

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA**

**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**

Lucieta Guerreiro Martorano
Meteorologista (UFPA)
Engenheiro Agrônomo (FCAP)
Mestre em Agronomia (ESALQ/USP)

Tese apresentada como um dos
requisitos à obtenção do Grau de
Doutor em Fitotecnia,
Área de Concentração Agrometeorologia

Porto Alegre (RS), Brasil
Janeiro de 2007

*Estude, mas estude para aprender.
Dizia meu amado pai Francesco Martorano.*

OFEREÇO (*in memorian*)

DEDICO

À minha adorável mãe Maria Hermínia, pela força, determinação e sólidos ensinamentos.

Aos meus queridos irmãos Antonietta e Pietro pelo amor verdadeiro e incentivo permanente, extensivo ao meu cunhado Dino Priante e a minha cunhada Odiléa, por fazerem parte de nossa querida família.

Aos meus avós maternos Corino e Cristina Gerreiro (*in memorian*) pelo amor e carinho na minha infância e adolescência.

Aos meus tios Geraldo e Celeste, pelos sólidos ensinamentos e amor verdadeiro.

Ao tio Gabriel Guerreiro pela força nos primeiros passos profissional.

Aos demais tios Maria Cristina (*in memorian*), Helena (*in memorian*) e Mário, Selma, Conceição, Alice e Gilberto, pelo carinho a cada reencontro. Também, à tia Sônia pelos ensinamentos no início da minha vida profissional.

Aos meus primos (manos) Graça, Márcia, Fernando, Leonel e Cristiane pelo amor fraterno.

À prima Alda Miléo, pelas sobrinhas lindas e amizade incondicional.

Aos meus amados e doces sobrinhos (Pierro, Alessandra, Andressa, Francesco, Bruno e Giancarlo) pela compreensão da distância física e amor verdadeiro.

A todos meus primos Miléos, Reales, Souzas, Guerreiros, Siqueiras, Martoranos, pelo carinho e alegria a cada reencontro.

Ao primo André Reale pelas mensagens de força durante o curso.

Aos meus incontáveis e especiais amigos por me incluírem em suas orações.

Em especial aos espíritos de luz que me deram força para chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Dr. Homero Bergamasch, meus sinceros agradecimentos pela compreensão, voto de confiança e valiosos ensinamentos durante o curso.

Ao professor Dr. Rogério Teixeira de Faria, pesquisador do Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), pela co-orientação, principalmente nas atividades envolvendo o sistema de suporte à Decisão, DSSAT. Obrigada pelo apoio durante as atividades em Londrina, extensivo a sua família e aos colegas que integram a sua competente e querida equipe de trabalho.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, especialmente à Embrapa Solos, pela oportunidade ímpar à minha capacitação profissional. Aproveito para registrar minha gratidão ao Dr. Celso Manzatto, extensivo aos colegas que integram sua equipe, pelo ambiente ético e agradável do nosso Centro de Pesquisa.

Registro meus sinceros agradecimentos aos professores Moacir A. Berlato, Denise C. Fontana, Luís Mauro Rosa, João Ito Bergonci e Aino Jacques pela atenção, apoio e incentivo permanente.

Não poderia deixar de registrar meus agradecimentos a todos os outros professores da Faculdade de Agronomia da UFRGS, em especial aos professores, Miguel Dall’Agnol, Maria Tereza Wittmann, Lúcia Franke, Renato de Medeiros, Cimélio Bayer, João Mielniczuk, Neroli Cogo e Carlos Trein, pela acolhida e agradável convívio. Aos professores Lúcia Dillenburg, Artur Fett Neto, Jacques Marré, João Riboldi e Djanira Saldanha, pelos valiosos conhecimentos transmitidos.

Meus agradecimentos aos funcionários da UFRGS, em especial à Marisa (Secretária do Programa de Pós-Graduação), ao Celso, Carlos e Alcino (EEA/UFRGS).

Aos amigos Genei Dalmago e Cleusa Bianchi pelo apoio na instalação do experimento de campo e valiosas críticas e sugestões.

À amiga Angélica Piccini pelo incentivo permanente e à pesquisadora Mariana Caballo, pela colaboração nas análises estatísticas.

À colega Tatiana Almeida e aos bolsistas, Antônio Giroto Jr., Flavia Comiran e Bruna Heckler pela colaboração nas coletas de campo e feliz convívio. À amiga Loana, pela ajuda em momentos difíceis, na fase final do curso. À amiga Janice Leivas pela acolhida e ensinamentos sobre as tradições gaúchas.

Aos colegas Júlio, Jefferson, Ricardo Mello, Gilca, Amanda, Ana Paula, Mauro, Fabrício, Eduardo, Edmundo, Maria e Eliana, extensivo às funcionárias do departamento Kátia e Maria, pelo salutar convívio.

As amigas Fabiane Lamego e Nara Poletto pelo apoio e força durante o curso.

Aos colegas mais próximos Armando (Carioca), Gilmar Nava, Fabiano Bona, Paulo César, Carla, Nilvania, Madalena, Margareth, Júlio Salton, Candida, Márcia, Frederico, Gustavo, Luís França, Osmar, Karina, Regilene, pela agradável convivência durante o curso.

À amiga Jeane Portela pelo apoio, força e compreensão em momentos difíceis.

À amiga Tatiana Lenskij pelas críticas e sugestões na finalização da tese.

Meu carinho e agradecimento aos amigos gaúchos que me apoiaram, rezaram e me incluíram em suas vidas (Solange França, Fatinha, Sandrina, Roselis, Giovana, Nina, Carol, Rejane, Jussara, Nádia e Pedroso).

Às irmãs da Divina Providência, em especial a Wilma, Cleusa, Ildegarda e Nelcy, extensivo à família das irmãs Wilma e Nelcy, em Estrela.

À professora de inglês Ana Peres e a psicóloga Anissis Ramos pelos ensinamentos que auxiliaram nessa conquista.

À minha amiga de alma Marisa Duarte (*in memorian*), pelo exemplo de força, ética e amizade verdadeira.

A todos que direta ou indiretamente incentivaram o desenvolvimento deste trabalho.

PADRÕES DE RESPOSTA DA SOJA A CONDIÇÕES HÍDRICAS DO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA, OBSERVADOS NO CAMPO E SIMULADOS NO SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO DSSAT¹

Autora: Lucieta Guerreiro Martorano

Orientador: Prof. Dr. Homero Bergamaschi

Co-orientador: Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria

RESUMO

Conduziu-se um experimento em Eldorado do Sul, RS para identificar respostas da soja à dinâmica do ambiente, com ênfase nas condições hídricas. A cultivar Fepagro RS-10 foi semeada em 20/11/2003, em preparo convencional e sistema plantio direto, irrigado e não irrigado - PCI, PCNI, PDI e PDNI, respectivamente. Foram monitoradas condições meteorológicas, variáveis hídricas de solo e planta e, de crescimento das plantas. Em períodos de estiagem, o solo manteve maior conteúdo de água em plantio direto que em preparo convencional. O índice de área foliar (IAF) máximo, no florescimento, variou de 5,6 (PDNI) a 6,3 (PCI). A evolução de IAF em função de graus-dia se ajustou a um modelo sigmoidal até IAF máximo e a um modelo log-normal em todo o ciclo. A cultura acumulou 806 graus-dia até o florescimento e 1.945 graus-dia, em todo ciclo. A evapotranspiração máxima foi de 690mm em todo o ciclo, com média de 4,8mm dia⁻¹. O coeficiente de cultura variou de 0,5 (início do ciclo) a 1,1 (florescimento). Déficit hídrico no solo causou reduções de IAF, estatura, biomassa aérea, área foliar específica e eficiência no uso de radiação solar. O potencial mínimo da água na folha, a condutância estomática (g_f) e o teor de clorofila foram mais elevados em PDI. A menor g_f ocorreu em PDNI, que manteve maior IAF que PCNI. O rendimento de grãos variou de 1.559 kg ha⁻¹ (PCNI) a 3.816 kg ha⁻¹ (PDI). O conjunto de indicadores evidenciou melhor desempenho em PD que em PC, pela maior disponibilidade hídrica. O modelo CROPGRO-Soybean foi eficiente em simular a fenologia da soja, mas demonstrou limitações nas estimativas de biomassa, IAF, rendimento e seus componentes, em particular sob déficit hídrico, indicando necessidade de ajustes em parâmetros do balanço de água no solo, para uma maior precisão do modelo em simular crescimento e rendimento da soja.

¹ Tese de Doutorado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil (151p.), Janeiro, 2007.

PATTERN OF RESPONSE OF SOYBEANS TO WATER CONDITIONS IN THE SOIL-PLANT-ATMOSPHERE SYSTEM, OBSERVED IN THE FIELD AND SIMULATED BY THE DSSAT DECISION SOPORT SYSTEM²

Author: Lucieta Guerreiro Martorano
Advisor: Prof. Dr. Homero Bergamaschi
Co-advisor: Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria

ABSTRACT

A field experiment was conducted in Eldorado do Sul, Brazil, to identify responses of soybeans to the environmental dynamics, emphasizing water conditions. The Fepagro RS-10 cultivar was sown in 20/11/2003, in conventional tillage and no-tillage, irrigated and non-irrigated – CTI, NTI, CTNI, NTNI, respectively. Weather conditions, water variables of soil and plant, as well as crop growth parameters were monitored. During dry periods, higher soil water content was observed in no-tillage, as compared to conventional tillage. Maximum leaf area index (LAI) at flowering stage ranged from 5.6 (NTNI) to 6.3 (CTI). The evolution of LAI as function of accumulated degree-days was adjusted to a sigmoid model from plants emergence to flowering stage and to a log-normal model for the entire crop cycle. Accumulated degree-days were 806 from emergence to flowering and 1,945 for the crop cycle. Crop maximum evapotranspiration was 690mm for the entire cycle, with an average of 4.8mm day⁻¹. Crop coefficient ranged from 0.5 (beginning of the cycle) to 1.1 (flowering). Soil water deficit reduced LAI, plant height, canopy biomass, specific leaf area and radiation use efficiency. Minimum leaf water potential and higher leaf stomatal conductance and chlorophyll content were detected in CTI. Crop grain yields ranged from 1,559 kg ha⁻¹ (CTNI) to 3,816 kg ha⁻¹ (NTI). The evaluated crop indices showed better performance under no-tilled soils, due to higher soil water availability, in comparison to the conventional tillage system. The COPGRO-Soybeans model was efficient to simulate crop phenology, but showed limitations to estimate canopy biomass, LAI and yield components, in particular under water deficit. Differences in soil water availability and extraction by plants, among the soil tillage systems, suggest the necessity in adjusting water parameters in order to improve the performance of the model in simulating the crop growth and yield.

² Doctor thesis in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (151p.), January, 2007.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Precipitação pluvial e sua influência no rendimento da soja no Rio Grande do Sul.....	7
2.2 Indicadores de déficits hídricos na soja	9
2.3 Sistemas de manejo e efeitos no regime térmico-hídrico do solo ..	12
2.4 Modelos de simulação em cultivos agrícolas	16
2.5 Sistema de suporte à decisão	18
2.6 Modelo de simulação para a cultura da soja no DSSAT	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 Caracterização da área experimental: clima e solo	22
3.2 Delineamento experimental	24
3.3 Histórico e manejo da área experimental	25
3.4 Cultura de soja (cv. Fepagro RS-10)	27
3.5 Monitoramento de variáveis do sistema solo-planta-atmosfera	27
3.5.1 Umidade no Solo	27
3.5.2 Graus-dia acumulados	29
3.5.3 Radiação fotossinteticamente ativa e eficiência de conversão ...	30
3.5.4 Crescimento e desenvolvimento da soja	32
3.5.5 Evapotranspiração e coeficiente de cultura da soja	34
3.6 Balanço hídrico no solo	36
3.7 Avaliação de potencial da água na folha e condutância foliar	40
3.8 Avaliação do teor de clorofila na folha	40
3.9 Rendimento de grãos e componentes	41
3.10 Índice de colheita (IC).....	42
3.11 Análise estatística.....	42
3.12 Modelo CROPGRO-Soybean	44
3.12.1 Dados de clima	45
3.12.2 Dados de solo	46
3.12.3 Dados do experimento de campo	48
3.12.4 Simulações no Modelo CROPGRO	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 Variáveis climáticas da área experimental	53
4.2 Variáveis meteorológicas durante o período experimental	54
4.3 Evapotranspiração máxima (ET _m) E Coeficiente de cultura (K _c)...	59

4.4 Balanço hídrico no solo em preparo convencional e plantio direto	64
4.5 Indicadores hídricos no solo	69
4.6 Indicadores de crescimento e desenvolvimento da soja	77
4.6.1 Índice de área foliar	79
4.6.2 Estatura da planta	84
4.6.3 Matéria seca aérea	88
4.6.4 Taxa de Crescimento da Cultura (TCC)	93
4.7 Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa	97
4.8 Indicadores de condições hídricas na planta	101
4.8.1 Potencial mínimo da água na folha	101
4.8.2 Condutância estomática.....	105
4.9 Teores de clorofila na folha	108
4.10 Rendimento de grãos e componentes	112
4.11 Teste de modelo CROPGRO – Soybean	117
5 CONCLUSÕES	135
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1 – Principais características da cultivar Fepagro RS-10	27
TABELA 2 – Coeficientes ajustados pela equação de Van Genuchten com base em dados de umidade do solo em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), em diferentes profundidades, utilizando as curvas características de retenção de água determinadas por Dalmago (2004). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS	29
TABELA 3 – Características pedológicas de diferentes profundidades (Prof) do perfil do solo em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) na área experimental. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04	47
TABELA 4 – Coeficientes genéticos da cultivar Fepagro RS-10, calibrados no CROPGRO-Soybean, em Eldorado do Sul, RS, 2003/04	51
TABELA 5 – Variáveis meteorológicas durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em diversos estádios fenológicos (Fehr & Caviness, 1977), em Eldorado do Sul, RS, 2003/04	69
TABELA 6 – Estádios fenológicos da soja, cultivar Fepagro RS-10 (Fehr & Caviness, 1977), em Eldorado do Sul, RS, 2003/04	78
TABELA 7 – Coeficientes do modelo sigmoidal ajustado para estimar IAF até IAFmáximo (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional irrigado e não irrigado (PCI e PCNI) e plantio direto irrigado e não irrigado (PDI e PDNI), em função de graus-dia acumulados e respectivos parâmetros ajustados e coeficientes de determinação (R^2). Eldorado do Sul, 2003/04	84

TABELA 8 – Coeficientes do modelo log-normal ajustado para estimar IAF durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional irrigado e não irrigado (PCI e PCNI) e plantio direto irrigado e não irrigado (PDI e PDNI), em função de graus-dia acumulados e respectivos parâmetros ajustados e coeficientes de determinação (R^2). Eldorado do Sul, 2003/04	84
TABELA 9 – Coeficientes do modelo sigmoidal ajustado para estimar a estatura da soja cv.Fepagro RS-10 em função de graus-dia acumulados, e coeficientes de determinação (R^2). Eldorado do Sul, 2003/04	87
TABELA 10 – Teores de clorofilas <i>a</i> e <i>b</i> (mg dm ⁻²) em folhas de soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) irrigado (I) e não irrigado (NI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04	109
TABELA 11 – Componentes de rendimento de soja (cv. Fepagro RS-10), cultivada em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), irrigado (I) e não irrigado (NI), no ano agrícola 2003/04, na EEA/UFRGS, em Eldorado do Sul, RS	115
TABELA 12 – Balanço de água durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) sob preparo convencional irrigado e não irrigado (PCI e PCNI) e plantio direto irrigado e não irrigado (PDI e PDNI) estimados pelo modelo CROPGRO-Soybean Eldorado do Sul, RS, 2003/04	124

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1 – Rendimento médio de soja no Rio Grande do Sul e no Paraná correspondentes ao ano agrícolas entre 76/77 a 04/05 (gráfico elaborado a partir de dados disponibilizados pela CONAB, 2006)	6
FIGURA 2 – Estação meteorológica na área experimental com soja (cv.Fepagro RS-10). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04	23
FIGURA 3 – Representação do delineamento experimental, com distribuição dos blocos, tratamentos (plantio direto irrigado e não irrigado - PDI e PDNI, preparo convencional irrigado e não irrigado - PCI e PCNI) e linha de aspersores. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04	24
FIGURA 4 – Diagrama ilustrativo das variáveis que integram a base de dados do sistema atmosfera-solo-planta para as simulações do modelo CROPGRO-Soybean, no DSSAT.....	45
FIGURA 5 - Estádios fenológicos e o tempo de duração de cada período (cv. Fepagro RS-10) obtidos no experimento em Eldorado do Sul, RS, 2003/04 e utilizados para calibrar o CROPGRO-Soybean.	50
FIGURA 6 – Precipitação pluvial (P) e temperaturas do ar: máxima (T _{máx}), mínima (T _{mín}) e média (T _{méd}) e estádios fenológicos, em dias após a emergência, durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04	55
FIGURA 7 – Duração do dia (h) e amplitude térmica (°C) no ciclo da (cv. Fepagro RS-10). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04	57

FIGURA 8 – Radiação solar global incidente (R_s) e radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA_{inc}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04	58
FIGURA 9 – Evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração máxima (ET_m), coeficiente de cultura (K_c) e irrigação diária (mm) na cultura da soja (cv. Fepagro RS-10) sob preparo convencional. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.....	60
FIGURA 10 – Coeficiente de cultura (K_c) da soja (cv. Fepagro RS-10) em função do índice de área foliar (IAF), em plantio direto irrigado (PDI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04	62
FIGURA 11 – Precipitação pluvial (P), normal e em 2003/04 (ciclo da soja) e evapotranspiração máxima da soja (ET_m) correspondente ao último decêndio de novembro e mensal de dezembro a abril em Eldorado do Sul, RS. 2003/04	63
FIGURA 12 – Balanço hídrico diário com excedentes (Exc) e déficits (Def) hídricos, em função de dias após a emergência da soja (cv. Fepagro RS-10), em preparo convencional não irrigado (PCNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04.	66
FIGURA 13 – Balanço hídrico diário com excedentes (Exc) e déficits (Def) hídricos, em função de dias após a emergência da soja (cv. Fepagro RS-10), em plantio direto não irrigado (PDNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04	67
FIGURA 14 – Umidade volumétrica do solo durante o primeiro ciclo de secagem do solo cultivado com soja (cv. Fepagro RS-10) sob plantio direto não irrigado (PDNI) e preparo convencional não irrigado (PCNI), nas profundidades de 0,075 m a 0,30 m em Eldorado do Sul, RS, 2003/04	70
FIGURA 15 – Potencial matricial da água no solo cultivado com soja em preparo convencional não irrigado (PCNI), nas profundidades de 0,075 a 1,20 m, no período de floração da soja (cv. Fepagro RS-10) entre os 73 e 77 dias após a emergência (DAE), em Eldorado do Sul, RS, 2003/04	74
FIGURA 16 – Potencial matricial da água no solo cultivado plantio direto não irrigado (PDNI), nas profundidades de 0,075 a 1,20 m, no período de floração da soja (cv. Fepagro RS-10), entre os 73 e 77 dias após a emergência (DAE), em Eldorado do Sul, RS, 2003/04	75

FIGURA 17 – Umidade volumétrica média no solo durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10), sob preparo convencional não irrigado (PCNI) e plantio direto não irrigado (PDNI), nas profundidades de 0,075 m a 0,45 m em Eldorado do Sul, RS, 2003/04	77
FIGURA 18 – Subperíodo da soja (cv. Fepagro RS-10), em sistemas de plantio direto e preparo convencional, irrigados e não irrigados. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04	79
FIGURA 19 – Evolução do índice de área foliar da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional irrigado e não irrigado (PCI e PCNI) e plantio direto irrigado e não irrigado (PDI e PDNI), EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04	83
FIGURA 20 – Modelo sigmoidal para estatura da soja (cv. Fepagro RS-10) em função de graus-dia acumulados, em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), irrigado (I) e não irrigado (NI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04	87
FIGURA 21 – Evolução da matéria seca (folhas, hastes e legumes), durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em função de graus-dia acumulados, em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), irrigado (I) e não irrigado (NI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04	90
FIGURA 22 – Área foliar específica da soja (cv. Fepagro RS-10), em preparo convencional irrigado (PCI) e plantio direto irrigado (PDI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04	91
FIGURA 23– Área foliar específica da soja (cv. Fepagro RS-10), em preparo convencional irrigado (PCI) e plantio direto irrigado (PDI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04	93
FIGURA 24 – Taxa de crescimento da cultura (TCC) da soja (cv. Fepagro RS-10) por graus-dia acumulados em preparo convencional irrigado (PCI) e plantio direto irrigado (PDI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04	94
FIGURA 25 – Taxa de crescimento da cultura (TCC) da soja (cv. Fepagro RS-10) expressa em função de graus-dia acumulados em preparo convencional não irrigado (PCNI) e plantio direto não irrigado (PDNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04	96

FIGURA 26 – Eficiência de interceptação (ϵ_{int}) de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) em função do índice de área foliar (IAF) em soja em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), irrigado (I) e não irrigado (NI). Eldorado do Sul, RS, 2003/04	98
FIGURA 27 – Evolução da matéria seca aérea da soja (cv. Fepagro RS-10) em função da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada sob condição irrigada e não irrigada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04	100
FIGURA 28 – Potencial mínimo da água na folha ($\Psi_{mín}$) em soja (cv. Fepagro RS-10) cultivada em plantio direto irrigado e não irrigado (PDI e PDNI) e preparo convencional irrigado e não irrigado (PCI e PCNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04	105
FIGURA 29 – Condutância estomática em folha de soja (cv. Fepagro RS10) sob plantio direto irrigado e não irrigado (PDI e PDNI) e preparo convencional irrigado e não irrigado (PCI e PCNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04	108
FIGURA 30 – Total de clorofila em folhas de soja (cv. Fepagro RS-10) sob preparo convencional irrigado e não irrigado (PCI e PCNI) e plantio direto irrigado e não irrigado (PDI e PDNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04	112
FIGURA 31 – Rendimento de grãos da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) irrigado (I) e não irrigado (NI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.....	113
FIGURA 32 – Umidade volumétrica do solo estimada pelo modelo CROPGRO-Soybeans e medida no campo, durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional e plantio direto irrigado (PCI e PDI) EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04	118
FIGURA 33– Umidade volumétrica do solo estimada pelo modelo CROPGRO-Soybeans e medida no campo, durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional e plantio direto não irrigado (PCNI e PDNI) EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04	119
FIGURA 34 – Umidade volumétrica do solo simulada pelo modelo CROPGRO-Soybeans e observada no campo (0,15 a 0,30 m), durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional e plantio direto irrigado (PCI e PDI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04	120

FIGURA 35 – Umidade volumétrica do solo simulada pelo modelo CROPGRO-Soybeans e observada no campo (0,15 a 0,30 m), durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional e plantio direto não irrigado (PCNI e PDNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04	121
FIGURA 36 – Umidade volumétrica do solo simulada pelo modelo CROPGRO-Soybeans e observada no campo (0,30 a 0,45 m), durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional e plantio direto irrigado (PCI e PDI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04	123
FIGURA 37 – Umidade volumétrica do solo simulada pelo modelo CROPGRO-Soybeans e observada no campo (0,30 a 0,45 m), durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional e plantio direto não irrigado (PCNI e PDNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04.....	123
FIGURA 38 – Simulação da transpiração (EP) da soja (cv. Fepagro RS-10) e evaporação (ES) na superfície do solo em preparo convencional irrigado (PCI) e plantio direto irrigado (PDI), pelo modelo CROPGRO-Soybeans. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04	126
FIGURA 39 – Simulação da transpiração (EP) da soja (cv. Fepagro RS-10) e evaporação (ES) na superfície do solo em preparo convencional não irrigado (PCNI) e plantio direto não irrigado (PDNI), pelo modelo CROPGRO-Soybeans. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04..	127
FIGURA 40 – Simulações do modelo CROPGRO-Soybeans para datas de ocorrência da primeira flor, primeiro legume e primeiro grão em soja (cv. Fepagro RS-10). Eldorado do Sul, RS, 2003/04	129
FIGURA 41 – Evolução do índice de área foliar (IAF) simulado pelo modelo CROPGRO-Soybeans (linhas) e observado no campo em preparo convencional e sistema plantio direto irrigado e não irrigado (PCI, PDI, PCNI e PDNI, respectivamente) em soja (cv. Fepagro RS-10). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04	130

FIGURA 42 – Simulações do modelo CROPGRO-Soybeans para matéria seca aérea (folhas, hastes, legumes e grãos) da soja (cv. Fepagro RS-10). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04	132
FIGURA 43 – Simulações do modelo CROPGRO-Soybean para rendimento da soja (cv. Fepagro RS-10). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04	133

RELAÇÃO DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α	Coeficiente de Van Genuchten
B	Blocos e seus indicadores (B1 a B4)
g_f	Condutância foliar
Ψ_{\min}	Potencial mínimo da água na folha
Ψ_m	Potencial matricial da água no solo
θ_r	Umidade residual do solo
θ_s	Umidade de saturação do solo
θ_v	Umidade volumétrica
R_s	Radiação solar global
RFA	Radiação fotossinteticamente ativa
ε_{int}	Eficiência de interceptação da radiação
EUR	Eficiência de uso da radiação
CC	Capacidade de campo
PMP	Ponto de murcha permanente
CAD	Capacidade de água disponível
Prof	Profundidade do solo
GD_{acum}	Graus-dia acumulados
DAE	Dias após a emergência
DAS	Dias após a semeadura
MS	Matéria seca aérea
IAF	Índice de área foliar
IAF _{máx}	Índice de área foliar máximo
$T_{máx}$	Temperatura máxima
$T_{mín}$	Temperatura mínima
$T_{méd}$	Temperatura média
T_b	Temperatura base (°C)
ET	Evapotranspiração
ET _m	Evapotranspiração máxima da soja

ETr	Evapotranspiração real
ETo	Evapotranspiração de referência
EP	Evapotranspiração da planta (no CROPGRO)
ES	Evaporação do solo (no CROPGRO)
Kc	Coefficiente de cultura
Cl _a	Clorofila <i>a</i>
Cl _b	Clorofila <i>b</i>
Σ	Somatório (Cl _a + Cl _b)
CROPGRO	Modelo de crescimento e rendimento de cultura
DSSAT	Sistema de suporte à decisão para transferência de agrotecnologias -"Decision Support System for Agrotechnology Transfer"
d	índice de confiança de Willmott
RQMS	Raiz quadrada do erro quadrado médio
ha	Hectare
U _o	Umidade do grão observado (%)
U _c	Umidade do grão corrigida (%)
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
IAPAR	Instituto Agrônômico do Paraná
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

1 INTRODUÇÃO

A soja é uma cultura de grande interesse econômico ao agronegócio brasileiro, por gerar recursos financeiros à cadeia produtiva, fomentar empregos, propiciar um dinâmico fluxo de bens e serviços, além de demandar suporte técnico-científico para aumentar a precisão na agricultura. Cada cultura responde de forma diferenciada às condições ambientais de acordo com o seu potencial genético. A comunidade científica tem buscado respostas das culturas à dinâmica de interações do sistema solo-planta-atmosfera para auxiliar no planejamento e condução nos cultivos agrícolas. Durante o ciclo a cultura é submetida a condições meteorológicas que podem ser favoráveis ou adversas, interferindo em processos relacionados ao crescimento e desenvolvimento, refletindo no seu rendimento final. Um desses fatores é a oferta pluvial.

No Rio Grande do Sul, a variabilidade interanual das chuvas, tem ocasionado quebra de rendimento de grãos, em cultivos de sequeiro (BERGAMASCHI, 1989, BERLATO; FONTANA, 1999, MATZENAUER *et al.*, 2002, BERGAMASCHI *et al.*, 2004). E, os maiores rendimentos na sojicultura gaúcha foram obtidos em anos em que as estiagens prolongadas ocorreram fora do período crítico da cultura, que vai do início da floração ao enchimento de grãos (MATZENAUER *et al.*, 1998), sendo o subperíodo de maior vulnerabilidade da cultura à escassez de água no solo.

Déficits hídricos no solo podem provocar alterações fisiológicas, tais como aumento na taxa transpiratória, redução do potencial da água na folha, da condutância estomática, da fotossíntese (OLIOSO *et al.*, 1996), fechamento estomático, redução no crescimento, queda de folhas, abortamento de flores, abscisão de legumes (CONFALONE *et al.*, 1999) e redução na eficiência de uso da radiação solar (CONFALONE *et al.*, 2002), bem como quedas no potencial de rendimento de grãos (MAEHLER *et al.*, 2003).

O conhecimento antecipado de indicadores de respostas da soja à condição hídrica pode auxiliar o empreendedor agrícola 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 de oferta hídrica adequada, seguir as recomendações do zoneamento agrícola (CUNHA; ASSAD, 2001) para cultura da soja (CUNHA *et al.*, 2001) e, adotar práticas de manejo capazes de aumentar os estoques de água no solo. Práticas de manejo que incorporam os resíduos culturais ou promovam a sua manutenção na superfície, podem implicar em diferentes condicionantes quanto aos estoques de água no solo.

Até os anos de 1970 predominava no Brasil o sistema de preparo convencional, mas houve mudanças na concepção quanto ao manejo e conservação do solo na região Sul (MIELNICZUK *et al.*, 1969; WÜNSCHE *et al.*, 1980; IAPAR, 1981) com implementação do sistema de semeadura direta, popularmente denominado sistema plantio direto. No preparo convencional, a adoção de práticas de revolvimento (aração seguido de gradagem), reduziu a armazenagem de água nas camadas mais superficiais (CINTRA *et al.*, 1983). Já no sistema plantio direto (que utiliza rotação de culturas, manutenção dos

restos culturais na superfície e mobiliza o solo apenas na linha de semeadura), houve aumentos na capacidade de retenção hídrica, reduções na temperatura do solo e nas taxas evaporativas (BRAGAGNOLO; MIELNICZUK, 1990; SALTON; MIELNICZUK, 1995). Estudos apontam que a palha na superfície do solo altera a relação solo-água, promovendo efeitos na redução das taxas evaporativas, principalmente nos estádios em que o dossel da cultura não cobre o solo totalmente.

As investigações envolvendo variáveis do sistema solo-clima-planta e sistema de manejo do solo geram um grande volume de dados. A análise integrada dessas variáveis demanda apoio computacional em sistemas capazes de suportar decisões. Neles é possível armazenar, consistir e tratar dados, bem como, a partir de modelos bem calibrados, simular padrões de respostas evidenciados em experimento de campo. Entre os sistemas disponíveis no mercado e nas instituições de pesquisa, encontra-se o sistema de suporte à decisão para transferência de tecnologia agrônômica, DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer). No DSSAT é possível simular crescimento, desenvolvimento e rendimento para 18 tipos de culturas (HOOGENBOOM *et al.*, 2003), inclusive a soja. No modelo CROPGRO-Soybean, no DSSAT é possível simular os efeitos do manejo (ANDALES *et al.*, 2000) e estabelecer cenários que auxiliem o planejamento dos cultivos.

Com base nas evidências apontadas em pesquisas, têm-se como hipóteses que: 1) a soja responde de forma diferenciada à condição hídrica solo-atmosfera e ao sistema de manejo do solo e 2) os padrões de resposta podem ser simulados no sistema de suporte à decisão, DSSAT. Para testar essas hipóteses, o objetivo geral foi identificar diferenças nos padrões de

resposta da soja em preparo condicional e em sistema plantio direto através de indicadores hídricos do sistema solo-planta-atmosfera e simulá-los no DSSAT. Para alcançar o objetivo geral foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar no experimento de campo indicadores hídricos no solo e na planta, sob o preparo convencional e sob o sistema plantio direto, irrigado e não irrigado;
- Avaliar padrões de respostas da soja a condições hídricas no sistema solo-planta-atmosfera;
- Avaliar o desempenho do modelo para soja, o CROPGRO-Soybean, integrante do DSSAT;
- Apontar a necessidade de possíveis ajustes ao modelo, a partir de diferenças significativas, decorrentes de condições hídricas observadas e simuladas, entre o sistema plantio direto e o preparo convencional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante toda a estação de crescimento da soja ela poderá passar por condições favoráveis ou adversas que podem condicionar a cultura a um determinado padrão de resposta. Dependendo das condições hídricas no solo, da atmosfera e dos efeitos nos estoques hídricos, decorrentes do manejo do solo, as respostas da cultura poderão ser expressas em termos de crescimento, produção de biomassa, índice de área foliar, eficiência de uso da radiação, potencial da água na folha, condutância estomática, entre outras. O momento e a severidade do estresse poderão apontar indicadores capazes de auxiliar nos ajustes e calibração de modelos de simulação de crescimento e rendimento das culturas. Na busca de indicadores de resposta da soja a condições hídricas, procurou-se na literatura pesquisas que fundamentassem estes argumentos.

Fatores relacionados às condições ambientais podem atuar de forma isolada ou conjuntamente, limitando ou favorecendo, o rendimento da cultura. Apesar de existirem cultivares de soja com potencial genético com rendimento de 6.000 kg ha⁻¹, atrelado ao elevado nível tecnológico de agricultura de precisão, a dependência da oferta hídrica tem se apresentado como um dos grandes desafios e até, uma das grandes limitações na obtenção de altos rendimentos da soja.

As variações anuais no regime de chuva no Rio Grande do Sul são apontadas por Matzenauer *et al.* (1998), como as causas de menores rendimentos de soja no Estado, em relação aos rendimentos alcançados no Paraná. Representou-se na Figura 1, os dados de rendimento médio de soja numa seqüência de 29 anos agrícolas, no Rio Grande do Sul e no Paraná, onde é percebida a predominância de rendimentos médios inferiores a 3.000 kg ha⁻¹.

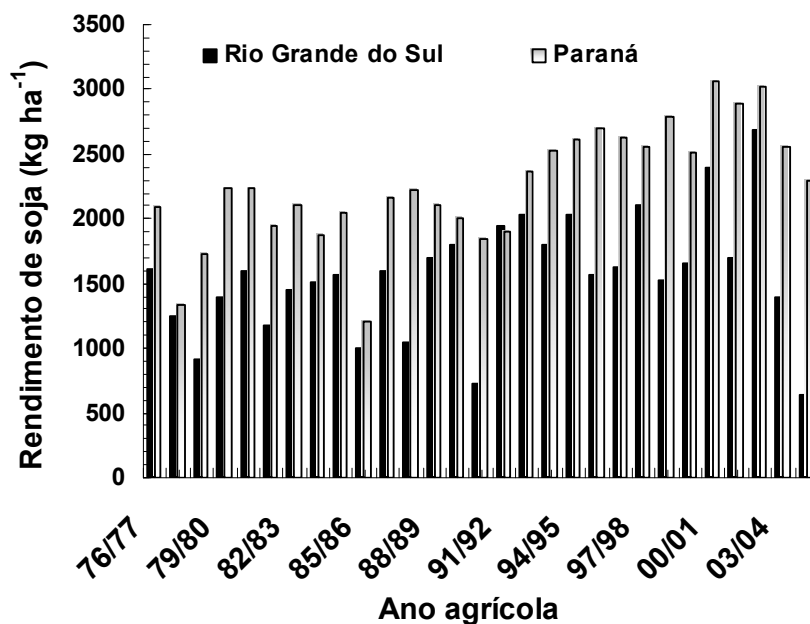


FIGURA 1 – Rendimento médio de soja no Rio Grande do Sul e no Paraná correspondentes ao ano agrícolas entre 76/77 a 04/05 (gráfico elaborado a partir de dados disponibilizados pela CONAB, 2006).

Quebras de safras de soja, decorrente de incertezas de oferta pluvial foram decisivas na motivação por novos conhecimentos relacionados à análise integrada água-solo-planta-atmosfera. Durante a participação em um projeto de pesquisa que buscava soluções tecnológicas à agricultura de precisão, nos Campos Gerais, no Paraná esse interesse foi consolidado. A equipe de

agrometeorologia procurou apontar soluções tecnológicas voltadas ao monitoramento de condições de tempo e clima da região (MARTORANO *et al.*, 2002; MARTORANO *et al.*, 2003). A necessidade em fornecer informações agrometeorológicas aos produtores de grãos (TSUKAHARA *et al.*, 2003; FARIA *et al.*, 2003b) no menor tempo possível, reforçou o interesse pelo tema da pesquisa. Em agrometeorologia, como nas outras áreas da ciência agrônoma, a busca por tecnologias de suporte à decisão e outros conhecimentos técnico-científicos que apontem indicadores de resposta da cultura para aumentar a precisão na agricultura brasileira, é uma tarefa constante.

2.1. Precipitação pluvial e sua influência no rendimento da soja no Rio Grande do Sul.

Conseqüências econômicas decorrentes de adversidades climáticas, principalmente por diminuição das chuvas no verão, na região Sul do Brasil, vêm preocupando o empreendedor agrícola. Culturas como soja e milho apresentaram alta correlação entre variáveis meteorológicas e variáveis de crescimento, desenvolvimento e rendimento dessas culturas (MATZENAUER *et al.*, 1995, BERLATO; FONTANA, 2001).

A soja é muito sensível ao déficit hídrico no período de floração e enchimento de grãos (DOORENBOS; KASSAM, 1994). Assim, períodos com déficits hídricos têm limitado a expressão do potencial de rendimento da soja no Rio Grande do Sul, ocasionando diferenças regionais quanto à magnitude das perdas (CUNHA *et al.*, 1998). Analisando as perdas de rendimentos no Estado, Farias *et al.* (2001) verificaram que elas foram da ordem de 38, 36, 37 e 58%, correspondentes aos anos de 1979, 1986, 1988 e 1991,

respectivamente, quando comparadas aos anos anteriores ou subseqüentes, considerados sob condições normais de disponibilidade hídrica no solo.

De acordo com Mota *et al.* (1996), o período favorável para a soja expressar maiores rendimentos, no Rio Grande do Sul, coincide com a maior necessidade de irrigação, decorrente de influências termo-fotoperiódicas. A deficiência hídrica no solo causou problemas mais evidentes na região Central, Sul e Oeste do Estado (CUNHA *et al.*, 2001).

Ao analisar períodos de estiagem prolongada no Planalto Médio do Rio Grande do Sul, Melo *et al.* (2004) destacaram que nos anos agrícolas 81/82, 85/86, 88/89, 90/91, 95/96, 96/97, 98/99 e 99/00 o rendimento médio predominantemente ficou abaixo de 1.000 kg ha⁻¹. Frank & Dorfman (2000) ressaltaram que, devido às variações no regime pluvial no Planalto Médio e Missões, há necessidade de irrigação nos cultivos semeados principalmente na segunda quinzena de outubro. A região das Missões é a que mais tem demandado suplementação hídrica.

Em termos de perdas de água para atmosfera por evapotranspiração (ETm) estudos de Matzenauer *et al.* (1998), indicaram que as maiores elevações da evapotranspiração da soja foram detectadas nos anos agrícolas de 78/79, 81/82, 85/86 e 90/91, variando de 664 mm, em Cruz Alta, para soja semeada em dezembro a 930 mm em Júlio de Castilhos, para semeadura ocorridas no mês de outubro. Nas três localidades analisadas por esses autores (Júlio de Castilhos, Cruz Alta e Passo Fundo), os totais de déficits hídricos variaram de 181 mm a 344 mm com maiores deficiências em Júlio de Castilhos e, menores em Passo Fundo. O atraso na semeadura preservou a planta dos efeitos da deficiência hídrica já que o período que vai do início da

floração ao início de enchimento de grãos, considerado o subperíodo de maior consumo de água, não coincidiu com o período de baixa oferta pluvial. Nessa mesma linha de investigação Matzenauer & Anjos (2004) verificaram que no subperíodo compreendido entre o início da floração e o início de enchimento de grãos foram obtidos os maiores valores de consumo de água pela soja, variando de 223 mm (em Cruz Alta) a 319 mm (em Passo Fundo) para semeaduras de dezembro e semeadura em outubro, respectivamente.

2.2. Indicadores de déficits hídricos na soja.

Déficits hídricos prolongados podem influenciar negativamente no metabolismo da soja, reduzindo sua capacidade fotossintética e, conseqüentemente, sua taxa de crescimento e desenvolvimento (HSIAO, 1973, MOMEN *et al.*, 1979, KORTE *et al.*, 1983), induzir abscisões de folhas fisiologicamente mais velhas como mecanismo de economia hídrica às folhas mais jovens (BEGG; TURNER, 1976) e reduzir a produção de grãos (SIONITT; KRAMER, 1977, PETTER; RIGHES, 1992, LIU *et al.*, 2004). Estresses hídricos podem alterar os mecanismos relacionados à eficiência de uso da radiação solar (MUCHOW *et al.*, 1993).

