ao tratamento sem irrigação suplementar.

b) Experimento simulado

O modelo de simulação apresentou calibração dentro da faixa aceitável para modelos de produção de culturas agrícolas, para as condições em que o estudo foi realizado.

Os dados simulados para as cultivares de soja CD 219 e AL 55 apresentaram variação inferior a 18% quando comparados, através do teste do modelo, com os dados medidos no experimento de campo.

O modelo de produção é eficiente na simulação do acúmulo de matéria seca total e produção de grãos, demonstrando coeficiente de correlação (r) acima de 80%, índice de concordância (I_w) variando entre 74 e 100%, índice de desempenho (I_d) entre 74 e 89%. As classes de desempenho foram de bom a ótimo, para matéria seca e grãos, respectivamente, para a cultivar CD 219 e muito bom para a produção de matéria seca e de grãos para a cultivar AL 55.

Os componentes do balanço hídrico foram influenciados pelas diferentes estratégias de irrigação (EI) e as diferentes frações de chuva simuladas. O total de água aplicado aumentou o estoque de água no solo, porém, isto ocasionou perdas por escoamento superficial, evaporação do solo, transpiração pelas plantas e drenagem.

A eficiência do uso da água (EUA) diminuiu com o aumento da EI, comprovando que para a cultura da soja uma deficiência hídrica moderada freqüentemente apresenta um aumento na EUA. A eficiência de aplicação da água (EAP) seguiu a mesma tendência, os maiores valores estavam na EI de 0% e fração de chuva de 25%, para a produção de matéria seca e grãos, em ambas as cultivares.

A aplicação do modelo de produção para funções de produção mostrou que, o aumento da lâmina aplicada a partir de 800 mm causou redução na produção de grãos na soja das cultivares CD 219 e AL 55.

O modelo foi capaz de representar satisfatoriamente a evolução do crescimento e desenvolvimento da cultura da soja, e se mostrou uma importante

ferramenta na previsão da produtividade em condições irrigadas, evidenciando as melhores estratégias de irrigação que resultem em elevadas produções de grãos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L. et al. Escarificação mecânica e biológica para redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.519-531, 2004.

ADDISCOTT, T. Fertilisers and nitrate leaching. Issues in **Environmental Sciences**. 5, 1-26, 1996.

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

ANGHINONI, I.; MEURER, E. J. Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes. In: Workshop sobre sistema radicular: metodologias e estudo de casos, 1., Aracaju. **Anais**. Aracaju: EMBRAPA, p.57- 87, 1999.

ARAUJO, M. A. de, **Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa – Paraná**. 2008. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

ASSAD, E. D. et al. Sistema de Previsão de safra de soja para o Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.5, p.615-625, 2007.

BARROS, A. H. C. **Análise de crescimento, do desenvolvimento e da produtividade da cultura do milho (*Zea mays* L.): Experimentos e modelos**. 85p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

BEUTLER, A. N. et al. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um latossolo vermelho cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n°6, Nov./Dez., 2007.

BENICASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. 2.ed. Jaboticabal, FUNEP, 41p., 2003.

BERGAMASCHI, H. et al. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, Série Livro-Texto nº 17, 125p, 1992.

_____. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. In: _____. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da Universidade, cap. 2, p. 25-32, 1999.

BERGONCI, J.I et al. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.949-956, 2001.

BERLATO, M. A. Exigências bioclimáticas e zoneamento agroclimático. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. (Ed.) **A soja no Brasil**. Campinas: Fundação Cargil, p. 175-184, 1981.

_____, MATZENAUER, R., BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja, relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação de tanque “classe A” e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.22, n.2, p.243-259, 1986.

_____. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul**. 1987. 93 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Curso de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987.

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

BERNARDES, M. S. **Modelagem matemática aplicada à agricultura**. Anuário de agricultura brasileira. São Paulo, p.80-81, 2000.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 625 p. 2008.

BLACK, J. R. Complexo Soja: Fundamentos, situação atual e perspectiva. In: Câmara, G. M. C. (Ed.). **Soja: Tecnologia da produção II**. Piracicaba. ESALQ/LPV, p.1-19, 2000.

BOARD, J. E. et al. Narrowrow seed-yield enhancement indeterminate soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v.82, n.1, p.64-68, 1990.

_____.; HARVILLE, B. G. Growth dynamics the vegetative period affects yield of narrow-row, late-planted soybean. **Crop Science**, v. 88, n. 4, p. 567-572, 1996.

BOLTON, F. E. Optimizing the use of water and nitrogen through soil and crop management. **Plant and Soil**, New York, v.58, p.231-247, 1981.

BOORGES, W. G.; RITCHIE, J. T. Economic and risk analysis of irrigation decisions in humid regions. **Journal Production Agricultural**. v. 1, n. 2, p. 116-122, 1998.

BORDIN, I. **Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em plantio direto e convencional**. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.43, n.12, p.1785-1792, dez. 2008.

BRAGA, R. P. et al. Os modelos de simulação e a investigação de sistemas da agricultura. **Ordem Engenharia**, v.20, p48-54, (2a série/ Ingenium, Agosto), 1997.

BRANDELERO, E. M. **Índices fisiológicos e rendimento de cultivares de soja no município de Cruz das Almas – Ba**. 63f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Escola de Agronomia, Universidade Federal da Bahia. Cruz das Almas, 2001.

