

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA – UFRGS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

RESPOSTAS ESPECTRAIS DA SOJA SOB
DIFERENTES CONDIÇÕES HÍDRICAS E DE
PREPARO DO SOLO

Aluna: Tatiana Silva de Almeida
Orientadora: Denise Cybis Fontana

Porto Alegre (RS), Brasil
Dezembro de 2008

Dissertação apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de
Mestrado em Sensoriamento Remoto

Agradecimentos

A Deus pelo dom da persistência.

À professora Denise Cybis Fontana, não apenas pela orientação, pela paciência e pela dedicação, mas principalmente, pela amizade e pela confiança desde a iniciação científica.

Ao professor Homero Bergamaschi, pela amizade, pelos ensinamentos e pela oportunidade de participar do experimento de campo do qual foram obtidos os dados para esta dissertação.

Ao professor Moacir Berlato pela amizade, pela confiança e pelos ensinamentos ao longo destes anos de convívio.

À Embrapa Trigo de Passo Fundo, RS pelo empréstimo do espectrorradiômetro.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da UFRGS pela oportunidade de realizar o curso.

A todos os colegas do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia da UFRGS.

A todos os amigos do Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia.

A toda a minha família, em especial a minha mãe Osmarina e às minhas irmãs: Andréa, Márcia e Amanda, pela compreensão, pela ajuda nas horas difíceis e por cuidarem dos meus interesses, extensivo aos meus cunhados e sogros.

Às minhas avós: Marina e Genuepha, de quem herdei tanta teimosia. Aos meus avôs: Arlindo e Arlindo José (*In memorian*) e ao meu tio Adecir (*In memorian*) que me incentivaram a estudar.

Ao meu marido Fernando, por me incentivar e acreditar na realização deste projeto. Também pelo amor diário e pela compreensão durante o curso.

RESPOSTAS ESPECTRAIS DA SOJA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES HÍDRICAS E DE PREPARO DO SOLO¹

Autora: Tatiana Silva de Almeida
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Denise Cybis Fontana

Resumo

O Estado do Rio Grande do Sul é um dos grandes produtores nacionais de soja, o que justifica o uso de técnicas de sensoriamento remoto para o monitoramento da cultura em tempo real. O objetivo geral da pesquisa foi analisar as respostas espectrais da cultura da soja ao longo do ciclo, submetida a diferentes sistemas de preparo do solo e níveis de irrigação. O experimento foi conduzido em uma área de 0,5ha, localizada na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, em Eldorado do Sul. A cultivar utilizada foi a FEPAGRO RS-10, com espaçamento entre linhas de 0,40m e uma população de 400.000 plantas/ha. Durante todo o ciclo foram realizadas medições de reflectância do dossel de plantas e do solo entre 11 e 13 horas, utilizando o telescópio do espectrorradiômetro marca LI-COR, modelo LI-1800. Para as determinações em folíolos de soja em laboratório, utilizou-se a esfera integradora acoplada ao espectrorradiômetro. Foram realizadas, também, algumas medições de parâmetros de planta. Os resultados mostraram que o manejo influencia o desenvolvimento das plantas, estando diretamente relacionado às diferenças nas respostas espectrais. O desenvolvimento dos folíolos de soja está associado a um aumento da absorvância e conseqüente diminuição da reflectância e da transmitância. A reflectância do solo descoberto úmido se diferenciou dos demais solos, reforçando a necessidade do uso de índices de vegetação que considerem a reflectância do solo. Sobre o dossel de soja foram constatadas diferenças de reflectância entre as datas, comprovando ser a reflectância um indicador adequado da condição de crescimento e desenvolvimento das plantas. Os tratamentos irrigados apresentaram valores de reflectância superiores aos tratamentos não irrigados na porção do infravermelho próximo. Os índices de vegetação foram eficientes no monitoramento da cultura da soja, mas somente o Índice de Vegetação Perpendicular (PVI) e o Índice de Vegetação Ponderado (WDVI) diferenciam dosséis segundo a condição hídrica e sistema de preparo do solo. Funções ajustadas entre índices de vegetação e parâmetros de planta podem ser utilizadas para o monitoramento da cultura da soja utilizando técnicas de sensoriamento remoto.