Segundo Confalone & Navarro Dujmovich (1999b), déficit hídrico severo reduz a eficiência de uso da radiação em soja, nos períodos vegetativo, de florescimento e enchimento de grãos em 25%, 24% e 21%, respectivamente. Em condições de ótimo suprimento hídrico a eficiência de uso da radiação pela soja foi de 1,37 g.MJ⁻¹. Valores próximos também foram

observados por Warren & Wilson (1971) com eficiência de uso da radiação em torno de $1,3 \text{ g.MJ}^{-1}$ pela cultura da soja sob ótimas condições hídricas no solo.

A falta de água no solo pode afetar a expansão das folhas, diminuindo a área foliar (BOYER, 1970) e, por conseguinte, reduzindo as trocas gasosas entre planta e atmosfera. A taxa de expansão foliar da soja sob condição irrigada foi de $8,40 \text{ cm}^2 \text{ dia}^{-1}$ e em não irrigada de $4,71 \text{ cm}^2 \text{ dia}^{-1}$, em experimento realizado em Viçosa, MG (CONFALONE, 1998). Déficit hídricos no solo promoveram encurtamento do período de floração e abortamento de flores, havendo antecipação de uma semana na maturação das plantas com déficit hídrico em relação às plantas bem hidratadas (SIONIT; KRAMER, 1977).

Respostas ao déficit hídrico na cultura da soja foram observadas por Thomas & Costa (1994) no período reprodutivo, principalmente na formação de legumes e enchimento de grãos, havendo aumento no peso de grãos nos tratamentos irrigados. Nessa mesma linha de investigação Rambo *et al.* (2003) verificaram que houve menor taxa de enchimento de grãos, resultando em menor peso do grão e refletindo em menores rendimentos de grãos de soja nos tratamentos não irrigados do que nos irrigados. Essas evidências não foram observadas por Westgate *et al.* (1989) com pouca alteração na taxa de enchimento de grãos em relação à disponibilidade hídrica à soja. Já Salinas *et al.* (1996) verificaram que o tamanho e o peso dos grãos foram os mais sensíveis ao déficit hídrico.

A limitação no suprimento hídrico reduziu a produção de fotoassimilados, inibindo o metabolismo do grão e promovendo o abortamento de flores e abscisão de legumes, conforme Bredan & Egli (2003). Os autores mantiveram o suprimento hídrico até o estágio R_6 e limitaram-no a partir desse

subperíodo. Constataram que, no início, os níveis de nitrogênio nas folhas foram próximos a $2,0 \text{ g m}^{-2}$ e aos 13 dias com deficiência hídrica, reduziram-se para $1,0 \text{ g m}^{-2}$, enquanto nos tratamentos irrigados os níveis de N mantiveram-se próximos a $1,5 \text{ g m}^{-2}$. Verificaram, ainda, que o teor de clorofila no primeiro dia de estresse hídrico foi de 500 mg m^{-2} , reduzindo-se para 250 mg m^{-2} no final do período de estiagem, enquanto nas plantas irrigadas foi de 400 mg m^{-2} . Houve reduções no rendimento de até 23%, bem como no tamanho de grãos, na ordem de 17% inferior aos grãos obtidos nos tratamentos irrigados (BREVEDAN; EGLI, 2003).

Em se tratando de raízes, Silvius *et al.* (1977) verificaram que a matéria seca total de raízes de soja bem suprida de água foi superior àquelas sob déficits hídricos. Também, Stone *et al.* (1976) observaram que houve absorção da água pelas raízes, nas camadas mais superficiais sob condição irrigada, sendo mais uniforme ao longo do perfil.

A soja, em determinados estádios pode ser mais sensível quanto à temperatura do ar, a disponibilidade hídrica e ao fotoperíodo (MAJOR *et al.*, 1975, JONES; LAING, 1978, WILKERSON *et al.*, 1989; VU *et al.*, 1997). Torna-se importante caracterizar quantitativamente a ocorrência de períodos de déficits hídricos (SANTOS; CARLESSO, 1998) durante o ciclo da cultura. Lima *et al.* (2004) observaram que a soja sob estresse de luz modificou sua morfologia e conseguiu interceptar o mesmo percentual de radiação daquelas não sombreadas, devido ao aumento na eficiência de uso da radiação. Os mesmos autores verificaram ainda que a capacidade da cultura em aumentar sua eficiência de uso da radiação deveu-se à diminuição da radiação

interceptada, ocasionado pelo menor índice de área foliar e não pela resposta direta a deficiência hídrica.

Confalone & Navarro Dujmovich (1999b) observaram reduções na eficiência de uso da radiação solar em soja em períodos de escassez de água no solo. Em sua estação de crescimento a soja pode expressar influências de outros fatores ambientais como o fotoperíodo e da temperatura do ar (EGLI; LEGGETT, 1973), os quais estão intimamente relacionados ao genótipo (EGLI *et al.*, 1984) da cultura.

2.3 Sistemas de manejo e efeitos no regime térmico-hídrico do solo hídrico do solo.

O sistema de manejo do solo influencia na dinâmica do regime térmico-hídrico por promover alterações em suas propriedades física-hídricas. Fazendo um breve relato sobre os sistemas de manejo no solo, Phillips & Phillips (1984) comenta que na década de 30, em países como os Estados Unidos da América, Grã Bretanha e Austrália, houve uma preocupação em mudar a forma convencional de manejar o solo. Nos anos 60, houve maior aceitação por parte dos produtores paralelamente ao surgimento de herbicidas de contato, que auxiliavam a manutenção da cobertura do solo com a palha da cultura anterior.

No Brasil, devido a problemas causados pelo processo erosivo mudou-se a concepção em determinadas práticas de manejo do solo. Com a consolidação do sistema plantio direto (MIELNICZUK *et al.*, 1969), as pesquisas voltaram-se para o estabelecimento de indicadores de qualidade do

solo. A adoção desse sistema de manejo, iniciado na região Sul, trouxe vários benefícios para a agricultura brasileira (DERPSCH *et al.*, 1986).

No sistema plantio direto, o armazenamento de água no solo é influenciado pela presença de canais decorrentes da decomposição de raízes e da fauna, formando bioporos que auxiliam na drenagem da água no solo (BOONE, 1988). De acordo com as observações de Derpsch *et al.* (1991), em períodos de estiagens, o sistema plantio direto manteve os estoques hídricos no solo, permitindo que o crescimento das plantas fosse superior àquelas sob preparo convencional.

Práticas agrícolas adotadas no preparo convencional ocasionam aumentos nas taxas de perda de matéria orgânica. O fracionamento e a incorporação dos resíduos culturais promovem maior disponibilidade de oxigênio, maiores temperaturas e menor proteção física intra-agregados, reduzindo gradativamente os estoques de carbono orgânico (BAYER *et al.*, 2000).

A matéria orgânica, no sistema plantio direto, potencializou a capacidade de retenção e estoques de águas pluviais, reduzindo a amplitude térmica no solo e a evaporação (LOGSDON *et al.*, 1990, DAO, 1993, SALTON; MIELNICZUK, 1995). Em pesquisa realizada no Paraná por Sidiras & Pavan (1986), foi constatado que, na profundidade de 3 cm, as temperaturas do solo foram superiores em preparo convencional do que no plantio direto. Aumentos da matéria orgânica nas camadas mais superficiais no sistema plantio direto, alteraram as interações no ciclo de nutrientes, proporcionando maior disponibilidade hídrica e reduzindo a amplitude térmica no solo (REICOSKY *et al.*, 1995).

Efeitos da infiltração da água no solo no sistema plantio direto foram observados por Dao (1993) que constatou alteração nas propriedades hídricas, melhorando a conservação e os estoques de água. O autor ressaltou que a redução na evaporação da água do solo foi proveniente de efeitos positivos dos resíduos culturais na retenção de água no solo. Stone *et al.* (2006) apontam que as perdas de água por evapotranspiração da cultura e evaporação do solo dependem da quantidade de matéria seca da palha, apontando para maiores diferenças nos estádios iniciais e finais do ciclo da cultura.

Na mesma linha de avaliação quanto à evaporação do solo, Dalmago (2004) verificou que, no início da secagem do solo, a evaporação foi maior em preparo convencional do que em sistema plantio direto; mas, ao final do tempo de secagem do solo a evaporação total foi superior no sistema plantio direto, devido à maior disponibilidade hídrica para atender à demanda atmosférica.

Houve aumento na condutividade hidráulica em solos sob plantio direto, quando comparados ao preparo convencional (AZOOZ; ARSHAD, 1996). Num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, com textura superficial franco-arenosa e subsuperficial franco-argilosa, cultivado com soja na região de Santa Maria, RS, Abreu *et al.* (2004), verificaram que, sob plantio direto, houve maior volume de macroporos nas profundidades de 0,02 a 0,05 m, favorecendo a maior condutividade hidráulica do solo saturado.

O mesmo foi constatado por Sidiras *et al.* (1984) quando verificaram aumentos na condutividade hidráulica saturada em plantio direto. Klein & Libardi (2002) verificaram que a estrutura do solo foi afetada pelo sistema de

manejo do solo até a profundidade de 0,4 m. No plantio direto irrigado, houve reduções na condutividade hidráulica do solo não saturado.

Em Eldorado do Sul, Dalmago (2004), avaliando indicadores de respostas na cultura do milho, na mesma área experimental, observou que a condutividade hidráulica foi de 3,07 cm h⁻¹ sob sistema plantio direto e 7,70 cm h⁻¹ sob preparo convencional, evidenciando alta condutividade para ambos os sistemas de manejo; porém, mais elevada em preparo convencional. O autor verificou que o avanço da frente de secagem do solo cultivado com milho foi mais lento no plantio direto do que no preparo convencional, o que resultou em maior disponibilidade de água às plantas em solo sob plantio direto.

No sistema plantio direto de longa duração, devido ao alto aporte de resíduos vegetais e menor revolvimento do solo, há formações de estruturas mais complexas que apontam para novos patamares de estabilidade de agregados (VEZZANI, 2001) indicando efeitos positivos na qualidade do solo (CONCEIÇÃO *et al.*, 2005).

De acordo com Cervi (2003), o Brasil ocupa a posição de segundo lugar em área agrícola cultivadas sob sistema plantio direto, sendo apontado, naquele ano, cerca de 20 milhões de hectares sob esse sistema de manejo do solo. O autor infere que no restante das áreas cultivadas, no País, o sistema adotado seja o preparo convencional.

Com o avanço da fronteira agrícola da soja (FEARNSIDE, 2001), ampliam-se às necessidades em aumentar as investigações quanto aos indicadores hídricos no solo que podem influenciar nos padrões de respostas da cultura durante o seu ciclo. A identificação de indicadores hídricos no solo,

em consonância com o sistema de manejo de solo, deve integrar os questionamentos da cultura à dinâmica do ambiente (solo e atmosfera).

2.4. Modelos de simulação em cultivos agrícolas.

Para Monteith (1996), os modelos de culturas representam um esquema quantitativo na predição do crescimento, desenvolvimento e rendimento, a partir de coeficientes genéticos e variações nas condições de solo, clima e manejo. Passioura (1996) destaca que um bom modelo necessita ser eficiente na predição do rendimento, com razoável precisão dentro da faixa de variáveis em que foi calibrado.

Ressaltam Sinclair & Seligman (1996), que existem etapas complexas durante o desenvolvimento de um modelo e, por isso, o mesmo poderá não responder a todas as perguntas sobre os problemas ocorridos durante o ciclo da cultura. Os autores ressaltaram que os modelos tendem a melhorar sua capacidade de predição à medida que aumenta o detalhamento descritivo do funcionamento de relações entre planta e ambiente.

O avanço da pesquisa na área agrometeorológica passa pela identificação de condicionantes de variáveis atmosféricas que possam causar perdas de safras agrícolas e buscar soluções estratégicas para tomada de decisão em tempo hábil. De posse de modelos testados e calibrados, torna-se possível detectar efeitos diretos do manejo (KEATING; MCCOWN, 2001) e prever alterações nos componentes do rendimento ou de outras variáveis durante o ciclo da cultura.

A partir de dados necessários para desencadear o processo de simulações por um modelo, denominados dados de entrada no modelo, é possível simular indicadores quantitativos de crescimento e rendimento de uma cultura. Para tanto, é fundamental definir os formatos de arquivos de dados de clima, solo e cultura, conforme destacam Hunt *et al.* (2001).

A obtenção de dados de limites de retenção hídrica no solo a campo é demorada e trabalhosa, conforme Ritter *et al.* (2003), ocasionando conseqüências nas simulações diante da ausência de determinados dados de solos, implicando em sub ou superestimativa entre os valores simulados e observados. Os autores destacam que a falta de dados de solos pode haver comprometimento na capacidade de predição do modelo.

Com o aumento da informatização no campo amplia o horizonte de aplicabilidade e uso de modelos de sistema de suporte à decisão. Dados históricos de clima e dados meteorológicos durante a estação de crescimento, bem como previsões de tempo de curto, médio e longo prazo, desempenham papel importante nas aplicações de sistemas de apoio à decisão (HOOGENBOOM, 2000).

A demanda por informações rápidas e consistentes impõe que pesquisadores, consultores, agricultores e gestores do setor agrícola ampliem as aquisições e conhecimentos em sistemas de suporte à decisão. As modernas plataformas de base de dados apresentam grande potencial de interoperabilidade, ou seja, a capacidade de bases de dados recuperarem dados de outras bases e vice-versa, visando o estabelecimento de uma rede internacional de dados experimentais e de modelos de culturas.

2.5. Sistema de Suporte à Decisão.

O aumento de parcerias entre os pesquisadores de diferentes áreas do conhecimento, numa perspectiva interdisciplinar (KROPFF *et al.*, 2001), tem ampliado o desenvolvimento e ajuste de modelos que apresentam sensibilidade para simular respostas da cultura aos efeitos de variáveis do sistema solo-atmosfera, ao longo do ciclo.

De acordo com Hunt *et al.* (2001), a partir de um projeto internacional com sede na Universidade do Havaí, foi desenvolvido um sistema de suporte à decisão e transferência de tecnologias em agropecuária, denominado DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer). O DSSAT tem sido utilizado por pesquisadores do mundo inteiro (JONES *et al.*, 2003a) e, atualmente conta com modelos capazes de simular o crescimento, desenvolvimento e rendimento para mais de 18 culturas (HOOGENBOOM *et al.*, 2003). As simulações procuram reproduzir o processo de repartição da biomassa (raízes, caules, folhas e componentes de rendimento), visando identificar possíveis causas que afetam o rendimento de uma cultura, em uma determinada região e ano agrícola.

Entre os dados de entrada requeridos pelos modelos devem constar: variáveis meteorológicas do local, parâmetros fisiológicos e morfológicos da cultura, propriedades do solo, práticas de manejo, densidade e data de plantio ou semeadura, irrigação e fertilizantes, os quais são fundamentais na geração de novos cenários (JONES, 1993). Fatores genéticos poderão ser avaliados a partir de simulações de acúmulo de matéria seca sob diferentes ambientes e manejo do solo (BOOTE; TOLLENAAR, 1994).

2.6. Modelo de simulação para a cultura da soja no DSSAT

O modelo utilizado para leguminosas no DSSAT é o CROPGRO (BOOTE *et al.* 1998a). Ao comparar dados obtidos no campo e simulados no CROPGRO, comparando dados de campo, Boote *et al.* (2003) verificaram que, a combinação de condições ambientais e melhorias genéticas da cultura propiciaram aumentos de 13 a 17% no rendimento. Testando o desempenho do modelo CROPGRO para prever rendimento da soja, usando dados climáticos, solo, manejo e variedade de sementes, Jagtap & Jones (2002) observaram que o modelo apresentou um desempenho de 95% (média de 17 anos), em prever as variações interanuais no rendimento da soja, principalmente em quebras de safras por déficits hídricos.

Ruiz-Nogueira *et al.* (2001) testaram o CROPGRO para o noroeste da Espanha, objetivando estabelecer as melhores datas de semeadura de três cultivares de soja. A partir de modificações na profundidade do solo, os autores concluíram que a soja foi mais sensível à data de semeadura sob manejo irrigado do que sob precipitação natural, nos três locais avaliados.

Ao testar o desempenho de dois modelos de simulação, sendo um deles o CROPGRO, Nielsen *et al.* (2002) verificaram que, após a calibração, em decorrência da variabilidade na precipitação pluvial, o modelo se mostrou eficiente na predição de reduções na evapotranspiração. Os autores indicaram o modelo CROPGRO nas avaliações do potencial de rendimento da soja para as condições dos Estados Unidos da América (Grandes Planícies Centrais).

Testando o desempenho do modelo BEANGRO, um precursor do modelo CROPGRO para feijão, Faria *et al.* (1997) identificaram que a melhor estratégia de irrigação foi para a condição de umidade crítica no solo igual a

60% da capacidade de água disponível, indicando máximo benefício econômico para a região de Londrina, Paraná. As simulações realizadas Meireles *et al.* (2003), no modelo CROPGRO para feijão indicaram que a época com menor risco de quebra de produtividade foi de outubro a novembro com risco médio de 34%, sendo os menores riscos para as semeaduras entre o primeiro e o segundo decêndio de novembro, na região de Santo Antônio de Goiás, GO.

Bastos *et al.* (2002) testando o desempenho do CROPGRO verificaram que o modelo foi adequado quanto à simulação dos índices fenológicos, com diferença de três dias aos dados coletados no campo e componentes de rendimento do feijão caupi (*Vigna unguiculata*), sob condições de solo e clima do Baixo Parnaíba, Piauí. Para a região de Maringá, Paraná, foi testado por Dallacort *et al.* (2005) o desempenho do CROPGRO para avaliar melhores épocas de semeadura do feijão, sendo os maiores rendimentos apontados para as semeaduras realizadas em datas específicas como: 10 e 20 de agosto e 1° de setembro.

Utilizando o CROPGRO-Soybeans para avaliar efeitos do estresse hídrico na variabilidade espacial do rendimento da soja em Iowa, EUA (Arkansas, Louisiana e Texas) Hoogenboom *et al.* (1994) verificaram que, após as estimativas de taxas de drenagem do solo e profundidade das raízes, o modelo explicou 69% da variabilidade de rendimento da soja, na região.

Entre essas e outras aplicações disponível na literatura evidenciam que o sistema de suporte à decisão, DSSAT possui potencial para simulações cenários em cultivos agrícolas, nas mais diferentes regiões edafo-climáticas no globo terrestre. Com a adoção do plantio direto, busca-se avaliar a capacidade

de predição do modelo CROPGRO-Soybean para soja cultivada em sistema plantio direto e o preparo convencional. Os estudos apontam que esses são os dois sistemas de manejo do solo são os mais utilizados no País.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental: clima e solo

O experimento de campo foi conduzido durante o ano agrícola 2003/04 com a cultura da soja, na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), no município de Eldorado do Sul (30°05'S e 51°40'W e 46m de altitude), na região da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

A região possui clima subtropical do tipo Cfa (Köppen) com média anual da temperatura do ar de 19,2°C e precipitação pluvial de 1.446mm, sendo evidenciados déficits hídricos no período de novembro a março (BERGAMASCHI *et al.*, 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 solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999), com relevo plano a levemente ondulado, apresentando horizonte B textural. O solo em preparo convencional (irrigado e não irrigado) apresenta cerca de 53% de areia, 29% de silte e 18% de argila, correspondendo à classe textural franco-arenosa. Essa classe também ocorre em plantio direto não irrigado, apresentando 59% de areia, 28% de silte e 13%

de argila. No sistema plantio direto irrigado se enquadrou na classe textural franca com 51% de areia, 33% de silte e 16% de argila.

A área experimental conta com uma estação meteorológica dotada de equipamentos convencionais e sensores automáticos, para o monitoramento das variáveis atmosféricas, tais como precipitação pluvial, radiação solar, temperatura e umidade do ar e vento, tanque de evaporação, classe “A” (Figura 2).



FIGURA 2 – Estação meteorológica na área experimental com soja (cv.Fepagro RS-10). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04.

3.2 Delineamento experimental.

Adotou-se um delineamento em faixas com quatro repetições (Figura 3). O delineamento segue os pressupostos de Hanks *et al.* (1980), dada a configuração imposta pelos tratamentos de manejo do solo e irrigações. As faixas iniciavam-se rente à linha dos aspersores, no centro da área, sendo cada unidade experimental disposta em direção transversal à linha de irrigação. As unidades experimentais tinham dimensões de 18m por 5,5m e subdivididas ao meio, sendo metade para avaliação de matéria seca e a outra para rendimento da cultura. Foram coletados em três repetições (B₁, B₃ e B₄), deixando-se uma repetição (B₂) para a instalação de sensores micrometeorológicos. O restante da área foi considerado como bordadura.

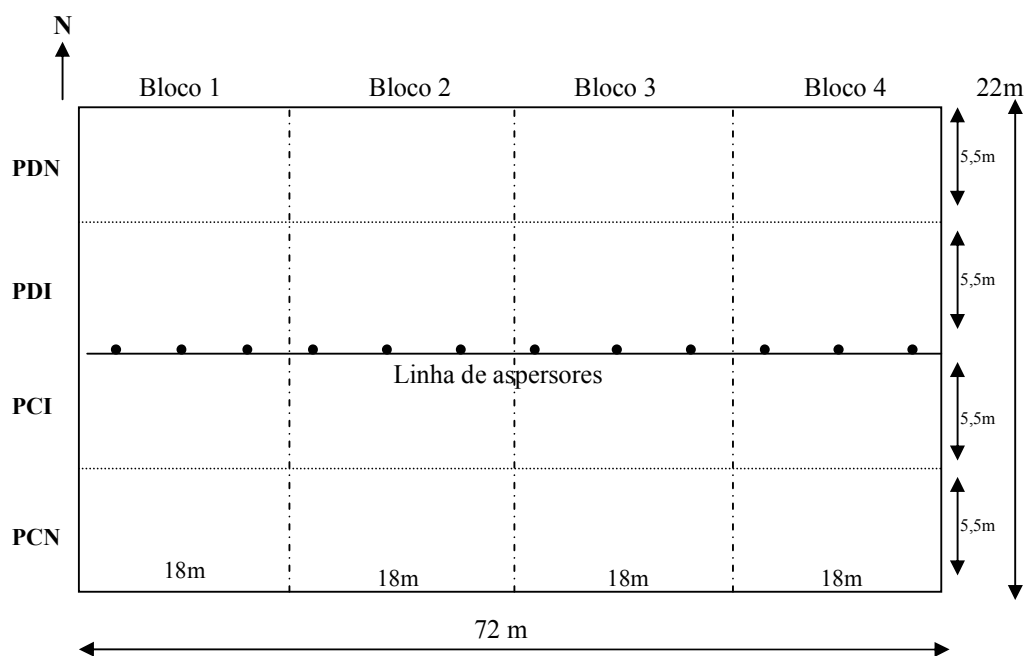


FIGURA 3 – Representação do delineamento experimental, com distribuição dos blocos, tratamentos (plantio direto irrigado e não irrigado - PDI e PDNI, preparo convencional irrigado e não irrigado - PCI e PCNI) e linha de aspersores. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04.

3.3 Histórico e manejo da área experimental.

A disposição dos sistemas de manejo do solo na área experimental (0,5 ha) foi adotada desde 1995, onde numa metade adota-se sistema plantio direto (PD) e na outra o preparo convencional (PC). No centro, na direção das fileiras de plantas, instalou-se uma linha de aspersores distanciados 6m entre si. Cada sistema de manejo foi subdividido em dois tratamentos: irrigado (I) e não irrigado (NI). Nos tratamentos irrigados, controlou-se a irrigação pelo potencial da água no solo a 0,45m de profundidade. As irrigações foram realizadas quando o potencial apresentava-se inferior a -0,06 MPa, nas parcelas próximas à linha dos aspersores. O volume de água foi determinado com base nos dados de um lisímetro de pesagem cultivado com soja, instalado no centro da uma área idêntica ao lado do experimento.

No preparo convencional, no dia 22/10/03, incorporou-se a biomassa verde de aveia (*Avena strigosa*) e ervilhaca (*Vicia sativa*), na base de 4 a 6 t ha⁻¹ de biomassa seca. Essa prática foi implementada com arado de disco, entre 0,20 e 0,25 m de profundidade. Foram realizadas duas gradagens, com grade de discos, sendo uma logo após a aração e a outra, imediatamente antes da semeadura da soja. Nas parcelas em sistema plantio direto a cobertura de inverno foi dessecada no dia 22/10/03, aplicando-se 3,0 l ha⁻¹ de herbicida à base de glifosato, no estágio de grão leitoso da aveia e florescimento da ervilhaca. A cobertura morta foi acamada com um rolo-faca, antes da semeadura da soja.

Para controle de plantas daninhas, aplicou-se herbicida sistêmico, em pós-emergência, principalmente, para controlar a *Brachiaria plantaginea* (nome comum Papuã), acrescido de adjuvante, diluído em água para eliminar

espécies daninhas gramíneas e controlar espécies dicotiledôneas. Os procedimentos quanto ao controle de pragas e daninhas seguiram as orientações técnicas para a cultura da soja na região.

O planejamento da adubação foi em função da disponibilidade de adubo da Estação Experimental. Assim, fez-se a adubação de base de 600 kg ha⁻¹ da formulação 5-30-20 de N-P-K, na semeadura, resultando em 30 kg ha⁻¹ de N, 180 kg ha⁻¹ de P₂ O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O. Ressalta-se que a recomendação para o cultivo da soja é que seja utilizado apenas inoculante sem a suplementação com fertilizante nitrogenado (HUNGRIA *et al.*, 1994).

As sementes foram inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium japonicum* em meio turfoso. As bactérias foram fornecidas pelo banco de germoplasma de rizóbio da FEPAGRO (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária, Porto Alegre, RS). As demais práticas de manejo seguiram orientações metodológicas definidas na XXXI Reunião de Pesquisa da Soja da Região Sul (2003).

Durante a condução do experimento, nos tratamentos irrigados, a irrigação foi realizada com base no potencial matricial da água no solo, avaliado no tensiômetro a 0,45m de profundidade. As irrigações foram realizadas quando o potencial apresentava-se inferior a -0,06 MPa, nas parcelas próximas à linha dos aspersores. O volume de água foi determinado com base nos dados de um lisímetro de pesagem cultivado com soja, instalado no centro de uma área idêntica ao lado do experimento, cultivada com soja em preparo convencional.

3.4 Cultura de soja (cv. Fepagro RS-10).

Utilizou-se a cultivar de ciclo tardio, Fepagro RS-10, semeada em 20/11/2003, com espaçamento de 0,40 m entre linhas e, população de 300 mil plantas ha⁻¹. Essa cultivar foi desenvolvida pela Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO RS) e suas principais características encontram-se listadas na Tabela 1.

TABELA 1 – Principais características da cultivar Fepagro RS-10

Características	Fepagro RS10
Ano de indicação	1995
Cor do hipocótilo e flor	Roxa
Cor do tegumento da semente e hilo	Amarela/Marrom
Hábito de crescimento	Determinado
Ciclo (semeadura em novembro)	Tardio (média de 147 dias)
Altura da planta (m) (semeadura em novembro)	0,96
Acamamento	Leve
Peso de 100 grãos (g)	21,2
Qualidade da semente	Boa
Rendimento médio de grãos (kg ha ⁻¹) (2000/01 a 2002/03)	3.214

Fonte: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL (2003)

3.5 Monitoramento de variáveis do sistema solo-planta-atmosfera.

3.5.1 Umidade no Solo

Foi monitorado o potencial da água no solo por quatro baterias de tensiômetros de mercúrio. Instalaram-se duas baterias em cada sistema de manejo do solo por tratamento. Uma bateria tinha tensiômetros nas profundidades de 0,075, 0,15, 0,30, 0,45, 0,60, 0,75, 0,90 e 1,05 e a outra nas mesmas profundidades, adicionando-se um tensiômetro a 1,20m. As leituras

foram realizadas diariamente por volta das 9 h (horário local). As leituras obtidas nos tensiômetros foram convertidas em potencial matricial da água no solo (Ψ_m) pela equação 1.

$$\Psi_m = (-12,6H + hc + z) \times 0,0001 \quad (1)$$

sendo Ψ_m o potencial matricial da água no solo (MPa), H a altura da coluna de mercúrio, acima da cuba (cm), hc a altura média do mercúrio (na cuba) em relação à superfície do solo (cm), z a profundidade do centro da cápsula porosa do tensiômetro (cm) e 0,0001 a constante de transformação da coluna de água, de centímetros para MPa. Os dados também podem ser interpretados na forma de tensão (kPa), multiplicando-se por (-1) os valores de potenciais, visando comparar a tensão em que a água se encontrava retida no solo.

Os dados de potenciais da água no solo foram convertidos para umidade volumétrica usando curvas características de retenção de água, em plantio direto e preparo convencional, obtidas no campo por Dalmago (2004). Esses dados foram ajustados à equação de Van Genuchten (1980), considerado positivo o valor do potencial matricial (Ψ_s), ou seja, na forma de tensão de água no solo (equação 2), em (kPa).

$$\theta_v = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[(1 + \alpha \Psi_m)^n \right]^m} \quad (2)$$

sendo θ_v a umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Ψ_m o potencial matricial (em módulo), θ_r e θ_s as umidades residual e de saturação, respectivamente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α , n e m coeficientes (adimensionais), indicados na Tabela 2.

TABELA 2 – Coeficientes ajustados pela equação de Van Genuchten (1980) com base em dados de umidade do solo em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), em diferentes profundidades, utilizando as curvas características de retenção de água determinadas por Dalmago (2004). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul.

Prof. (m)	α (kPa)		m		n		θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)		θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	
	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC	PD
	0,075	437	211	0,3440	0,4073	1,5262	1,6873	0,150	0,140	0,35
0,15	484	493	0,3132	0,3683	1,4560	1,5830	0,190	0,160	0,35	0,35
0,30	321	410	0,3681	0,3285	1,5825	1,4826	0,190	0,170	0,43	0,36
0,45	301	184	0,3791	0,5408	1,6105	2,1778	0,170	0,147	0,37	0,40
0,60	169	384	0,3909	0,4530	1,6418	1,8283	0,210	0,200	0,44	0,40

3.5.2 Graus-Dia Acumulados

A partir dos dados de temperatura (máxima e mínima), registrados na estação agrometeorológica (Figura 2), extraiu-se a temperatura média do ar (média aritmética entre as temperaturas extremas) para determinar a soma de graus-dia. Considerou-se a temperatura base de 10°C , iniciando-se o acúmulo de soma térmica a partir do dia da emergência da soja (27/11/2003). Os graus-dia acumulados (GD_{acum}) foram calculados usando-se a equação 3.

$$GD_{acum} = \sum_{j=1}^n \left(\left(\frac{T_{máx} - T_{mín}}{2} \right) - T_b \right) \quad (3)$$

sendo $T_{\text{máx}}$, a temperatura máxima diária ($^{\circ}\text{C}$), $T_{\text{mín}}$ a temperatura mínima diária ($^{\circ}\text{C}$), T_b a temperatura base ($^{\circ}\text{C}$), que limita o desenvolvimento da soja. A partir da temperatura de 10°C foram calculados os valores de graus-dia acumulados (GDacum) e utilizados como variável independente em modelos de regressão que exprimissem o crescimento e desenvolvimento da soja.

3.5.3 Radiação fotossinteticamente ativa e eficiência de conversão

Nos dois sistemas de manejo do solo foram instalados saldos radiômetros para medir o saldo de radiação (R_n), instalados a 1m acima do solo. Foram instaladas a cerca de 1m acima do solo barras de alumínio compostas por cinco células foto-voltaicas de silício-amorfo para medir a radiação fotossinteticamente ativa refletida (RFAR) pela superfície do solo (PANDOLFO, 1995). Com um piranômetro (LI-COR) acoplado à estação meteorológica, foi monitorada a radiação solar global (R_s). Monitorou-se a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) incidente (entre 0,4 e 0,7 μm) com o auxílio de um sensor “*quantum*” (LI-COR) acima da cultura. As medições foram programadas a cada 30 segundos e suas médias armazenadas a cada 15 minutos e os sensores acoplados a um sistema de aquisição automática (*datalogger* Campbell CR 10). Em cada tratamento foram instalados três conjuntos de sensores, a 0,05m acima do solo.

Os dados de RFA foram registrados em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e convertidos em $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, segundo a equação 4, obtendo-se os valores em mol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

$$RFA = \sum_{\text{diário}} \frac{RFA(\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-2})(t(s))}{1.000.000} \quad (4)$$

Também, fez-se a transformação dos dados para MJ m² dia⁻¹, conforme Thimijan & Heins (1983). Os totais diários foram computados, adotando-se o período das 7h às 18h (FRANÇA *et al.*, 1999). Os componentes do balanço de radiação fotossinteticamente ativa foram calculados segundo Gosse *et al.* (1986) e Varlet-Grancher *et al.* (1989). Denominou-se a quantidade de radiação incidente que chegou no topo da cultura, RFA_{inc}; RFA_t a parcela de radiação que passou através da cultura e atingiu os níveis inferiores do dossel; RFA_{rs} a radiação refletida pelo solo e RFA_{rsc} a porção refletida pelo solo e cultura.

Calculou-se a radiação fotossinteticamente ativa interceptada, denominada de RFA_{int}, conforme França *et al.* (1999), pela seguinte equação 5.

$$RFA_{\text{int}} = RFA_{\text{inc}} - RFA_{\text{t}} \quad (5)$$

A eficiência de interceptação (ξ_{int}) em cada sistema de manejo do solo (plantio direto e preparo convencional), sob condição irrigada e não irrigada foi calculada pela equação 6.

$$\xi_{\text{int}} = \frac{RFA_{\text{int}}}{RFA_{\text{inc}}} \quad (6)$$

Ajustou-se um modelo de regressão relacionando matéria seca da cultura com a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (MONTEITH, 1977; GOSSE *et al.*, 1986), conforme a equação 7.

$$MS = EUR \times RFA_{int} \quad (7)$$

Em que MS representa a matéria seca (g m^{-2}), RFA_{int} a radiação fotossinteticamente ativa interceptada e EUR, a eficiência de uso da radiação.

3.5.4 Crescimento e desenvolvimento da soja

Os principais estádios fenológicos da cultura foram observados segundo a escala fenológica da soja proposta por Fehr & Caviness (1977). Determinações destrutivas como área foliar (AF) e matéria seca (MS) das plantas de soja foram realizadas a partir de coletas semanais de amostras. A amostragem iniciou com oito dias após a emergência (8 DAE), sendo que em cada coleta cortavam-se, ao acaso, as plantas existentes em 0,5 m de linha de semeadura em todas unidades experimentais.

Assim, ao longo da estação de crescimento da soja, determinou-se a biomassa seca da cultura (folhas, caules, legumes e grãos). Durante a coleta a campo, mediu-se a estatura da planta de soja, tomando-se à distância da base da planta ao último nó desenvolvido, considerando-se quatro plantas por subparcela, nos tratamentos monitorados. Os dados permitiram ajustar um modelo para estimar a estatura da soja (cv. Fepagro RS-10) em função de

graus-dia acumulados (GD_{acum}). A evolução em estatura de soja se ajustou a um modelo sigmoidal (equação 8) com três parâmetros.

$$Estatura = \frac{a}{1 + \exp\left(\frac{-(x - x_0)}{b}\right)} \quad (8)$$

sendo Estatura a máxima estatura das plantas (m), a e b coeficientes do modelo (assintótico), avaliado em graus-dia acumulados.

Os indicadores de crescimento calculados foram: índice de área foliar, duração da área foliar (DAF), taxa de crescimento da cultura (TCC), taxa assimilatória líquida (TAL), área foliar específica e índice de colheita (IC).

A área foliar (cm^2) foi medida em planímetro eletrônico ótico, modelo LI 3000 (Licor, Lincon, EUA) cujos valores foram divididos pela área correspondente a área do terreno para obtenção do índice de área foliar (IAF), conforme a equação 9.

$$IAF = \frac{AF}{S} \quad (9)$$

sendo AF a área foliar verde (cm^2) e S a área do terreno (cm^2).

Após computar o valor de área foliar, o material foi separado entre folhas e hastes, visando a obtenção de dados para comparar com os simulados no CROPGRO-Soybean. Posteriormente o material era levado para secagem em estufa ventilada, à temperatura de $75^\circ C$, por 72h (peso constante). A biomassa seca foi pesada em balança de precisão para obtenção da massa seca total (MSt).

Foram ajustados modelos de regressão, pelo método de mínimos quadrados, entre o índice de área foliar (IAF) em função de graus-dia acumulados até IAF_{máximo}. Também, ajustaram-se modelos para estimar matéria seca aérea em função de graus-dia acumulados e, em função da RFA interceptada acumulada, adotando-se um nível de significância de 1% de probabilidade do erro, pelo teste t.

Avaliou-se a taxa de crescimento da cultura, calculando-se a relação entre a matéria seca da parte aérea em função do tempo entre coletas, conforme a equação 10.

$$TCC = \frac{\Delta MSa}{\Delta t} \quad (10)$$

em que TCC é a taxa de crescimento da cultura ($\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), ΔMSa corresponde a incrementos de matéria seca aérea (g m^{-2}) e Δt a variação do tempo, em dias, decorrido entre as amostragens a campo. Para incorporar os efeitos da temperatura do ar ao longo do ciclo da cultura, avaliou-se a taxa de crescimento da cultura considerando a relação entre a matéria seca aérea e a diferença em graus-dia acumulados ($\text{g m}^{-2} \text{ GDacum}^{-1}$).

3.5.5 Evapotranspiração e coeficiente de cultura (Kc) da soja

Pela lei da conservação das massas, considera-se que balanço da água no solo depende das entradas (precipitação pluvial e irrigação) e saídas de água (evapotranspiração), quando são negligenciadas as contribuições do escoamento superficial e da drenagem profunda ou ascensão capilar

superficial. A evapotranspiração máxima (ETm) foi monitorada em um lisímetro de pesagem com 5,1 m², descrito por Bergamaschi *et al.* (1997), localizado no centro de uma parcela homogênea de 0,54 ha. Na área do lisímetro o solo foi mantido próximo à capacidade de campo (CC), sendo monitorado pelos tensiômetros e o peso do lisímetro. Efetuava-se a irrigação sempre que os tensiômetros de mercúrio instalados a 0,45m de profundidade indicavam o potencial matricial de -0,06 MPa e suspensa quando o peso do lisímetro atingia o valor correspondente ao solo drenado. Ao considerar que os tensiômetros operam dentro da faixa de 0 a -80 kPa de potencial matricial (FARIA, 1987), o valor de -60 kPa apontava condições hídricas limitantes à soja.

As leituras foram realizadas diariamente às 9 h (horário local), considerando-se a variação de massa do lisímetro, a precipitação pluvial ocorrida no período de 24 horas anteriores a leitura, bem como a drenagem do excesso de água, pelo princípio da conservação de massa. A evapotranspiração máxima (mm dia⁻¹) foi determinada pela equação 11.

$$ETm = \frac{(M_{i+1} - M_i) - D_i}{5,1} + P_i \quad (11)$$

sendo ETm a evapotranspiração máxima da cultura (mm dia⁻¹), em qualquer dia i monitorado, M_i a massa do lisímetro (kg) em cada dia i, P_i a precipitação pluvial ocorrida nas 24 horas (mm) e D_i o volume drenado no dia i (litro), M_{i+1} a massa do lisímetro (kg) no dia seguinte, 5,1 o fator que corresponde à superfície do lisímetro (5,1 m²).

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada pelo método de Penman (1948), com saldo de radiação estimado sobre superfície gramada,

seguindo ajustes descritos por Bergamaschi et al. (2004). Calculou-se a razão entre ET_m e ET_o para a obtenção do coeficiente de cultura (K_c) ao longo do ciclo da soja, conforme a equação 12.

$$K_c = \frac{ET_m}{ET_o} \quad (12)$$

De posse dos dados, ajustou-se um modelo pelo método dos mínimos quadrados para estimar o K_c (ALLEN *et al.*, 1998) em função de dias após a emergência (DAE) para um nível de significância de 5% de probabilidade do erro, pelo teste t. Considerando que cerca de 75% dos produtores do Rio Grande do Sul adotam o sistema plantio direto (Denardin et al., 2005), ajustou-se um modelo de regressão para estimar o K_c nesse sistema de manejo em função do índice de área foliar (IAF), sob condição irrigada. A primeira derivada das equações de K_c forneceu o valor do ponto máximo.

3.6 Balanço hídrico no solo

Na avaliação sobre ganhos e perdas de água no sistema solo-planta-atmosfera utilizou-se o balanço hídrico diário adaptado por Thornthwaite & Mather (1955), sendo a deficiência hídrica contabilizada a partir da diferença entre a evapotranspiração máxima (ET_m) e a evapotranspiração real (ET_r).