_____ et al. Índices fisiológicos e rendimento de cultivares de soja no recôncavo baiano. **Magistra**, v. 14, n. 2, 2002.

BREVEDAN, R.E.; EGLI, D. B. Crop physiology & metabolism: Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. **Crop Science**, Madison, v. 43, n. 6, p. 2083-2088, 2003.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media**: Hydrology Papers, Colorado State University, 24 p., 1964.

BUTTERY, B. R. et al. Stomatal numbers of soybean and response to water stress. **Plant and Soil**, New York, v.149. p.283-288, 1993.

CALVACHE, A. M. et al. Efeito da deficiência hídrica e da adubação nitrogenada na produtividade e na eficiência do uso de água em uma cultura do feijão **Scientia Agricola**. v. 54 n. 3, 1997.

CÂMARA, G. M. S. **Soja: tecnologia da produção II**. Gil Miguel de Sousa Câmara (editor). Piracicaba: G.M.S. Câmara, 450p, 2000.

CÂMARA, G. M. S.; HEIFFIG, L. S. Fisiologia, ambiente e rendimento da cultura da soja. In: CÂMARA, G. M. S (Coord.) **Soja: tecnologia e produção II**. Piracicaba: ESALQ/USP, CAP.5, p.81-119, 2000.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas**. Piracicaba: ESALQ, 132p, 1997.

CAMARGO, M. B. P. **Exigências bioclimáticas e estimativa para quatro cultivares de soja no Estado de São Paulo**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, Piracicaba, 1984.

_____ ; BRUNINI, O.; MIRANDA, M. A. C. Modelo agrometeorológico para estimativa da produtividade para a cultura da soja no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, 45 (2):279-292, 1986.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CAMPBELL, G. S. **Soil Physics with Basic**. New York: Elsevier, 1985.

CANZIANI, J. R. F. et al. Cadeia produtiva da soja. In: _____. **Grandes lavouras I: cd 1 - soja**. Curitiba: UFPR, 2006.

CARDOSO, E. G. et al. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**. Brasília, v.41, n.3, p.493-501, 2006.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extrível e a produtividade das culturas. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 183-188, 1995.

_____ ; ZIMMERMANN, F. L. **Água no solo: parâmetros para o dimensionamento de sistemas de irrigação**. Santa Maria: UFSM/Departamento de Engenharia Rural, 88p, 2000.

CARPENTIERI-PÍPOLO, V. et al. Correlações fenotípicas entre caracteres quantitativos em soja. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 1, p. 11-16, jan./mar. 2005.

CHARLES-EDWARDS, **Physiological determinants of crop growth**. London: Academic Press, 1965 p., 1982.

CHAVES, M. M. et al. How plants cope with water stress in the field. Photosynthesis and growth. **Annals of Botany**, Oxford, v.89, p.907-916, 2002.

CINTRA, F. L. D. et al. **Tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil: uma análise dos efeitos do regime hídrico e da presença de camadas coesas nos solos**. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.22, n.2, p.77-80, 1997.

COALE, F.J.; GROVE, J. H. Alteration in soybean root development due to cultural practices: a review. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. Athens, v.17, n.8, p.799-818, 1986.

COLASANTE, L. O. **Uso de índice de colheita e do rendimento biológico na comparação da eficiência de variedades de soja**. 1980. 68 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1980.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 394 p., 2004.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conaweb/>. Acesso em: 20 de jan., 2011.

_____ – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: grãos, sétimo levantamento, abril 2010 / Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília : Conab, 42p. Publicação Mensal, 2010.

CONFALONE, A. E.; COSTA, L. C.; PEREIRA, C. R. Crescimento e captura de luz em soja sob estresse hídrico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 165-169, 1998.

CONFALONE, A.; DUJMOVICH, M. N. Influência do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 2, p. 183-187, 1999.

COOPER, R. L. A delayed flowering barrier to higher to higher soybean yields. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.82, p. 27-35, 2003.

COSTA NETO, P. O. Correlação e regressão. In: **Estatística**. São Paulo: Edgard Blucher, p. 178-228, 1977.

COSTA, J. A. **Cultura da soja**. Porto Alegre: I. Manica, J. A. Costa, 1996.

COSTA, L. C. et al. Effect of water stress on the efficiency of capture of water and radiation by soybean. **Crop Science**, v. 39, n. 1, p. 91-97, 1999.

CRUZ, T. V. da. Crescimento e produtividade de soja em diferentes épocas de semeadura no oeste da Bahia. **Scientia Agraria**, Vol. 11, Núm. 1, enero-febrero, pp. 33-42, 2010.

CUNHA, G. R. da; BERGAMASCHI, H. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre : Editora da UFRGS, p. 85-97., 1992.

_____. et al. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, p.446-459, Número Especial: Zoneamento Agrícola, 2001.

DALLACORT, R. et al. Ajuste e teste dos coeficientes genéticos do modelo de simulação Cropgro-soybean, para a região Noroeste do Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 27, n. 2, p. 363-371, 2005.

DE VRIES, F. W. T. et al. **Simulation of ecophysiological process of growth in several annual crops**. Wageningen: Pudoc, 1989.