¹ Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, Dezembro, 2008.

SPECTRAL RESPONSES OF SOYBEAN CROPS UNDER DIFFERENT WATER CONDITIONS AND TILLAGE SYSTEMS¹

Author: Tatiana Silva de Almeida
Advisor: Prof^a. Dr^a. Denise Cybis Fontana

Abstract

The state of Rio Grande do Sul is one of the greatest Brazilian soybean producers, which justifies using remote sensing techniques to crop monitoring in actual time. The purpose of this study was to analyze some spectral responses of soybean during the crop cycle, submitted to different tillage systems and irrigation levels. The experiment was carried out in an area of 0.5 ha, located in the Estação Experimental Agronômica of UFRGS, in Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil. The cultivar used was the Fepagro RS-10, with row spacing of 0.40 m and a population of 400,000 plants per hectare. During the crop cycle, reflectance of plants and soil was measured between 11am and 1pm, using the telescope of a spectroradiometer LI-COR, model LI-1800. To carry out the determinations in soybean leaflets in the laboratory, the spectroradiometer integrating sphere were used. Some measurements of plant parameters were also performed. The results showed that the management has influenced the plants development which is directly related to the spectral responses. The development of soybean leaflets is associated to the increasement in absortance and consequent reduction in reflectance and transmittance. The moist bare soil is distinct from the others, reinforcing the need for using vegetation index by considering the reflectance of the soil. Differences in reflectance above the soybean canopy were found between the dates, showing that the reflectance is an indicator of plant growth and development conditions. The irrigated soybean crops showed higher reflectance values than those of non-irrigated plants in the near infrared portion. The vegetation indices were efficient for soybean monitoring, but only the Perpendicular Vegetation Index (PVI) and Weight Difference Vegetation Index (WDVI) differentiate canopies according water condition and tillage systems. Adjusted functions among vegetation indices and plant parameters can be used for soybean monitoring by using remote sensing techniques.

¹ Master of Science dissertation in Remote Sensing. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, December, 2008.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Importância e caracterização da espécie.....	4
2.2 Aquisição de dados através de Sensoriamento Remoto.....	7
2.3 Comportamento espectral de folhas verdes.....	10
2.3.1 A estrutura das folhas.....	10
2.3.2 Interação da radiação solar com a folha verde.....	12
2.4 Comportamento espectral do solo.....	18
2.5. Comportamento espectral de dosséis.....	20
2.6 Índices de vegetação.....	23
2.6.1 Relação com propriedades biológicas da vegetação.....	24
2.6.2 Relação com padrões de crescimento e desenvolvimento.....	26
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	28
3.1 Descrição da área experimental.....	28
3.2 Condições hídricas do período experimental.....	29
3.3 Cultura e delineamento experimental.....	29
3.4 Medições e determinações espectrais.....	31
3.4.1 Equipamento.....	31
3.4.2 Partição da radiação em folíolos.....	33
3.4.3 Reflectância no solo.....	35
3.4.4 Reflectância no dossel.....	35
3.5 Medições e determinações de planta.....	36
3.5.1 Área foliar.....	36
3.5.2 Teor de clorofila.....	37
3.5.3 Índices de vegetação.....	38
3.6 Análises.....	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1 Caracterização das condições meteorológicas do período experimental.....	41
4.2 Resposta espectral dos folíolos de soja.....	42
4.3 Resposta espectral do solo.....	52
4.3.1 Curvas de reflectância.....	52
4.3.2 Variação temporal da reflectância no visível e no infravermelho.....	54
4.3.3 Ajuste da linha do solo.....	55
4.4 Resposta espectral do dossel de soja.....	57
4.4.1 Variabilidade da reflectância entre os tratamentos.....	57
4.4.2 Comparação entre a reflectância do folíolo e do dossel.....	61
4.4.3 Reflectância no vermelho e no infravermelho.....	63
4.5 Índices de vegetação.....	65
4.5.1 Evolução temporal.....	66
4.5.2 Relações com parâmetros de planta.....	71
4.5.2.1 Análise de correlação.....	71