A evapotranspiração de referência foi estimada pelo método de Penman, de 1948, e a evapotranspiração máxima foi determinada em lisímetro

com soja em preparo convencional. A evapotranspiração real (ETr) foi estimada pela equação 13.

$$ETr = P + I - (Arm_i - Arm_{i-1}) \quad (13)$$

sendo P a precipitação pluvial diária, I o total de água adicionado por irrigação e $(Arm_i - Arm_{i-1})$ a alteração de armazenamento de água no solo, estimada pela diferença entre o armazenamento do dia considerado (*i*) na avaliação e o dia anterior (*i-1*).

Nos dias em que o solo se encontrava com saldo diário negativo entre entradas e saídas de água no sistema solo-planta ($P+I-ETm < 0$), estimou-se o armazenamento pela equação 14.

$$Arm = CAD \exp\left(\frac{-NegAc}{CAD}\right) \quad (14)$$

sendo CAD a capacidade de água disponível no solo e NegAc, a negativa acumulada, representando a deficiência hídrica no sistema ($P+I-ETm < 0$), representada pela equação 15.

$$NegAc = \sum (P + I - ETm) \quad (15)$$

para $P+I-ETm < 0$ o valor foi adicionado ao armazenamento de água no solo até atingir a capacidade de água disponível (CAD). O restante, em milímetros, foi considerado excedente hídrico. Nesse dia, a estimativa do saldo negativo foi

obtido pela equação 16, onde a capacidade de água disponível é multiplicada pelo logaritmo natural (ln) do armazenamento de água dividido pela capacidade de água disponível.

$$NegAcm = CAD \times \ln\left(\frac{Arm}{CAD}\right) \quad (16)$$

Foram considerados nos cálculos os aprofundamentos do sistema radicular da soja. Assim, CAD foi estimada diariamente pela equação 17.

$$CAD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp})z \quad (17)$$

sendo θ_{cc} a umidade volumétrica do solo na capacidade de campo e θ_{pmp} a umidade volumétrica no ponto de murcha permanente e z a profundidade do sistema radicular da soja. As estimativas diárias de CAD foram realizadas usando o modelo de simulação de aprofundamento do sistema radicular proposto por Faria & Madramootoo (1996), desenvolvido para a cultura do trigo, em que o aprofundamento do sistema radicular é função de graus-dia, a partir da emergência, estabilizando-se no período de florescimento da cultura.

A profundidade do sistema radicular foi estimada pela relação linear com graus-dia acumulados após a emergência, pela equação 18.

$$z = z_{mic.} + GD_{acum}Ap \quad (18)$$

em que z_{inic} refere-se à profundidade do sistema radicular na emergência, GDacum os graus-dia acumulados após a emergência e A_p o acréscimo de profundidade por unidade de graus-dia até o florescimento.

Para avaliar o desempenho potencial da cultura em cada estágio fenológico, estimou-se a fração de demanda hídrica consumida pela cultura (Cons Relativo) e a que não foi fornecida (Def Relativa), através das equações 19 e 20.

$$\text{Cons Relativo} = \frac{ETr}{ETm} \quad (19)$$

$$\text{Def Relativa} = \left(1 - \frac{ETr}{ETm}\right) \quad (20)$$

sendo $\frac{ETr}{ETm}$ denominado de consumo relativo de água e Def Relativa deficiência hídrica relativa.

Procurou-se estimar o consumo relativo de água, considerando-se o período compreendido entre o início do subperíodo da floração e o início do subperíodo de enchimento de grãos (R_1 - R_5), por ser o período que apresentou as maiores associações entre o consumo relativo de água e o rendimento de grãos de soja (BERLATO, 1987), no Rio Grande do Sul.

No cálculo do balanço hídrico para cada tratamento (PCI, PCNI, PDI e PDNI), o índice de área foliar foi estimado em função de graus-dia acumulados através do ajuste de um modelo log-normal, abrangendo todo o ciclo da cultura. Neste sentido, os períodos de deficiência e excessos hídricos foram obtidos utilizando-se valores estimados de K_c e IAF , em escala diária.

3.7 Avaliação de potencial da água na folha e condutância foliar.

As medições foram realizadas em dias de céu limpo, por volta das 13h (horário local), em períodos de deficiência hídrica. No porômetro (LI-COR, modelo 16000M) foram realizadas as medidas de condutância foliar (gf) nas duas faces das folhas (adaxial e abaxial), de acordo com Von Caemmer & Farquhar (1981). Procurou-se monitorar a condição hídrica do último trifólio médio completamente expandido e exposto à radiação solar.

Para avaliar o potencial da água na folha ($\Psi_{mín}$), utilizou-se uma câmara de pressão do tipo *Scholander*, marca *Soil Moisture*, modelo 3000. Escolhia-se, aleatoriamente, o último trifólio médio, completamente expandido, cortava-se e levava-se, imediatamente, à câmara de pressão para efetuar as medidas, sendo um total de quatro coletas (repetições) por tratamento e sistema de manejo do solo. Considerando-se o paralelismo das faces da folha, a condutância total foi obtida pelo somatório das duas condutâncias avaliadas.

3.8 Avaliação do teor de clorofila na folha.

Do mesmo folíolo eram coletados cinco discos foliares de 1 cm de diâmetro, os quais eram acondicionados em vidros envoltos em papel-alumínio, contendo 20ml de álcool a 96° (P.A) e mantidos em local seco, fresco e escuro por 4 dias. De cada vidro extraia-se amostras de 1 ml para o procedimento de leitura em espectrofotômetro de absorvância (Beckman, modelo DU-65), conforme metodologia descrita por Wintermans & De Mots (1965), de acordo com as equações 21 e 22.

$$Cla = 13,7A_{665} - 5,76A_{649} \quad (21)$$

$$Clb = 25,8A_{649} - 7,6A_{665} \quad (22)$$

onde *Cla* e *Clb* são as concentrações de clorofilas a e b, respectivamente, e A_{665} e A_{649} são as absorvâncias em 665 e 649 nm.

3.9 Rendimento de grãos e componentes.

A partir da constatação de que a cultura se encontrava em plena maturação fisiológica, fez-se a colheita manual das parcelas, em cada unidade experimental. As plantas cortadas foram agrupadas em feixes, etiquetadas e trilhadas por trilha mecanizada.

O rendimento de grãos (kg ha^{-1}) foi obtido a partir da pesagem das sementes devidamente limpas. Os valores obtidos foram corrigidos para 13% de umidade, utilizando a equação 23, convertendo-se os valores para quilograma por hectare (ha).

$$Mc = Mo \left\{ \frac{\left[\left(1 - \left(\frac{Uo}{100} \right) \right) \right]}{\left[\left(1 - \left(\frac{Uc}{100} \right) \right) \right]} \right\} \quad (23)$$

sendo M_c a massa corrigida, M_o a massa observada após a colheita, U_o o grau de umidade (em percentagem) e U_c o grau de umidade de correção (em percentagem).

Na mesma ocasião, foram determinados os componentes do rendimento: número de legumes por metro quadrado (leg m^{-2}), número de grãos por legume e peso de 100 grãos. Em cada tratamento foram separadas quatro amostras de 100 grãos coletados, aleatoriamente, dos grãos devidamente corrigidos para 13% de umidade.

3.10 Índice de colheita (IC).

O índice de colheita (IC) foi obtido pela equação 24.

$$IC = \frac{\text{Rendimento de grãos}}{\text{Rendimento de MS}} \times 100 \quad (24)$$

sendo que, o rendimento de grãos (kg ha^{-1}) foi obtido na colheita e o rendimento total de matéria seca aérea (MS), em kg ha^{-1} , foi determinado na colheita da cultura. Ressalta-se que cultura estava em plena maturação fisiológica no dia 30 de abril, mas a colheita foi realizada só no dia 13 de maio, devido à disponibilidade da equipe de apoio, no campo.

3.11 Análise estatística.

Uma análise inicial dos dados mostrou que algumas variáveis, como IAF e área foliar, necessitavam de transformação para reduzir a variabilidade dos dados. Utilizou-se a transformação logarítmica e raiz quadrada,

respectivamente. Também, fez-se um agrupamento entre dias após a emergência, correspondentes aos dias de coleta em 4 grupos (0 a 30 DAE, 30 a 50 DAE, 50 a 80 DAE, 80 a 130 DAE) para avaliar períodos durante o ciclo da cultura.

Para identificar as possíveis causas de variação no experimento, aplicou-se análise de variância considerando como fonte de variação blocos, sistema de manejo do solo (preparo convencional ou plantio direto), irrigação (sim ou não) e dias após a emergência, juntamente com as interações dupla e tripla e o fator bloco foi usado para controlar a variação entre amostras, inerente ao delineamento. Quando a significância de um dos efeitos principais ou de uma interação foi atingida foram realizados os desdobramentos, buscando identificar as diferenças ou as semelhanças nos sistemas de manejo e tratamentos.

Estratificando-se pela interação entre sistema e irrigação, ajustou-se um polinômio para explicar a variação do índice de área foliar (transformado em \ln IAF) em relação a dias após a emergência (DAE). Para o plantio direto (irrigado e não irrigado) o polinômio ajustado foi do segundo grau e para o preparo convencional (irrigado e não irrigado) ajustou-se um polinômio de terceiro grau. As análises para os dados transformados servem para os valores originais. As diferenças entre as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, em nível de 5% de significância. Foram realizadas, também, análises de regressão e correlação, submetendo os dados à análise de variância, pelo teste F.

3.12 Modelo CROPGRO-Soybean.

Utilizou-se o CROPGRO-Soybeans para simular o crescimento, desenvolvimento e rendimento da soja. O modelo considera efeitos de variáveis climáticas, ponderando limitações de nitrogênio e água no solo para simular processos físicos e fisiológicos: fotossíntese, respiração, acumulação e partição da biomassa, fenologia, crescimento foliar de caules e de raízes, extração de água do solo e evapotranspiração. Inseriu-se na base de dados do DSSAT variáveis do sistema clima-solo-planta (HOOGENBOOM *et al.*, 2003, JONES *et al.*, 2003a, JONES *et al.*, 2003b).

Os dados monitorados no campo foram utilizados nas simulações do modelo do CROPGRO-Soybean. Na Figura 4 fez-se um esquema dos temas que integram a base de dados de variáveis do sistema clima-solo-planta, no DSSAT, necessários para as simulações do modelo.

Foram inseridas dados pedoclimáticos, sistema de manejo do solo e características da cultura. A partir das simulações fez-se a calibração do modelo, visando identificar padrões de respostas da planta, fundamentais na avaliação do desempenho do modelo.

O CROPGRO-Soybean adota uma faixa térmica ótima que vai de 8°C (temperatura base $-T_b$) até 37°C. Dentro dessa faixa o modelo assume que há um incremento linear no transporte elétrico fotossintético e que acima de 30°C, o modelo considera que ocorre um incremento exponencial de dano térmico à cultura.

Existe uma progressiva queda fotossintética, atingindo a nulidade em 48°C (BOOTE *et al.*, 1998b). Essa temperatura de 8°C pode não ser a mais adequada para o limite inferior do início de estresse térmico para a cultivar

utilizada (cv. Fepagro-RS10), já que a literatura recomenda a temperatura base de 10°C.

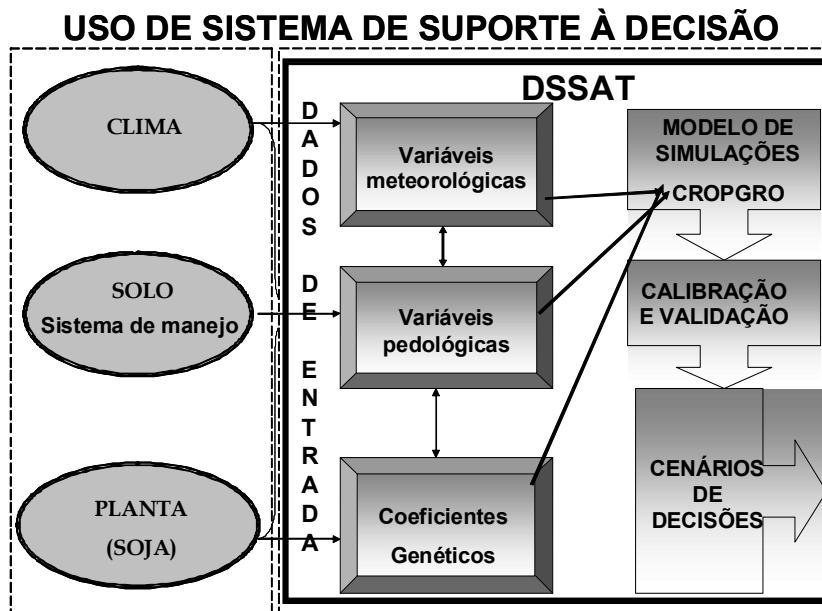


FIGURA 4 – Diagrama ilustrativo das variáveis que integram a base de dados do sistema atmosfera-solo-planta para as simulações do modelo CROPGRO-Soybean, no DSSAT.

No DSSAT os dados de clima, solo e do experimento de campo foram armazenados em bases de dados correspondentes a cada tema, conforme descrito a seguir:

3.12.1 Dados de Clima

Utilizando-se dados diários de temperatura do ar, máxima e mínima (°C), precipitação pluvial (mm) e radiação solar (MJ m^{-2}) da estação meteorológica de Eldorado do Sul, RS (30°05'S; 51°40'W; 40m de atitude),

compôs-se a base de dados climáticos. A série homogênea contém dados de janeiro de 1990 a dezembro de 2004 e foram apresentados em termos médios e extremos.

3.12.2 Dados de Solo

Foi criado um arquivo contendo informações gerais do local do experimento, identificando-se coordenadas geográficas (latitudes e longitudes), bem como a classe e cor do solo, tipo de drenagem, potencial de escoamento superficial (“runoff”), fator de fertilidade e declividade. Partindo-se da premissa que o solo sob sistema plantio direto (PD), devido sua mínima mobilização, apresenta características físico-hídricas diferentes do preparo convencional (PC), foram inseridas no DSSAT as informações correspondentes ao solo sob esses dois sistemas de manejo (Tabela 3). Adotou-se o valor igual a 84 que corresponde ao número da curva de “runoff” no DSSAT. Para o albedo considerou-se 0,14 e para a taxa de drenagem o valor de 0,25.

TABELA 3 – Características pedológicas de diferentes profundidades (Prof) do perfil do solo em preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (PD) na área experimental. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04.

Prof (cm)	Fração (%)				Carbono Orgânico (%)		Densidade (g cm ³)		LL		DUL		pH em água		θ _s (cm h ⁻¹)		Raiz
	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC/PD
5	18,2	12,5	29,9	28,8	0,85	0,85	1,7	1,6	0,15	0,14	0,235	0,235	4,9	4,9	7,7	3,07	1
10	18,2	12,5	29,9	28,8	0,85	0,85	1,7	1,6	0,15	0,14	0,235	0,235	4,9	4,9	7,7	3,07	1
15	18,0	13,7	29,0	27,1	0,72	0,52	1,58	1,66	0,19	0,16	0,225	0,21	5,1	5,2	10,21	10,38	1
20	18,0	13,7	29,0	27,1	0,72	0,52	1,58	1,66	0,19	0,16	0,225	0,21	5,1	5,2	10,21	10,38	1
30	27,6	20,0	28,9	23,9	-	-	1,59	1,0	0,19	0,17	0,29	0,245	5,0	5,0	26,65	57,3	1
45	27,9	24,1	27,7	22,2	-	-	1,59	1,0	0,17	0,15	0,3	0,245	5,0	5,0	57,3	57,3	1
60	32,3	31,8	28,7	23,1	-	-	1,57	1,0	0,21	0,2	0,36	0,25	5,0	5,0	37,1	37,1	0,8
75	40,7	31,8	26,2	23,1	-	-	1,52	0,9	0,26	0,26	0,315	0,315	5,0	5,0	5,72	5,72	0,6
100	40,7	31,8	26,2	23,1	-	-	1,58	0,9	0,26	0,26	0,315	0,315	5,0	5,0	5,72	5,72	0,4
120	40,7	31,8	26,2	23,1	-	-	1,58	0,9	0,26	0,26	0,315	0,315	5,0	5,0	5,72	5,72	0,05
150	40,7	31,8	26,2	23,1	-	-	1,58	0,9	0,26	0,26	0,315	0,315	5,0	5,0	5,72	5,72	0,05

DUL e LL (DUL - Drained Upper Limit; LL - Low limit). Representam as siglas em inglês correspondentes em português ao limites superior e inferior da umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente.

Prof - Abreviatura de profundidade do solo (cm).

* A análise de laboratório forneceu dados de carbono orgânico até a profundidade de 20 cm. A falta de dados está representada por traço na tabela.

3.12.3. Dados do Experimento de Campo

Informou-se a data da semeadura da soja (20/11/2003), data de emergência, descrição da cultivar Fepagro RS-10 (ciclo tardio), espaçamento de 0,40m entre linhas e população de 300 mil plantas ha⁻¹. Os tratamentos irrigados foram mantidos com adequado suprimento hídrico. As irrigações eram feitas por uma linha de aspersores no centro da área, quando o potencial matricial da água no solo atingia -0,06 MPa (tensiômetros de mercúrio até 0,45m de profundidade). As demais práticas de manejo da cultura seguiram recomendações técnicas para a soja, no Estado. As simulações correspondentes ao crescimento e desenvolvimento da soja foram realizadas considerando as condições: irrigada e não irrigada, nos dois sistemas de manejo do solo: sistema plantio direto (PD) e preparo convencional (PC).

Montou-se a base de dados, identificando-se o local do experimento e instituição de ensino e pesquisa. Foram armazenadas informações sobre as condições iniciais, criando-se quatro níveis, assim descritos: 1) preparo convencional irrigado (PCI); 2) preparo convencional não irrigado (PCNI); 3) plantio direto irrigado (PDI); 4) plantio direto não irrigado (PDNI). Foram armazenados dados de solos, correspondentes às profundidades de 0,10m e 0,20m. As características físico-químicas que integram a base de informações de solo são procedentes de análise realizadas no Laboratório de Solos da Embrapa Solos, bem como dados disponibilizados em Dalmago (2004).

As datas de coletas a campo, irrigações e estádios fenológicos foram relacionadas em dias do calendário Juliano na composição da base de dados experimentais. No quadro referente aos tratamentos foram inseridos os

números correspondentes aos níveis (1 a 4), conforme as condições iniciais e suas respectivas descrições (1-PCI-preparo convencional irrigado, 2-PCNI-preparo convencional não irrigado, 3-PDI-plantio direto irrigado, 4-PDNI-plantio direto não irrigado).

O cálculo do balanço hídrico foi realizado assumindo-se o modelo de Ritchie (1998). Esse modelo prevê o fluxo e absorção de água pelas raízes até dez camadas do solo e necessita de informações sobre as características pedológicas (Tabela 3), compondo o arquivo de solos, no DSSAT.

Com relação a cultivar (Fepagro RS-10), procurou-se identificar características referentes ao ecotipo e atributos genéticos entre as cultivares, na base de dados do DSSAT, que mais se aproximavam dos coeficientes genéticos da cultivar utilizada. No arquivo contendo dados da cultura incluiu-se: índice de área foliar, estádios de crescimento da soja (FEHR, CAVINESS, 1977), estatura (m), peso de folha (g planta^{-1}), peso de folha (kg ha^{-1}), peso de caule (kg ha^{-1}), peso de matéria seca aérea (kg ha^{-1}), peso de legumes (kg ha^{-1}), número de legumes (legumes m^{-2}), peso de grãos (kg ha^{-1}), números de grãos (grãos m^{-2}), índice de legumes, índice de colheita e área específica de folha.

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) optou-se pelo método de Priestley-Taylor-Ritchie (RITCHIE; 1998), em função da disponibilidade de dados. Esse método considera apenas dados diários de radiação solar, precipitação pluvial, temperatura do ar (máxima e mínima) e o albedo do solo. A evaporação do solo é estimada em função da quantidade de água disponível na camada superficial do solo e da radiação solar que atinge a superfície, que é proporcional ao índice de área foliar e ao albedo do solo.

3.12.4. Simulações no Modelo CROPGRO

Na Figura 5 estão representados os intervalos, em dias após a emergência, de estádios fenológicos da cultivar Fepagro RS-10 que serviram de comparação com os dados do ecotipo, incluídos no programa computacional DSSAT v. 4,0. A calibração foi realizada através de análise de sensibilidade no CROPGRO-Soybean (HOOGENBOOM *et al.*, 2003; JONES *et al.*, 2003a; JONES *et al.*, 2003b). Primeiro calibrou-se os coeficientes genéticos e, posteriormente foram realizadas as calibrações de variáveis de crescimento da soja. Essa seqüência foi seguida devido a dependência entre as variáveis de crescimento com a fenologia da cultura.

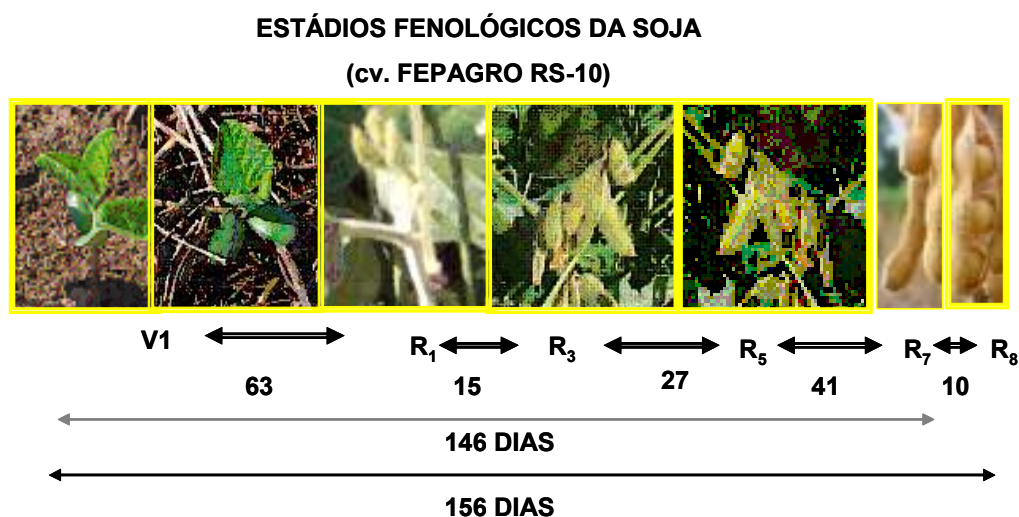


FIGURA 5. Estádios fenológicos e o tempo de duração de cada subperíodo durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10), em Eldorado do Sul, RS, 2003/04, utilizados para calibrar o modelo CROPGRO-Soybean, no DSSAT.

Foram especificados apenas os coeficientes genéticos ajustados no CROPGRO-Soybean, os quais são identificados por siglas no idioma inglês e correspondem as seguintes especificações: FL-SH, que corresponde ao tempo entre a primeira flor e o primeiro legume (em dias fototérmicos); FL-SD, refere-se ao tempo decorrido em dias fototérmicos da primeira flor ao primeiro grão; SD-PM, equivalente ao tempo, em dias fototérmicos, do primeiro grão à maturação fisiológica; FL-LF, tempo entre a primeira flor e o final da expansão foliar; SLAVR, correspondendo à máxima área foliar específica. Os outros coeficientes não foram alterados, ou seja, SIZLF, corresponde ao tamanho máximo da folha (trifólio) em cm²; XFRT se refere à fração máxima alocada à parte reprodutiva; WTPSD ao peso do grão; SFDUR à duração do enchimento de grãos; SDPDV representa a relação média de grãos por legumes; PODUR o tempo requerido pela cultivar para adição de legumes, sob ótimas condições.

TABELA 4. Coeficientes genéticos da cultivar Fepagro RS-10 calibrados no CROPGRO-Soybean, em Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

Fenologia							
CSDL	PPSEN	EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM	FL-LF	
12,33	0,32	23,0	6,5	16,0	42,0	18,0	
Crescimento							
LFmáx	SLAVR	SIZLF	XFRT	WTPSD	SFDUR	SDPDV	PODUR
1,0	329	170	1,0	0,20	24,0	1,65	10,0

As datas de fenologia, crescimento, componentes de rendimento e rendimento de grãos foram comparadas utilizando-se o Índice de concordância “d”, descrito por Willmott *et al.* (1985), conforme identificado na equação 25.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i'| + |O_i'|)^2} \right] \quad (25)$$

em que: N correspondente ao total de observações, P_i é o valor predito (simulado) pelo modelo. P_i' refere-se ao valor da diferença de P_i pela média M da variável analisada. O_i' é a diferença entre o valor observado e a média M . Conforme o valor do índice “d” quanto mais próximo estiver da unidade, maior é a concordância, ou seja, menor é o afastamento entre o dado observado e o simulado pelo modelo.

Para efeito de avaliação foram comparados os dados observados com os simulados através do quadrado médio do erro (RMSE), conforme Loague & Green (1991), utilizando-se a equação 26.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \times \frac{100}{M} \quad (26)$$

sendo P_i e O_i os valores das variáveis analisadas previstas pelo modelo e as observadas no campo, correspondente ao intervalo de avaliação. O RSME exprime a diferença relativa (%) entre os valores observados e os simulados (preditos) pelo CROPGRO-Soybean. Considera-se alta precisão quando o RMSE é inferior a 10%; entre 10 e 20%, boa precisão e, entre 20 a 30%, dependendo da condição de contorno, pode ser aceitável. Erro superior a 30% apresenta baixa precisão do modelo. Além das variáveis de crescimento, desenvolvimento e rendimento da soja, o CROPGRO também simulou os balanços de água e nitrogênio na cultura e no solo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variáveis climáticas da área experimental

A partir da análise dos dados de precipitação pluvial, temperatura do ar e radiação solar da área experimental, que integram a base de clima no DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), correspondente ao período entre 1° de janeiro de 1990 e 31 de dezembro de 2004, fez-se o diagnóstico das condições médias e extremas dessas variáveis meteorológicas. A radiação solar global diária extrema foi de $33 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, ocorrido em 07/01/2002, com o menor valor médio de $8,1 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, no mês de junho e o maior de $20,9 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, no mês de janeiro.

As temperaturas máximas mais elevadas ocorrem no mês de janeiro com média de $30,2^{\circ}\text{C}$, porém, o dia mais quente, da série histórica analisada, foi 18/12/1995, com $39,5^{\circ}\text{C}$, em Eldorado do Sul. Com relação às temperaturas mínimas, o mês com médias mais frias foi o de julho, com $7,8^{\circ}\text{C}$. A madrugada mais fria ocorreu em 30/06/1996 com mínima de $-3,8^{\circ}\text{C}$.

A precipitação pluvial média anual foi de 1.559,6mm. Esse valor difere do apresentado por Bergamaschi *et al.* (2004) que foi de 1.445,8 mm por representar a média de uma outra série de dados (março de 1970 a fevereiro de 1989). Ainda com base na série de dados analisada de 1° de janeiro de

1990 a 31 de dezembro de 2004, verificou-se que o mês de março foi o menos chuvoso, apresentando média mensal de 93,0 mm e, o de julho o mais chuvoso com média de 170 mm. A maior precipitação pluvial diária ocorreu em 12/04/1998 totalizando 111 mm.

4.2. Variáveis meteorológicas durante o período do experimento de campo.

Procurando analisar os impactos da precipitação pluvial sobre o crescimento, desenvolvimento e rendimento da soja, foram detalhados os períodos em que houve maior disponibilidade hídrica à cultura. A precipitação pluvial durante o ciclo da soja foi de 663,4 mm. Ressalta-se que entre o dia 20/11/03 (data da semeadura) e 27/11/03 (data da emergência) choveu 63,2 mm. Nos 24 dias após a emergência (24 DAE) foram totalizados 203,1 mm de precipitação, seguido de um período de 20 dias sem chuvas (Figura 6). As temperaturas do ar elevaram-se entre 36 e 41 DAE, indicando maior demanda hídrica às taxas transpiratórias, condicionantes ao equilíbrio térmico da planta (Figura 5).

De 45 a 67 DAE foram computados 71,8 mm, sendo que a maior contribuição hídrica à área experimental foi de 34,0 mm, a 45 DAE, e os demais milímetros restantes (37,8mm) foram na forma de chuvas esparsas com baixo volume pluvial. No período as temperaturas máximas foram superiores a 26,5°C. Sob essas condições a cultura atingiu o estágio de floração (R_1), a 63 DAE. Entre 68 e 77 DAE choveu 45,3 mm, sendo 39,2 mm a 68 DAE e o restante concentrado nos primeiros quatro dias. No período de 73 a

77 DAE não houve oferta pluvial, mas entre 78 e 79 DAE a oferta foi de 81,5 mm. Nos 28 dias subseqüentes, compreendidos entre 80 e 107 DAE, choveu apenas 11,9 mm, momento em que a cultura encontra-se elaborando seus componentes de rendimento (R_5 a 98 DAE), necessitando de maior oferta hídrica. O período entre R_1 e R_5 é considerado crítico para a soja quanto à oferta hídrica (MATZENAUER *et al.*, 2003). Nos 48 dias finais do ciclo da cultura, entre 108 a 155 DAE (R_8), a precipitação pluvial foi de 185,6 mm.

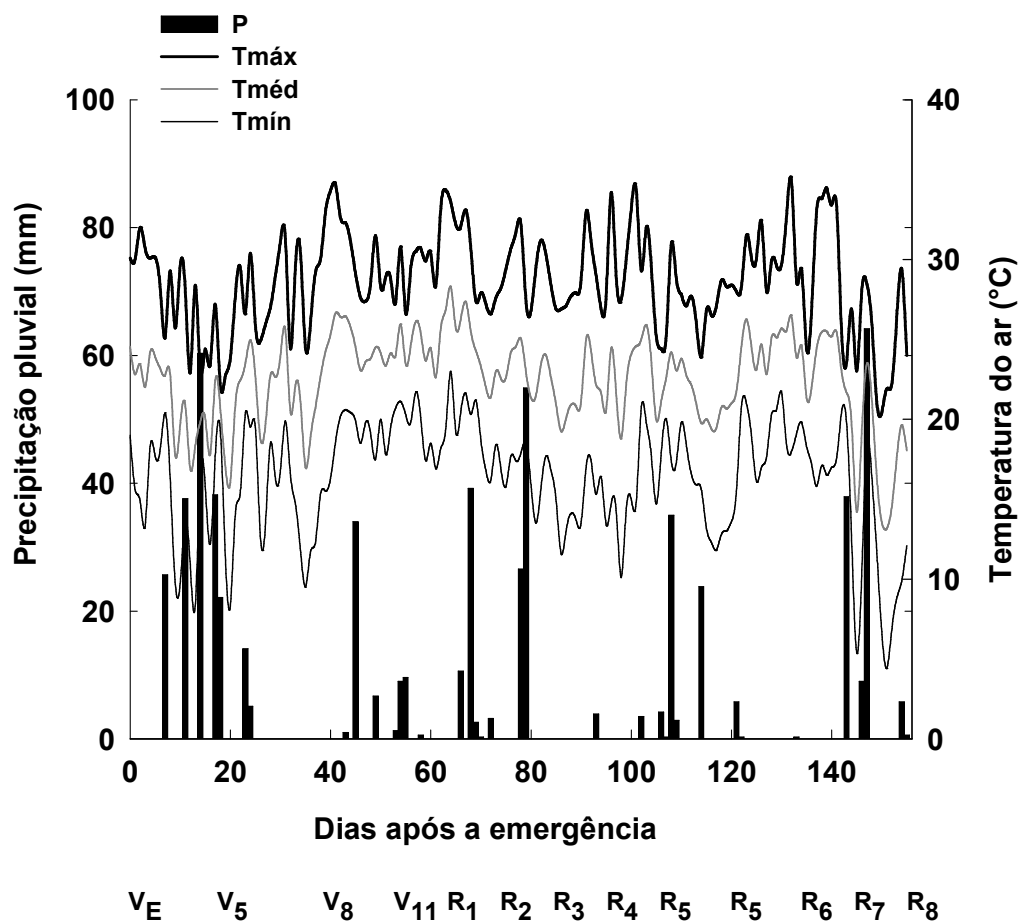


FIGURA 6 – Precipitação pluvial (P) e temperaturas do ar: máxima (Tmáx), mínima (Tmín) e média (Tméd) e estádios fenológicos, em dias após a emergência, durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04.

No período compreendido entre a semeadura e a maturação fisiológica da cultura (ciclo da cultura), a temperatura média foi de 22,5°C, com médias das temperaturas extremas de 28,6°C a 16,3°C para as máximas e mínimas, respectivamente. As temperaturas máximas ficaram abaixo de 35°C e as mínimas foram, predominantemente superiores a 10°C (Figura 6), que foi a temperatura-base adotada, ou seja, a cultura se manteve na faixa dos limites térmicos favoráveis durante o seu ciclo. Os dados corroboram com as afirmações de Berlato (1992) e Barni (1999) que o regime térmico não apresenta limitações à soja no Rio Grande do Sul.

Considerando que a partir do início do período vegetativo a cultivar (ciclo tardio) foi adquirindo sensibilidade ao fotoperíodo e à temperatura do ar, notou-se que o início da floração (R_1) detectado no campo, ocorreu quando o fotoperíodo foi reduzido para 13h 45min e a amplitude térmica ficou em torno de 15°C, ou seja, com 806 graus-dia acumulados (Figura 7).

A floração ocorrida a 63 DAE, ou seja, 70 dias após a semeadura, confirma a premissa de que cultivares de ciclo tardio florescem em dias curtos (MAJOR *et al.*, 1975; WILKERSON *et al.*, 1989). A cultivar utilizada - Fepagro RS-10 (maturação tardia) - foi sensível ao aumento das amplitudes térmicas à floração. Entre as nove cultivares avaliadas por Rodrigues *et al.* (2001), as que apresentaram maior sensibilidade à temperatura e ao fotoperíodo, em relação à data de florescimento, foram as cultivares de ciclo tardio.

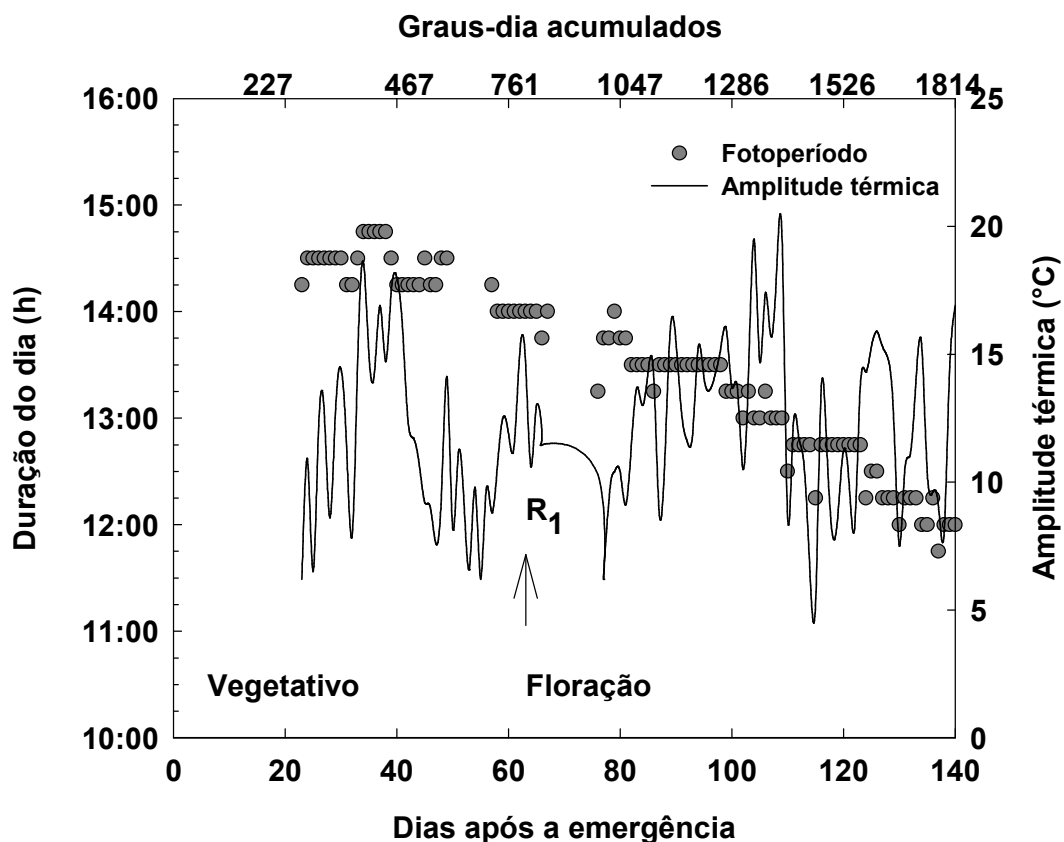


FIGURA 7 – Duração do dia (h) e amplitude térmica (°C) no ciclo da (cv. Fepagro RS-10). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04.

Os dados de campo apontaram que radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foi cerca de 42% da radiação solar global (R_s). Esta razão média também foi encontrada por França *et al.* (1999), no mesmo local ($0,42 \pm 0,02 \text{ mol mol}^{-1}$), em experimento com a cultura do milho. No período correspondente ao experimento de campo de Pandolfo (1995) a RFA_{inc} foi cerca de 43% da radiação solar. Essas variações estão associadas às condições meteorológicas ocorridas no ano agrícola em que o experimento foi realizado.

Assim sendo, os dados apresentados de radiação fotossinteticamente ativa correspondem a esse percentual da radiação solar global (Figura 8). O total de radiação solar global (R_s), a partir da data de emergência da soja foi de 3.192 MJ m^{-2} , sendo a média de $20,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e

os valores extremos de 31,8 e 1,5 MJ m⁻² dia⁻¹. A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) total foi de 1.340 MJ m⁻², sendo a média de 8,6 MJ m⁻² dia⁻¹ e as extremas variaram entre 0,6 e 13,4 MJ m⁻² dia⁻¹.

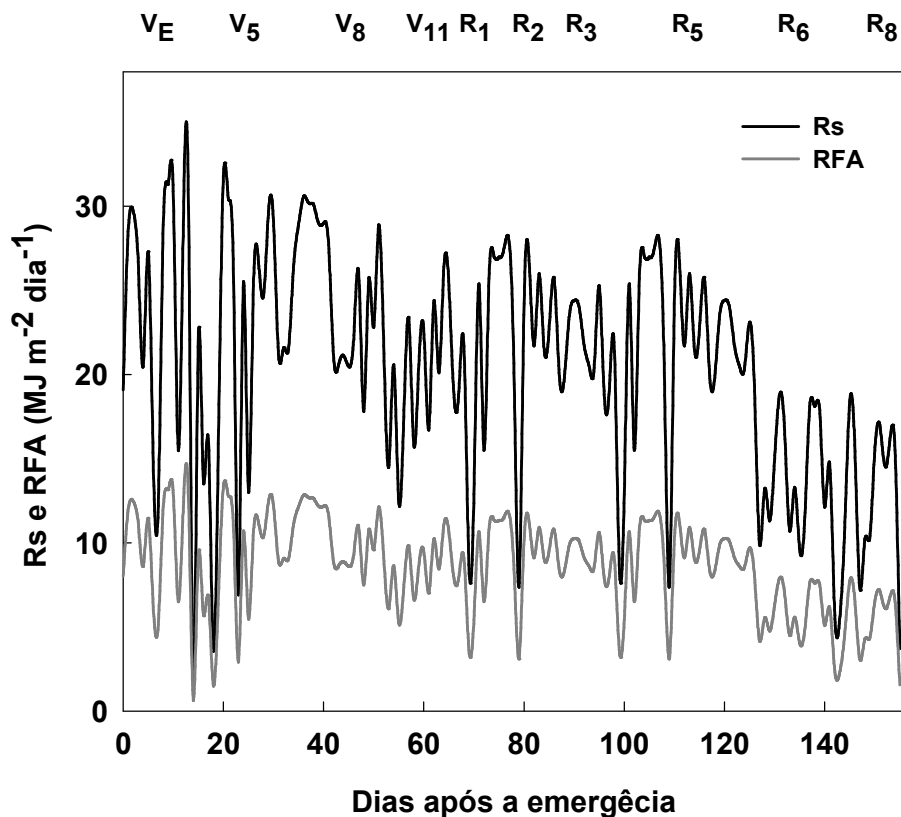


FIGURA 8 – Radiação solar global incidente (Rs) e radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA_{inc}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

A partir de 120 DAE a oferta de radiação declina e os valores ficam abaixo de 24,4 MJ m⁻² dia⁻¹ de Rs e 10,2 MJ m⁻² dia⁻¹ de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), mas, nessas condições, a cultura estava drenando as reservas acumuladas ao enchimento de grãos, em baixa atividade fotossintética (Figura 8). Em Bergamaschi *et al.* (2004) verifica-se que a região recebe cerca de 4.523 MJ m⁻² ano⁻¹. Ao avaliar o valor da média climatológica

de Rs de $18,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, no período de novembro a abril e comparar com o seu equivalente em RFA ($7,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), infere-se que no ano agrícola 2003/04 com RFA média de $8,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ não houve limitação energética à produção de fotoassimilados pela cultura.