DE WITT, C. T. **Simulation for assimilation, respiration, on transpiration of crop**. Wageningen: A Halsted.J. Wiley, 140 p., 1978.

DEAN, D. Modeling supplemental irrigation water demand. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, 106(4): 285-297, dez., 1980.

DENMEAD, O. T.; SHAW, R. H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. **Agronomy Journal**. Madison, v. 43, p. 385-390, 1962.

DINAR, A. Economic factors and opportunities as determinates of water use efficiency in agriculture. **Irrigation Science**, Beer Sheva, v.14, n.2, p.47-52, 1993.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Roma: FAO, 193 p. (Irrigation and Drainage Paper; 33), 1979.

_____.; KASSAM, A. M. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande, UFPB, 1994.

DYBING, C. D. Soybean flower production as related to plant growth and seed yield. **Crop Science**, Madison, v. 34, n. 2, p. 489-497, 1994.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de **Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa – CNPS, 412p, 1999.

_____ – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja - Paraná - 2007**. Londrina: Embrapa Soja, 2006. Disponível em: http://www.cnpso.embrapa.br/download/tpsoja_2007_pr.pdf. Acesso em: 26 de fev., 2011.

EMBRAPA SOJA. **Considerações sobre o florescimento precoce. Sistema de Alerta – Londrina, PR - 2010**. Disponível em: www.cnpso.embrapa.br/alerta/ver_alerta.php?cod_pagina_sa=214&cultura=1. Acesso em: 10 jan., 2011.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Fenologia do milho. In: _____. (Coord.). **Tecnologia da produção de milho**. Piracicaba: p. 131-134, 1997.

_____.; _____. Feijão irrigado: Estratégias básicas de manejo. Piracicaba. **Publique**. FEALQ/ESALQ/USP, 194p. 1999.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Statistical Databases**. Disponível em: <http://faostat.fao.org/>. Acesso em: 14 de mar., 2011.

FARIA, L. N. **Partição da extração da água do solo por plantas entre camadas com teores de água distintos**. 2009. 62 p.: il. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

FARIAS, J. R. B. Climatic requirements. In: EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Soja . **Tropical soybean: improvement and production**. Rome: FAO, p. 13-17. (FAO Plant Production and Protection Series; 27), 1994.

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

FEDDES, R. A. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. **Journal of Hydrology**. (Amsterdam) 31:13–26, 1976.

FERRAZ, E. S. B. **Estudo da evapotranspiração através da medida de umidade no solo por moderação de nêutrons**. Piracicaba: CENA/ESALQ, (Boletim Científico), 1972.

FERREIRA, W. P. M. Teste de um modelo agrometeorológico para estudo da influência da variabilidade climática na cultura da soja. **Revista Ceres**. 54 (312): 206-213, 2007.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas: o estudo que está por trás do que se vê**. 4 ed. Passo Fundo: UPF, 733p., 2008.

FONTANA, D.C. et al. Alterações micrometeorológicas na cultura da soja submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 27, n. 5, p. 661-669, 1992.

_____, et.al. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.3, p.399-403, março, 2001.

FRANCISCO, E. A. B. **Antecipação da adubação da soja na cultura de *Eleusine coracana* (L.) Gaertn em sistema de plantio direto**. 2002. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

FRANCISCO, C. R. et al. Estado nutricional e produção do capim pé-de-galinha e da soja cultivada em sucessão em sistema antecipado de adubação. **Bragantia**, v.66, p.259-266, 2007.

FRIZZONE, J. A. Funções de resposta do feijoeiro ao uso do nitrogênio e lâmina de irrigação. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DA ÁGUA NA AGRICULTURA, 1987, Campinas. **Anais...** Campinas: Unicamp, p. 123-133, 1987.

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

FUNDACEP - **Informativo Fundacep**. ANO XI, nº 14, Agosto/2004.

GANDOLFI, V.H.; BAN, A.D.; VILHORDO, B.W.; MULLER, L. Raiz. In: VERNETTI, F.J. Coord. **Soja: planta, clima, pragas, moléstias e invasoras**. Campinas: Fundação Cargil, p.26-38, 1983.

GAZZONI, D.L. **Avaliação de efeito de três níveis de desfolhamento aplicados em quatro estádios de crescimento de dois cultivares de soja (*Glycine max* (L.) MERRILL), sobre a produção e a qualidade do grão**. 1974. 70f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1974.

GILIOLI, J. L. et al. **Soja**: Série 100. FTSeementes, Cristalina: 18 p. (Boletim Técnico 3), 1995.

GOUDRIAAN, L.; Van LARR, H. H., **Modeling potential crop growth processes: text book with exercises**. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 283 p., 1994.

GOMES, A. C. S., **Caracterização climática de Santiago, RS para fins agrícolas**. 2004. 25 f. Monografia (Especialização em Ciências Ambientais) – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santiago, 2004.

_____. **Efeito de diferentes estratégias de irrigação sob a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merril) na região de Santiago, RS**. 2007. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2007.

GREGORY, F. G. The effect of climatic conditions on the growth of barley. **Annals of Botany**, London, 40:1-26, 1926.

GREGORY, P. J. Crescimento y funcionamiento de las raíces. In: WILD, A. (Coord.). **Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel**. Madrid: Mundi-Prensa, p.121-175, 1992.