4.3 Evapotranspiração máxima (ETm) e coeficiente de cultura (Kc)

A evapotranspiração máxima (ETm) total, durante o ciclo da soja, foi de 681,3 mm com média diária de $4,5 \text{ mm dia}^{-1}$. No período compreendido entre o final da fase vegetativa (V_{11}) e o início do enchimento de grãos (R_5) ocorreram as maiores taxas evapotranspiratórias (Figura 9), ou seja, entre 600 e 1200 graus-dia acumulados (49 a 93 DAE), com valores entre 4,6 a $8,0 \text{ mm dia}^{-1}$. Essas taxas podem ser explicadas pela condição da cultura em preparo convencional irrigado (área do lisímetro) e índice de área foliar máximo (6,3), obtido na floração (R_2). A evapotranspiração de referência (ETo) total foi de 704 mm com média diária de $4,6 \text{ mm dia}^{-1}$.

Na mesma região climática, Berlato & Bergamaschi (1978) obtiveram ETm total de 840 mm e média de $5,8 \text{ mm dia}^{-1}$ com espaçamento de 0,60m entre linhas e população de 400.000 plantas ha^{-1} . Ao avaliar dados de cinco anos em experimento com soja, cultivar de ciclo médio, Berlato *et al.* (1986) encontraram taxas evaporativas de $6,1 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$. A relação da evapotranspiração máxima com a evapotranspiração de referência (ETo), apontou para valores de coeficiente da cultura (Kc) variando entre 0,5 a 1,13 (Figura 9). Os baixos valores de Kc, no início do ciclo da cultura, expressam

que a evapotranspiração de referência suplanta as taxas evapotranspiratórias da cultura, indicando o baixo índice de área foliar (IAF) e o predomínio da evaporação do solo. O valor de Kc de 1,13 reforça a condição de máximo IAF e altas taxas transpiratórias na condição de cultura irrigada. No final do ciclo o Kc reduziu-se para valores próximos a 0,7 (Figura 9).

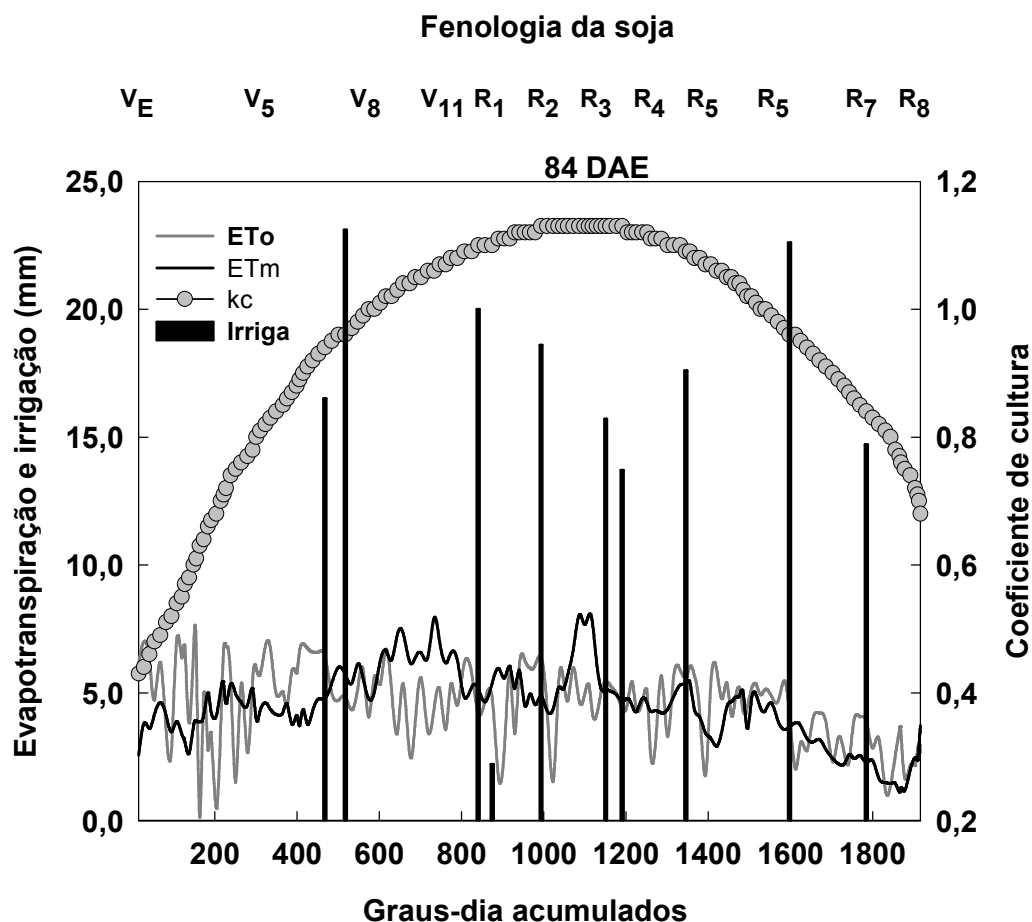


FIGURA 9 – Evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração máxima (ETm), coeficiente de cultura (Kc) e irrigação diária (mm) na cultura da soja (cv. Fepagro RS-10) sob preparo convencional. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

Os valores de Kc se ajustaram a um modelo quadrático, em função de dias após a emergência (DAE), conforme a equação 27. O valor máximo de

Kc da soja foi 1,13 (cv. Fepagro RS-10), considerando-se a primeira derivada da equação 27. Destaca-se que a 84 DAE, na condição de Kc máximo, a cultura encontrava-se em R₃, definindo seus componentes de rendimento. O modelo ajustado indica o momento em que a cultura encontrava-se em máxima atividade evapotranspiratória (ETm), ou seja, sobrepondo a evapotranspiração de referência (ETo). Esse indicador pode auxiliar em estratégias de decisão nas avaliações quanto à necessidade de complementação hídrica, por irrigação, em períodos de escassez hídrica no solo.

$$Kc = -0,0001(DAE)^2 + 0,0168(DAE) + 0,4269 \quad (27)$$

Considerando que cerca de 75% dos produtores do Rio Grande do Sul adotam o sistema plantio direto (DENARDIN *et al.*, 2005), verificou-se que houve ajuste de um modelo de regressão quadrática para estimar o Kc em plantio direto irrigado. A Figura 10 indica a evolução do coeficiente de cultura (Kc) da soja em sistema plantio direto irrigado em função do índice de área foliar (IAF). O ponto de máxima no modelo quadrático ajustado (primeira derivada) indicou que a soja em plantio direto irrigado (cv. Fepagro RR-10) com IAF de 4,3 teve Kc de 1,16. Quando comparado com valores de Kc obtidos no campo, em preparo convencional irrigado, na área do lisímetro com soja, verificou-se que os mesmos ficaram muito próximos, indicando que o modelo pode ser utilizado para estimar o Kc da soja, a partir de dados de IAF em plantio direto, para condições de manejo semelhantes.

Nas Figuras 9 e 10, percebe-se que o coeficiente de cultura (Kc) se mantém no patamar superior a 1,0 correspondente ao período em que a cultura

encontrava-se próximo ao IAF máximo, nas condições irrigadas (PCI e PDI). Observa-se que no período que vai da floração ao início de enchimento de grãos os valores de K_c encontram-se superiores a 1,0, indicando que esse é um subperíodo de grande consumo de água pela cultura.

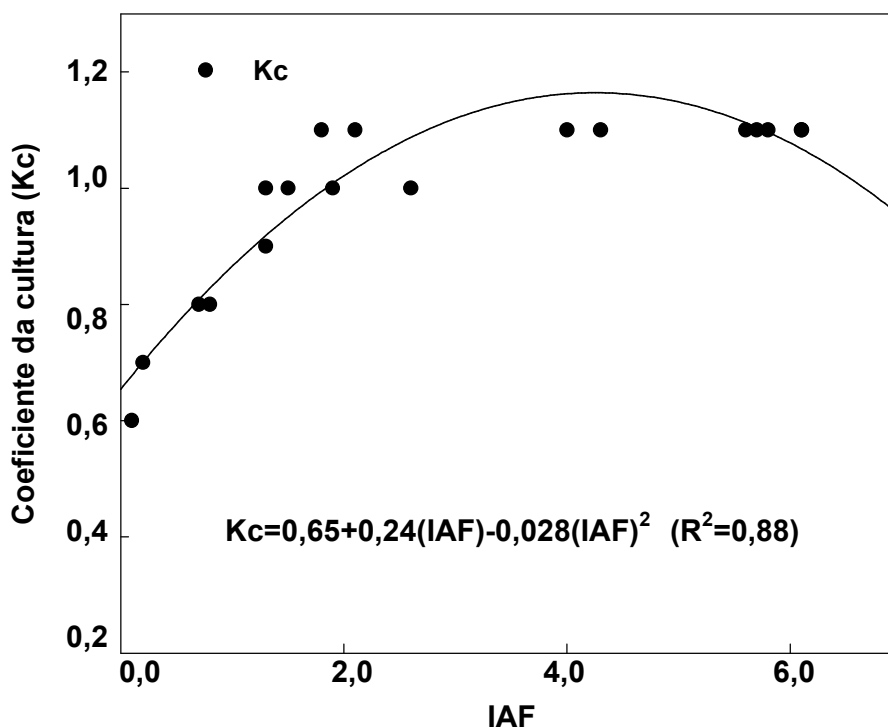


FIGURA 10 – Coeficiente de cultura (K_c) da soja (cv. Fepagro RS-10) em função do índice de área foliar (IAF), em plantio direto irrigado (PDI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04.

Na Figura 11 estão representados os valores mensais equivalentes às entradas (precipitação pluvial) e as saídas de água (evapotranspiração da soja) no sistema solo-planta, entre 20 de novembro de 2003 e 30 de abril de 2004. Nos últimos dez dias de novembro de 2003 as precipitações pluviais foram superiores às normais climatológicas (BERGAMASCHI *et al.*, 2004). Durante o mês de dezembro, as chuvas continuaram acima da média climática,

não sendo fator limitante ao crescimento e desenvolvimento, no início do ciclo da cultura. Nesse período ocorreram as maiores saídas de água para a atmosfera pela evaporação na superfície do solo.

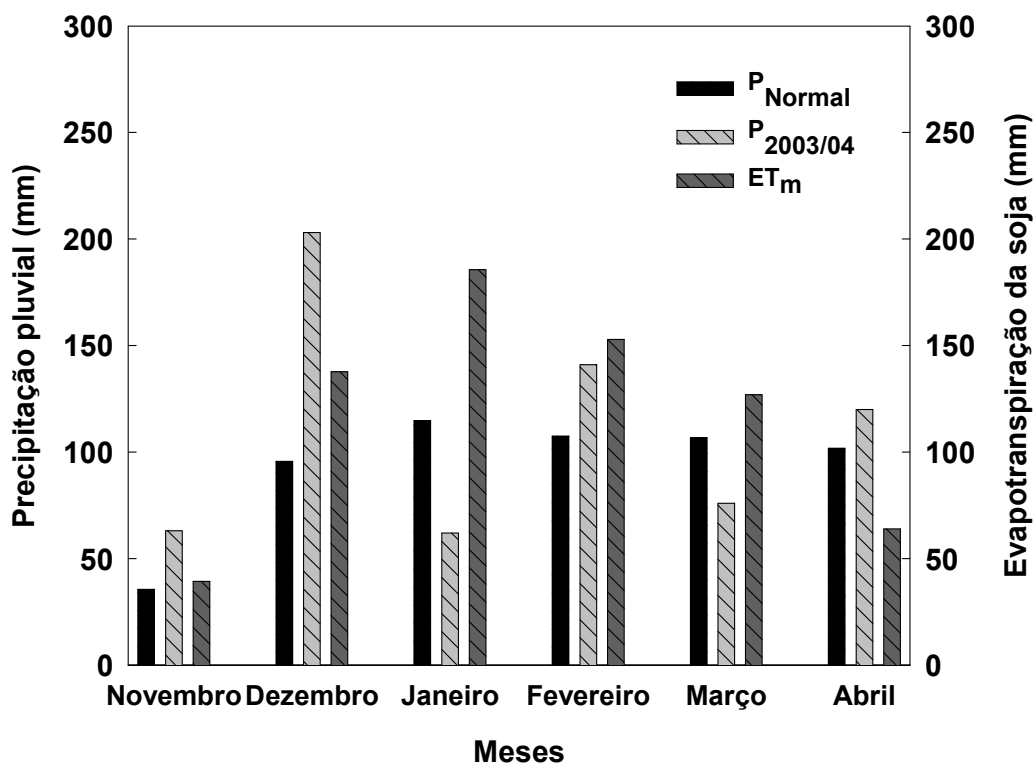


FIGURA 11 – Precipitação pluvial (P), normal e em 2003/04 (ciclo da soja) e evapotranspiração máxima da soja (ET_m) correspondente ao último decêndio de novembro e mensal de dezembro a abril em Eldorado do Sul, RS. 2003/04.

No mês de janeiro houve redução na oferta pluvial, indicando restrições hídricas nos tratamentos não irrigados, em escala mensal (Figura 11). Em Eldorado do Sul, em condições climáticas normais a precipitação é de 115 mm, no mês de janeiro. Mas, em 2004 houve apenas 62 mm, enquanto a evapotranspiração da cultura atingiu 189 mm, indicando que as saídas foram

superiores às entradas de água, neste mês. Ao final do mês de janeiro a cultura entrou em floração, indicando que a baixa oferta pluvial poderia comprometer o processo de transformação de meristemas vegetativos em reprodutivos, nos tratamentos não irrigados, ou seja, em PCNI (preparo convencional não irrigado) e PDNI (plantio direto não irrigado).

Em fevereiro, o total de precipitação pluvial e de evapotranspiração foi cerca de 150 mm. Em março, as chuvas reduziram-se, apresentando valores abaixo das normais climatológicas. Por volta de 105 DAE (11/03/04) a cultura encontrava-se no subperíodo de formação de grãos, que é considerado de grande necessidade de água do solo à cultura. Em abril, houve proximidade dos valores de precipitação pluvial, mantendo-se próximos da média climatológica da região (Figura 11). De janeiro a março, os déficits hídricos podem influenciar no rendimento da soja, por coincidirem com a floração e o enchimento de grãos, considerados críticos à necessidade hídrica da cultura (BERLATO, 1987, BERGAMASCHI, 1992, BERLATO; FONTANA, 1999).

4.4 Balanço hídrico no solo em preparo convencional e plantio direto

Os tratamentos irrigados receberam suplementação hídrica de 190 mm, aplicados em 11 dias com lâmina média de água de 17,3mm. O balanço de água no solo identificou déficits e excessos capazes de influenciar o padrão de resposta da cultura, quanto à oferta hídrica. Durante o ciclo, a evapotranspiração real em PCI foi de 372 mm e em PDI de 370 mm. Em termos de excedentes hídricos houve 551 mm em PCI e 532 mm em PDI. O

déficit de 111 mm nos tratamentos irrigados deu-se por limitação temporária de oferta hídrica, decorrente de problemas no equipamento de irrigação, durante a condução do experimento.

Os tratamentos não irrigados receberam durante o ciclo da soja 663 mm oriundos de precipitação pluvial. No plantio direto não irrigado a deficiência hídrica foi cerca de 283 mm, enquanto em preparo convencional não irrigado, foi em torno de 287 mm. Os excedentes hídricos contabilizaram 229 mm, em PCNI e, 239 mm, em PDNI, sendo a evapotranspiração real de 377 mm e de 368 mm, respectivamente. A oferta pluvial indicou que, no início do ciclo da cultura (até 15 dias após a emergência), não houve limitação hídrica, quando os excedentes (Figura 12 e 13) atingiram 92 mm (PCNI) e 89 mm (PDNI). Neste período, os valores de déficits foram em torno de 11 mm (PCNI) e 16 mm (PDNI), confirmando a adequada disponibilidade de água no solo à cultura.

No período entre a semeadura e V_{11} os déficits hídricos totalizaram em PCNI 102 mm e em PDNI, 94 mm. Entre 15 DAE e o início da floração (R_1), constatou-se que em PCNI os déficits de água no solo foram de 94 mm e excessos de 54 mm, com evapotranspiração real de 132 mm. Em PDNI os valores foram de 81 mm, 56 mm e 126 mm, respectivamente. Os valores de déficits indicam que o plantio direto não irrigado teve maior disponibilidade hídrica. A evapotranspiração superior em PCNI é indicador de maior índice de área foliar neste sistema de manejo do solo. Durante o período considerado crítico à cultura com relação à oferta hídrica (R_2 a início de R_5), identificou-se que os déficits em preparo convencional não irrigado foram de 79,8 mm e em plantio direto não irrigado de 86,8 mm. Os excedentes foram de 37 mm e 41

mm, respectivamente, a evapotranspiração real no PCNI atingiu 124 mm e no PDNI 118 mm.

Evidências constatadas por Matzenauer *et al.* (1998) apontam que a cultura apresenta maior demanda hídrica no subperíodo compreendido entre o início da floração e enchimento de grãos. Do início de R5 ao final do ciclo da soja, totalizou-se 110,9 mm de deficiência hídrica em PCNI e, 105,2 mm em PDNI. Os excedentes foram em torno de 46 mm (PCNI) e 53 mm (PDNI). A evapotranspiração real foi cerca de 101 mm e 98 mm, respectivamente.

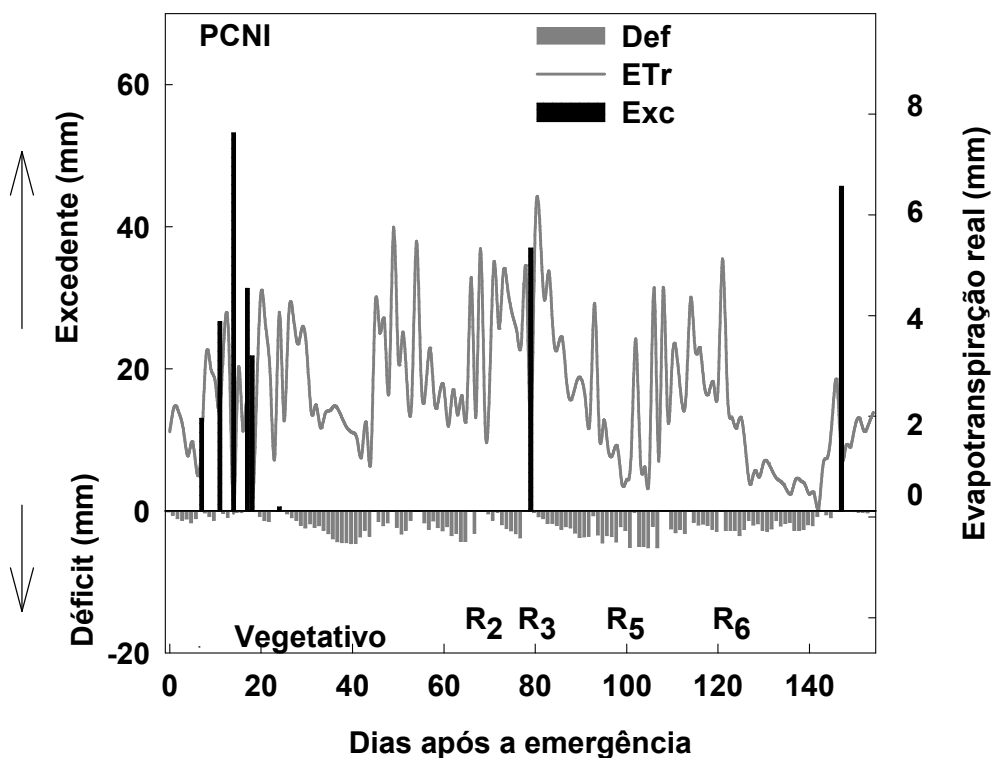


FIGURA 12 – Balanço hídrico diário com excedentes (Exc) e déficits (Def) hídricos, em função de dias após a emergência da soja (cv. Fepagro RS-10), em preparo convencional não irrigado (PCNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04.

As condições médias, em termos de radiação solar global (R_s) e temperatura do ar (extremas e médias), além dos totais de precipitação pluvial, deficiência hídrica e graus-dia acumulados durante o ciclo (nos principais subperíodos) foram sintetizados na Tabela 5.

A disponibilidade hídrica no solo identificada pelos balanços hídricos (Figuras 12 e 13) e valores apresentados na Tabela 5 confirmam os períodos de oferta e escassez de precipitação pluvial (Figura 6).

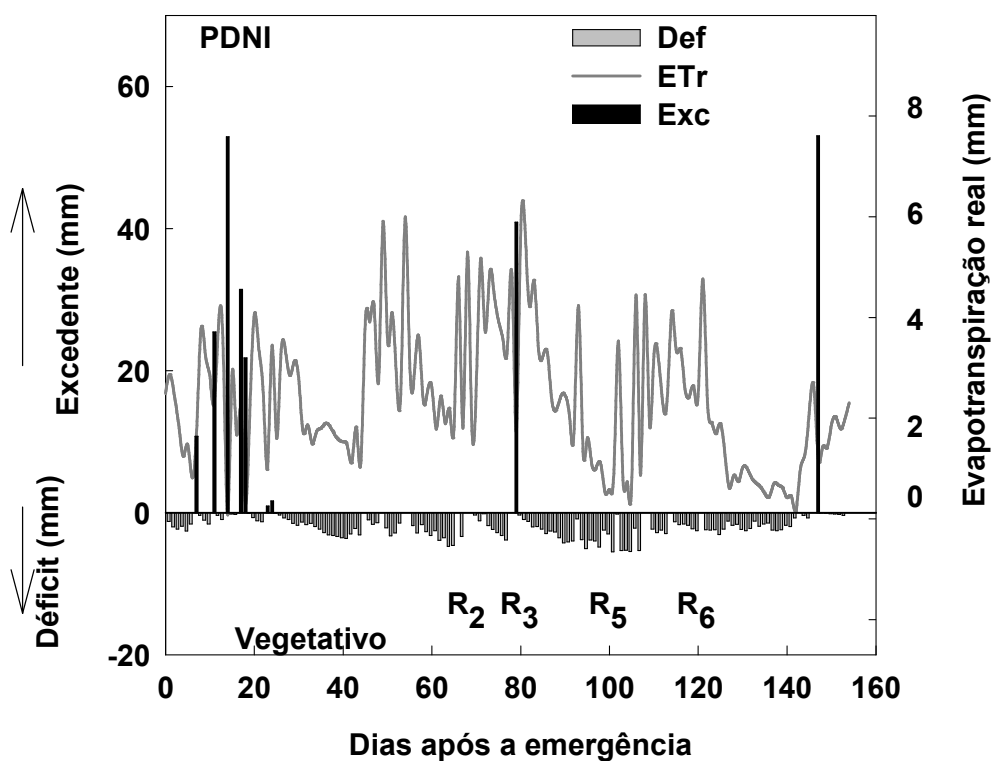


FIGURA 13 – Balanço hídrico diário com excedentes (Exc) e déficits (Def) hídricos, em função de dias após a emergência da soja (cv. Fepagro RS-10), em plantio direto não irrigado (PDNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04.

Ao abordar aspectos relacionados à dinâmica da água no solo, Dalmago (2004) confirmou evidências de maior evaporação em preparo

convencional, no início da secagem do solo, mas, ao observar todo o período de secagem constatou que a evaporação total foi maior no sistema plantio direto, devido aos maiores estoques hídricos no solo.

Ao comparar os valores de déficits hídricos (Def) no período vegetativo da cultura (V_E a V_{11}), Tabela 5, as pequenas diferenças entre PDNI (93,7 mm) e PCNI (101,2 mm) são indicadores dos efeitos da cobertura na superfície (palha) em PDNI. A palha aumenta a refletividade em períodos secos e mantém o solo mais úmido em curtos períodos de estiagem, em relação ao PCNI. Ao longo do ciclo da cultura os efeitos das pequenas diferenças de déficits hídricos foram evidenciadas nos indicadores de crescimento, desenvolvimento e rendimento da planta (índice de área foliar estatura, matéria seca aérea e área específica).

Para Idso *et al.* (1974) existem três fases de secagem da camada superficial do solo. Na primeira fase a evaporação depende das condições meteorológicas e em seguida, na segunda fase, o domínio passa a ser do solo, controlando os fluxos das camadas mais internas para a superfície. Na terceira fase as taxas de evaporação dependem da capacidade do solo em transferir e adsorver o vapor d'água.

Comparando as interações no sistema solo-planta-atmosfera de forma integrada, a evaporação do solo no início da secagem de respostas da cultura à dinâmica do ambiente. Em análises do sistema como um todo, um conjunto de evidências aponta para a mesma direção e sentido, como forte indicador de aceitação ou rejeição de uma determinada hipótese.

TABELA 5 – Variáveis meteorológicas durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em diversos estádios fenológicos (Fehr & Caviness, 1977). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

Estádios	Rs MJ m ⁻² dia ⁻¹	PRP (mm)	Temperatura (°C) (média)			GD _{acum} T _b (10°C)	DEF (mm)	
			T _{máx}	T _{mín.}	T _{méd}		PCNI	PDNI
S-V ₁₁	22,6	328,5	28,5	16,4	22,5	789,6	101,2	93,7
R ₁	20,1	0,0	34,3	19,4	26,9	806,5	3,1	3,5
R ₁ - R ₅ [*]	21,8	141,2	29,4	16,5	22,9	1259,6	102,1	113,4
R ₅ ^{**} - R ₇	19,2	76,1	29,3	17,1	23,2	1814,4	80,2	72,3
S-R ₈	20,6	663,4	28,6	16,3	22,5	1945,1	287,5	280,9

S (Semeadura), Rs (Radiação solar global), PRP (precipitação pluvial), DEF (deficiência hídrica), T_b, temperatura base considerada para a soja (10°C). R₁, início da floração e R₅^{*}-primeiro dia em R₅ e R₅^{**}-a partir do segundo dia em R₅ até o primeiro em R₇ (os graus-dia foram computados da emergência em 27/11/2003 até 30/04/2004, final do ciclo).

4.5 Indicadores hídricos no solo

O primeiro período de secagem iniciou a 26 DAE (23/12/03), estendendo-se até 45 DAE (11/01/04), quando houve uma oferta pluvial de 34 mm. A 40 DAE (06/01/04) os potenciais matriciais deixaram de ser registrado, decorrente do rompimento da coluna de mercúrio, identificados pela interrupção dos valores de teores de umidade no solo, representados na Figura 14, nas profundidades entre a superfície e 0,30 m, onde os efeitos de sistemas de manejo do solo são mais evidenciados.

Os tensiômetros operam dentro da faixa de 0 a -80 kPa de potencial matricial, que corresponde à faixa ótima de suprimento de água à maioria das culturas (FARIA, 1987). À medida que se reduz o conteúdo de água no solo, torna-se mais difícil a sua extração pelas raízes, identificado por valores mais negativos de potencial matricial, ou altos valores de tensão e baixa umidade volumétrica.

Nas linhas representadas por profundidade em cada sistema de manejo do solo (Figura 14) é possível identificar que, na camada mais superficial do solo (0,075m), o início da secagem em preparo convencional não irrigado (PCNI), deu-se no dia 23/12/03 (26 DAE), correspondendo a $0,236 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de umidade volumétrica. Em plantio direto não irrigado (PDNI) o início foi no dia 25/12/03 (28 DAE), sendo a umidade volumétrica no solo de $0,270 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Nesse mesmo dia o solo em PCNI apresentava umidade de $0,185 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, indicando que a cultura já estava com potencial matricial de $-0,06 \text{ MPa}$.

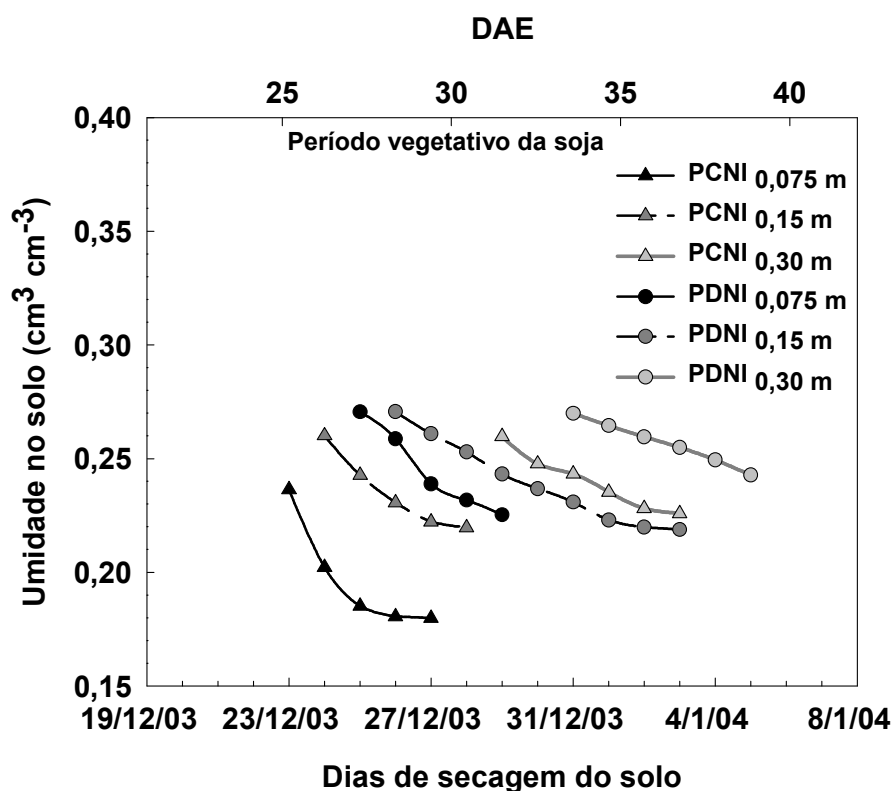


FIGURA 14 – Umidade volumétrica do solo durante o primeiro ciclo de secagem do solo cultivado com soja (cv. Fepagro RS-10) sob plantio direto não irrigado (PDNI) e preparo convencional não irrigado (PCNI), nas profundidades de 0,075 m a 0,30 m em Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

A 29 DAE (26/12/03), houve o rompimento da coluna de mercúrio dos tensiômetros em PCNI na profundidade de 0,075m, fato só observado em PDNI a 32 DAE (29/12/03), sendo a umidade volumétrica de $0,225 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Na Figura 14, identifica-se que houve defasagem em torno de 4 dias quanto à secagem do solo, apontando para maiores estoques hídricos em plantio direto, nesse intervalo de tempo. Na mesma área experimental, em experimento com a cultura de milho, Dalmago *et al.* (2004) também detectaram essa mesma tendência quanto ao tempo de secagem do solo, evidenciando que em preparo convencional não irrigado a secagem se dá mais rapidamente, quando comparada ao plantio direto.

Continuando-se o processo de secagem ao longo do perfil do solo, verificou-se que, na profundidade de 0,15m, os tensiômetros atingiram seu limite de funcionamento em PCNI no dia 28/12/2003 (31 DAE), fato só observado em PDNI no dia 03/01/2004 (37 DAE), confirmando o avanço mais rápido em preparo convencional em relação ao plantio direto. Observando as isolinhas correspondentes aos teores de umidade na profundidade de 0,30 m, percebe-se que o solo apresentava valores superiores em PDNI.

A oferta hídrica proveniente das precipitações pluviais, os dados evidenciaram que as plantas passaram 14 dias sob limitação hídrica em PCNI, enquanto que em PDNI esse período correspondeu a 8 dias.

No subperíodo vegetativo, o potencial da água do solo era de -27kPa em PCNI no primeiro dia de secagem e de -8kPa em PDNI, na profundidade de 0,075m. Esse potencial mais negativo, na camada mais superficial em PCNI, no início da secagem do solo, pode ser explicado pela exposição do solo aos efeitos da radiação solar, vento (advecção e convecção) e térmicos, enquanto

em plantio direto os restos culturais (palha) atenuam esses efeitos. Já na profundidade de 0,15m os potenciais foram de -8kPa nos dois sistemas de manejo do solo. Assim, verificou-se que nos dois sistemas de manejo o potencial da água no solo correspondente à capacidade (CC) esteve em torno de -8kPa.

Conforme Reichardt (1988), em solos típicos de regiões tropicais úmidas o potencial da água no solo na capacidade de campo apresenta valores entre -10 e -6kPa, sendo que em regiões de clima temperado ele fica em torno de -33kPa. Em solo, com textura franco-arenosa, Carlesso (1995) encontrou -10 kPa, entre a superfície e a profundidade de 0,025m, com umidade variando de 0,25 a 0,31 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, influenciada pela estrutura e composição dos materiais, tanto em termos de matéria orgânica quanto de argila.

Sob o ponto de vista prático (REICHARDT, 1988), a água disponível no perfil do solo é obtida pela diferença entre a capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP). Na área experimental, Dalmago (2004) constatou no campo, que a umidade volumétrica em sistema plantio direto na capacidade de campo a 0,075m foi de 0,273 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e em preparo convencional de 0,284 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Na profundidade de 0,15m os valores foram de 0,234 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (PD) e 0,287 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (PC) e a 0,30m foi de 0,272 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e de 0,288 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente.

A porosidade total do solo da área experimental, observada por Dalmago (2004) apresentou valores superiores em sistema plantio direto ao comparar com o preparo convencional, na camada mais superficial do solo. O preparo convencional apresentou aumentos na porosidade nas camadas mais internas do perfil, reduzindo-se no plantio direto, nas mesmas profundidades. A

umidade na profundidade de 0,30m foi de $0,43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em PC e $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em PD, apontando para maior drenagem hídrica em preparo convencional, nessa profundidade. Dalmago (2004), observou, ainda, que houve diferença significativa a 5% nos valores de mesoporosidade nas camadas de 0,225m a 0,375m com menores valores em plantio direto em relação ao preparo convencional.

O segundo período de secagem do solo, iniciado a 73 DAE, com medidas de potencial matricial (Ψ_m) até 77 DAE, indicou valores mais negativos em preparo convencional não irrigado (Figura 15) em relação ao sistema plantio direto não irrigado (Figura 16).

Ao observar as linhas de potencial matricial, ao longo do perfil, percebe-se que, entre 0,45 e 0,9m PDNI, o solo se apresentava mais úmido, naquele período. Já, em PCNI verificou-se que entre 0,3 e 1,05m havia menores teores de umidade, do que no restante do perfil. A 73 DAE, na profundidade de 0,30m no solo em PDNI apresentava Ψ_m de $-0,03\text{MPa}$, enquanto em PCNI de $-0,05\text{MPa}$, indicando que a água em sistema plantio direto estava com menores tensões na matriz do solo, mais facilmente disponível às raízes da soja.

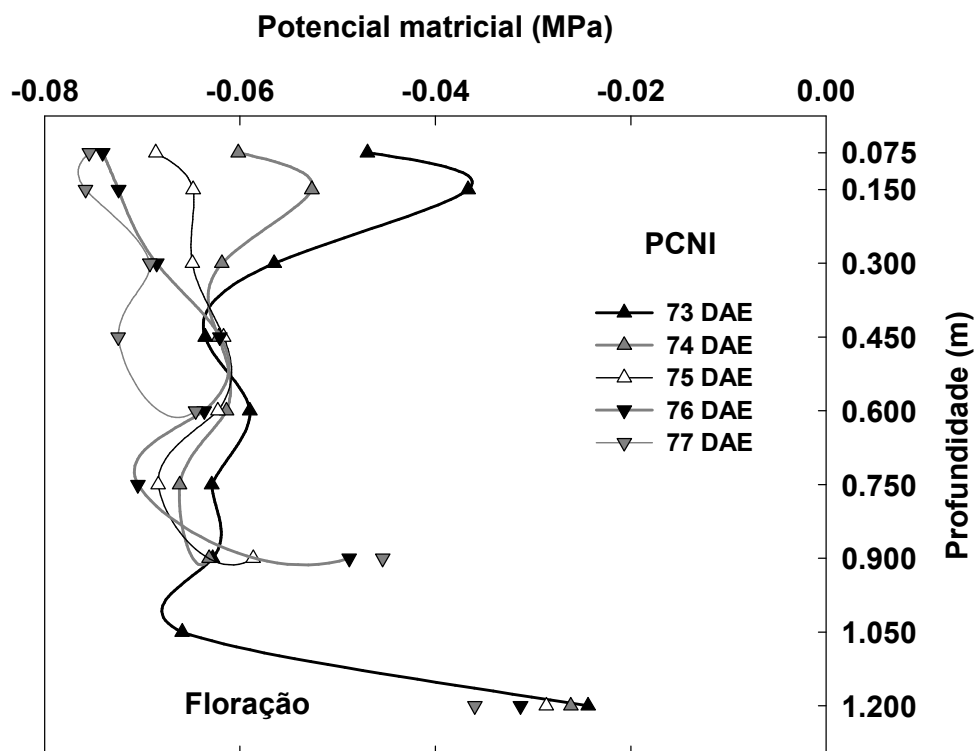


FIGURA 15 – Potencial matricial da água no solo cultivado com soja em preparo convencional não irrigado (PCNI), nas profundidades de 0,075 a 1,20 m, no período de floração da soja (cv. Fepagro RS-10) entre os 73 e 77 dias após a emergência (DAE), em Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

A maior armazenagem de água no plantio direto foi atribuída por Dalmago (2004), principalmente, à maior mesoporosidade e à maior condutividade hidráulica não saturada do solo. Evidências observadas por Assis & Lanças (2005) apontaram que houve aumento na macroporosidade do solo, após 12 anos de sistema plantio direto e, redução na microporosidade, na camada entre a superfície e a profundidade de 0,05m. Observaram, ainda, maior velocidade de infiltração tridimensional de água e condutividade hidráulica do solo saturado em 12 anos sob sistema plantio direto, semelhante à condição do solo com mata nativa (com mais de 40 anos sem cultivo ou outra atividade).

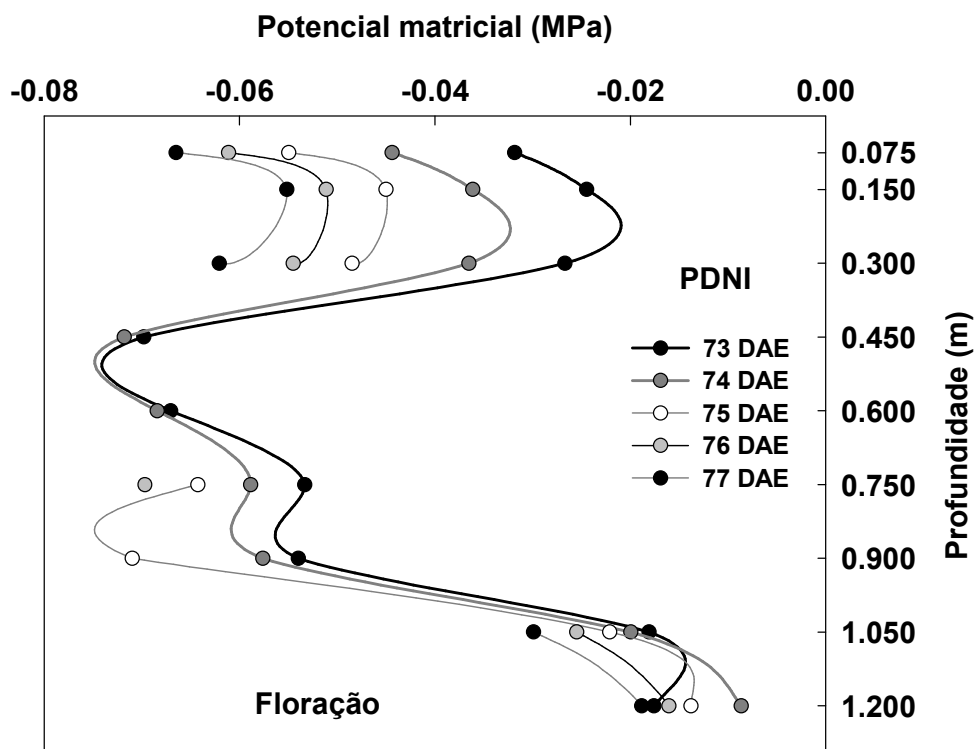


FIGURA 16 – Potencial matricial da água no solo cultivado plantio direto não irrigado (PDNI), nas profundidades de 0,075 a 1,20 m, no período de floração da soja (cv. Fepagro RS-10), entre os 73 e 77 dias após a emergência (DAE), em Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

Também, Tormena *et al.* (2002) num Latossolo Vermelho distrófico e, Klein & Libardi (2002) num Latossolo Roxo ácrico, identificaram propriedades favoráveis ao aumento na armazenagem de água em plantio direto, quando comparadas com o preparo convencional.