GRIMM, E. C. et al. A 50,000-year record of climate oscillations from Florida and its temporal correlation with the Heinrich events. **Science** **261**. 198–200, 1993.

HANKS, R. J.; RITCHIE, J. T. Modelling plants and soil systems. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science society of America, Inc./**Soil Science Society of America**, 387p. (Agronomy, 31) 1991.

HEIFFIG, L. S. **Plasticidade da cultura da soja (*Glycine max* (L) Merrill) em diferentes arranjos espaciais**. 2002. 151 p. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escolar Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

HERBERT, S. J.; LITCHFIELD, G. V. Partitioning soybean seed yield components. **Crop Science**, v. 22, n. 5, p. 1074-1079, 1982.

HERZOG, R. L. da S. et al. Produtividade de soja em semeadura direta influenciada por profundidade do sulcador de adubo e doses de resíduo em sistema irrigado e não irrigado. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.3, p.771-780, 2004.

HODGES, T.; FRENCH, V. Soyphen: soybean growth stages modeled from temperature, daylength and water availability. **Agronomy Journal**, v. 77, p. 500-505, 1985.

HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. **Management of Farm Irrigation Systems**. St Joseph, USA, ASAE, 1040, 1992.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Agricultura. Disponível em: www.sidra.ibge.gov.br. Acesso em: 05 de dez., 2010.

IBGE. Informações institucionais, produtos, notícias, pesquisas, eventos e serviços. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda> Acesso em: 30 de fev., 2011.

JAME, Y. M.; CUTFORTH, H. W. Crop growth models for decision support systems. Can. **Journal Plant Science**., Ottawa, v. 76, p. 9-19, 1996.

JENSEN, M. E. Water consumption by agricultural plants. In: KOSLOWSKI, T.T. **Water Deficit and Plant Growth**. San Diego (Califórnia): Academic Press. Vol 2. p.1-22, 1968.

JIANG, A. C. D. et al. Leaf orientation, photorespiration and xanthophyll cycle protect young soybean leaves against high irradiance in field. **Environmental and Experimental Botany**, p.1-10, 2004.

JONES, J. W.; RITCHIE, J. T. Crop growth models. In: HOFFMAN, G.J. HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. **Farm irrigation systems**. 1 ed. Saint Joseph-MI, ASAE. Cap. 4, p.64-89., 1992.

_____. et al. Soybean crop growth simulation model. User's Guide. **Florida Agricultural Experiment Station Journal**, v 5.42, n.8304, 1989.

KLOSOWSKI, E. S. **Utilização do modelo Soygro para estimar a produtividade da soja para a região de Londrina, Estado do Paraná**. 1994. Dissertação (Mestrado)-Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1994.

KOLLER, H. R. et al. Growth Analysis of the Soybean Community. **Crop Science**, v. 10, p. 407-412, 1970.

KORTE, L. L. et al. Irrigation of soybean genotypes during reproductive ontogeny. L Agronomic responses. **Crop Science**., New York, v.23, p.521-533, 1983.

KRON, A. P. et al. Water deficiency at different developmental stages of *glycine max* can improve drought tolerance. **Bragantia**, Campinas, v.67, p.43-49, 2008.

KUSS, R. C. R. **Populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja**. Santa Maria, UFSM, 2006. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

LAM-SANCHEZ, A.; VELOSO, E. J. Época de plantio da cultura da soja (*Glycine Max* (L.) Merrill), cultivares "Santa Rosa" e "Viçosa" em Jaboticabal, SP. **Científica**, v. 7, n. 2, 1974.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 531p, 2000.

LAZINSKI, L. R. **Variabilidade da utilização do modelo Soygro para a região de Londrina, PR.** 1993. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba/SP, 1993.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Adv. Soil Science.**, 1:277-294, 1985.

_____. Relationship between salinity and efficient water use. **Irrigation Science**, New York, v.14, p.75-84, 1993.

LI, J. S. Modeling crop yield as affected by uniformity of sprinkler system. **Agricultural Water Management.** Amsterdam, v.38, p.135-146, 1998.

LIEDGENS, M. M. **Modelos numéricos para a descrição do crescimento da planta de soja (*Glycine max* L. Merrill, cultivar IAC15) em condições sazonais diferenciadas.** 1993. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

LIU, W. T. H.; LIU, B. W. Y. Modelo de previsão de produtividade de soja no Estado de Minas Gerais. In: Congresso Interamericano de Meteorologia 1., Brasília. **Anais.** Brasília: Sociedade Brasileira de Meteorologia, p.15-18, 1986.

MAEHLER, A. R. et al. Potencial de rendimento da soja durante a ontogenia em razão da irrigação e arranjo de plantas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n. 2, p. 225-231, 2003.

MANARA, N. T. F. Origem e expansão. In: SANTOS, O.S. (coord.). **A cultura da soja 1.** Rio de Janeiro: Globo, p.13-23, 1988.

MANTOVANI, E. C. et al. Modeling the effects of sprinkler irrigation uniformity in crop yield. **Agricultural Water Management.** Amesterdam v.27, p.243-257, 1995.

_____. et al. **Irrigação: princípios e métodos.** Viçosa: Ed.UFV, 2006.

MARION, E. **Parâmetros hídricos para estimativa do rendimento de grãos de soja.** Florianópolis. 2004. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

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

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants.** New York, Academic Press, 403p, 1986.