A umidade volumétrica média no solo, durante o ciclo da soja (Figura 17) apontou diferença estatística na profundidade de 0,075m, sendo o sistema plantio direto não irrigado mais úmido ($0,247 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) do que o preparo convencional não irrigado ($0,193 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). A umidade a 0,45m de profundidade também foi superior em PDNI ($0,322 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) em relação ao PCNI ($0,212 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Entre 0,15 e 0,30 m a umidade foi estatisticamente

semelhante, nos dois sistemas de manejo do solo (em torno de 0,23 e 0,24 cm³ cm⁻³, respectivamente). Os fatores que podem ter contribuído para maior umidade na camada superficial do solo (até 0,075m), são, segundo Bragagnolo & Mielniczuck (1990), a maior infiltração e menor evaporação em plantio direto.

De Maria *et al.* (1999) observaram diferenças significativas para umidade do solo em base volumétrica, com valores mais elevados no sistema plantio direto, em Latossolo Roxo cultivado com soja.

Umidade volumétrica superior na camada superficial (0 a 0,10m de profundidade) em sistema plantio direto em relação ao preparo convencional foi observada por Costa *et al.* (2003), em Latossolo Bruno, no Paraná e, que nas camadas de 0,10 a 0,20 a umidade não foram detectadas diferenças estatísticas entre os dois sistemas de manejo do solo. Os autores constataram que o sistema plantio direto promoveu redução da densidade e aumento da estabilidade de agregados na camada superficial, melhorando suas condições estruturais. No Argissolo Vermelho da área experimental, em Eldorado do Sul, Dalmago (2004) verificou que no sistema plantio direto a densidade foi diretamente relacionada a mesoporosidade (diâmetro entre 50µm e 0,2µm), indicadora do efeito do sistema de manejo, na camada superficial.

Com base nos dados da tensiometria obtidos durante o experimento com a cultura da soja, o resultado da análise de variância detectando maior teor de umidade em sistema plantio direto, na camada mais superficial do solo (Figura 17) reforçam as evidências de outros autores quanto aos maiores estoques de água no solo. Como a área experimental estava no 9º ano, em sistema plantio direto, esses indicadores apontam para os efeitos da palha na

superfície e do processo evolutivo do solo, devido aos aportes de matéria orgânica no solo.

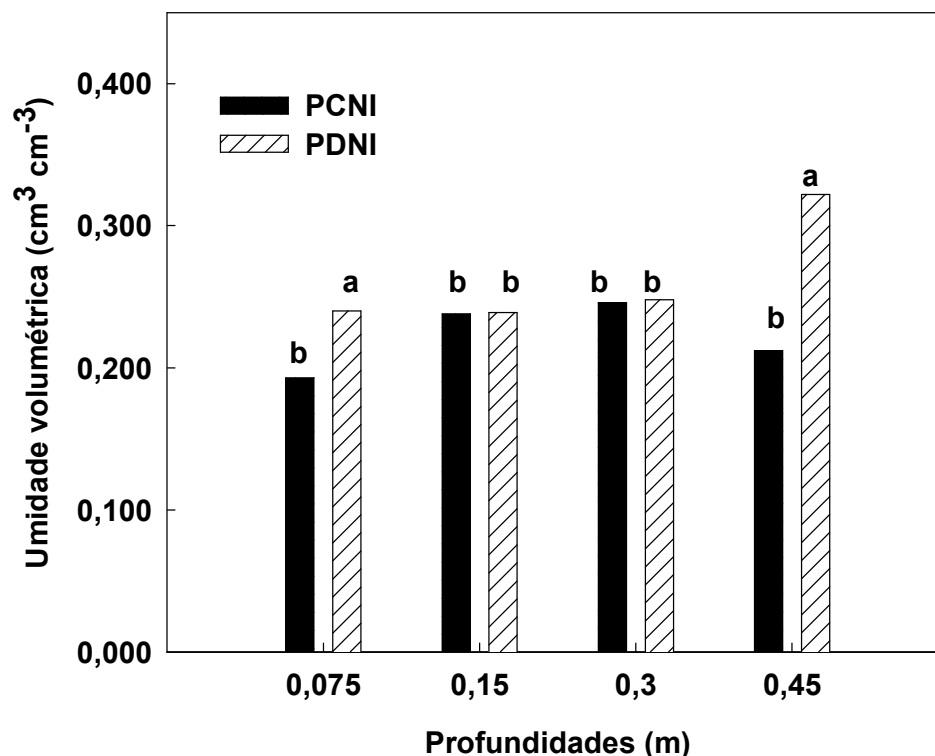


FIGURA 17 – Umidade volumétrica média no solo durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10), sob preparo convencional não irrigado (PCNI) e plantio direto não irrigado (PDNI), nas profundidades de 0,075 m a 0,45 m em Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

4.6. Indicadores de crescimento e desenvolvimento da soja

Com base na morfologia da planta, o ciclo da soja inicia com a emergência dos cotilédones acima da superfície do solo, seguida do crescimento e desenvolvimento do caule, folhas, flores, formação legumes, enchimento e maturação dos grãos até a plena senescência das folhas,

quando a cultura completa seu ciclo de vida. Nesse sentido, a cultura iniciou seu ciclo com a emergência, em 27 de novembro de 2003, correspondendo ao sétimo dia após a sementeira (VE). Lamego *et al.* (2005) também verificaram que a cultivar Fepagro RS-10 teve um tempo de emergência em torno de sete dias após a sementeira. Em experimento na Argentina, Confalone & Navarro Dujmovich (1999a) constataram que a soja (cv. Asgrow 4656) emergiu no sétimo dia após a sementeira.

Considerando-se que o acúmulo de fitomassa seca apresenta relação linear com a temperatura média diária, entre a temperatura base e a temperatura ótima de uma cultura, observou-se que a soja acumulou 1.945 graus-dia até 146 DAE. A duração de estádios fenológicos, em dias após a emergência (DAE), encontra-se indicada na Tabela 6. Na Figura 18 ilustrou quatro subperíodos da soja, durante o experimento a campo.

TABELA 6 – Estádios fenológicos da soja, cultivar Fepagro RS-10 (FEHR; CAVINESS, 1977), em Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

Datas	Caracterização	Estádios	DAE
20/11/03	Sementeira	S	
27/11/03	Emergência	V _E	
29/01/04	Início da floração	V _E - R ₁	63
06/02/04	Floração plena	R ₂	70
13/02/04	Início da formação de legumes	R ₃	77
04/03/04	Início do enchimento de grãos	R ₅	98
20/04/04	Início da maturação fisiológica	R ₇	146
30/04/04	Maturação plena	R ₈	155

S – Sementeira da soja

V_E - Emergência (cotilédones acima da superfície do solo)

V₁₁ - Décimo primeiro nó desenvolvido (final do período vegetativo)

R₁ - Início do florescimento (uma flor aberta em qualquer nó da haste principal, indicando o início do período reprodutivo da soja)

R₇ - Início da maturação fisiológica

R₈ - Maturação Plena (95% dos legumes com coloração madura)



FIGURA 18 – Subperíodo da soja (cv. Fepagro RS-10), em sistemas de plantio direto e preparo convencional, irrigados e não irrigados. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04.

4.6.1 Índice de Área Foliar

A evolução temporal do índice de área foliar (IAF) durante o ciclo da soja indica que primeiros 30 dias após a emergência, as plantas em preparo convencional apresentaram IAF mais elevado que em plantio direto (Figura 19). O maior IAF em preparo convencional no início do ciclo da soja pode estar associado ao nitrogênio, pela incorporação dos resíduos culturais no solo que pode ter sido disponibilizado mais rapidamente às plantas em preparo convencional. Em sistema plantio direto, os resíduos da cobertura de inverno

permanecem na superfície do solo onde, por conseguinte, a mineralização da matéria orgânica ocorre mais lentamente. O aumento em IAF no sistema plantio direto próximo ao período de floração, pode estar associado aos efeitos na fixação biológica do nitrogênio.

Avaliando a evolução do IAF em soja (cv. Williams-82) Yusuf *et al.* (1999) também verificaram que a cultura apresentou menor IAF em plantio direto em relação ao preparo convencional, nos estádios iniciais de desenvolvimento.

A cultivar Fepagro RS-10 antecipou, em uma semana, o IAF máximo em plantio direto irrigado (PDI) e nos dois tratamentos não irrigados (PDNI e PCNI) em relação ao preparo convencional irrigado (PCI). Os valores de IAF máximo nos tratamentos irrigados foram de 6,3, em PCI e de 6,1, em PDI. Nos não irrigados foram de 5,7, em PCNI e de 5,6, em PDNI, o que demonstra proximidade em termos de IAF máximo nos dois sistemas de manejo do solo, com menores valores nos tratamentos não irrigados. Em todos os tratamentos o IAF máximo ocorreu no estágio R₂, correspondendo à plena floração da cultura. Essa mesma resposta, em termos de menores valores de IAF, foi apontada por Confalone *et al.* (2002). Na floração deu-se o máximo IAF e os valores foram de 7,2 em tratamentos irrigados e de 4,9, sob condição não irrigada.

Em períodos de alta demanda evaporativa atmosférica e escassez de água no solo, ocorre aumento da resistência à difusão gasosa, baixando a taxa de assimilação do dióxido de carbono, bem como diminuição do fluxo transpiratório. Esse efeito desencadeia o processo de aumento da resistência ao fluxo de água na interface solo-raiz (LARCHER, 2000).

Até 40 DAE, observou-se que a cultura manteve evolução normal de IAF em todos os tratamentos. Reduções na oferta hídrica refletiram nos valores de IAF (Figura 19), indicando abscisão de folhas nas plantas em PCNI e PDNI, enquanto nos tratamentos irrigados a cultura manteve a expansão do IAF até atingir seu valor máximo. Em soja sob condições de sequeiro, Cox & Joliff (1986) também verificaram reduções no IAF da cultura devido aos efeitos dos períodos de déficits hídricos.

A partir de 78 DAE, quando as plantas se encontravam no início de formação de legumes (R_3), o IAF entrou em declínio. Em R_5 (105 DAE) os valores de IAF em PDI, PDNI e PCNI estavam próximos a $2,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, porém em PCI era de $2,8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, indicando que houve maior manutenção de folhas em PCI, enquanto nos demais tratamentos a cultura se encontrava drenando suas reservas ao enchimento de grãos. Reduções a partir do IAF máximo, entre R_1 e R_5 , foram da ordem de 29,4% em plantio direto não irrigado (PDNI), 28,5% em plantio direto irrigado (PDI), 44,5% em preparo convencional irrigado (PCI) e 31,5% em preparo convencional não irrigado (PCNI).

A evolução do IAF da emergência até máximo IAF, em função de graus-dia acumulados se ajustou a um modelo sigmóide (Tabela 7), conforme a equação 28.

$$IAF_{m\acute{a}x} = \frac{a}{\left(1 + \frac{\exp(-(x - x_0))}{b}\right)} \quad (28)$$

Observando os coeficientes do modelo, identifica-se que os valores de IAF máximo ficaram próximos aos observados no campo. Os coeficientes de

determinação ajustados (R^2_{ajs}) indicam que o modelo é adequado para descrever a evolução do IAF até seu valor máximo.

O grau de dispersão dos valores em torno da média varia entre 2 a 6%, indicando cerca de 94 a 98% das estimativas do índice de área foliar até o IAF máximo ocorrem próximos aos valores observados no campo. Os menores coeficientes de determinação (94 e 97%) foram obtidos nos tratamentos não irrigados, PDNI e PCNI, respectivamente (Tabela 7).

Esses valores podem ser atribuídos à maior dispersão em IAF devido aos efeitos dos períodos de déficits hídricos, promovendo quedas de folhas, alterando a área foliar nesses tratamentos.

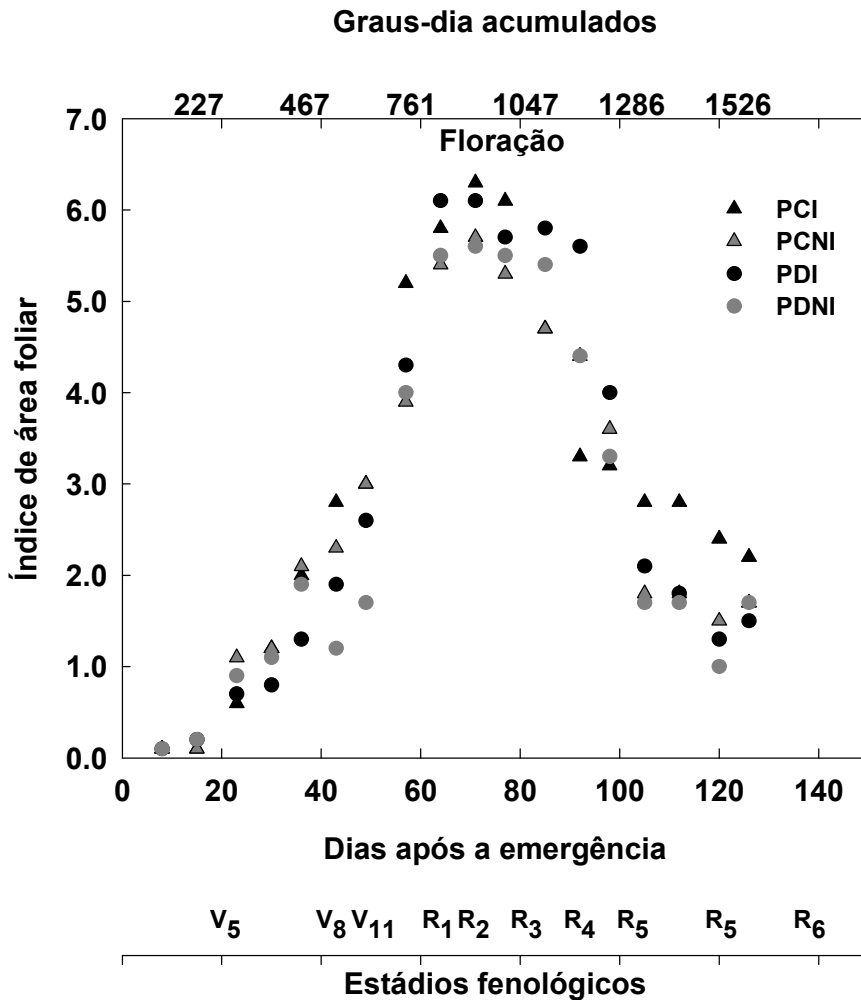


FIGURA 19 – Evolução do índice de área foliar da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional irrigado e não irrigado (PCI e PCNI) e plantio direto irrigado e não irrigado (PDI e PDNI), EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04.

Os valores de IAF durante o ciclo da cultura em função de graus-dia acumulados se ajustaram a um modelo log-normal (Tabela 8), descrevendo o processo evolutivo e o declínio de IAF, ao final do ciclo, descrito pela equação 29.

$$IAF = ax \exp\left(-0,5x\left(\frac{x}{x_0}\right)^2\right) \quad (29)$$

O modelo apresentou limitações nas estimativas de IAF no início do ciclo da cultura (nos primeiros 20 DAE), mas tornou-se eficiente, inclusive quanto às estimativas de IAF máximo, bem como no período de rápida senescência foliar.

TABELA 7 – Modelo sigmoidal ajustado (equação 28) para estimar IAF até IAFmáximo (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional irrigado e não irrigado (PCI e PCNI) e plantio direto irrigado e não irrigado (PDI e PDNI), em função de graus-dia acumulados e respectivos parâmetros ajustados e coeficientes de determinação (R^2). Eldorado do Sul, 2003/04.

Tratamentos	Coeficiente (a)	Coeficiente (b)	Coeficiente (x_0)	R^2
PCI	6,65	136,4	557,2	0,98
PCNI	6,15	164,0	587,7	0,97
PDI	6,41	122,5	618,1	0,98
PDNI	6,71	156,7	675,3	0,94

TABELA 8 – Modelo log-normal ajustado (equação 29) para estimar IAF durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional irrigado e não irrigado (PCI e PCNI) e plantio direto irrigado e não irrigado (PDI e PDNI), em função de graus-dia acumulados e respectivos parâmetros ajustados e coeficientes de determinação (R^2). Eldorado do Sul, 2003/04.

Tratamentos	Coeficiente (a)	Coeficiente (b)	Coeficiente (x_0)	R^2
PCI	5,7	0,42	852,9	0,93
PCNI	5,3	0,40	862,6	0,88
PDI	6,3	0,32	912,0	0,93
PDNI	5,8	0,30	921,0	0,88

4.6.2 Estatura da Planta

Em termos de estatura média, observou-se que, nos primeiros 30 DAE, as plantas apresentavam maior estatura em preparo convencional que

em plantio direto, com aproximadamente 0,3m (PCI e PCNI) e 0,2m (PDI e PDNI). Esses resultados corroboram com os apresentados por Fleck *et al.* (2006) para a cultivar Fepagro RS-10 que, aos 30 DAE, estava com estatura em torno de 0,2m, demonstrando competitividade dessa cultivar com espécies daninhas. Alta competitividade da cultivar Fepagro RS-10 foi observada também por Lamego *et al.* (2005), observando estatura média de 0,134m aos 28 DAE.

No início do estabelecimento da cultura, com adequada oferta hídrica, a cultura apresentou estatura mais elevada em preparo convencional, devido ao seu crescimento ser dependente apenas dos nutrientes no solo. A maior estatura pode ser explicada pela disponibilidade de nitrogênio no solo, decorrente da incorporação dos restos culturais. Focando as atenções nos tratamentos irrigados, identifica-se a evolução das plantas em estatura, atingindo a 500 graus-dia acumulados semelhantes valores em PCI e PDI. Essa estatura pode ser explicada pelos efeitos do nitrogênio, decorrentes da simbiose às plantas em plantio direto irrigado.

Nos tratamentos não irrigados, tornam-se perceptíveis os efeitos da escassez hídrica no solo. As plantas, em PCNI, que apresentavam estatura semelhante àquelas em PCI, reduziram seu desenvolvimento em torno de 500 graus-dia acumulados (Figura 19). De um modo geral as plantas nos tratamentos irrigados atingiram valores de 1,20m, em PDI, e 1,12m em PCI e nas parcelas não irrigadas, em torno de 0,95m. Os valores indicam que, sob adequada oferta hídrica, a estatura foi superior à média da cultivar, que fica em torno de 0,95m. Lamego *et al.* (2004) encontrou valor médio de 0,96m para essa mesma cultivar, em experimento realizado em 2002, em Eldorado do Sul,

atribuído aos efeitos competitivos da soja (cv. Fepagro RS-10) com plantas daninhas.

Na Tabela 9, estão indicados os coeficientes de ajuste do modelo sigmoidal (equação 29, substituindo a sigla IAF_{máx} por Estatura de plantas), para estimar estatura em função de graus-dia acumulados. Os valores do coeficiente *a* indicam a estatura máxima da cultura para cada sistema de manejo e tratamento. A estatura máxima estimada pelo modelo foi em PCI de 1,09m e em PCNI de 0,93m. Já em PDI foi de 1,17m e, em PDNI de 0,97m. Esses valores ficaram muito próximos aos obtidos no campo.

Pelos valores do coeficiente *x₀* na Tabela 9, identifica-se que a estatura máxima estimada dá-se por volta do início da floração, que corresponde a valores em graus-dia acumulados entre 571 a 691. A ocorrência da estatura máxima na floração também foi verificada por Egli & Leggett (1973). Constataram que a cultivar de hábito determinado atingiu máxima estatura no início da floração, em praticamente 87% das plantas.

O padrão em estatura de plantas (Figura 20) aponta para indicadores como o primeiro período de crescimento mais lento, o segundo de máxima expressão em estatura e por fim, a curva vai sendo estabilizada em um determinado total de graus-dia acumulados. Verifica-se que a partir de 800 graus-dia acumulados, as plantas estavam com maior estatura em sistema plantio direto, em relação àquelas em preparo convencional.

TABELA 9 – Modelo sigmoidal ajustado (equação 28) para estimar a estatura de plantas de soja (cv.Fepagro RS-10) em função de graus-dia acumulados, respectivos parâmetros ajustados e coeficientes de determinação (R^2). Eldorado do Sul, 2003/04.

Tratamentos	Coefficiente (a)	Coefficiente (b)	Coefficiente (x_0)	R^2
PCI	1,1	245,5	652,8	0,99
PCNI	0,9	236,1	571,3	0,99
PDI	1,2	221,4	669,3	0,99
PDNI	1,0	261,1	691,4	0,99

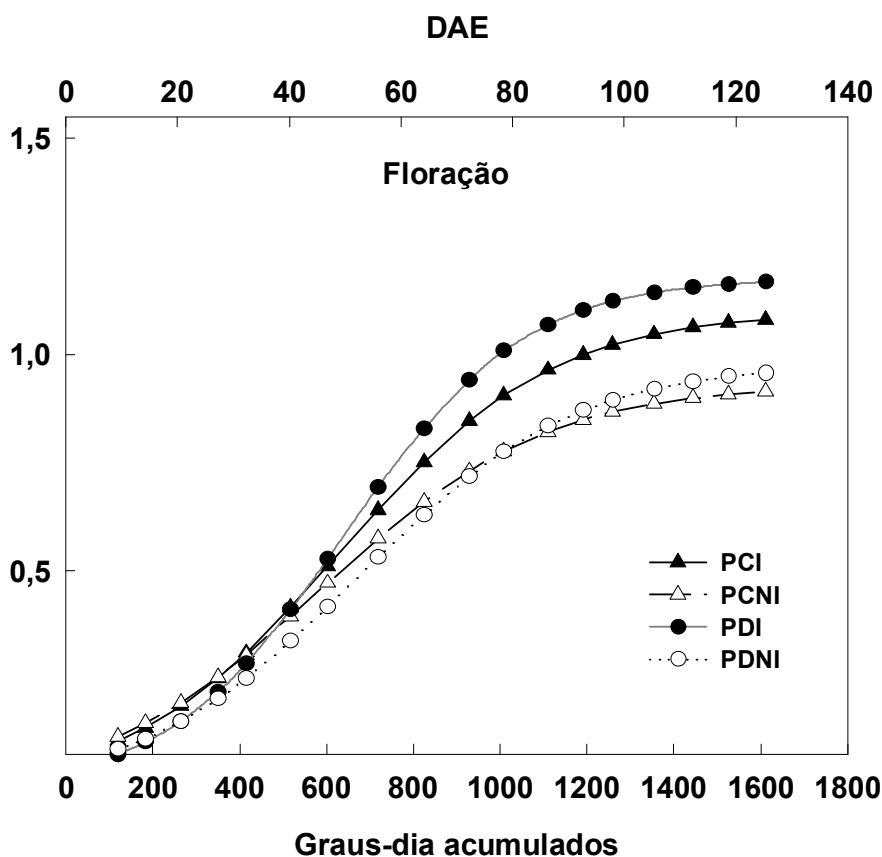


FIGURA 20 – Modelo sigmoidal para estatura da soja (cv. Fepagro RS-10) em função de graus-dia acumulados, em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), irrigado (I) e não irrigado (NI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

Plantas com elevada estatura garantem maior competitividade com plantas infestantes, pela vantagem na captação da energia solar em relação às espécies mais baixas, conforme observado por Lamego *et al.* (2005) e Fleck *et al.* (2006). Esses autores detectaram rápido crescimento e elevada estatura da cultivar Fepagro RS-10, quando comparada com outras cultivares e espécies daninhas. Avaliando o desempenho de 18 cultivares (ciclo precoce, médio, tardio e semitardio), Bonato *et al.* (2001) constataram que as cultivares de ciclo tardio e semitardio apresentaram maior porte médio, da ordem de 0,83m.

4.6.3 Matéria seca aérea

A matéria seca aérea produzida não teve diferença significativa entre sistemas de manejo do solo, mas sim quanto à oferta hídrica. Nos tratamentos irrigados, a matéria seca aérea atingiu o máximo em torno de 14.000 kg ha⁻¹ e nos não irrigados de 7.000 kg ha⁻¹. A produção de matéria seca de uma cultura é uma variável sensível em modelos de simulação de crescimento e desenvolvimento. Na evolução da fitomassa aérea da soja (Figura 21), tornam-se perceptíveis os efeitos das limitações hídricas no solo.

Analisando concomitantemente o potencial matricial da água no solo entre 73 e 77 DAE (Figuras 15 e 16) e as Figuras (12 e 13) que exprimem o balanço hídrico no período, explicam-se as reduções na matéria seca aérea exatamente a partir de 1.200 graus-dia acumulados. O padrão de extração de água pelas raízes indica que as plantas dos tratamentos não irrigados, dos dois sistemas de manejo do solo, estavam extraíndo água de forma diferenciada,

influenciando as respostas da cultura quanto à sua produção de biomassa aérea, refletindo em PDNI valores superiores ao PCNI.

Avaliando acúmulo de matéria seca em soja (cv. IAC-15) Lazarini *et al.* (2000) verificaram que as plantas acumularam matéria seca de forma crescente até o final de R₆, que ocorreu 49 dias após o início de R₂. Os resultados apresentados na Figura 21 demonstram que, a partir de R₂, ocorreu o acúmulo expressivo, principalmente entre R₃ e R₅. As reduções em matéria seca nos tratamentos não irrigados evidenciam os efeitos dos períodos de déficits hídricos em perdas na capacidade da relação fonte-dreno que expressam o rendimento final da cultura. Em R₆, as plantas reduziram suas taxas de acúmulo de biomassa aérea devido às modificações morfofisiológicas para suprir os órgãos demandantes em fotoassimilados (legumes e grãos).

Sem déficit hídrico a cultura apresentou um padrão de resposta que serve como referencial de comparação da cultivar Fepagro RS-10. Observa-se que a cultura manteve os mesmos padrões evidenciados, por exemplo, quanto à estatura, índice de área foliar, matéria seca aérea e área foliar específica (Figuras 21 e 22). Esses indicadores sustentam a hipótese de que os efeitos decorrentes de períodos de déficits hídricos no solo podem limitar o desempenho de modelos de simulação de crescimento e desenvolvimento da soja em sistema plantio direto, já que os estoques de água no solo, na camada mais superficial foram significativamente superiores, em relação ao preparo convencional (Figura 17). Na Figura 21 nota-se que o padrão de evolução da matéria seca aérea também pode ser descrito por um modelo sigmoidal, conforme o modelo conceitual, representado na equação 29.

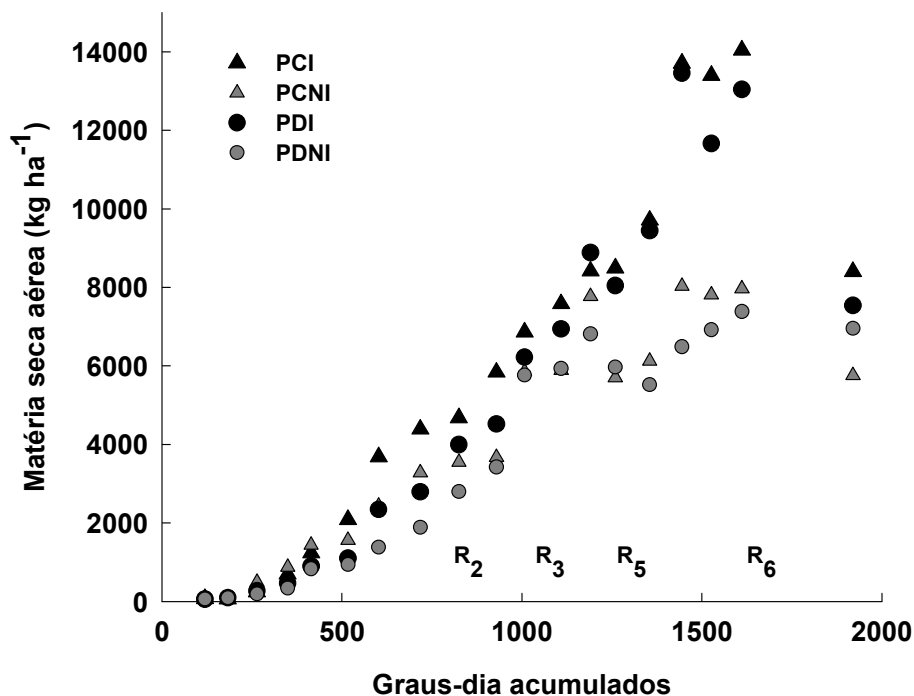


FIGURA 21 – Evolução da matéria seca (folhas, hastes e legumes), durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em função de graus-dia acumulados, em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), irrigado (I) e não irrigado (NI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

Ao avaliar a área foliar específica, que é a relação entre a área de folha (cm²) e sua biomassa seca (g⁻¹), observou-se que até 20 DAE o preparo convencional irrigado (PCI) apresentou menores valores, indicando maior biomassa seca em relação ao sistema plantio direto irrigado (PDI), confirmando evidências observadas em estatura da planta, IAF e matéria seca aérea (folhas e hastes). Quando as plantas encontravam-se em IAF máximo, na floração (63 DAE), a área específica foi de 246cm² g⁻¹ em PDI e de 286cm² g⁻¹ em PCI,

indicando que a biomassa seca em PDI era maior em relação ao PCI, pois o menor valor indica que a biomassa seca de folha (denominador) apresentava-se maior em relação ao PCI. Nesse subperíodo, adicionando as evidências quanto à área específica, observou-se também maior estatura, IAF e matéria seca em PDI. No início da maturação fisiológica (140 DAE) a área foliar específica foi de $28\text{cm}^2\text{ g}^{-1}$ em PDI e de $11\text{cm}^2\text{ g}^{-1}$ em PCI. O menor valor em PCI indica maior manutenção de folhas, confirmadas em IAF e matéria seca aérea. A maior área específica em PDI aponta menor manutenção de folhas, indicando maior translocação de fotoassimilados para o enchimento de grãos, os quais foram evidenciados em termos de rendimento de grãos.

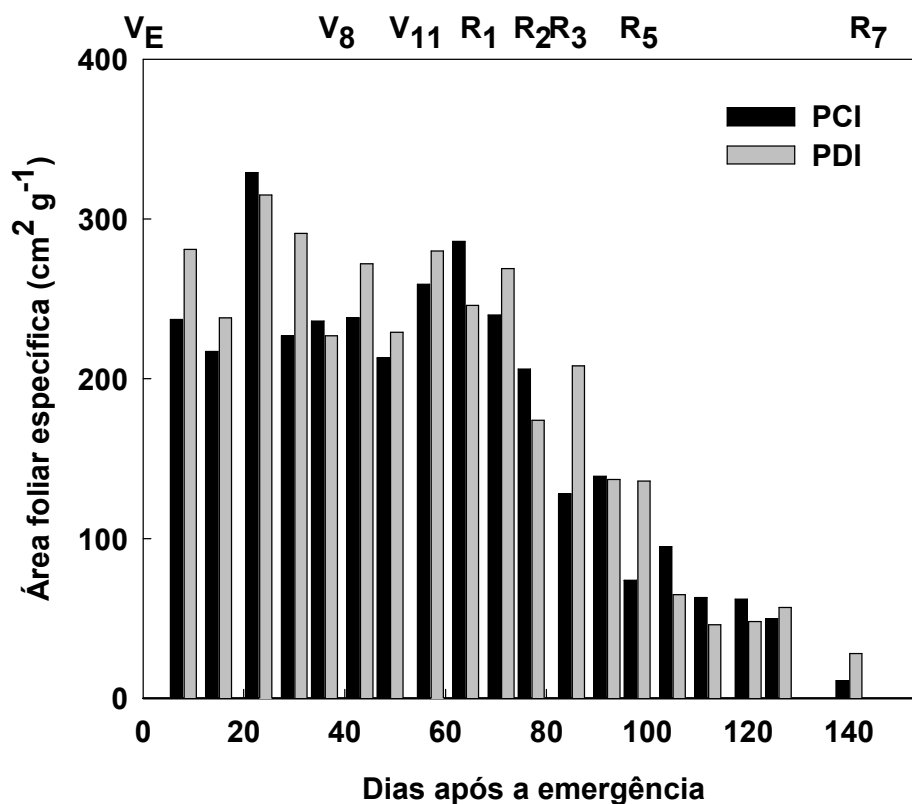


FIGURA 22 – Área foliar específica da soja (cv. Fepagro RS-10), em preparo convencional irrigado (PCI) e plantio direto irrigado (PDI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

Nos tratamentos não irrigados a área específica da emergência até 40 DAE foi inferior em PCNI, indicando maior biomassa de folha, confirmada pelos maiores valores de IAF, estatura e matéria seca aérea. Ao comparar os valores de área específica com os de excedentes hídricos até 20 DAE, observa-se que a área específica menor em PCNI indica que a biomassa de folhas era maior que em PDNI. A 49 DAE a área foliar específica em PCNI foi de $202\text{cm}^2\text{ g}^{-1}$ e em PDNI de $191\text{cm}^2\text{ g}^{-1}$, expressando os efeitos decorrentes dos períodos de déficits hídricos, que refletiram em maior manutenção de folhas em PDNI.

Quando a cultura encontrava-se em floração a área específica em PDNI foi de $334\text{cm}^2\text{ g}^{-1}$ e em PCNI de $306\text{cm}^2\text{ g}^{-1}$. Associando os valores de área específica aos de potencial matricial (73 a 77 DAE), confirmam-se as evidências quanto à manutenção da umidade no solo (Figura 13 e 14) em curtas estiagens, em PDNI, promovendo maior manutenção de folhas. A 77 DAE a área específica em PDNI era de $198\text{cm}^2\text{ g}^{-1}$ e em PCNI de $250\text{cm}^2\text{ g}^{-1}$.

No início da maturação fisiológica (140 DAE) as plantas em PCNI apresentaram maior manutenção de folhas à semelhança de PCI. Os menores valores de área específica a 140 DAE em preparo convencional não irrigado (PCNI), reforçam a premissa de que as plantas, nesse sistema de manejo do solo, mantiveram as folhas e em plantio direto elas perderam as folhas e drenaram suas reservas para a formação de grãos, sendo mais eficiente do que em preparo convencional, evidências também detectadas em IAF e matéria seca aérea.

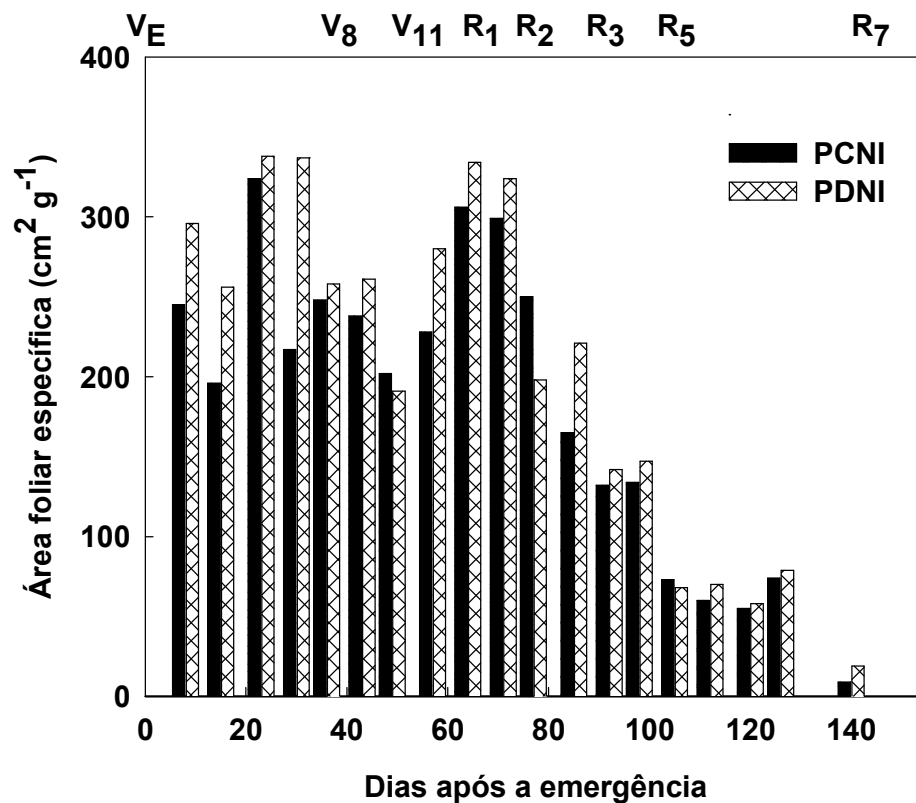


FIGURA 23 – Área foliar específica da soja (cv. Fepagro RS-10), em preparo convencional não irrigado (PCNI) e plantio direto não irrigado (PDNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

4.6.4 Taxa de Crescimento da Cultura (TCC)

Entre os tratamentos irrigados (Figura 24) durante o estágio vegetativo até 700 graus-dia acumulados, a taxa de crescimento da cultura (TCC) em PCI foi mais elevada do que em PDI, sendo a 717 GDacum de $1,9 \text{ g m}^{-2} \text{ GDacum}^{-1}$ em PCI e $1,5 \text{ em PDI g m}^{-2} \text{ GDacum}^{-1}$.

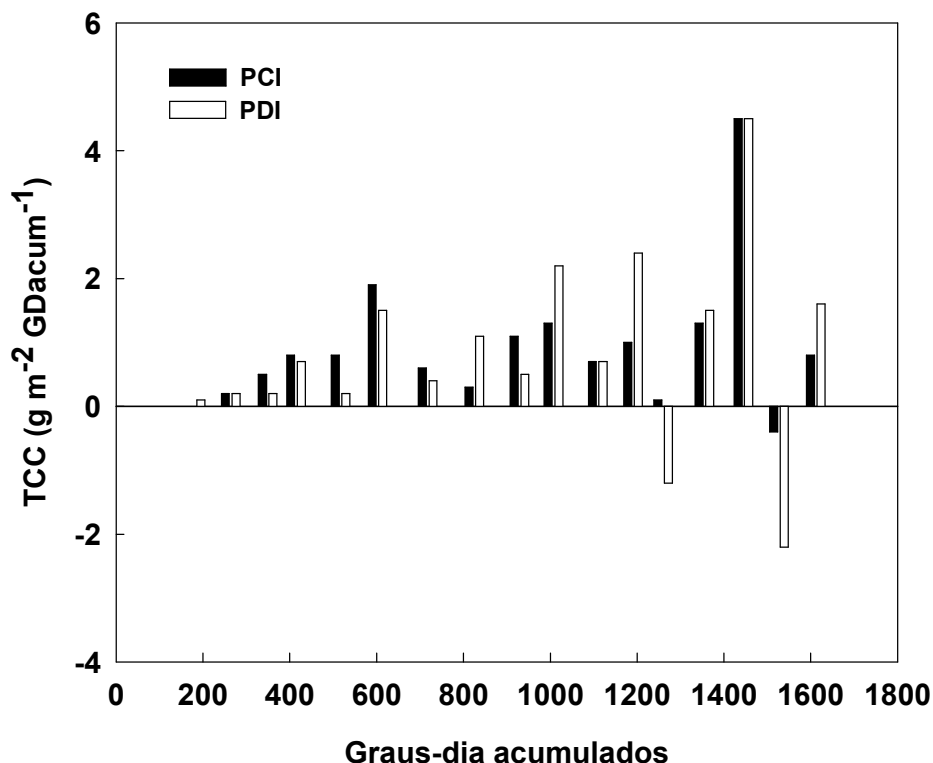


FIGURA 24 – Taxa de crescimento da cultura (TCC) da soja (cv. Fepagro RS-10) por graus-dia acumulados em preparo convencional irrigado (PCI) e plantio direto irrigado (PDI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04.

Por volta de 800 graus-dia acumulados às plantas em PDI apresentaram TCC de $1,1 \text{ g m}^{-2} \text{ GDacum}^{-1}$ e em PCI de $0,3 \text{ g m}^{-2} \text{ GDacum}^{-1}$, indicando maior crescimento em PDI. Esse fato foi confirmado em termos de estatura, índice de área foliar e área foliar específica, indicando que as plantas em plantio direto no estágio de floração atingiram sua mais elevada expressão em matéria seca. Com 1007 GDacum (77 DAE) as plantas em PDI crescem a uma taxa de $2,2 \text{ g m}^{-2} \text{ GDacum}^{-1}$, enquanto em PCI acumulavam $1,3 \text{ g m}^{-2} \text{ GDacum}^{-1}$. Expressando TCC em relação ao tempo decorrido em dias, informa-se que em PDI (77DAE) as plantas crescem a uma taxa de $28 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e em

PCI de $17 \text{ g m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. Durante o período de enchimento de grãos o crescimento em PDI foi de $6,4 \text{ g m}^{-2} \text{ GDacum}^{-1}$ e em PCI de $5,9 \text{ g m}^{-2} \text{ GDacum}^{-1}$, correspondendo a $88 \text{ g m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ e $81 \text{ g m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, respectivamente.

Os efeitos dos períodos de déficits hídricos foram evidenciados nas taxas de crescimento da cultura (TCC). Nos tratamentos não irrigados as taxas de crescimento até 400 graus-dia acumulados foram maiores em PCNI do que em PDNI, apresentando-se iguais ($1,0 \text{ g m}^{-2} \text{ GDacum}^{-1}$), em 516 GDacum (Figura 25). Todavia, percebem-se os efeitos dos maiores estoques hídricos no solo em PDNI, expressados em TCC.

Próximo a 800 graus-dia acumulados, em PDNI a TCC era de $0,8 \text{ g m}^{-2} \text{ GDacum}^{-1}$ e em PCNI de $0,3 \text{ g m}^{-2} \text{ GDacum}^{-1}$. A 77 DAE as plantas apresentavam TCC bem próxima, sendo em PDNI de $3,0 \text{ g m}^{-2} \text{ GDacum}^{-1}$ e em PCNI de $2,8 \text{ g m}^{-2} \text{ GDacum}^{-1}$. Esses valores corresponderam a $39 \text{ g m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ e $36 \text{ g m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, respectivamente. Comparando os valores de TCC aos períodos de déficits hídricos verifica-se que o fator escassez de água no solo constitui-se no principal responsável dos baixos valores de TCC, nos tratamentos não irrigados, reforçando a hipótese de que a soja pode elevar suas taxas de crescimento quando não houver limitação hídrica.

Vale destacar que a cultura expressou a evolução no seu padrão de crescimento em termos de matéria seca até o início de R_5 , tanto nos tratamentos irrigados (Figura 24) quanto nos não irrigados (Figura 25). Redução na matéria seca de caules e folhas indica que a planta está translocando suas reservas para o enchimento de grãos.

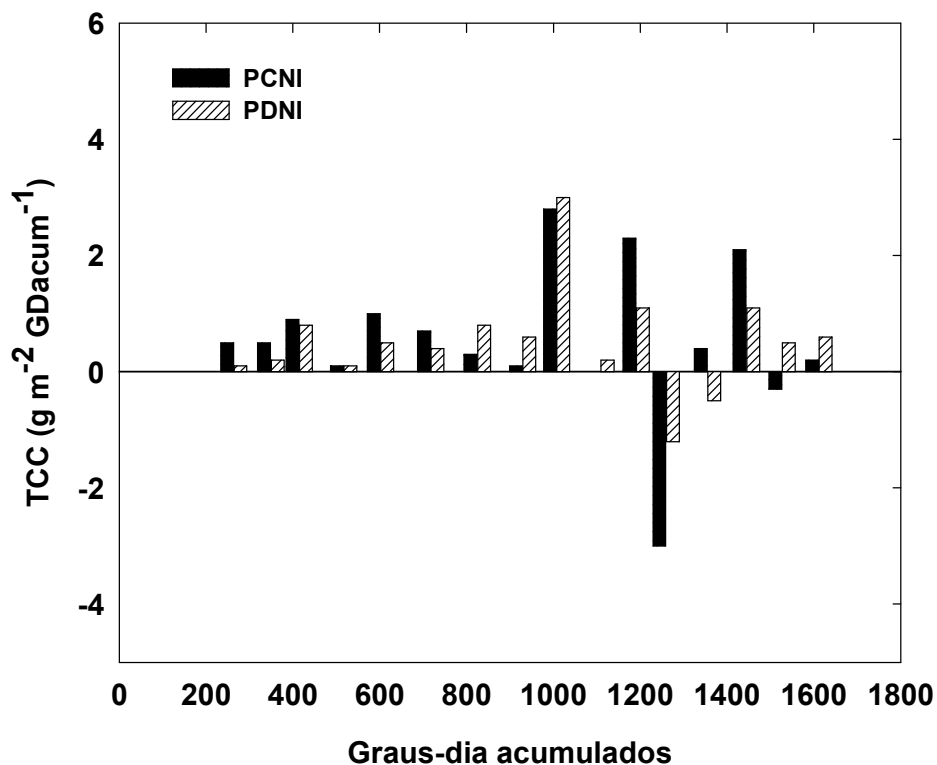


FIGURA 25 – Taxa de crescimento da cultura (TCC) da soja (cv. Fepagro RS-10) expressa em função de graus-dia acumulados em preparo convencional não irrigado (PCNI) e plantio direto não irrigado (PDNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04.

Durante o período reprodutivo o incremento rápido de matéria seca, entre 1.300 e 1.500 graus-dia acumulados, tanto nos tratamentos irrigados quanto nos não irrigados, deve-se à contribuição das estruturas reprodutivas. Voltando-se para as interações solo-planta-atmosfera, verificou-se que nesse período (correspondente a 100 e 120 DAE) a cultura em PDNI estava com 46 mm de deficiência hídrica e o consumo relativo de água ($\frac{ETr}{ETm}$) era de 0,51. Em PCNI esses indicadores eram de 47 mm e 0,54, respectivamente. Nesse período, as temperaturas do ar encontravam-se elevadas (Figura 6). O efeito de três eventos de chuva isolados, que totalizaram cerca de 70 mm, amenizaram as temperaturas do ar, identificado pela redução nas amplitudes

térmicas (Figura 7). Comparando os resultados de estatura da soja, percebe-se que foi nesse período as plantas já haviam estabilizado o crescimento e estavam drenando suas reservas para a formação de legumes e grãos.

4.7 Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa

O conjunto de pontos (Figura 26) de eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) permitiu ajustar um modelo único de ϵ_{int} em função de IAF. Os parâmetros da equação traduzem a capacidade da cultura em interceptar a RFA. Com o aumento de IAF observa-se que aumenta a eficiência de interceptação de RFA. No início do desenvolvimento da cultura, em IAF igual a 1 a ϵ_{int} foi de 54%, atingindo 80% em IAF igual a 2. A partir do IAF 3 percebe-se a aproximação entre os valores de ϵ_{int} . Naquela condição a cultura estava interceptando 89% de RFA. A máxima de eficiência pode ser considerada como uma constante ao redor de 95%, nas condições em que foi conduzido o experimento.

Como ϵ_{int} é função do IAF, períodos de estresses hídricos, que reduziram IAF nos tratamentos não irrigados (PCNI e PDNI) também causaram reduções na eficiência de interceptação da RFA, nesses tratamentos quando comparado aos irrigados (PCI e PDI). A cultura atingiu IAF máximo de 6,3 em PCI, quando ϵ_{int} foi de 95%, enquanto no tratamento não irrigado (PCNI) cujo IAF máximo foi de 5,7 a ϵ_{int} apresentou-se inferior, da ordem de 94%. Em PDI a cultura também apresentava a máxima eficiência (95%) em IAF máximo (6,1) e em PDNI ϵ_{int} foi de 94% em IAFmáximo (5,6). Confalone *et al.* (1999)

observaram que o déficit hídrico reduziu a eficiência de uso da radiação em soja, com quedas de até 25% no florescimento. Essas reduções são explicadas pela influência de períodos de déficits hídricos no crescimento da cultura, reduzindo a estatura da planta, a taxa de crescimento, aceleração da senescência foliar e abortamento de flores, os quais refletem no rendimento de grãos e seus componentes.

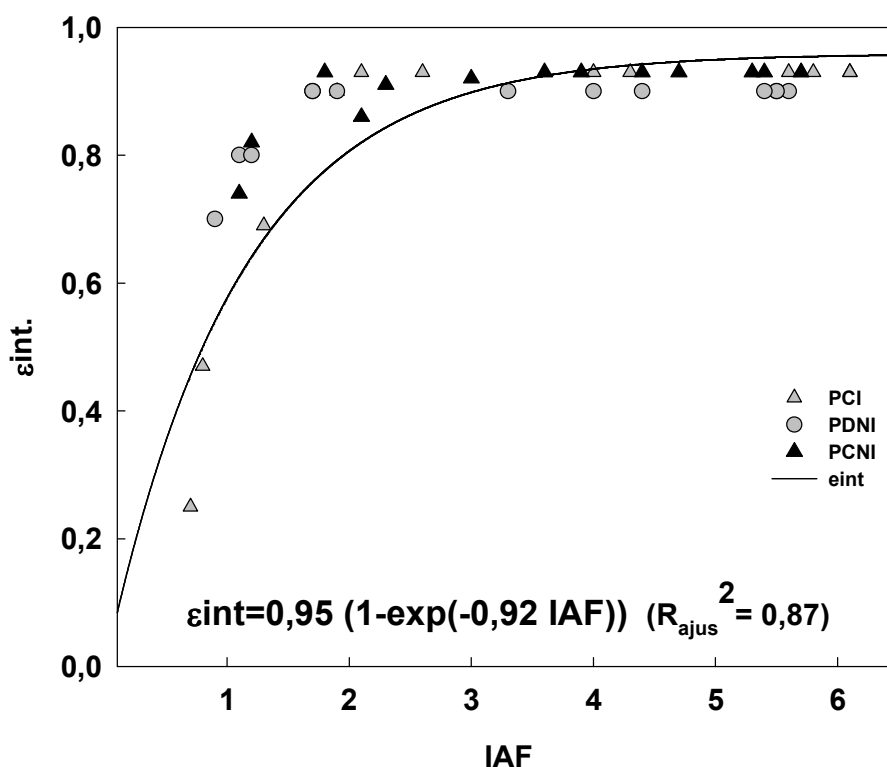


FIGURA 26 – Eficiência de interceptação (ϵ_{int}) de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) em função do índice de área foliar (IAF) em soja em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), irrigado (I) e não irrigado (NI). Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

Ao avaliar a conversão da energia solar em matéria seca é possível associar efeitos do índice de área foliar, ângulo de inclinação de folhas, disposição das folhas no caule e arranjos de folhas no dossel. A eficiência de

intercepção da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada (ϵ_{int}) exprime a porção de radiação incidente que foi interceptada pela cultura. Com a relação entre a produção de biomassa e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada tem-se uma idéia da eficiência com que a cultura utilizou a radiação solar (MONTEITH, 1977). Assim, o estabelecimento de indicadores de conversão da energia fotossinteticamente ativa em biomassa aérea pode auxiliar as avaliações dos efeitos do fator hídrico na expressão do rendimento da cultura. A Figura 27 representa o acúmulo de matéria seca aérea ($g\ m^{-2}$) em função da RFA_{int}. Os dados experimentais se ajustaram estatisticamente a uma relação linear, passando pela origem, pelas seguintes equações:

$$MS_{PCI} = 1,57 \times RFA_{int}. \quad (R^2=0,95) \quad (30)$$

$$MS_{PCNI} = 1,03RF \times A_{int}. \quad (R^2=0,93) \quad (31)$$

$$MS_{PNDI} = 0,90 \times RFA_{int}. \quad (R^2=0,93) \quad (32)$$

Os coeficientes angulares das retas (equações 30 a 32) indicam a eficiência de uso da radiação (EUR). Assim sendo, a cultura sem limitação hídrica, decorrente das adições de água por irrigação, apresentou uma eficiência de uso da radiação de 1,57 g de MS para cada megajoule de radiação fotossinteticamente interceptada (RFA_{int}). Essa eficiência de uso da radiação foi considerada para os dois sistemas de manejo do solo (PCI e PDI). Nos tratamentos com limitação hídrica a eficiência de uso da radiação (EUR) foi de 1,03 g de MS por MJ de RFA_{int} em PCNI e de 0,90 g de MS por MJ de RFA_{int} em PDNI. A redução na eficiência de uso da radiação indica o comprometimento do aparato fotossintético da cultura, devido à escassez de

água no solo. Os reflexos da menor eficiência de uso de RFAint nos tratamentos não irrigados confirma evidências nas reduções do índice de área foliar e conseqüentemente na matéria seca área.

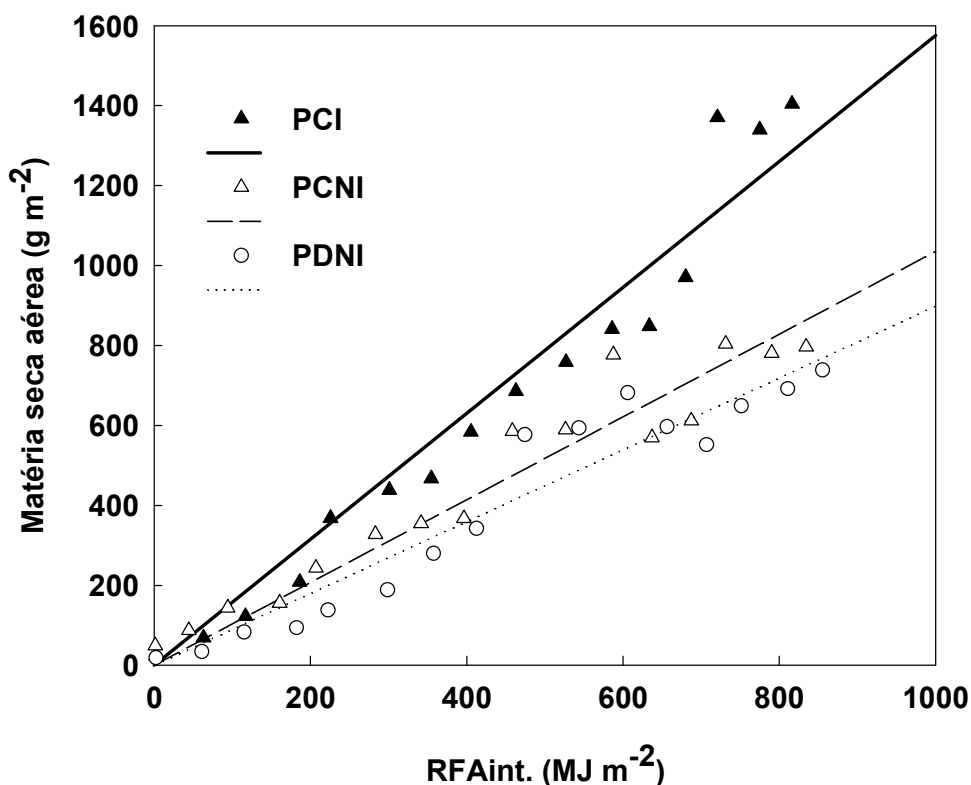


FIGURA 27 – Evolução da matéria seca aérea da soja (cv. Fepagro RS-10) em função da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada sob condição irrigada e não irrigada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

Tomando como valor comparativo o total de 800 MJ m⁻² de RFAint. constata-se que a cultura sem limitação hídrica produz em torno de 12.560 kg ha⁻¹. Sob limitação hídrica em preparo convencional (PCNI) a produção de matéria seca é de 8.240 kg ha⁻¹ e em sistema plantio direto (PDNI) de 7.200 kg ha⁻¹. Os valores simulados pelos modelos (equações 30 a 32) foram menores

que os obtidos no campo, conforme ilustra a Figura 27. Apesar disso, sua utilização é indicada para inferir a produção média de matéria seca pela cultura sob condição irrigada e não irrigada.

4.8 Indicadores da condição hídrica na planta

4.8.1 Potencial mínimo da água na folha

Observando os valores de potencial mínimo da água na folha de soja ($\Psi_{\text{mín}}$), verifica-se que a 77 DAE (12/02/04), quando a cultura se encontrava em plena floração, os tratamentos não irrigados apresentavam valores mais negativos, indicando que a cultura passava por limitações hídricas no solo.

Ao associar com os valores de potencial matricial (Figuras 15 e 16), pode ser observado que, naquele dia, os tensiômetros estavam no limite de funcionamento (-80 kPa), nos dois sistemas de manejo do solo. Analisando-se o potencial matricial em PCNI, a 74 DAE (Figura 15), verificou-se que os valores estavam em -0,06 MPa, ou seja, as raízes das plantas estavam extraindo água a 0,30m de profundidade, fato só ocorrido em PDNI a 77 DAE (Figura 16).

A evapotranspiração real (ET_r) era de 3,49 mm dia⁻¹ em PCNI e de 3,36 mm dia⁻¹ em PDNI, refletindo as condições semelhantes expressadas em termos de potencial mínimo que foi de -1,5 MPa. Nos tratamentos irrigados, o potencial mínimo da água na folha em sistema plantio direto (PDI) foi de -0,99 MPa e em preparo convencional (PCI) de -1,08 MPa, não sendo evidenciadas

diferenças estatísticas entre os sistemas de manejo do solo, nem quanto aos tratamentos.

No dia 11/03/04 (105 DAE), o Ψ_{\min} da água na folha nos tratamentos não irrigados foi inferior a -1,5 MPa (Figura 28), apresentando em PDNI valor de -2,16 MPa e em PCNI de -1,66 MPa. Essa tendência pode ser atribuída à longa estiagem em que a cultura foi submetida, principalmente, a partir de 80 DAE (Figura 12 e 13). A 105 DAE a cultura encontrava-se em R₅, no subperíodo de formação de legumes, considerado crítico à soja devido à escassez hídrica no solo.

A análise de variância, para cada dia específico de monitoramento, detectou interação significativa entre sistemas de preparo e irrigação em três dos cinco dias de monitoramento. Quando não houve interação, verificou-se que o potencial mínimo da água na folha foi maior em plantio direto do que em preparo convencional. Apesar da diferença não ter sido significativa, em dois dias monitorados, essa tendência se apresenta como um indicador de maior disponibilidade hídrica no solo em sistema plantio direto.

Quando a interação foi significativa, houve efeito contrário entre sistemas de manejo do solo. O potencial mínimo da água na folha de -2,16 MPa, em PDNI, a 105 DAE, foi menor do que em PCNI. Todavia, ao avaliar o sistema solo-planta-atmosfera de forma integrada, essa aparente diminuição do potencial mínimo da água na folha no plantio direto não irrigado não significa que esse sistema de manejo tinha menos água disponível, ou que, as plantas estavam sob condição hídrica inferior ao preparo convencional. Esses menores valores são atribuídos à maior manutenção de folhas em plantio direto (PDNI),

indicando maiores transpirações em PDNI do que em PCNI, expressado pelo Ψ_{\min} mais negativo.

Nesses dias, não foi possível explicar a condição hídrica das plantas pela variação do potencial matricial da água no solo, pois os tensiômetros já haviam rompido a coluna de mercúrio até 45 cm de profundidade, demonstrando baixa disponibilidade de água em ambos sistemas de manejo do solo. A deficiência hídrica no dia 11/03/04 (105 DAE) em PDNI era de 5,4 mm e em PCNI de 5,2mm.

Na área irrigada, o potencial mínimo da água foi sempre superior em plantio direto (PDI), variando de -0,86 a -1,17 MPa, enquanto que em preparo convencional (PCI) o mesmo ficou entre -1,06 e -1,3 MPa. Esse fato pode ser explicado pela maior disponibilidade de água no solo em plantio direto (DALMAGO, 2004).

Também, deve-se registrar que a irrigação foi monitorada com base no potencial matricial da água no solo em plantio direto, o que pode ter penalizado o preparo convencional. Bianchi *et al.* (2005) também encontrou maiores valores de potencial mínimo da água na folha de milho em sistema plantio direto, na mesma área experimental, em experimento realizado no ano agrícola 2002/03.

Em folhas de soja Confalone & Navarro Dujmovich (1999a, 1999b) encontraram valores de potencial da água nas folhas da ordem de -1,85 MPa e -1,77 MPa, mostrando uma tendência de menores valores nos tratamentos com deficiência hídrica. Sob condições irrigadas, Bianchi *et al.* (2005) verificaram a mesma tendência para o milho (*Zea mays* L), onde Ψ_{\min} em plantio direto foi maior, ou seja, menos negativos do que em preparo convencional. Observaram

os autores que, de 42 a 58 DAE o Ψ_{\min} foi superior a -1,39 MPa, tanto em plantio direto quanto em preparo convencional irrigados. Sob estresse hídrico foi detectado que, em dois períodos de intensos déficits hídricos no solo (58 e 64 DAE), os potenciais da água na folha em plantio direto não irrigado foram de -1,66 e -2,08 MPa e em preparo convencional de -1,70 e -2,38 MPa, respectivamente.

Na mesma área experimental, nos anos agrícolas 93/94 e 94/95, Bergonci *et al.* (2000) verificaram que potenciais da água na folha variando entre -1,2 e -1,5 MPa, sendo apontados como críticos, servindo de indicadores de déficits hídricos para a cultura do milho. Os autores encontraram relação linear entre o potencial mínimo da água na folha do milho com o potencial matricial da água no solo, a 0,45 m de profundidade.

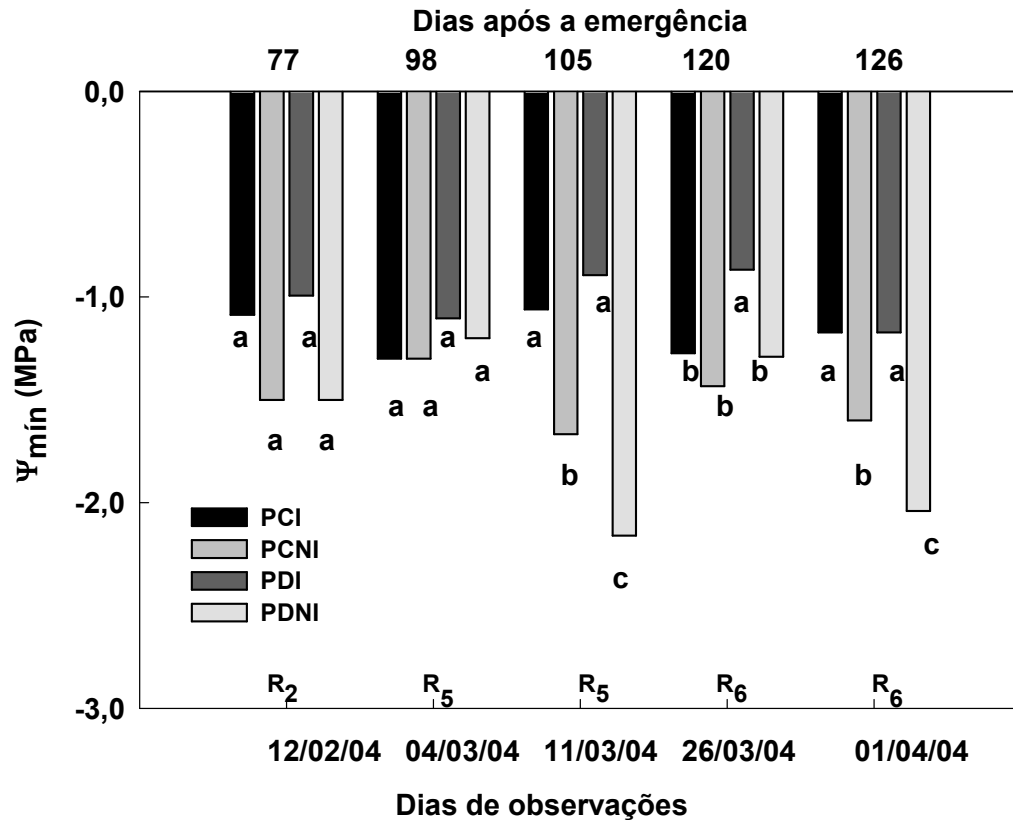


FIGURA 28 – Potencial mínimo da água na folha ($\Psi_{\text{mín}}$) em soja (cv. Fepagro RS-10) cultivada em plantio direto irrigado e não irrigado (PDI e PDNI) e preparo convencional irrigado e não irrigado (PCI e PCNI)*. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04.

* Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey para o nível de significância de 5%.

4.8.2 Condutância estomática

Analisando a condutância estomática (g_f) representada na Figura 29, observou-se que houve efeito significativo quanto ao fator irrigação, em todos os dias monitorados. Notou-se que, a 77 DAE (12/02/04), os valores observados foram de $785 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, em plantio direto irrigado (PDI), e $677 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, em preparo convencional irrigado (PCI), não havendo diferença estatística entre os mesmos (Figura 29). Nos tratamentos não irrigados (PCNI e

PDNI), a condutância foi de $221 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em PDNI e de $148 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em PCNI, que também foram estatisticamente semelhantes. Portanto, nesse período, as diferenças foram estatisticamente significativas apenas entre os tratamentos irrigados e não irrigados. Como a cultura se encontrava em plena floração (R_2) os valores indicam que a cultura estava sob condições semelhantes estatisticamente quanto ao fluxo hídrico nos tratamentos não irrigados.

Estudos comprovam que o ácido abscísico, produzido na raiz, pode desempenhar um papel importante no controle da condutância foliar (TAIZ, ZIGER, 2004). Liu *et al.* (2004) verificaram que sob estresse hídrico o ácido abscísico (ABA) aumentou linearmente com o decréscimo do potencial da água na folha. Expressos de forma relativa, os autores constataram que a condutância estomática decresceu linearmente de 1,0 para 0,40 com relativo aumento de ABA. A condutância relativa reduziu-se para 0,10, sendo linearmente correlacionada com a relativa queda da pressão de turgor da folha. Portanto, os déficits hídricos no solo aumentaram o ABA na raiz, afetando a condutância estomática em períodos de déficits severos (14 dias).

A 105 DAE, a cultura iniciava o enchimento de grãos (R_5). A condutância média em plantio direto não irrigado foi de $42 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, sendo estatisticamente menor que nos demais tratamentos. Em seguida, observando em ordem crescente, verificou-se que em preparo convencional não irrigado g_f foi de $176 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Em plantio direto irrigado g_f foi de $660 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, sendo estatisticamente superior à condutância em PCI ($497 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Quando visualizada de forma integrada a condição hídrica da planta e a disponibilidade hídrica no solo em curto período de estiagem, a menor

condutância (Figura 29) e o menor potencial mínimo da água na folha (Figura 28) em PDNI podem ser explicados pela menor senescência de folhas em plantio direto, devido à maior armazenagem de água no solo em plantio direto, quando comparado ao preparo convencional sem irrigação.

A 120 DAE a condutância apresentava valores superiores em PDI, em comparação a PCI, embora com diferenças estatísticas apenas quanto ao fator irrigação. Os tratamentos não irrigados (PCNI e PDNI) tiveram condições semelhantes, de 236 e 212 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente.

A 126 DAE a maior condutância foi observada em PCI (417 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), diferente estatisticamente de PDI (269 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Os tratamentos não irrigados não diferiam estatisticamente, sendo em PDNI de 98 e em PCNI de 80 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Os valores de condutância estomática em preparo convencional não irrigado mais baixos reforçam a evidência de maior manutenção das folhas nesse sistema de manejo do solo, confirmado pelo maior IAF (Figura 19) e estatura mais elevada (Figura 20).

Essas evidências vão sendo adicionadas durante as avaliações dos padrões de resposta da cultura à condição hídrica no solo e a demanda atmosférica. Elas apontam para maior manutenção da água no solo em sistema plantio direto não irrigado, em períodos de curtas estiagens, em relação ao preparo convencional.

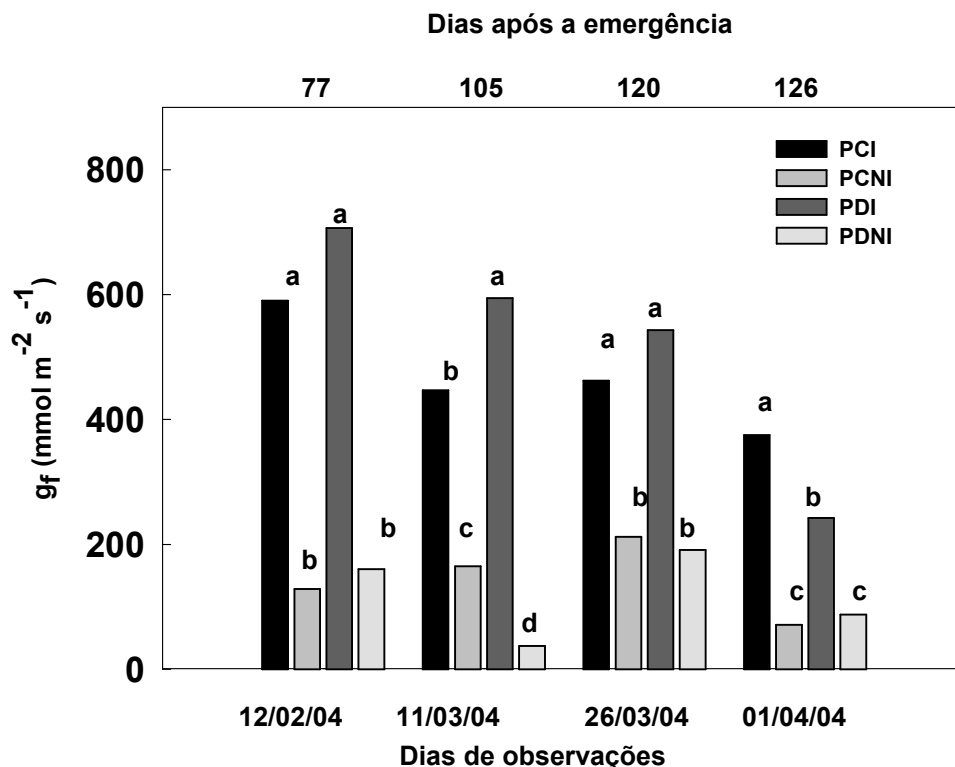


FIGURA 29 – Condutância estomática em folha de soja (cv. Fepagro RS10) sob plantio direto irrigado e não irrigado (PDI e PDNI) e preparo convencional irrigado e não irrigado (PCI e PCNI)*. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04.

* Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey para o nível de significância de 5%.

4.9 Teores de clorofila na folha

Considerando que as clorofilas são pigmentos responsáveis pela conversão da radiação fotossinteticamente ativa em energia química, procurou-se identificar indicadores do estado hídrico da planta. Indicou-se na Tabela 10, os teores de clorofilas (*a* e *b*) e o total correspondente a cada dia de coleta.

TABELA 10 – Teores de clorofilas *a* e *b* (mg dm^{-2}) em folhas de soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) irrigado (I) e não irrigado (NI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

2004	PCI			PCNI			PDI			PDNI		
Dias	<i>Cl_a</i>	<i>Cl_b</i>	Σ	<i>Cl_a</i>	<i>Cl_b</i>	Σ	<i>Cl_a</i>	<i>Cl_b</i>	Σ	<i>Cl_a</i>	<i>Cl_b</i>	Σ
Coletas												
13/2	0,8	0,2	1,0	0,5	0,1	0,6	0,9	0,3	1,2	0,8	0,2	1,0
20/2	4,9	1,5	6,4	6,9	2,3	9,2	4,8	1,5	6,3	5,3	1,7	7,0
08/3	5,3	1,7	7,0	4,1	1,5	5,6	6,2	2,2	8,4	4,9	1,7	6,6
15/3	5,7	1,9	7,6	4,6	1,6	6,2	6,6	2,2	8,8	4,8	1,7	6,5
30/3	5,0	1,6	6,6	3,2	1,1	4,3	5,3	1,7	7,0	5,6	1,8	7,4
06/4	5,6	1,8	7,4	3,7	1,3	5,0	5,9	2,0	7,9	4,7	1,5	6,2
15/4	1,4	0,6	2,0	2,0	0,8	2,8	2,5	0,9	3,4	2,2	0,8	3,0

As análises de comparações múltiplas pelo teste Krus-Wallis indicaram que, no dia 13/02/04 (correspondente a 78 DAE), os teores de clorofila em sistema plantio direto irrigado foi superior aos demais, sendo de $1,2 \text{ mg dm}^{-2}$ de clorofila total em PDI, enquanto os menores foram em PCNI com $0,6 \text{ mg dm}^{-2}$. As plantas em PCI e PDNI apresentavam mesmos valores de $1,0 \text{ mg dm}^{-2}$.

As respostas da planta em total de clorofila a 78 DAE aos ser avaliada concomitantemente com os valores de potencial matricial, representados nas Figuras 15 e 16, reforçam a evidência de menor disponibilidade hídrica em preparo convencional. Nos dois sistemas de manejo do solo os tensiômetros já haviam rompido a coluna de mercúrio a 0,45 m de profundidade, demonstrando baixa disponibilidade de água às culturas, nos tratamentos não irrigados. O total de clorofila no sistema plantio direto irrigado semelhante ao preparo convencional irrigado, reforça a evidência de maiores estoques hídricos em curtas estiagens, nesse sistema.

Comparando o potencial matricial no dia 12/02/04, a 77 DAE, um dia antes da coleta das folhas para avaliação de teores de clorofila, constata-se

que o solo em PDNI apresentava Ψ_m em torno de -0,06 MPa (-6kPa) a 0,30 m (Figura 16). Em preparo convencional não irrigado (Figura 15), desde 74 DAE os potenciais já apresentavam valores abaixo de -0,06 MPa, a 0,30m. Esses valores mais elevados de clorofila, em PDNI apontam que as plantas apresentavam melhores condições ao processo de fotossíntese devido à condição hídrica do solo, em relação ao PCNI.

A 102 DAE (08/03/04), 109 DAE (15/03/04) e 131 DAE (06/04/04), as plantas apresentaram condições semelhantes estatisticamente àquelas a 78 DAE, ou seja, a quantidade de clorofila em PDI superava a de PCNI. Em PCI e PDNI apresentaram teores bem próximos, não sendo constatadas diferenças estatísticas entre os mesmos. No dia 30/03/04 (124 DAE), houve significância estatística a 10%, indicando que havia 90% de probabilidade dos teores de clorofila serem semelhantes entre PDI, PCI e PDNI, com diferença apenas em relação ao PCNI.

Os dados evidenciaram que as plantas sem irrigação, a partir de 08 de março, apresentaram maiores teores de clorofila em plantio direto, quando comparadas ao preparo convencional. As reduções nos teores de clorofila em PCNI apontam na mesma direção na manutenção de folhas em sistema plantio direto não irrigado, respondendo positivamente aos maiores estoques hídricos no solo.

Em soja, estudos realizados por Brevedan & Egli (2003) constataram que períodos de déficits hídricos induzidos promoveram decréscimos em área foliar, nitrogênio e teor de clorofila da folha. Em R_6 foi induzido o déficit e os autores observaram que o teor de clorofila no primeiro dia era de 500 mg m^{-2} , reduzindo-se a 250 mg m^{-2} no décimo terceiro dia de estresse hídrico,

enquanto as plantas consideradas como controle ainda apresentavam teores em torno de 400 mg m^{-2} . Ao final do ciclo da cultura, os autores constataram reduções no rendimento de até 23% em relação ao rendimento das plantas controle. Eles observaram também que a cultivar apresentou um longo período de floração (de 40 dias ou mais), mas houve um curto período de maior produção de flores. Segundo Egli (2005), pouco se sabe sobre a distribuição temporal de flores e seu papel na determinação do potencial de rendimento de grãos.

Comparando os valores obtidos no campo com a cultivar Fepagro RS-10 na mesma unidade (mg m^{-2}), utilizada por Brevedan & Egli (2003), verifica-se que os maiores teores de clorofila foram em torno de 800 mg m^{-2} (Figura 30). O valor encontrado em PCNI no dia 20/02/04 (85 DAE), identificando que as plantas apresentavam maiores teores de clorofila, com 920 mg m^{-2} , reforça a evidência de que as plantas em PCNI estavam com mais folhas jovens, devido à grande abscisão pelo estresse hídrico, seguida de renovação de folhas após eventos de chuva ocorridos nos dias 13 e 14/02/04 (Figura 6).

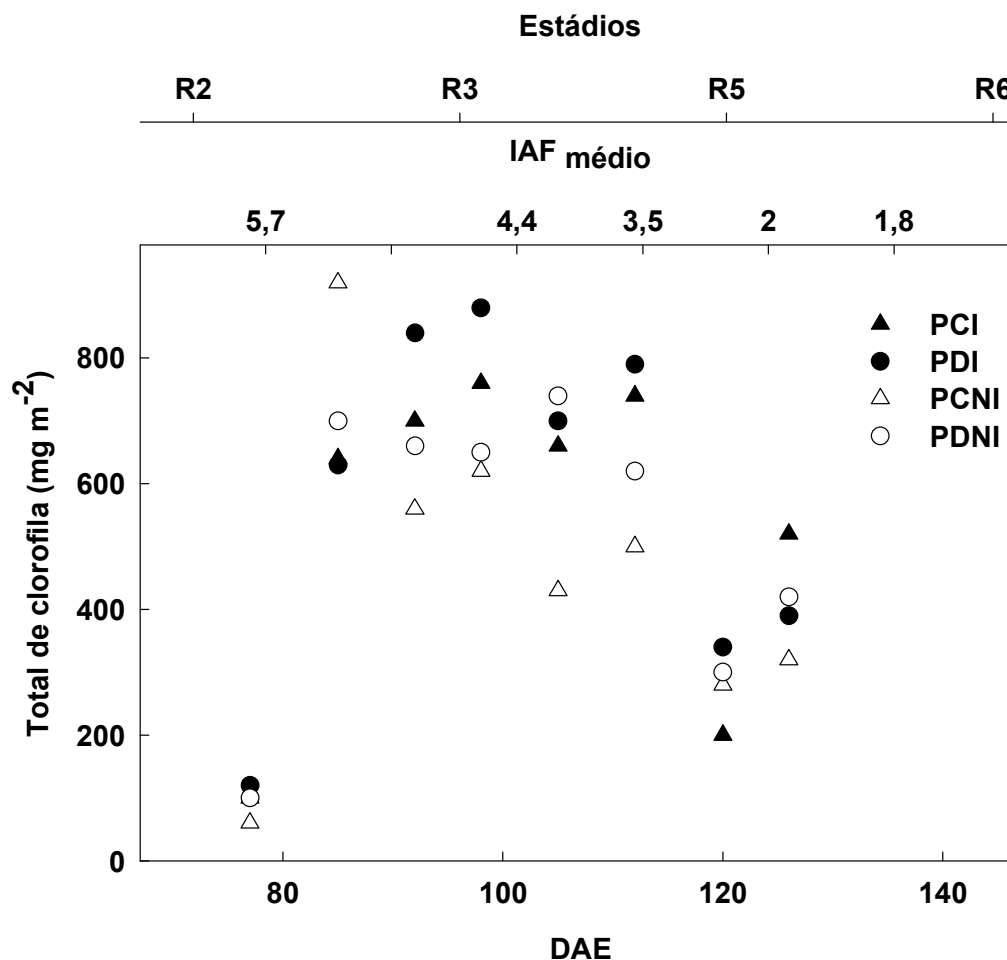


FIGURA 30 – Total de clorofila em folhas de soja (cv. Fepagro RS-10) sob preparo convencional irrigado e não irrigado (PCI e PCNI) e plantio direto irrigado e não irrigado (PDI e PDNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, 2003/04.

4.10 Rendimento de grãos e componentes

O rendimento de grãos foi mais elevado nos tratamentos irrigados, sendo em plantio direto (PDI) de 3.816 kg ha^{-1} e em preparo convencional de 3.597 kg ha^{-1} . Já nos tratamentos não irrigados o rendimento em PDNI foi de 1.894 kg ha^{-1} e em PCNI de 1.558 kg ha^{-1} , não havendo diferença estatística

entre os dois sistemas de manejo do solo (Figura 31). As diferenças detectadas foram apenas com relação aos tratamentos com e sem irrigação. Os dados evidenciam que existem várias condicionantes à expressão do rendimento da soja. As interações edafoclimáticas e condições de manejo podem comprometer o rendimento potencial de cultivares de soja (PIRES, 2002, MAEHLER *et al.*, 2003, RAMBO *et al.*, 2004, PIRES *et al.*, 2005).

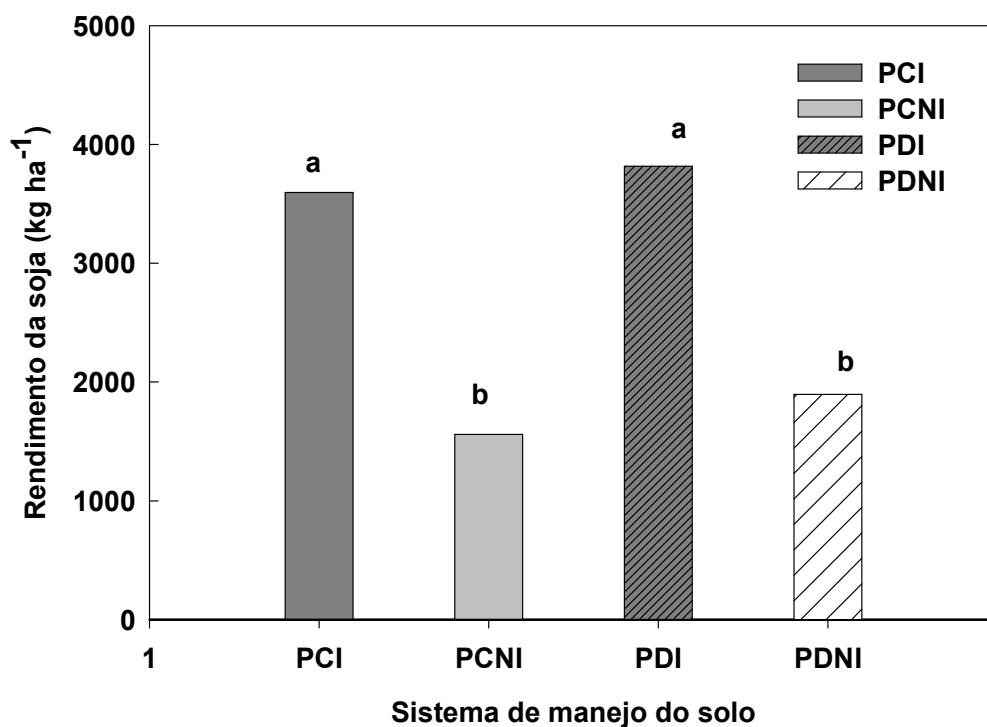


FIGURA 31 – Rendimento de grãos da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) irrigado (I) e não irrigado (NI)*. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

* Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey para o nível de significância de 5%.