MARTIN, T. N. **Modelo estocástico para estimação da produtividade de soja no Estado de São Paulo utilizando simulação normal bivariada.** 2007. 208 p. Tese (Doutorado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2007.

MARTORANO, L. G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do sistema solo planta-atmosfera, observados no campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT.** 2007. 151 p. Tese (Doutorado). Porto Alegre: UFRGS, 2007.

McBLAIN, B. A.; HUME, D. J. Reproductive abortion, yield components and nitrogen content in three early soybean cultivars. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 61, n. 3, p. 499-505, 1981.

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.

MELGES, E. et al. Crescimento e conversão da energia solar em soja cultivada sob quatro níveis de radiação solar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.24, n.9, p.1065-1072, 1989.

MINHAS, B. S. et al. Towards the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. **Water Resource Research**, v. 10, p. 383-393, 1974.

MISHRA, H. S. et al. Water use efficiency of irrigated wheat in the Tarai Region of India. **Irrigation Science**, New York, v.16, p.75-80, 1995.

MORAES, A.V. de C.; et al. Teste e análise de modelos agrometeorológicos de estimativa de produtividade para a cultura da soja na região de Ribeirão Preto. **Bragantia**, v.57, p.393-406, 1998.

MOREIRA, H. J. C. **Sistema agroclimatológico para o acompanhamento das culturas irrigadas**. Manual prático para o manejo da irrigação. Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação, 90 p., 1993.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Secção de Geografia. Secretaria da Agricultura. Porto Alegre, 42p., 1961.

MOTA, F. S. Condições climáticas e produção de soja no sul do Brasil. In; VERNETTI, F.J. (Coord.) **Soja: planta, clima, pragas, moléstias e invasoras**. Campinas: Fundação Cargill, v. 1, p. 93-126, 1983.

_____.; AGENDES, M. O. de O. Informação climática para planejamento da irrigação da soja no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. Maceió. **Anais...** Maceió: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, p. 348-354, 1989.

MUCHOV, R. C. et al. Optimizing crop and cultivar selection in response to climatic risk. In: MUCHOV, R. C.; BELLAMY, J. A. (Ed.) **Climatic risk in crop production models and management for the semiarid Tropics and Subtropics**. Wallingford: CAB International, p. 235-262, 1991.

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

NAVARRO JÚNIOR, H. M; COSTA, J. A. Contribuição relativa dos componentes do rendimento para produção de grãos em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 3, p. 269-274, 2002.

OPLIGUER, E. S. Irrigating Soybeans. **UWEX**, Madison, 2004.

PANG, X. P. et al. Irrigation quantity and uniformity and nitrogen application effects on crop yield and nitrogen leaching. **Soil Science**, Baltimore, v.61, p.257-261, 1997.

PARIZI, A. R. C. **Funções de produção das culturas de milho e feijão através de estudo experimental e simulado**. 2010. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

PAUSTIAN, R. et al. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. **Soil Science**. Soc. Am. J., 56:476-488, 1992.

PEDRO JUNIOR, M. J. et al. Análise de crescimento em soja. **Turrialba**, v. 35, n. 4, p. 323–327, 1985.

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

PEIXOTO, C. P. et al. Matéria seca, área foliar e rendimento de grãos em cultivares de soja sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002. 1 CD-ROM, 2002.

_____. et al. Época de semeadura e densidade de plantas de soja: I. Componentes da produção e rendimento de grãos, **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 89-96, 2000.

_____. **Análise de crescimento e rendimento de três cultivares de soja (*Glycine max* (L) Merrill) em três épocas de semeadura e três densidades de plantas**. São Paulo. 1998. 151p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escolar Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

PEREIRA, A. R.; MACHADO, E. C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidade de vegetais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 33 p. (Boletim técnico, 114), 1987.

PEREIRA, C. R. **Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientais**. 2002. 282 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, 2002.

PERROCHET, P. Water uptake by plant roots – A simulation model: conceptual model. **Journal of hydrology**. Amesterdã: p. 55-61, 1987.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações pra uso de aplicativos**. Piracicaba, FEALQ. 309 p., 2002.

PORRAS, C. A. et al. Comportamento fisiológico de genótipos de soja em diferentes arreglos de siembra. **Acta Agronômica**, v. 47, n. 1, p. 9-15, 1997.

PORTO, A. L. P. **Efeitos do déficit hídrico e do nitrogênio em cobertura em folhas de sorgo granífero (*Sorghum bicolor*, L).** 1993. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, SP, 1993.

PROCÓPIO, S. O. et al. Desenvolvimento foliar da soja e do feijão e de plantas daninhas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 207-211, 2003.

QUEIROZ, E. F. et al. Efeito de época de plantio sobre o rendimento da soja, na Região Norte do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n.9, p.1461-1474, set. 1998.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B. et al. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.929-938, 2000.

RAMBO, L. et al. Rendimento de grãos da soja em função do arranjo de plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.3, p.405-411, mai-jun, 2003.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. 1 ed. São Paulo: Manole, 188 p., 1990.

_____. TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri, Manole, 2004.

REICOSKY, D. C.; HEATHERLY, L. G. Soybean. In: STEWART, B.A.; NIELSEN, D.R. **Irrigation of agricultural crops**. Madison: ASA/ CSSA/SSSA, 1990. p.639-674. (Agronomy, 30).