Indicou-se na Tabela 11 os componentes do rendimento da soja: número de legumes por planta, número de grãos por legume, peso médio do grão e plantas por metro quadrado e as letras correspondentes ao resultado da

análise de variância. Na ausência de limitação hídrica a cultivar expressou valores superiores à média da região. Não foram detectadas diferenças significativas quanto ao rendimento de grãos, as diferenças foram decorrentes apenas da condição hídrica no solo. A soja tem potencial genético para produzir três óvulos por legume (McBLAIN; HUME, 1981), mas ao final do ciclo da Fepagro RS-10 (Tabela 11) verificou-se que em média o plantio direto irrigado apresentou 1,7 grãos por legume e em preparo convencional irrigado 1,6 grãos por legume, sem diferença significativa entre os dois sistemas de manejo do solo, com relação a esse componente do rendimento. Nos tratamentos não irrigados os valores foram semelhantes, ou seja, de 1,4 em PDNI e PCNI. No cômputo geral, o número de grãos nas três cavidades dos legumes esteve abaixo de dois grãos, indicando que houve média “granação” da cultivar.

As diferenças estatísticas foram constatadas em número de legumes por planta e peso de 100 grãos, indicando superioridade desses componentes nos tratamentos irrigados, em relação aos não irrigados. Essas diferenças confirmam os efeitos do fator hídrico no solo. Sob limitação hídrica a cultura produziu em média em termos de legumes por planta cerca de 37 em PDNI e 32 em PCNI. A maior produção de legumes por planta verificada em PDI com 54, seguida em PCI com 50 legumes por planta. Observa-se que os efeitos dos períodos de déficits hídricos indicam que houve maior abortamento de flores nos tratamentos não irrigados, expressados na redução dos legumes produzidos pelas plantas que sofram estresses hídricos.

Esses efeitos confirmam que a escassez de água no solo, no subperíodo entre a floração e o enchimento de grãos, afetou significativamente

o rendimento de grãos da soja, com rendimentos superiores nos tratamentos irrigados. Neste sentido, os indicadores de potencial matricial e de déficits hídricos no solo, nesse subperíodo, corroboram com as evidências em termos de reduções em IAF, matéria seca aérea, potencial da água no folha, condutância estomática e teores de clorofila, os quais foram manifestados no rendimento de grãos e seus componentes (Tabela 11).

TABELA 11 – Componentes de rendimento de soja (cv. Fepagro RS-10), cultivada em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), irrigado (I) e não irrigado (NI), no ano agrícola 2003/04, na EEA/UFRGS, em Eldorado do Sul, RS.

Componentes de rendimento	PCI	PCNI	PDI	PDNI
Plantas por m ²	26 a	29 a	28 a	30 a
Legumes por planta	50,0 a	32,0 b	54,0 a	37,0 b
Peso de 100 grãos (g)	17,2 a	15,5 b	17,4 a	14,7 b
Grãos por legume	1,6 a	1,4 a	1,7 a	1,4 a
Rendimento potencial	4.128a	2.083b	4.792a	2.284b

* Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey para o nível de significância de 5%.

Os rendimentos obtidos nos tratamentos irrigados ficaram próximos aos de Herzog *et al.* (2004) para a mesma cultivar cv. Fepagro RS-10, no ano agrícola 2001/02, em Eldorado do Sul que foram de 3.334kg ha⁻¹ sob condição irrigada, em sistema plantio direto e sem irrigação de 2.996kg ha⁻¹. Esses rendimentos, nos tratamentos não irrigados foram atribuídos à boa oferta pluvial na fase em que a cultura encontrava-se em enchimento de grãos (fevereiro e março). Sem limitação hídrica Moreira *et al.* (2002), obtiveram rendimentos de 3.207kg ha⁻¹ em plantio direto e 3.094kg ha⁻¹ em preparo

convencional, também não houve diferença significativa entre os dois sistemas de manejo do solo.

Santos & Tomm (2003) encontraram maiores rendimentos de soja em plantio direto, explicado, em parte, pelo peso de 1.000 grãos. Os autores atribuíram o maior rendimento da cultura à maior disponibilidade de água, ao acúmulo de nutrientes e de matéria orgânica na camada superficial do solo, mais elevados em plantio direto, quando comparados ao preparo convencional.

Relacionando o rendimento de grãos com a matéria seca total obtido em cada sistema de manejo (PC e PD) e tratamento, irrigado (I) e não irrigado (NI) com o índice de colheita (IC), observa-se a nítida superioridade dos tratamentos irrigados. O índice de colheita foi de 0,55 em PDI e de 0,43 em PCI e nos não irrigados foram de 0,41 (PCNI) e 0,36 (PDNI). São percebidos os efeitos da maior manutenção de matéria seca em PDNI em relação ao PCNI. Os dados do índice de colheita (IC) em PDNI refletem a maior manutenção de folhas, apontada pelos menores valores do potencial da água na folha e condutância estomática. As reduções no índice de colheita em PDNI confirmam a manutenção de folhas, decorrente dos maiores estoques hídricos em períodos de déficits hídricos, em relação a PCNI.

Multiplicando-se os componentes do rendimento, observa-se que a cultivar apresentou um potencial médio de rendimento de 4.460kg ha^{-1} . Os valores de rendimento estimados a partir do produto dos componentes de rendimento apontam que a cultivar apresenta um potencial genético para maiores rendimentos de grãos. 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. As diferenças entre os

rendimentos entre os valores obtidos na colheita podem ser atribuídas às perdas de grãos na trilhadeira, fatores não controlados como queda de legumes e grãos no final do ciclo e a data de colheita que deveria ter ocorrido no dia 30 de abril ou o mais próximo possível.

4.11 Teste do modelo CROPGRO-Soybean

A evolução da umidade no solo em períodos de secagem do solo (Figura 32) indica que o modelo seguiu o mesmo padrão de secagem, havendo coincidência das linhas que indicam os valores simulados com os pontos observados. O índice de concordância de Willmott *et al* (1985) entre os valores simulados pelo modelo e os observados no campo foi de 0,55, indicando que os valores não apresentaram alta concordância, devido índice “d” estar afastado da unidade. Comparando o valor do erro quadrado médio (RMSE) verificou-se que a umidade no solo em PDI, na profundidade ente 0,05 e 0,15 m, estimada pelo modelo, ficou na faixa aceitável, já que o valor do RMSE foi de 22%.

Nessa mesma profundidade (Figura 31), os valores preditos pelo CROPGRO-Soybean em preparo convencional irrigado (PCI) tiveram um índice de concordância de 0,89, bem mais próximo da unidade do que em PDI. O erro quadrado médio (RMSE) de 10,6% indica que houve boa predição no teor de umidade no solo medido pelo CROPGRO-Soybean. Tal concordância pode ser visualizada ao comparar os pontos observados e os simulados na Figura 32. Nota-se que houve maior coincidência dos valores observados em PCI do que

em PDI, reforçando a evidência detectada pelo índice “d” de Willmott et al (1985).

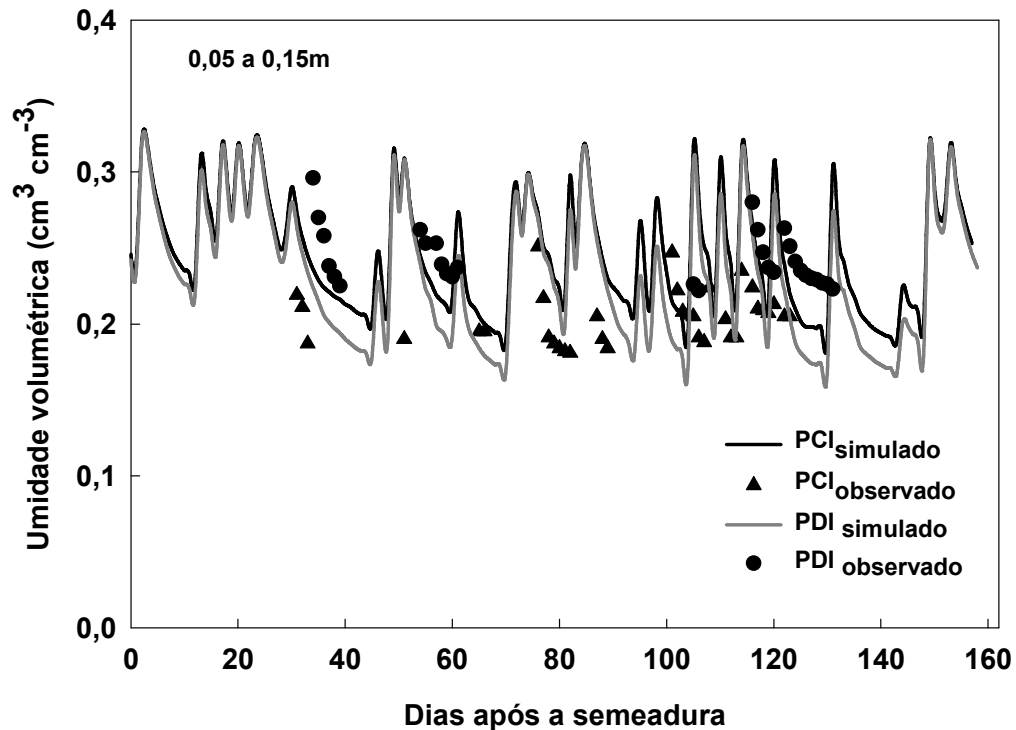


FIGURA 32 – Umidade volumétrica do solo estimada pelo modelo CROPGRO-Soybean e medida no campo, durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional e plantio direto irrigado (PCI e PDI) EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04.

Comparando a diferença relativa nos teores de umidade do solo observados no campo e simulados pelo modelo CROPGRO-Soybean, nos tratamentos não irrigados, constatou-se baixa capacidade de predição do modelo. O valor obtido pela raiz quadrada do erro quadrado médio (RMSE) apontou alto afastamento da variável simulada com a observada, sendo de 46% em PCNI e 50% em PDNI. Portanto, a imprecisão nos valores simulados quanto aos estoques de água nas camadas mais superficiais, apontam para

outras simulações discrepantes em se tratando de respostas da cultura à condição hídrica do solo. Na Figura 33 observa-se que os valores de umidade volumétrica em sistema plantio direto não irrigado estão mais afastados das linhas que expressam os valores simulados, confirmando a falta de concordância com a variável observada. A baixa qualidade no ajuste aponta que o modelo não conseguiu reproduzir o padrão de secagem do solo, nos tratamentos não irrigados.

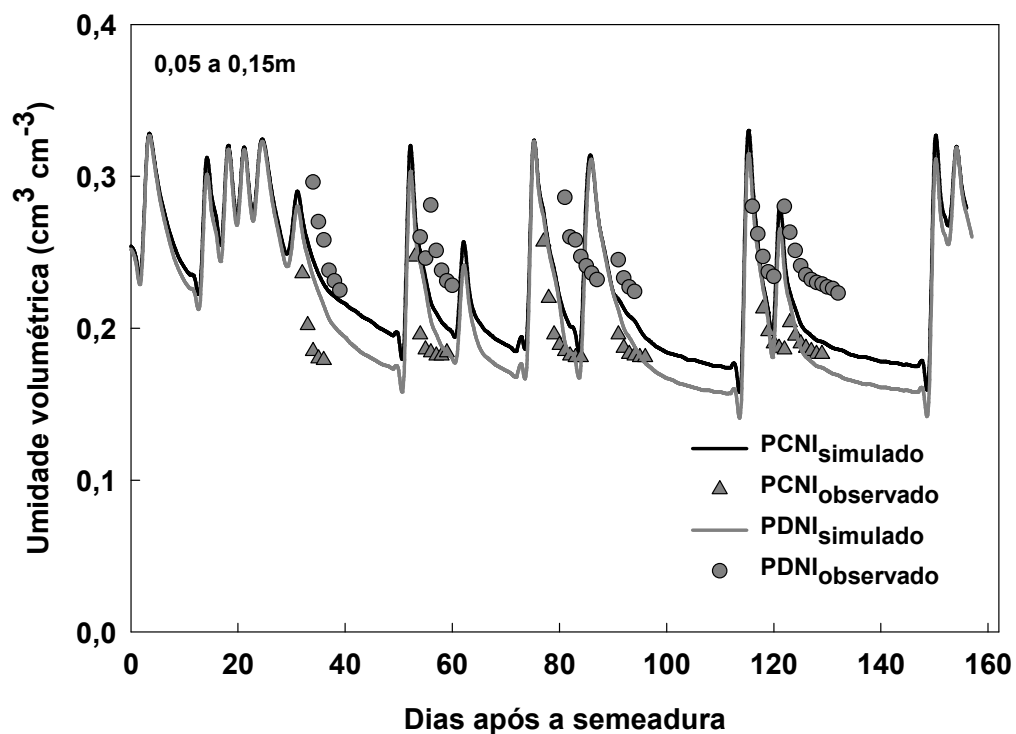


FIGURA 33 – Umidade volumétrica do solo estimada pelo modelo CROPGRO-Soybean e medida no campo, durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional e plantio direto não irrigado (PCNI e PDNI) EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04.

Na camada entre 0,15 e 0,30 m de profundidade, observou-se que em preparo convencional irrigado o modelo teve alta precisão, indicando mínimo afastamento entre os dados simulados e os observados. A raiz quadrada do erro quadrático médio foi de 2%, enquadrando-se na faixa excelente de capacidade de predição da umidade volumétrica no solo, pelo modelo, em preparo convencional irrigado (PCI).

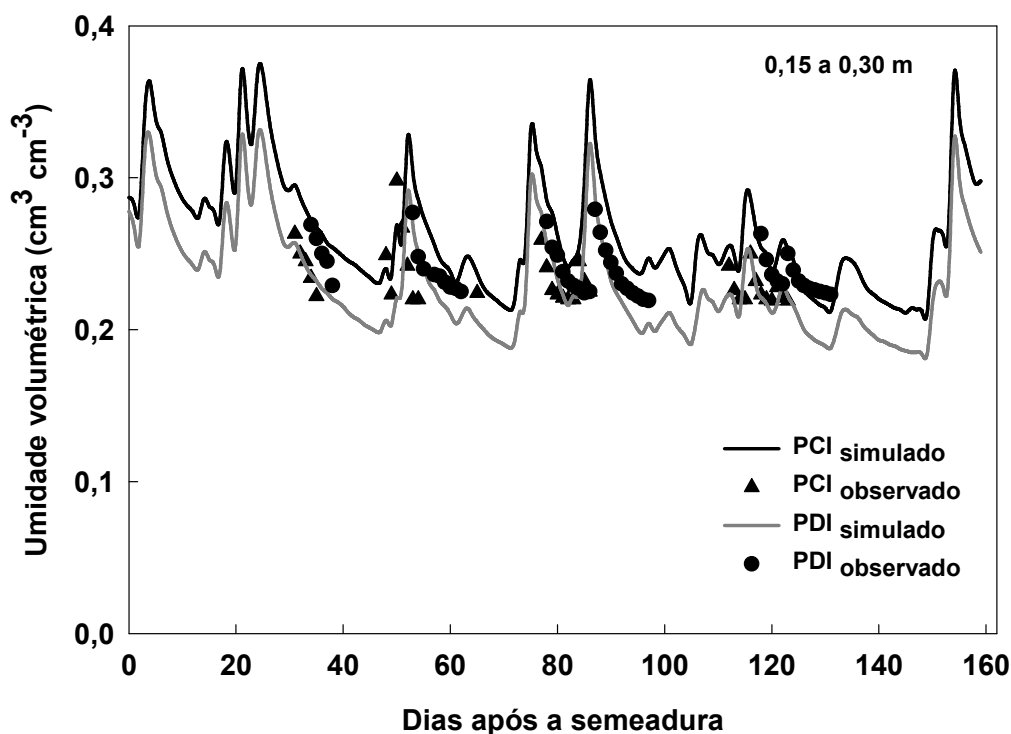


FIGURA 34 – Umidade volumétrica do solo simulada pelo modelo CROPGRO-Soybean e observada no campo (0,15 a 0,30 m), durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional e plantio direto irrigado (PCI e PDI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04.

As simulações para a umidade volumétrica no solo em sistema plantio direto irrigado (PDI), na profundidade (Figura 34), não apresentaram o mesmo desempenho de PCI. Todavia, podem ser consideradas aceitáveis, pois

o RMSE foi de 22,4%. A diferença relativa em torno de 20 % aponta para a necessidade de ajustes em rotinas no CROPGRO-Soybean, contemplando de forma diferenciada os estoques hídricos no solo em sistema plantio direto, visando melhor o desempenho do modelo.

Sob condição de não irrigada, o modelo simulou bem os teores de umidade no solo em preparo convencional na camada entre 0,15 e 0,30 m de profundidade, identificada pela proximidade entre as linhas e os pontos (Figura 35). A diferença relativa entre os valores simulados e os observados foi baixa em PCNI, explicado pelo erro quadrado médio (RMSE) de 15%.

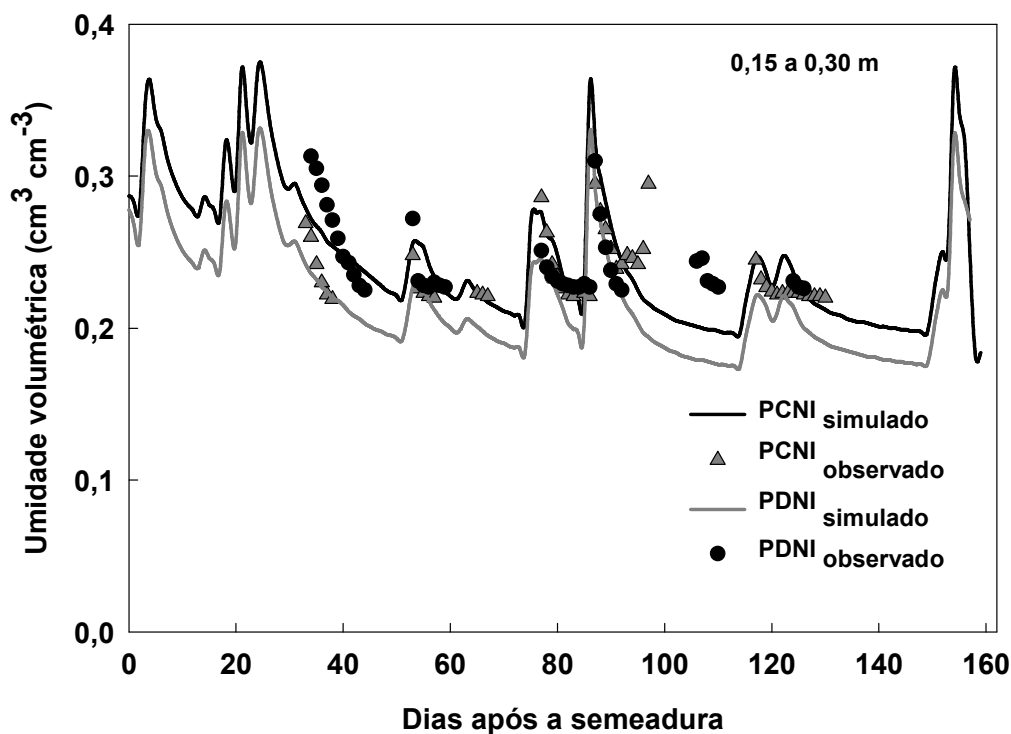


FIGURA 35 – Umidade volumétrica do solo simulada pelo modelo CROPGRO-Soybean e observada no campo (0,15 a 0,30m), durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional não irrigado e plantio direto não irrigado (PCNI e PDNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04.

Por outro lado, em sistema plantio direto não irrigado a habilidade do modelo foi muito baixa (Figura 35), apresentando um valor de 34,5 % para a raiz quadrada do erro médio, reforçando as evidências quanto à necessidade de ajustes em rotinas ou sub-rotinas no modelo para melhorar as previsões dos teores de umidade do solo em sistema plantio direto.

Entre as profundidades de 0,30 e 0,45 m (Figura 36), os valores simulados encontram-se mais afastados dos observados, mas podem ser considerados aceitáveis, a partir da análise do RMSE que ficou em torno de 20%, em PCI. Em PDI, o modelo foi impreciso nas simulações, pois o RMSE foi de 34%. Essa imprecisão indica que os parâmetros hídricos que simulam os estoques de água nas camadas do solo devem ser ajustados para aumentar o desempenho do modelo. Os altos valores de RMSE, nas comparações entre dados observados e preditos, apontam para outras imprecisões nas simulações do modelo, já que a expressão do padrão de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura dependem de estoques de água no solo e, por conseguinte, o modelo reduz sua capacidade no estabelecimento de cenários, principalmente, em sistema plantio direto.

Nas camadas do solo entre 0,30 e 0,45 m, nos tratamentos não irrigados (Figura 37) o desempenho do modelo caiu bastante, com erro de 26% em PCNI e superior a 80% em PDNI. Pelo afastamento das linhas que descrevem o padrão de evolução da secagem do solo, nota-se que o modelo não conseguiu prever a umidade volumétrica, nessa camada em PDNI.

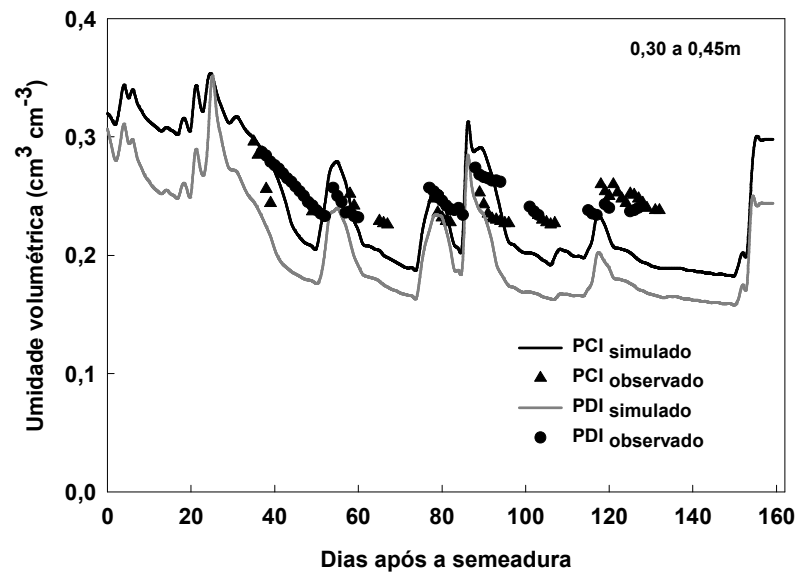


FIGURA 36 – Umidade volumétrica do solo simulada pelo modelo CROPGRO-Soybean e observada no campo (0,30 a 0,45 m), durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional e plantio direto irrigado (PCI e PDI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04.

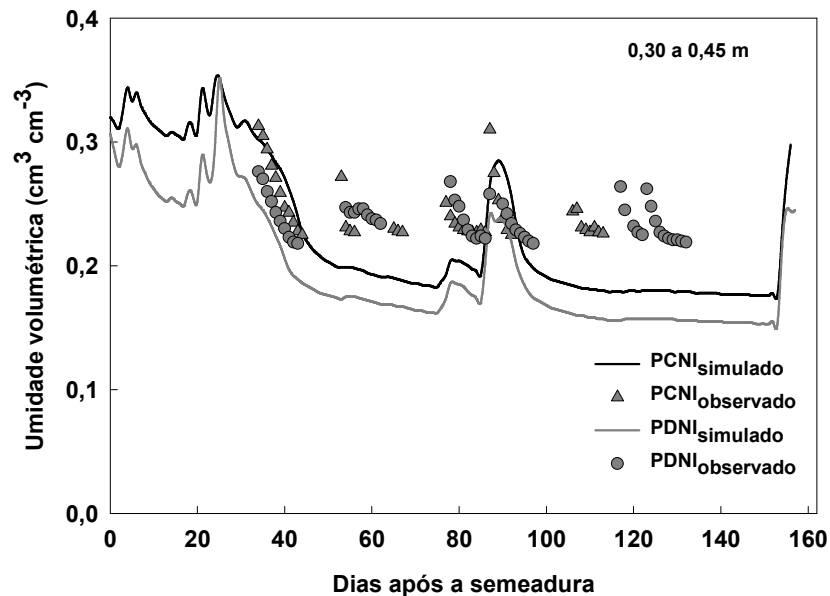


FIGURA 37 – Umidade volumétrica do solo simulada pelo modelo CROPGRO-Soybean e observada no campo (0,30 a 0,45 m), durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) em preparo convencional e plantio direto não irrigado (PCNI e PDNI). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS. 2003/04.

Ao compara os resultados do balanço de água no solo, simulado pelo CROPGRO-Soybean (Tabela 12) e as simulações do teor de água no perfil (RITCHIE, 1998), observa-se que ao final do ciclo, a variação (ΔS) do armazenamento de água (JONES, RITCHIE, 1990; HOOGENBOOM *et al.*, 1992) podem justificar imprecisões no balanço. Computando as adições de água por precipitação pluvial (P) e irrigações (I) e as perdas por evaporação do solo (ES), transpiração da planta (EP), escoamento superficial (*runoff*- R) e drenagem interna (D), ou seja, $\Delta S = P + I - EP - ES - R - D$, observa-se que elas não se equivalem para fechar o balanço (Tabela 12). Foi incluída na Tabela 12 o valor correspondente a evapotranspiração de referência (ETo) simulada pelo CROPGRO-Soybean., determinada pelo método de Priestley-Taylor-Ritchie (RITCHIE, 1998). Observa-se que a evapotranspiração de referência (ETo) variou entre 770,34 mm e 779,57 cultura em

TABELA 12 – Balanço de água simulado pelo modelo CROPGRO-Soybean**, durante o ciclo da soja (cv. Fepagro RS-10) sob preparo convencional irrigado e não irrigado (PCI e PCNI) e sistema plantio direto irrigado e não irrigado (PDI e PDNI), em Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

	P (mm)	I (mm)	EP (mm)	ES (mm)	R (mm)	D (mm)	ETo (mm)
PCI	657,0	190,5	395,29	177,52	200,04	118,76	767,14
PCNI	657,0		217,36	183,92	186,16	118,74	770,34
PDI	657,0	190,5	345,57	207,65	197,22	154,99	773,35
PCNI	657,0		190,68	196,95	184,02	149,86	779,57

** Entradas de água no sistema por precipitação pluvial e irrigação (P e I) e saídas por evaporação do solo (ES), transpiração de plantas (EP), escoamento superficial (R) e drenagem interna (D).

Os valores de transpiração da cultura (EP) apontam que no período vegetativo os valores foram superiores em preparo convencional, corroborando com as evidências em estatura das plantas, área foliar, matéria seca, área

específica e taxa de crescimento (TCC) medidos no campo. As taxas transpiratória da cultura somam-se as demais evidências, ou seja, que o desenvolvimento inicial das plantas em preparo convencional foi superior, em relação ao sistema plantio direto (Figura 38).

As avaliações quanto aos valores estimados de transpiração e evaporação do solo no CROPGRO-Soybean, indicam que, no início do ciclo da cultura, os valores de evaporação foram superiores a 4 mm dia^{-1} , às vezes superando 6 mm dia^{-1} . Devido ao crescimento da área foliar, percebe-se que de 30 a 140 dias após a semeadura, a transpiração das plantas apresentava-se superior d evaporação no solo, atingindo valores de 6 mm dia^{-1} .

Quando a cultura encontrava-se com 40 dias após a semeadura (DAE), as simulações indicaram que as plantas estavam transpirando a uma taxa diária acima de 4 mm dia^{-1} . Observando os valores de transpiração das plantas (EP) em sistema plantio direto, reforçam-se as evidências quanto ao menor desenvolvimento no início do ciclo da cultura em relação ao preparo convencional. As plantas atingiram seu máximo desenvolvimento na floração (R_2), confirmado pelas estimativas de transpiração (Figura 38). Durante os estádios reprodutivos, a transpiração tornou-se superior à evaporação do solo (ES), indicando a dominância do dossel da soja nas perdas de água por evapotranspiração. Os dados estimados de transpiração e evaporação pelo modelo apontam na mesma direção de outros indicadores como o coeficiente de cultura (K_c), máxima estatura e máximo IAF.

As linhas representadas na Figura 28 indicam que o solo apresentava maiores taxas evaporativas em sistema plantio direto, fato esse associado aos estoques de água no solo.

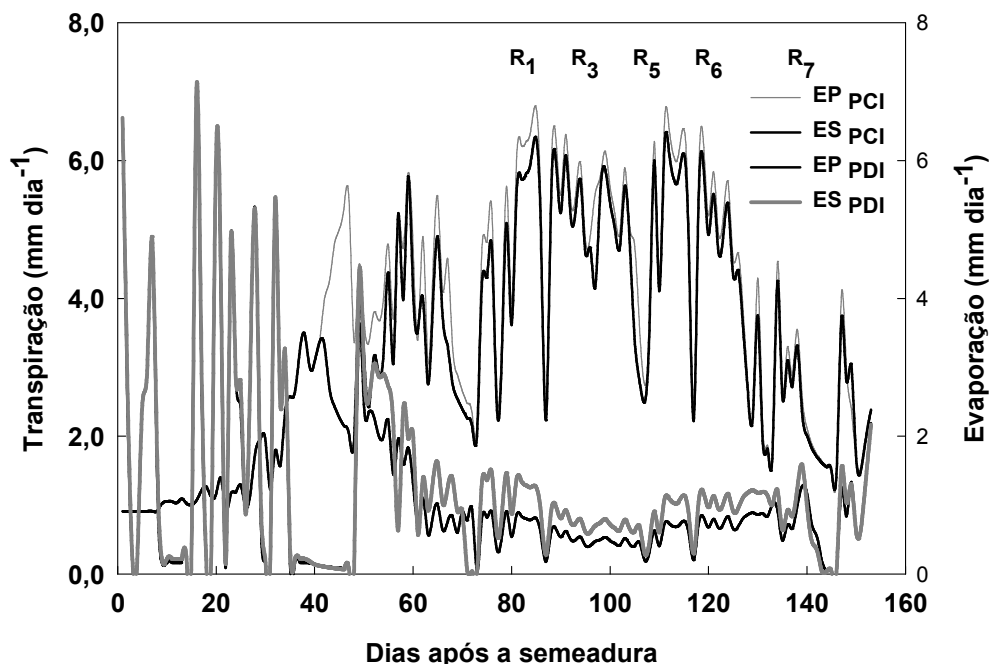


FIGURA 38– Simulação da transpiração (EP) da soja (cv. Fepagro RS-10) e evaporação (ES) na superfície do solo em preparo convencional irrigado (PCI) e plantio direto irrigado (PDI), pelo modelo CROPGRO-Soybean. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

Na Figura 39, percebem-se os efeitos dos períodos de déficits hídricos reduzindo os valores de transpiração das plantas. Verifica-se que, durante o ciclo da cultura, o modelo foi capaz de simular maiores taxas de evaporação no solo em plantio direto não irrigado (PDNI). Antes da ocorrência do primeiro período de secagem do solo, as plantas em PCNI apresentavam valores de transpiração semelhantes ao tratamento irrigado (PCI), conforme o padrão da transpiração simulado pelo CROPGRO-Soybean até 40 DAE.

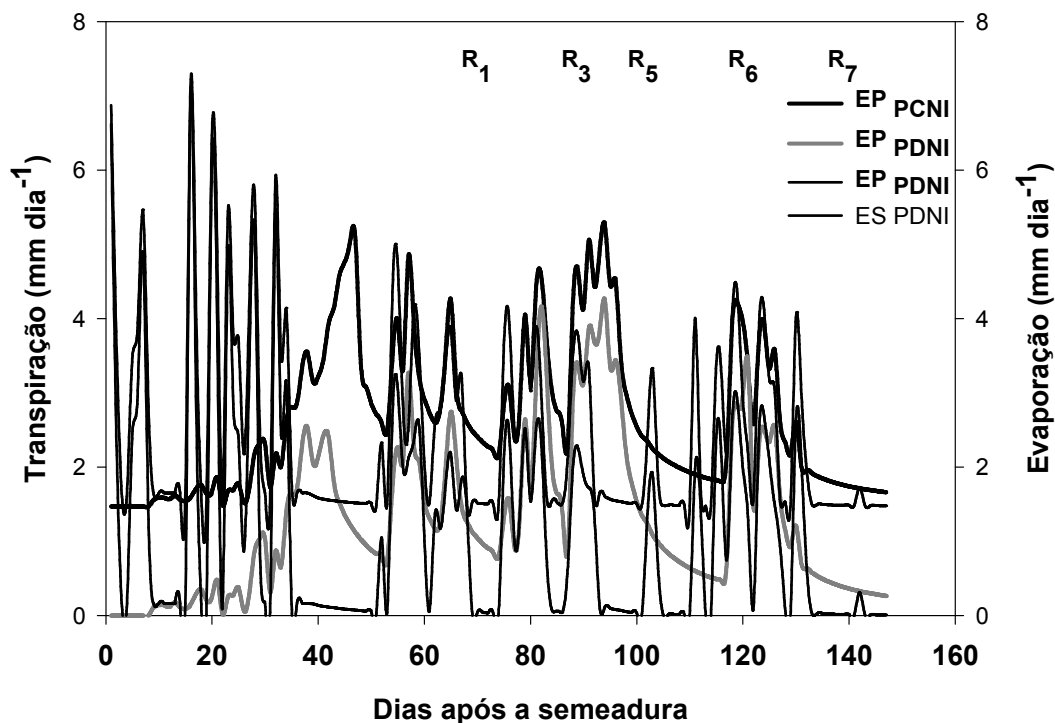


FIGURA 39– Simulação da transpiração (EP) da soja (cv. Fepagro RS-10) e evaporação (ES) na superfície do solo em preparo convencional não irrigado (PCNI), pelo modelo CROPGRO-Soybean. Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

Os valores de evaporação estimados pelo modelo em plantio direto não irrigado (PDNI) reforçam as evidências de Dalmago et al. (2004), de que a evaporação é mais elevada nesse sistema de manejo, devido aos maiores estoques hídricos no solo, em comparação ao preparo convencional.

Em geral, o modelo CROPGRO-Soybean simulou com alta precisão as datas de ocorrência dos estádios fenológicos (Figura 40). A melhor eficiência do modelo nas estimativas dos indicadores fenológicos ocorreu sob ausência de limitações hídricas. A cultura emergiu sete dias após a semeadura e o modelo estimou com exatidão esse dia em preparo convencional irrigado. A data de ocorrência da primeira flor para os tratamentos não irrigados foi estimada em três dias após a data calculada para a condição irrigada, ou seja,

70 e 37 DAS para PCI e PCNI, e 71 e 74 DAS para PDI e PDNI, respectivamente.

No experimento de campo, a floração ocorreu a 63 DAE em preparo convencional irrigado e o modelo estimou com precisão o estágio fenológico em preparo convencional irrigado (70 DAS), reforçando a hipótese que o modelo necessita de ajustes para aumentar o grau de precisão nas estimativas para esse sistema de manejo do solo. A diferença de um dia a mais em plantio direto (PDI), não compromete a eficácia do modelo. A diferença de três dias, com relação aos tratamentos não irrigados, não deve ser considerada como falha do modelo, mas sim, como indicador de sensibilidade à condição hídrica no solo.

O modelo apresentou-se eficiente nas simulações do estágio fenológico correspondente à formação de legumes, ocorrendo em PCI a 85 DAS e em PCNI a 88 DAS. Em plantio direto irrigado este foi a 86 DAS e em PDNI a 89 DAS. Os valores representados na Figura 40 apontam que os valores estão muito próximos da reta 1:1, comprovando estreita relação entre os dados observados no campo e os simulados pelo modelo CROPGRO-Soybean, quanto à floração, formação de legumes e enchimento de grãos.

Ainda com relação às simulações avaliadas na Figura 40, observa-se que o modelo foi eficiente quanto às estimativas das datas do início da maturação fisiológica e da plena maturação da cultura. Nos tratamentos irrigados, o modelo não apresentou dispersão em relação à reta 1:1, sendo um forte indicador de seu desempenho, quando os coeficientes genéticos estiverem bem calibrados, como foi o caso da cultivar Fepagro RS-10. Quanto ao início e plena maturação fisiológica constatou-se que, nos tratamentos não

irrigados, houve uma antecipação em três dias em PCNI (144 e 156 DAS) e dois dias em PDNI (145 e 157 DAS), em relação aos tratamentos irrigados (147 e 159 DAS).

A proximidade dos valores simulados e observados no campo com a reta 1:1, referente aos estádios fenológicos da soja (Figura 40), aponta para a aplicabilidade do modelo em estimativas da fenologia da cultura, quando adequadamente calibrado.

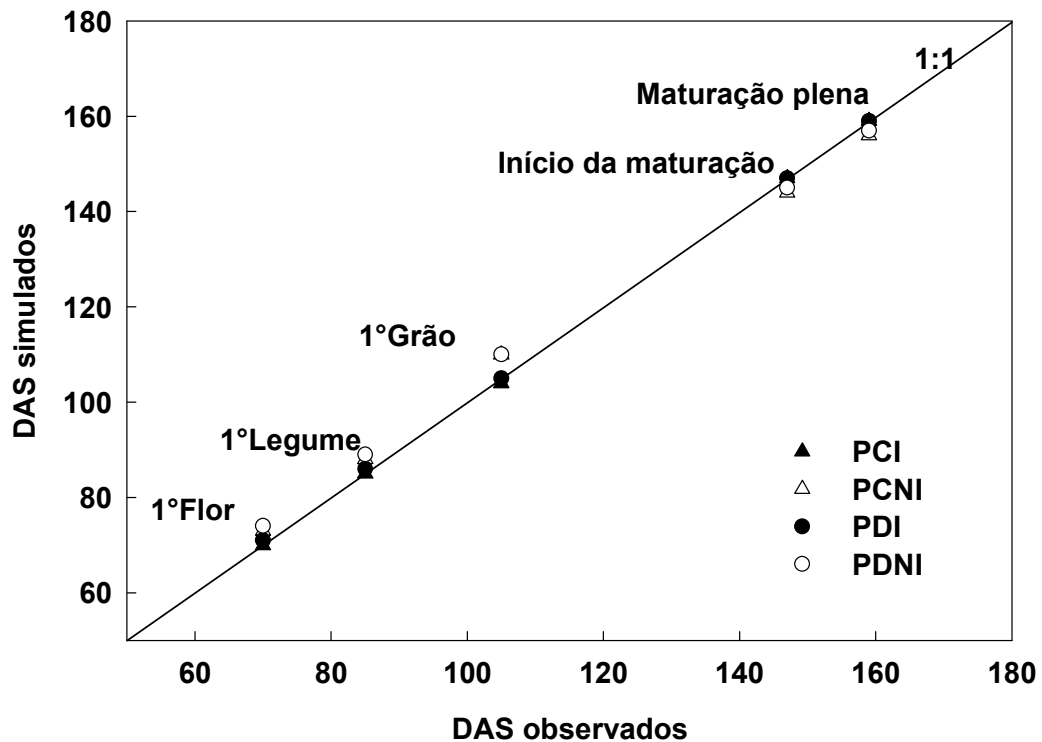


FIGURA 40 – Simulações do modelo CROPGRO-Soybean para a ocorrência da primeira flor, primeiro legume e primeiro grão em soja (cv. Fepagro RS-10) em dias após a semeadura (DAS). Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

A Figura 41 evidencia que até IAF máximo o modelo apresentou um grau de eficiência, pela aproximação entre os pontos observados e os

simulados, nos tratamentos irrigados. Já nos não irrigados (PCNI e PDNI) observa-se afastamento dos pontos de IAF. Avaliando os valores a raiz quadrada do erro quadrado médio entre os valores simulados no CROPGRO-Soybean e os coletados no campo, constatou-se que o modelo foi eficiente nos tratamentos irrigados, sendo em PCI o RMSE de 6,4% e em PDI de 13%, apontando para maior precisão em preparo convencional irrigado.

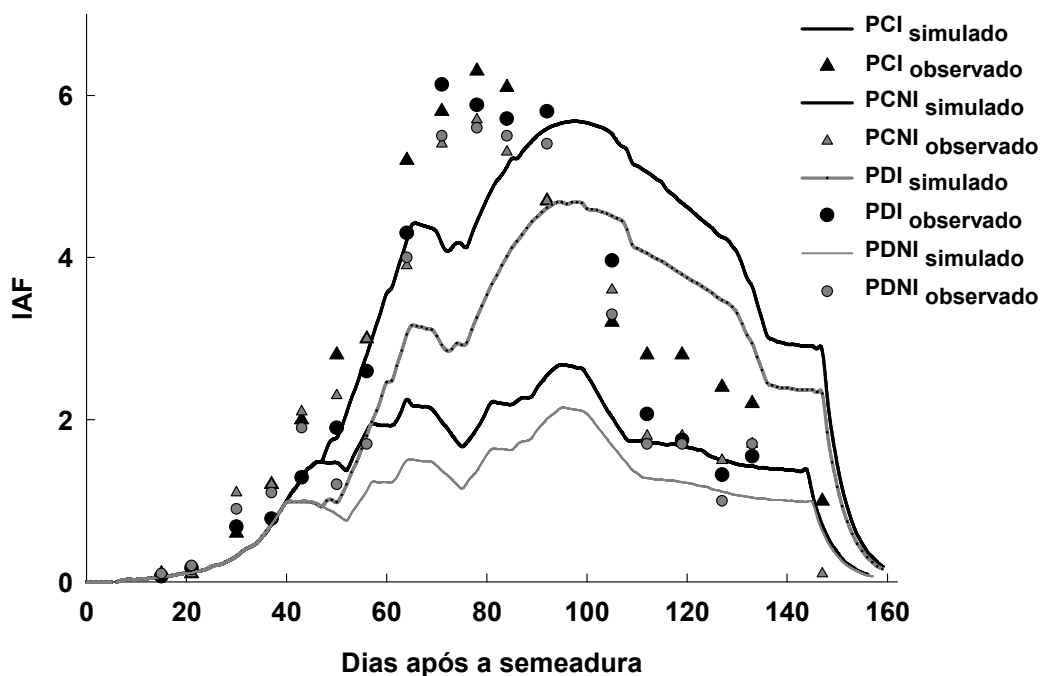


FIGURA 41 – Evolução do índice de área foliar (IAF) simulado pelo modelo CROPGRO-Soybean (linhas) e observado (triângulos e círculos cheios) no experimento de campo com soja (cv. Fepagro RS-10), em preparo convencional e sistema plantio direto irrigado e não irrigado (PCI, PDI, PCNI e PDNI, respectivamente), na EEA/UFRGS em Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

O modelo não foi eficiente em simular o IAF nos tratamentos não irrigados com erros de 61% em PCNI e 77% em PDNI, não sendo recomendado para simular essa variável sob limitação hídrica. Esse baixo

desempenho deve-se as imprecisões nas estimativas dos estoques de água no solo, já discutidas, anteriormente.

A máxima produção de matéria seca estimada pelo modelo foi de 10.000 kg ha⁻¹ em preparo convencional irrigado (PCI) e 8.000kg ha⁻¹ em plantio direto irrigado (PDI), penalizando assim, a produção de matéria seca aérea nesse sistema de manejo do solo (Figura 42). Nos tratamentos onde não houve suplementação hídrica no solo o modelo foi rigoroso nas estimativas de biomassa aérea da soja.

Os valores experimentais ficaram em torno de 8.000kg ha⁻¹, mas as estimativas do modelo foram inferiores a 4.000kg ha⁻¹ nos tratamentos não irrigados. Houve maior distância entre os pontos observados no campo e as linhas que indicam as estimativas do modelo para matéria seca aérea. Torna-se evidente que se o modelo contemplar, no cálculo do balanço de água no solo os estoques, conforme os indicadores hídricos apontados nesta pesquisa.

As respostas do fator hídrico na produção de biomassa aérea, simuladas pelo modelo tenderão a melhorar seu desempenho, principalmente em plantio direto não irrigado (PDNI), que foi o mais penalizado pelo CROPGRO-Soybean. Os resultados de matéria seca aérea e IAF evidenciam que o modelo apresentou limitações em estimar a produção de biomassa aérea pela cultura, principalmente nos tratamentos não irrigados, sendo necessários ajustes capazes de melhorar seu desempenho.

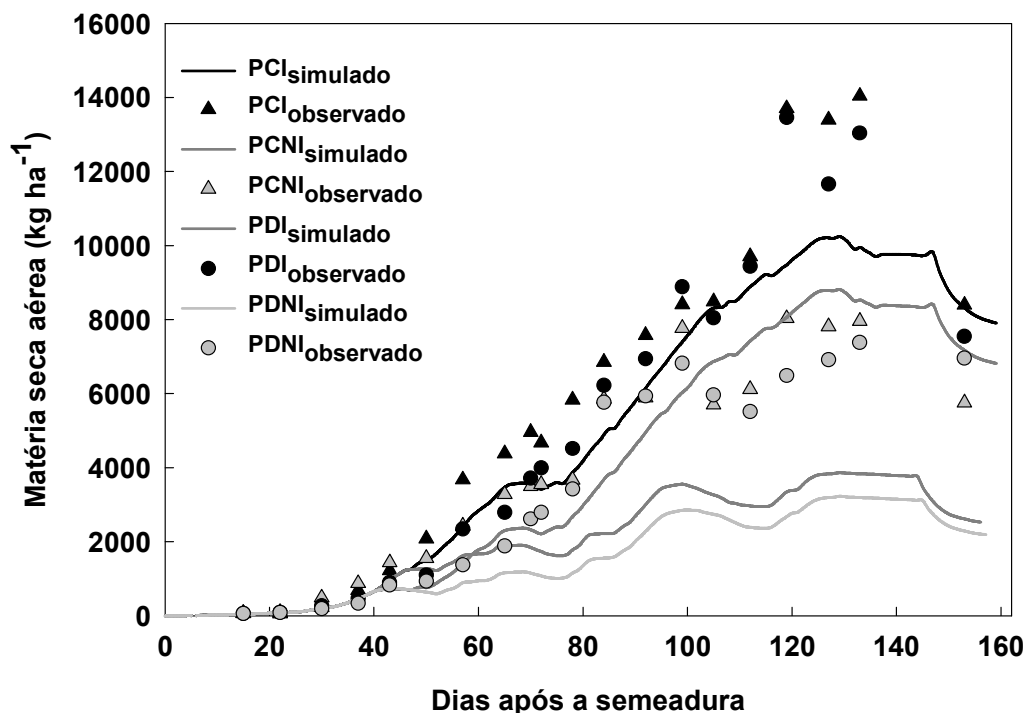


FIGURA 42 – Simulações do modelo CROPGRO-Soybean para matéria seca aérea (folhas, hastes, legumes e grãos) da soja (cv. Fepagro RS-10). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

Constatou-se que o modelo estimou com maior precisão o rendimento de grãos em PDI, sendo o RMSE de 5%. Em PCI o erro ficou dentro do aceitável (10,4%). O grau de precisão do modelo em simular o rendimento de grãos nos tratamentos não irrigados ficou na faixa de 23% em PCNI e 24 % em PDNI do valor da raiz quadrada do erro quadrado médio.

Por essa imprecisão, notou-se que o modelo CROPGRO-Soybean simulou rendimentos inferiores aos observados no campo (Figura 43). Em PCI o rendimento simulado foi de 3.108 kg ha⁻¹ e em PDI foi de 2.788 kg ha⁻¹, enquanto no campo o rendimento observado foi de 3.597 kg ha⁻¹ e 3.816 kg ha⁻¹, respectivamente. Nos tratamentos não irrigados o modelo foi mais rigoroso nas estimativas de rendimento de grãos, sendo em PCNI de 824 kg ha⁻¹ e em

PDNI de 818 kg ha⁻¹, enquanto no campo os valores obtidos foram de 1.559 kg ha⁻¹ e 1.894 kg ha⁻¹, respectivamente.

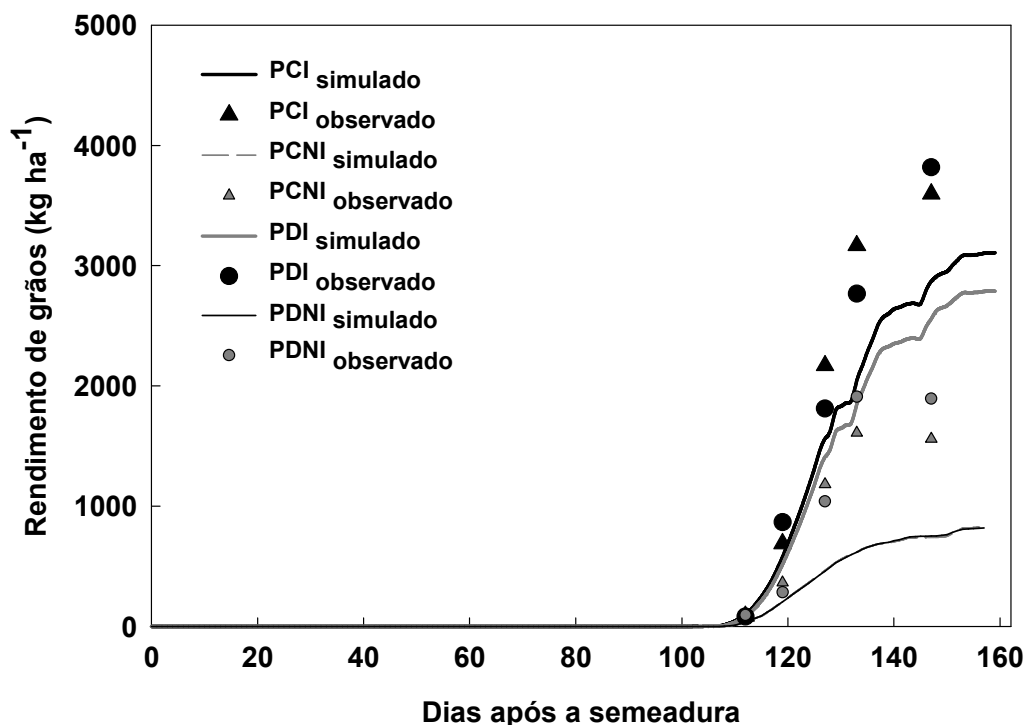


FIGURA 43. Simulações do modelo CROPGRO-Soybean para rendimento da soja (cv. Fepagro RS-10). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

As simulações do estoque já haviam indicado imprecisões nas simulações, impondo a necessidade de ajustes no CROPGRO-Soybean, sustentadas pela série de evidências, obtidas nesta pesquisa.

Estudos realizados por Mercau *et al.* (2007) contataram que após ajustes no CROPGRO-Soybean aumentou a sensibilidade nas simulações de rendimento, biomassa, índice de colheita e componentes do rendimento da soja. Esses autores verificaram maior desempenho nas simulações dos estádios fenológicos da cultura nas condições dos Pampas Argentinos, a

semelhança dos resultados das simulações de fenologia da soja, em Eldorado do Sul, fruto deste trabalho.

Ressalta-se que o CROPGRO-Soybean possui potencial em simular teor de carbono e nitrogênio tanto no solo quanto na planta, teor de óleo no grão, componentes do rendimento, entre outros que auxiliam nas análises de evidências nas variáveis observadas a campo. O conjunto de indicadores simulados e obtidos no campo aponta que o fator hídrico foi decisivo no padrão de resposta da soja e nas simulações no CROPGRO-Soybean.

Os resultados apontam que há necessidade de ajustes nos parâmetros de balanço de água no solo para melhorar a capacidade em prever as respostas da planta ao fator hídrico, como é o caso do índice de área foliar, matéria seca, rendimento de grãos e outros componentes simulados, mas não apresentados neste trabalho.

Em sistema plantio direto não irrigado (PDNI) o modelo foi mais rigoroso, subestimando os valores estoques de água no solo. Essas evidências confirmam a hipótese da necessidade de ajustes no CROPGRO-Soybean para regiões que adotam o sistema plantio direto utilizado no Brasil.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e discutidos é possível afirmar que:

- Períodos prolongados com deficiência hídrica reduzem o rendimento de grãos da soja;
- Cultivos de soja em sistema plantio direto apresentam maiores estoques hídricos nas camadas superficiais do solo;
- O tempo de secagem do solo é mais lento em sistema plantio direto com potenciais matriciais menos negativos do que no preparo convencional;
- O déficit hídrico no solo reduz o índice de área foliar, a estatura de plantas, a matéria seca aérea, a área foliar específica, a taxa de crescimento e o rendimento de grãos da soja;
- Na ausência de déficit hídrico, a soja em sistema plantio direto mantém o potencial mínimo da água, a condutância estomática e o teor de clorofila nas folhas mais elevados do que no preparo convencional;
- O padrão de evolução do índice de área foliar (IAF) e da estatura de plantas é descrito por um modelo sigmoidal, até IAF máximo;

- O padrão de evolução do índice de área foliar durante o ciclo da soja é descrito por um modelo log-normal em função de graus-dia acumulados;
- O coeficiente de cultura (K_c) da soja em sistema plantio direto é estimado por um modelo quadrático em função do índice de área foliar;
- O modelo CROPGRO-Soybean é eficiente para simular a ocorrência de estádios fenológicos da soja, com maior precisão em preparo convencional que em plantio direto, sem déficit hídrico;
- A capacidade de predição dos estoques de água solo até 0,15 m é alta em preparo convencional;
- O CROPGRO-Soybean subestima o índice de área foliar máximo, a estatura máxima de plantas e a matéria seca aérea da soja, sobretudo na condição de déficit hídrico;
- O CROPGRO-Soybean penaliza as simulações de indicadores de crescimento e rendimento da soja sob sistema plantio direto, independente da condição hídrica da cultura;
- Para aumentar a precisão nas simulações de crescimento e rendimento da soja, pelo CROPGRO-Soybean é necessário ajustar rotinas do modelo que simulam os estoques de água no solo, principalmente em sistema plantio direto.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S.L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, p. 519-531, 2004.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998, 297p. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56.

ANDALES, A.A.; BATCHELOR, W.D.; ANDERSON, C.E; FARNHAM, D.E; WHIGHAM, D.K. Incorporating tillage effects into a soybean model. **Agricultural Systems**, Amsterdam, n. 66, p. 69-98, 2000.

ASSIS, R.L. de; LANÇAS, K.P. Avaliação dos atributos físicos de um nitossolo vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 515-522, 2005.

AZOOZ, R.H.; ARSHAD, M.A. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 76, p. 143-152, 1996.

BARNI, N.A. Práticas agrícolas para minorar o impacto das secas e racionalizar a irrigação. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia Aplicada à Irrigação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1999. P. 116-125.

BASTOS, E.A.; FOLEGATTI, M.V.; FARIA, R.T. de; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; CARDOSO, M.J. Simulation of growth and development of irrigated cowpea in Piauí State by CROPGRO model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.10, p.1381-1387, 2002.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, p. 101-109, 2000.

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

BERGAMASCHI, H. Variations on the Brazilian soybean production related to the drought occurrences: preliminary analysis. In: WORLD SOYBEAN

RESEARCH CONFERENCE, 4., 1989, Buenos Aires. **Anais**. Buenos Aires: Asociación Argentina de la Soja, 1989. V. 5, p. 2153-2158.

BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1992. P. 25-32.

BERGAMASCH, H.; DALMAGO, A.G.; BERGONCI, J.I.; BIANCHI, C.A.M.; MÜLLER, A.G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; ROSA, L.M.G.; SANTOS, A.O.; BERGONCI, J.I. Automação de um lisímetro de pesagem, através de estação meteorológica, a campo. Resumo em: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Resumos**. Campinas, SP: ESALQ, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997. V. 1, p. 222-224.

BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; SANTOS, A.O. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 8, p. 1531-1540, 2000.

BERLATO, M.A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul**. 1987. 93 p. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987.

BERLATO, M.A. 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: UFRGS, Ed. Universidade, 1992. P. 11-24.

BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Consumo de água da soja: evapotranspiração estacional em condições de ótima disponibilidade de água no solo. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 1., 1978, Londrina. **Anais**. Londrina: Embrapa-CNPSo, 1978. P. 06.

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

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. Impacts of El Niño and La Niña on agricultural production in southern Brazil and the use of climate forecasts in agriculture. In: CUNHA, G.R.; HAAS, J.C.; BERLATO, M.A. (Ed.). **Applications of climate forecasting for better decision-making processes in agriculture**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001. P. 217-241.

BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação

de Penman, evaporação do tanque classe A e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 243-259, 1986.

BIANCHI, C.A.M.; BERGONCI, J.I.; BERGAMANSCHI, H.; DALMAGO, G.A. Ajuste osmótico em milho cultivado em diferentes sistemas de manejo e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 7, p. 645-651, 2005.

BONATO, E.R.; LANGE, C.E.; BERTAGNOLLI, P.F. Desempenho de Cultivares de soja de diferentes ciclos em semeaduras de dezembro, na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 6, p. 935-940, 2001.

BOONE, F.R. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.3-4, p.283-324, 1988.

BOOTE K.J.; JONES J.W.; BATCHELOR, W.D.; NAFZIGER, E.D.; MYERS, O. genetic coefficients in the CROPGRO–Soybean Model: links to field performance and genomics. **Agronomic Journal**, [s.l.], v. 95, p. 32-51, 2003.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Ed.). **Agricultural systems modeling and simulation**. New York: M. Dekker, 1998a. P. 651-691.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N.B. The CROPGRO model for grain legumes. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, 1998b. P. 99-128.

BOOTE, K.J.; TOLLENAAR, M. Modeling genetic yield potential. In: BOOTE, K.J., BENNETT, J.M.; SINCLAIR, T.R.; PAULSEN, G.M. (Ed.). **Physiology and Determination of Crop Yield**. Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA, 1994. P. 533–565.

BOYER, J.S. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean and sunflower at various leaf water potentials. **Plant Physiology**, Rockville, v. 46, n. 2, p.233-235, 1970.

BRAGAGNOLO, N.; MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 14, p. 369-374, 1990.

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.

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

CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J.; SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.323-327, 1983.

CERVI, E.U. A revolução da palha. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, n. 73, p. 8-12, 2003.

CONAB. **Soja – Brasil**. Série Histórica de Área Plantada. Safras 1990/91 a 2003/04. Disponível em: < www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/sojaset04.xls > Acesso em: 30 jun. 2006.

CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUCK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, p. 777-788, 2005.

CONFALONE, A. **Captura e utilização da radiação na cultura da soja (Glicine Max (L) Merrill) com e sem irrigação em diferentes estádios de desenvolvimento**. 1998. 74 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 1998.

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

CONFALONE, A.; NAVARRO DUJMOVICH, M. Influência do déficit hídrico sobre a eficiência de utilização da radiação em soja. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 5, n. 3, p. 195-198, 1999b.

CONFALONE, A.; VILLACAMPA, Y.; CORTÉS, M.; NAVARRO, M. **Modelo agrometeorológico del crecimiento de soja en función de la temperatura del aire y de la radiación fotosintéticamente activa**. [S.l.: 10p.], 1999.

CONFALONE, A.; VILLACAMPA, Y.; CORTÉS, M.; NAVARRO DUJMOVICH, M. Crecimiento de soja en función de la temperatura del aire y de la radiación fotosintéticamente activa soybean growth as a function of air temperature and photosynthetic active radiation. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 8, n. 3, p. 185-189, 2002.

COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 527-535, 2003.

COX, W. J.; JOLLIFF. Growth and yield of sunflower and soybean under soil water deficits. **Agronomy Journal**, Madison, v. 78, n. 2, p. 226-230, 1986.

CUNHA, G.R.; HAAS, J.C.; DALMAGO, G.A.; PASINATO, A. Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica.

Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 111-119, 1998.

CUNHA, G.R.; ASSAD, E.D. Uma visão geral do número especial da RBA sobre o zoneamento agrícola no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, p. 446-459, 2001.

CUNHA, G.R.; BARNI, N.A.; HASS, J.C.; MALUF, J.R.T.; MATZENAUER, R.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M.B.M.; PIRES, J.L.F. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, p. 446-459, 2001.

DALLACORT, R.; FREITAS, P.S.L. de.; FARIA, R.T. de.; GONÇALVES, A.C.A. de.; REZENDE, R.; BERTONHA, A.; JÚNIOR, C.H. Utilização do modelo Cropgro-drybean na determinação das melhores épocas de semeadura da cultura do feijão para a região de Maringá, Estado do Paraná, Brasil. **Acta Sciential Agronomy**, Maringá, v.27, n.2, p.349-355, 2005.

DALMAGO, G.A. **Dinâmica da água no solo em cultivos de milho sob plantio direto e preparo convencional**. 2004. 244 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

DAO, T.H. Tillage and winter wheat residue management effects on water infiltration and storage. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 57, p. 1586–1595, 1993.

DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, p. 703-709, 1999.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; FLORES, C.A.; FERREIRA, T.N.; CASSOL, E.A.; MONDARDO, A.; SCHWARZ, R.A. **Manejo de enchurrada em Sistema Plantio Direto**. Porto Alegre: Fórum Estadual do Solo e Água, 2005. 88 p.

DERPSCH, R.; ROTH, C.H.; SIDIRAS, N.; KÖPKE, U. **Controle da erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo**. Londrina: Fundação Instituto Agrônomo do Paraná, 1991. 272 p.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; ROTH, C.H. Results of studies from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 8, p. 253-263, 1986.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (FAO - Estudos de irrigação e drenagem, 33)

EGLI, D.B. Crop/stress physiology: flowering, pod set and reproductive success in soya bean. **Journal Agronomy & Crop Science**, Berlim, v. 191, p. 283-291, 2005.

EGLI, D. B.; LEGGETT, T. E. Dry matter accumulation patterns in determinate and indeterminate soybean. **Crop Science**, Madison, v. 13, p. 220-222. 1973.

EGLI, D.B.; ORF, J.H.; PFEIFFER, T.W. Genotypic variation for duration of seedfill in soybean. **Crop Science**, Madison, v. 24, n. 3, p. 587-592, 1984.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.

FARIA, R.T. **Tensiômetro**: construção, instalação e utilização; um aparelho simples para se determinar quando irrigar. Londrina: IAPAR, 1987. 24 p. (IAPAR, Circular, 56).

FARIA, R.T.; MADRAMOOTOO, C.A. Simulation of soil moisture profiles for wheat in Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 31, p. 35-49, 1996.

FARIA, R.T.; BOWEN, W.T. Evaluation of DSSAT soil-water balance module under cropped and bare soil conditions. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 46, n. 4, p. 489-498, 2003a.

FARIA, R.T.; CHIBANA, E.Y.; GALDINO, J. Riscos de decréscimo de produtividade de trigo devido a fatores climáticos em diferentes épocas de semeadura na região dos Campos Gerais, Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13., 2003, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2003b. P. 713-713.

FARIA, R.T. de; OLIVEIRA, D. de; FOLEGATTI, M.V. Simulação da fenologia e produção do feijoeiro pelo modelo BEANGRO. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 10., Piracicaba,. **Anais...**Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, p.141-142(a). 1997.

FARIAS, J.R.; ASSAD, E.D.; ALMEIDA, I.R.; EVANGELISTA, B.A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.

FEARNSIDE, P.M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, Foundation for Environmental Conservation, 28 (1): 23-38, 2001.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 11 p.

FLECK, N.G.; BIANCHI, M.A.; RIZZARDI, M.A.; AGOSTINETTO, D. Interferência de *Raphanus Sativus* sobre cultivares de soja durante a fase

vegetativa de desenvolvimento da cultura. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 425-434, 2006.

FRANÇA, S.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L.G. Modelagem do crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de grãos, com e sem irrigação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 59-66, 1999.

FRANK, A.E.; DORFMAN, R. Necessidades de irrigação suplementar em soja nas condições edafoclimáticas do Planalto Médio e Missões, RS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 8, p. 1675-1683, 2000.

GOSSE, G.; VARLET-GRANCHER, C.; BONHOMME, R. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, Paris, v. 6, p. 47-56, 1986.

HANKS, R.J.; SISSON, D.V.; HURST, R.L.; HUBBARD, K.G. Statistical analysis of results from irrigation experiments using the line-source sprinkler system. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 886-888, 1980.

HERZOG, R.L. da S.; LEVIEN R.; TREIN C.R. 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**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 771-780, 2004.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; BOOTE, K.J. Modeling growth, development and yield of grain legumes using SOYGRO, PNUTGRO, and BEANGRO: A review. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 35, n. 6, p. 2043-2056, 1992.

HOOGENBOOM, G., WHITE, J.W.; JONES, J.W.; BOOTE, K.J. BEANGRO, a process-oriented dry bean model with a versatile user interface. **Agronomic Journal**, v. 86, n.1, p.182-190. 1994.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, p. 137-157, 2000.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; POTER, C.H.; WILKENS, P.W.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; TSUJI, G.Y. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer**: (version 4.0). Honolulu: University of Hawaii, v. 1, p. 1-60. 2003.

HSAIO, T.C. Plant responses to water stress. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 24, p. 519-570, 1973.

HUNGRIA, M.; VARGAS, M.A.T.; SUHET, A.R.; PERES, J.R.R. Fixação biológica do nitrogênio na soja. In: ARAUJO, R.S.; HUNGRIA, M. (Ed.).

Microrganismos de importância agrícola. Brasília: Embrapa-SPI, 1994. P. 9-89.

HUNT, L.A.; WHITE, J.W.; HOOGENBOOM, G. Agronomic data: advances in documentation and protocols for exchange and use. **Agricultural Systems**, Oxon, v. 70, n. 2-3, p. 477-492, 2001.

IAPAR. **O Plantio Direto no Paraná.** Londrina, PR: Instituto Agronômico do Paraná, 1981. 284 p.

IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; JACKSON, R.D.; KIMBALL, B.A.; NAKAYAMA, F.S. 3 stages of drying of a field soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 38, n. 5, p. 831-837, 1974.

JAGTAP, S.S.; JONES, J.W. Predicting regional soybean yield and production: Adaptation of the CROPGRO soybean simulation model and scaling up yields. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 93, p. 78-85, 2002.

JONES, J.W. Decision support systems for agricultural development. In: De VRIES, P.; TENG, F.W.T.; METSELAAR, P.S.K. (Ed.). **Systems approaches for agricultural**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. P. 459-472.

JONES, B.P.; HOLSHOUSER, D.L.; ALLEY, M.M.; ROYGARD, J.K.F.; ANDERSON-COOK., C.M. Double-crop soybean leaf area and yield responses to md-atlantic soils and cropping systems. **Agronomic Journal**, [s.l.], v. 95, p. 436-445, 2003a.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; BOOTE, K.J.; PORTER, C.H.; TSUJI, G.Y. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer: DSSAT 4.** Honolulu: University of Hawaii, 2003b. 269 p.

JONES, J. W.; RITCHIE, J. T. Crop growth models. In: HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. (Ed.), **Management of Farming Irrigation Systems. American Society of Agricultural Engineers Monograph**, St Joseph, MI, USA, p. 63-89, 1990.

JONES, P.G.; LAING, D.R. Simulation of the phenology of soybeans. **Agricultural Systems**, Oxford, v. 3, p. 295-311, 1978.

KEATING, B.A., McCOWN, R.L. Advances in farming systems analysis and intervention. **Agricultural Systems**, Oxon, v. 70, p. 555-579, 2001.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 26, p. 857-867, 2002.

KORTE, L.L.; WILLIAMS, J.H.; SPECHT, J.E.; SORENSEN, R.C. Irrigation of soybean genotypes during reproductive ontogeny I: agronomic responses. **Crop Science**, Madison, v. 23, n. 3, p. 521-527, 1983.

KROPFF, M.J.; JONES, J.W.; VAN LAAR G. Advances in systems approaches for agricultural development. **Agricultural Systems**, Oxon, v. 70, n. 2/3, p. 353-354, 2001.

LAMEGO, F.P.; FLECK, N.G.; BIANCHI, M.A.; SCHAEGLER, C.E. Tolerância à interferência de plantas competidoras e habilidade de supressão por genótipos de soja – II. Resposta de variáveis de produtividade. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 491-498, 2004.

LAMEGO, F.P.; FLECK, N.G.; BIANCHI, M.A.; VIDAL, R.A. Tolerância à interferência de plantas competidoras e habilidade de supressão por cultivares de soja – I. Resposta de variáveis de crescimento. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 405-414, 2005.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa Artes e Textos, 531p. 2000.

LAZARINI, E.; SÁ, M.,E. de; FERREIRA R.C. Acúmulo de matéria seca em plantas de soja durante os estádios reprodutivos e qualidade fisiológica de sementes colhidas em diferentes fases do desenvolvimento. **Revista Brasileira de Sementes**, Pelotas, v. 22, n. 1, p. 153-162, 2000.

LIMA, F.Z. de; COSTA, L.C.O.; PEREIRA C.R.; DOURADO NETO D.; CONFALONE, A.E. Efeito do estresse de luz e água na eficiência do uso da radiação solar pela cultura da soja (*Glycine max* Merrill) Effect of light and water stress on radiation use efficiency of soybean (*Glycine max* Merrill) crop. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 1-7, 2004.

LIU, F.; JENSEN C.; ANDERSEN, R.M.N. Drought stress effect on carbohydrate concentration in soybean leaves and pods during early reproductive development: its implication in altering pod set. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 86, n. 1, p. 1–13, 2004.

LOAGUE, K.; GREEN, R.E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 7, p.51-73, 1991.

LOGSDON, S.D.; ALLMARAS, R. R.; WU, L.; SWAN, J.B.; RANDALL, G.W. Macroporosity and its relation to saturated hydraulic conductivity under different tillage practices. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 4, p. 1096-1101, 1990.

MAEHLER, A.R.; PIRES, J.L.F.; COSTA, J.A.; FERREIRA, F.G. Potencial de rendimento da soja durante a ontogenia em razão da irrigação e arranjo de plantas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 225-231, 2003.

MAJOR, D.J.; JOHNSON, D.R.; TANNER, J.W.; ANDERSON, I.C. Effects of daylength and temperature on soybean development. **Crop Science**, Madison, v. 15, p. 174-179, 1975.

MARTORANO, L.G.; CARAMORI, P.H.; FARIA, R.T. de.; VALENTINI, M.L. Monitoramento agrometeorológico como subsídio para adoção de técnicas de agricultura de precisão na Região de Campos Gerais, PR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz de Iguaçu, PR. **Anais**. São José dos Campos, SP: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002. P. 2827-2831.

MARTORANO, L.G.; CARAMORI, P.H.; TSUKAHARA, R.Y.; FARIA, R.T de; BERGAMASCHI, H.; STRAUCH, J.C. A agrometeorologia como suporte na adoção de técnicas de agricultura de precisão na região de Campos Gerais, PR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13., 2003, Santa Maria, RS. **Anais**. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2003. P. 403-404.

MATZENAUER, R. *et al.* **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO, 2002. 105 p. (Boletim FEPAGRO, 10).

MATZENAUER, R.; ANJOS, C.S. dos. Disponibilidade hídrica para a cultura da soja em anos de El Niño, La Niña e Neutros, nas regiões climáticas do planalto médio e depressão central do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 315-322, 2004.

MATZENAUER, R.; BARNI, N.A.; MACHADO, F.A.; ROSA, F.S. da. Análise agroclimática das disponibilidades hídricas para a cultura da soja na região do planalto médio do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 263-275, 1998.

MATZENAUER, R.; BARNI, N.A.; MALUF, J.R.T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.33, n.6, p.1013-1019, 2003.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; RIBOLDI, J. Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 225-241, 1995.

MAVROMATIS, T.; BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; IRMAK, A.; SHINDE, D.; HOOGENBOOM, G. Developing genetic coefficients for crop simulation models with data from crop performance trials. **Crop Science**, Madison, v. 41, p. 40-51, 2001.

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

MEIRELES, E.L.; PEREIRA, A.R.; SENTELHAS, P.C.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, F.J.P. Risco climático de quebra de produtividade da cultura do feijoeiro em Santo Antônio de Goiás, GO. *Bragantia*, Campinas, v.62, n.1, p.163-171, 2003.

MELO, R.W. de; FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. Indicadores de produção de soja no Rio Grande do Sul comparados ao zoneamento agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 12, p. 1167-1175, 2004.

MERCAU, J.L.; DARDANELLI, J.L.; COLLINO, D.J.; ANDRIANI, J.M.; IRIGOYEN, A.; SATORRE, E.H. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-Soybean. **Field Crops Research**, n. 100, p. 200–209, 2007.

MIELNICZUK, J.; LUDWICK, A.; BOHNEN, H. **Recomendação de adubo e calcário para solos e culturas do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1969. 29 p. (UFRGS - Boletim Técnico, 2).

MOMEN, N.M.; CARLSON, R.E.; SHAW, R.H. *et al.* Moisture-stress effects on the yield components of two soybeans cultivars. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, n. 1, p. 86-90, 1979.

MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, v. 281, p. 277-294, 1977.

MONTEITH, J.L. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 5, p. 695–697, 1996.

MOREIRA, S.G.; PROCHNOW, L.I.; KIEHL, J. de C.; PAULETTI, V. Produtividade de soja e acúmulo de nutrientes em função de sistemas de preparo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. **Anais**. Cuiabá: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. 1 CD ROM.

MORENO, J.A. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura. 1961. 41p.

MOTA, F.S. *et al.* Análise agroclimatológica da necessidade de irrigação da soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 133-138, 1996.

MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J.; PENGELLY, B.C. Radiation-use efficiency of soybean, mungbean and cowpea under different environmental conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 32, n. 1, p. 1-6, 1993.

NIELSEN, D.C.; MA, L.; AHUJA, L.R.; HOOGENBOOM, G. Simulating Soybean Water Stress Effects with RZWQM and CROPGRC Models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 6, p. 1234-1243, 2002.

OLIOSO, A.; CARLSON, T.N.; BRISSON, N. Simulation of diurnal transpiration and photosynthesis of a water stressed soybean crop. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 81, n. 1-2, p. 41-59, 1996.

PANDOLFO, C. **Parâmetros básicos para uso na modelagem do rendimento de matéria seca em alfafa (*Medicago sativa* L.)**. 1995. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

PASSIOURA, J.B. Simulation models: science, snake oil, education or engineering. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 5, p. 690-694, 1996.

PIRES, J.L.F. **Estimativa do potencial produtivo da soja e variabilidade espacial de área de produção**. 2002. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

PIRES, J.L.F.; COSTA, J.A.; RAMBO, L.; GUTHEIL, E.F.F. Métodos para a estimativa do potencial de rendimento da soja durante a ontogenia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 4, p. 337-344, 2005.

PETTER, R.L.; RIGHES, A. A. Resposta da soja a diferentes potenciais de água no solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21.; SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA DO CONE SUL, 1., 1992, Santa Maria. **Anais**. Santa Maria: DER/UFMS, 1992. v.1, p.983-991.

PHILLIPS, R.E.; PHILLIPS, S.H. **No-Tillage Agriculture: principles and practices**. New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1984, 306 p.

RAMBO, L.; COSTA, J.A.; PIRES, J.L.F.; PARCIANELLO, G.; FERREIRA, F.G. Rendimento de grãos da soja em função do arranjo de plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33 , n.3, p.405-411, 2003.

RAMBO, L.; COSTA, J.A.; PIRES, J.L.F.; PARCIANELLO, G.; FERREIRA, F.G. Estimativa do potencial de rendimento por extrato do dossel da soja, em diferentes arranjos de plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34 , n. 1, p. 33-40, 2004.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 211-216, 1988.

REICOSKY, D.C.; KEMPER, W.D.; LANGDALE, G.W.; DOUGLAS, C.L.; RASMUNSEN, P.E. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 50, p. 253-261, 1995.

REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 31., 2003, Porto Alegre. **Indicações técnicas para cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2003/2004**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 137 p.

RITCHIE, J. T. Soil water balance and plant water stress. In: TSUJI G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, p. 41-54. 1998.

RITTER, A.; HUPET, F.; MUNÕZ-CARPENA, R.; LAMBOT, S.; VANCLOOSTER, M. Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. **Agricultural Water Management**, v.59, p.77-96, 2003.

RODRIGUES, O; DIDONET, A.D.; LHAMBY, J.C.B.; BERTAGNOLLI, P.F.; LUZ, J.S. da. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 431-437, 2001.

RUIZ-NOGUEIRA, B.; BOOTE, K.J.; SAL, F. Calibration and use of CROPGRO-Soybean model for improving soybean management under rainfed conditions. **Agricultural Systems**, Oxon, v. 68, p. 151-163, 2001.

SALINAS, A. R.; ZELENER, N.; CRAVIOTTO, R. M.; BISARO, V. Respuestas fisiológicas que caracterizan el comportamiento de diferentes cultivares de soja a la deficiencia hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 31, n. 5, p. 331-338, maio 1996.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico vermelho-escuro de Eldorado de Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n.2, p. 313-319, 1995.

SANTOS, H.P. dos; TOMM, G.O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo de solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 3, p. 479-486, 2003.

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico fisiológico das plantas **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SIDIRAS, N.; PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo na temperatura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, n. 3, p. 181-184, 1986.

SIDIRAS, N.; ROTH, C.H.; FARIAS, G.S. Efeito da intensidade da chuva na degradação por impacto de gotas em três sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, p. 251-254, 1984.

SILVIUS, J.E.; JOHNSON, R.R.; PETERS, D.B. Effect of water stress on carbon assimilation and distribution in soybean plants at different stages of development. **Crop science**, Madison, v. 17, n. 5, p. 713-716, 1977.

SINCLAIR, T.R.; SELIGMAN, N. G. Crop modeling: from infancy to maturity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 698-704, 1996.

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

STONE, L.R.; TEARE, I.D.; NICKELL, C.D.; MAYAKI, W.C. Soybean root development and soil-water depletion. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, n. 4, p. 677-680, 1976.

STONE, F.L.; SILVEIRA, P.M. DA; MOREIRA, J. A.A.; BRAZ, A.J.B.P. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.41, n.4, p.577-582, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

THIMIJJAN, R.W.; HEINS, R.D. Photometric, radiometric and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion. **Hort Science**, St. Joseph, v. 18, p. 817-822, 1983.

THOMAS, 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.

THORNTHWAIT, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104 p.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S. da; GONÇALVES, A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em atossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, 2002.

TSUKAHARA, R.Y.; CANTERI, M.G.; SILVA, O.C. da; CARAMORI, P.H.; CLEMENTE, M.A. Monitoramento agrometeorológico para avaliação de infecção e desenvolvimento de doenças fitopatológicas nos Campos Gerais através do programa ARC EPIDEMIC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13. 2003, Santa Maria. **Anais**. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2003. P. 641-642.

VEZZANI, F. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VARLET-GRANCHER, C.; GOSSE, G.; CHARTIER, M.; SINOQUET, H.; BONHOMME, R.; ALLIRAND, J. M. Mise au point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, Paris, v. 9, p. 419-439, 1989.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, 44: 892-898. 1980.

VON CAEMMER, S.; FARQUHAR, G.D. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. **Planta**, v.153, p.376-387, 1981.

VU, J.C.V; ALLEN JR., L.H.; BOOTE, K. J.; BOWES, G. Effects of CO₂ and temperature on photosynthesis and Rubisco in rice and soybean. **Plant Cell and Environment**. v. 20. p.68-76. 1997.

WARREN, J.W.; WILSON, J. Maximum yield potential. In: COLLOQUIUM INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 7, 1971, Berne. **Transition from extensive to intensive agriculture with fertilizers**: proceedings. Berne: IPI, 1971. P. 105-115.

WESTGATE, M. E.; SCHUSSLER, J. R.; REICOSKY, D. C. Effect of water deficits on seed development in soybean. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 91, n. 2, p. 980-985, 1989.

WILKERSON, G.G.; JONES, J.W.; BOOTE, K.J.; BUOL, G.S. Photoperiodically sensitive interval in time to flower of soybean. **Crop Science**, Madison, v. 29, p. 721-726, 1989.

WILLMOTT, C.J.; AKLESON, G.S.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, 8995-9005, 1985.

WINTERMANS, J.F.G.M.; DE MOTTS, A. Spectrophotometric characteristics of chlorophylls *a* and *b* and their pheophytins in ethanol. **Biochimica ET Biophysica Acta**, Berlin, v. 109, p. 448-453, 1965.

WÜNSCHE, W.A.; DENARDIN, J.E.; MIELNICZUK, J.; SCOPEL, I.; SCHEIDER, P.; CASSOL, E.A. Projeto integrado de uso e conservação de solo: um esforço conjunto para a conservação do solo no Rio Grande do Sul. **Trigo e Soja**, Porto Alegre, v. 51, p. 20-25, 1980.

YUSUF, R.I.; SIEMENS, C.J.; BULLOCK, C.D. Growth analysis of soybean under no-tillage and conventional tillage systems. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, p. 928-933, 1999.