REUNIÃO DE PESQUISA DA SOJA DA REGIÃO SUL, 37., Porto Alegre, 2009. **Programa e resumos**. Porto Alegre : UFRGS, CD-ROM, 2009.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous médiums. **Physics**, p. 318-33, 1931.

RICHARDS, R. A. et al. Improving the efficiency of water use by plant breeding and molecular biology. **Irrigation Science**, New York, v.14, p.93-104, 1993.

RICHTER, D. D, et al. Effects of annual tillage on organic carbon in a fine-textured udalf: the importance of root dynamics to soil carbon storage. **Soil Science.**, Baltimore, v.48, n.3, p. 78-83, 1990.

RITCHIE, J. T. **Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover.** *Water Resour. Res.*, 8(5): 1204-13, 1972.

ROBAINA, A. D. **Estudo experimental e de simulação numérica da aplicação da água na produção das culturas.** 1992. 144 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1992.

_____. **Programa computacional MFLUXO.** Comunicação pessoal, em 28 jun. 2009, 2009.

ROBERTSON, W. K. et al. Effects of plant-water stress on root distribution of corn, soybeans, and peanuts in sandy soil. ***Agronomy Journal***, Madison, v. 72, n. 3, p. 548-550, May/June 1980.

ROCHA, O. C. et al. Ajuste do modelo Christiansen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. ***Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 263-268, 2003.

RODRIGUES, O. et al. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. ***Pesquisa Agropecuária Brasileira***, Brasília, v. 36, n. 3, p. 431-437, mar. 2001.

ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate:** The biological environment. New York: John Wiley & Sons, 459 p., 1983.

RUÍZ-NOGUEIRA, B. et al. Calibration and use of CROPGRO-soybean model for improving soybean management under rainfed conditions. *Agric. Sys.*, [s.l.], v. 68, n. 2, p. 151-173, 2001.

RUNGE, E. C. A.; ODELL, R. T. The relation between precipitation, temperature and yield of soybeans in the Agronomy South Farm, Urbana, Illinois. ***Agronomy Journal***, 52:245-247, 1960.

RUNNING, S. W. et al. Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by coupling satellite data with ecosystem simulation. ***Ecology***, v.70, p.1090-1101, 1989.

SALINAS, A. R. et al. Comportamento de genótipos de soja, hasta el estadio de plantulas, en diferentes niveles de humedad. IN: CONFERENCIA MUNDIAL DE

INVESTIGACION EN SOJA, 4., 1989. Buenos Aires. **Actas...** Buenos Aires: Asociación Argentina de la Soja, 1989, p. 376-382.

_____. et al. Respostas fisiológicas que caracterizan el comportamiento de diferentes cultivares de soja a la deficiencia hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 5, p. 331-338, 1996.

SANTOS JUNIOR, J D. G.; MONTEIRO, F. A. M; LAVRES JUNIOR, J. Análise de Crescimento do Capim-Marandu Submetido a Doses de Nitrogênio. **Revista Brasileira Zootecnia**, v.33, n.6, p.1985-1991, 2004.

SCHACKER, C. A.; MATZENAUER, R. Disponibilidade hídrica para a cultura da soja em anos de El Nino, La Ninam e Neutros, nas regiões climáticas do planalto médio e depressão central do Rio Grande do Sul. XIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. **Anais...**, VOL I, Páginas 327 e 328 UNIFRA, SBA, UFSM, Santa Maria, RS, 2003.

SCHIAVON, M. et al. Interactions between chromium and sulfur metabolism in Brassica juncea. *J. Environ. Qual.* 37:1536-1545, 2008.

SCHNEIDER, P. R. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF, 236p. 1998.

SCHNEPF, R. D. et al. 2001. Agriculture in Brazil and Argentina: Developments and Prospects for Major Field Crops. Market and Trade Economics Division, Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture (USDA), Agriculture and Trade Report. WRS-01-3. Disponível em: <http://www.ers.usda.gov/publications/wrs013/>. Acesso em 18 de fev., 2011.

SCHÖFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, n.2, v.9, p.241-249, 2001.

SCOTT, H. D.; BATCHELOR, J. T. Dry weight an leaf area production rates of irrigated determinate soybeans. **Agronomy Journal**, v. 71, p. 776-782, 1979.

SEGINER, I. A note on the economic significance of uniform water application. **Irrigation Science**., Berlin, v.19, p.19-25, 1978.

SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia aplicada à irrigação. In: MIRANDA, J.H e PIRES, R. C. M. Irrigação. FUNESP, p. 63-120. Piracicaba, SP, 2001.

SHIBLES, R. M.; WEBER, C. R. Leaf area, solar radiation interception, and dry matter production by various soybean planting patterns. **Crop Science**, v.6, p.575-577, 1965.

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

SOUZA, P. J. O. P. et al., Uso da radiação pela soja (*Glycine max* (L.) Merrill), em Paragominas-PA. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.16, n. 2, p.175-181, agosto, 2008.

SPAETH, S. C.; RANDALL, H. C.; SINCLAIR, T. R.; VENDELAND, J. S. Stability of soybean harvest index. **Agronomy Journal**, Madison, v.76, p.482-486, 1984.

STEWART, D. A.; NIELSEN, D. R. **Irrigation of agricultural crops**. Madison: American Society of Agronomy. (Agron. Mon, 30) 1990.

STECKLING, C. et al. Análise conjunta de VCU de linhagens de soja RR de ciclo precoce no Rio Grande do Sul na safra de 2006/07. In: XXXV REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 2007, Santa Maria. **Atas e Resumos**, 2007.

STEINBERG, R. A.; GARDNER, W. W. Response of certain plants to length of day and temperature under controlled conditions. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 52, p. 943-960, 1936.

STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Eds.). Irrigation of agricultural crops. New York : **American Society of Agronomy**, ch.9, p. 244-280, 1990.

STICKLER, F. C. et al. Leaf area determination in grain sorghum. **Agronomy Journal**, v. 53, p. 197-188, 1961.

STOCKLE, C.; CAMPBELL, G. A. simulation model for predicting effect of water stress on yield: An example using corn. **Advances in Irrigation**, New York, v.3, p.283-311, 1985.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Tradução Eliane Romanato Santarém et al. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 719 p., 2004.

TAYLOR, H. M.; ARKIN, G. F. Root zone modification: fundamentals and alternatives. In: Taylor, H. M.; ARKIN, G. F. Modifying the root environment to reduce crop stress. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, p.1-17, 1981.

TESTEZLAF, R. et al. **Importância da irrigação no desenvolvimento do agronegócio**, Junho 2002. Disponível em <http://www.agr.feis.unesp.br/csei.pdf>. Acesso em 15 de jan., 2011.

THOMAS, A. L. et al. Rendimento de grãos de soja afetado pelo espaçamento entre linhas e fertilidade do solo. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.28, n.4, p.543-546, 1998.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, n. 38, p. 55-94, 1948.

TOMAS, A. L.; COSTA, J. A. Influência do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.9, p. 1389-1396, 1994.

TORRES, E. et al. **Manejo do solo para a cultura da soja**. Londrina: EMBRAPA-CNPSO, 71p. (EMBRAPA-CNPSO. Circular técnica, 12), 1993.

URBEN FILHO, G.; SOUZA, P. I. de M. de. Manejo da cultura da soja sob cerrado: época, densidade e profundidade de semeadura. In: ARANTES, N.E.; SOUZA, P.I. de M. de (Ed.). **Cultura da soja nos cerrados**. Piracicaba: Potafos, p.267-298, 1993.

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.

VILLA NOVA, N. A. et al. Evapotranspiration as a function of leaf area index and class A pan evaporation. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.2, p.35-37, 1996.

WALLACE, D. H.; YAN, W. K. **Whole system plant physiology-breeding for plant maturity, adaptation, and yield**. Wallingford, Oxon, UK: CAB International, 462 p., 1998.

WATSON, D. J. The physiological basis of variation in yield. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.4, p.101-144, 1952.

WRIGHT, D. L. et al. Planting method and plant population influence on soybeans. **Agronomy Journal**, v. 76, n. 4, p. 921-924, 1984.

ZABOT, L. **Caracterização agrônômica de cultivares transgênicas de soja cultivadas no Rio Grande do Sul**. 2009. 280 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

ZOCOLER, J. L. et al. Eficiência e adequabilidade da irrigação de um equipamento do tipo pivô central. **In: XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA 2001 Mabu Thermas & Resort, Foz do Iguaçu – Paraná, 31 de julho a 03 de agosto de 2001.**

APÊNDICES

APÊNDICE I: Valores médios do índice de área foliar ($m^2.m^{-2}$) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura da soja CD 219.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
12	175,6	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,00	11,14
19	271,5	0,16	0,20	0,27	0,22	0,25	0,26	0,22	0,04	18,29
26	347,0	0,91	1,08	0,90	0,91	0,62	0,89	0,88	0,15	16,61
33	439,6	1,67	1,84	2,71	2,57	2,67	2,48	2,29	0,45	19,64
44	578,3	2,30	2,78	3,41	4,04	4,02	3,86	3,31	0,72	21,77
54	717,8	4,79	4,78	6,10	5,05	4,11	3,95	4,97	0,77	15,49
63	845,9	5,45	5,51	6,20	5,86	5,00	4,86	5,36	0,44	8,20
70	946,3	5,66	5,70	6,65	6,45	6,26	6,23	6,14	0,40	6,50
78	1040,6	5,72	5,65	6,70	7,36	6,72	6,51	6,20	0,77	12,45
86	1147,4	4,73	5,54	6,46	7,63	6,65	6,34	6,20	0,99	16,01
93	1232,8	3,59	5,47	5,89	6,21	5,52	5,79	5,34	0,93	17,50
103	1345,6	3,50	4,42	4,77	4,90	3,82	3,79	4,28	0,58	13,51
110	1438,5	3,32	3,41	3,48	2,41	2,35	2,20	3,00	0,60	19,99
126	1613,4	0,06	0,06	0,09	0,34	0,16	0,44	0,14	0,16	112,83

APÊNDICE II – Valores médios do índice de área foliar ($m^2.m^{-2}$) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura da soja AL 55.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
19	271,5	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,00	10,34
26	347,0	0,16	0,18	0,45	0,14	0,19	0,23	0,22	0,11	50,76
33	439,6	1,04	1,07	1,31	0,98	1,39	0,76	1,09	0,23	21,02
44	578,3	2,50	2,57	2,79	3,59	3,25	2,72	2,90	0,43	14,66
54	717,8	3,95	4,08	4,27	6,19	5,11	4,68	4,72	0,84	17,80
63	845,9	5,62	6,46	6,61	7,17	7,41	6,41	6,61	0,63	9,58
70	946,3	6,58	7,49	7,50	7,54	8,01	7,71	7,47	0,48	6,38
78	1040,6	7,36	7,63	7,88	7,69	8,14	7,75	7,74	0,26	3,37
86	1147,4	5,52	6,74	6,82	7,11	7,13	6,46	6,63	0,60	9,04
93	1232,8	4,40	6,29	6,51	6,63	7,11	6,31	6,21	0,93	15,02
103	1345,6	3,15	3,21	3,42	3,82	4,21	3,92	3,62	0,43	11,78
110	1620,7	0,56	0,57	0,67	0,38	0,65	0,65	0,58	0,11	18,88

APÊNDICE III – Valores médios de matéria seca total (g.planta⁻¹) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura da soja CD 219.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV(%)
44	578,3	4,85	6,83	5,53	4,72	7,84	6,30	6,01	1,21	20,18
54	717,8	12,45	12,18	10,26	10,73	13,47	16,16	12,54	2,13	16,96
63	845,9	14,62	15,30	15,80	13,33	15,86	18,99	15,65	1,88	12,04
70	946,3	19,40	19,43	19,20	18,34	22,50	25,19	20,68	2,63	12,72
78	1040,6	24,00	22,72	22,51	18,10	26,33	31,16	24,14	4,36	18,08
86	1147,4	32,53	40,06	31,51	33,95	41,72	42,25	37,00	4,87	13,16
93	1232,8	39,42	41,08	46,52	41,75	49,62	51,19	44,93	4,88	10,86
103	1345,6	43,76	42,31	48,95	45,24	47,48	56,83	47,43	5,20	10,96
110	1438,5	46,46	46,83	51,38	49,45	46,26	60,33	50,12	5,39	10,76
117	1519,5	43,84	48,57	52,79	53,42	49,39	56,93	50,82	4,56	8,97
128	1641,6	46,14	50,69	53,33	54,94	51,39	59,92	52,73	4,61	8,74
137	1721,5	41,84	46,52	49,94	51,10	53,03	54,34	49,46	4,61	9,31

APÊNDICE IV – Valores médios de matéria seca (g.planta⁻¹) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura da soja AL 55.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV(%)
44	578,3	5,64	7,31	5,21	4,03	4,45	5,85	5,42	1,16	21,40
54	717,8	18,16	12,18	9,17	13,60	7,22	17,71	13,01	4,43	34,02
63	845,9	18,59	14,52	12,88	17,33	9,89	22,34	15,92	4,42	27,78
70	946,3	18,46	14,89	15,46	19,76	12,59	23,22	17,40	3,84	22,07
78	1040,6	19,88	21,92	20,15	24,26	15,88	27,43	21,59	3,97	18,40
86	1147,4	23,53	25,55	23,46	27,31	22,59	39,03	26,91	6,18	22,96
93	1232,8	37,90	47,22	36,91	37,19	33,31	40,49	38,84	4,71	12,12
103	1345,6	38,25	47,85	41,80	37,65	42,42	44,41	42,06	3,83	9,09
110	1438,5	34,66	42,33	44,07	42,03	46,75	48,77	43,10	4,89	11,34
117	1519,5	42,36	49,01	49,53	50,11	51,59	56,34	49,82	4,52	9,07

APÊNDICE V – Valores médios de profundidade do sistema radicular (cm) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura da soja CD 219.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
12	175,6	3,68	4,31	4,91	5,40	5,74	5,85	4,98	0,85	17,16
26	347,0	15,57	18,13	20,47	22,29	23,33	23,30	20,52	3,13	15,26
44	578,3	19,38	22,61	26,10	28,90	29,80	28,38	25,86	4,09	15,82
70	946,3	20,32	23,59	28,47	30,56	32,53	30,96	27,74	4,78	17,22
78	1040,6	25,00	24,09	29,53	32,73	34,86	32,53	29,79	4,41	14,81
110	1438,5	25,30	25,10	30,03	33,23	35,36	33,03	30,34	4,33	14,27

APÊNDICE VI – Valores médios de profundidade do sistema radicular (cm) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura da soja AL 55.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
12	175,6	3,68	4,31	4,91	5,40	5,74	5,85	4,98	0,85	17,16
26	347,0	15,57	13,18	20,47	22,29	23,33	23,30	20,52	3,13	15,26
44	578,3	19,38	22,61	26,10	28,90	29,80	28,38	25,86	4,09	15,82
70	946,3	20,32	23,59	28,47	30,56	32,53	30,96	27,74	4,78	17,22
78	1040,6	25,00	24,09	29,53	32,73	34,86	32,53	29,79	4,41	14,81
110	1438,5	25,30	25,10	30,03	33,23	35,36	33,03	30,34	4,33	14,27

APÊNDICE VII – Variação diária dos elementos agrometeorológicos durante o ciclo da cultura.