4.5.2.2 Ajuste de funções.....	73
a) Índice de área foliar.....	73
b) Teor de clorofila.....	76
5 CONCLUSÕES.....	82
6 REFERÊNCIAS.....	84
Apêndice 1.....	90

Relação de Tabelas

	Página
1. Coeficientes de correlação entre as reflectâncias e as absortâncias no vermelho e no infravermelho para a cultura da soja nos sistemas direto e convencional. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.	51
2. Teste de diferença de médias para os índices de vegetação (SR, NDVI, TVI e SAVI) para a cultura da soja submetida a diferentes sistemas de preparo (C - convencional e D -direto) ao longo do período experimental (41, 102 e 144 DAE – dias após a emergência) EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	67
3. Teste de diferença de médias para os índices de vegetação (PVI e WDV) para a cultura da soja submetida a diferentes tratamentos (CI – convencional irrigado, CNI - convencional não irrigado, DI -. direto irrigado e DNI - direto não irrigado) ao longo do período experimental (41, 102 e 144 DAE – dias após a emergência) EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	68
4. Coeficientes de correlação entre o índice de área foliar (IAF) e o teor das clorofilas <i>a</i> e <i>b</i> , as reflectâncias no vermelho (RV) e no infravermelho (RI) e os índices de vegetação para a cultura da soja no sistema direto, em preparo convencional e para o conjunto total de dados. EAA – UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	72

Relação de Figuras

	Página
1. Curva de irradiância solar, mostrando a absorção da radiação pelos gases atmosféricos.....	9
2. Diagrama característico da anatomia de uma folha típica.....	11
3. Reflectância, transmitância e absortância de folha típica.....	14
4. Curva de reflectância de uma folha típica sadia.....	15
5. Espectro de absorção das clorofilas a e b e do β -caroteno.....	16
6. Curvas espectrais dos horizontes A e B de um Latossolo Vermelho distroférico típico (A) e de um Latossolo Amarelo ácrico típico (B).....	19
7. Área experimental de 0,5ha, localizada na Estação Experimental Agrônômica da UFRGS, Município de Eldorado do Sul – RS.....	30
8. Detalhe do delineamento experimental, com a distribuição dos tratamentos e posição da linha de aspersores.....	30
9. Esquema de funcionamento do espectrorradiômetro.....	32
10. Detalhes do funcionamento da esfera integradora do espectrorradiômetro LI-1800.....	34
11. Esquema de funcionamento da esfera integradora do espectrorradiômetro LI-1800.....	34
12. Determinações de campo. Medidas da radiância no dossel de soja e do solo coberto com palha. Eldorado do Sul, RS, 2003/04.....	36
13. Déficit hídrico decendial para os meses de novembro a abril na EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, normal de 1971 a 2000 e período Experimental 2003/04.....	42
14. Reflectância, transmitância e a absortância em folíolos de soja, 102 DAE. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	43
15. Reflectância (A), transmitância (B) e a absortância (C) em folíolos de soja aos 41, 102 e 139 dias após a emergência (DAE) para tratamento direto não irrigado (DNI) . EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	45
16. Reflectância (A), transmitância (B) e a absortância (C) em folíolos de soja aos 41, 102 e 139 dias após a emergência (DAE) para o tratamento direto irrigado (DI) . EEA-UFRGS, Eldorado do Sul RS, 2003/04.....	46

17. Reflectância (A), transmitância (B) e a absortância (C) em folíolos de soja aos 41, 102 e 139 dias após a emergência (DAE) para o tratamento convencional não irrigado (CNI) , EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	47
18. Reflectância (A), transmitância (B) e a absortância (C) em folíolos de soja aos 41, 102 e 139 dias após a emergência (DAE) para o tratamento convencional irrigado (CI) . EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	48
19. Reflectância em folíolos de soja nas porções do vermelho e do infravermelho em relação aos dias após a emergência (DAE) A, B, C e D e representam os tratamentos direto não irrigado (DNI), direto irrigado (DI), convencional não irrigado (CNI) e convencional irrigado (CI), respectivamente. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	50
20. Curva da reflectância dos solos: solo seco exposto (SSE), solo seco coberto com palha (SSC), solo úmido exposto (SUE) e solo úmido coberto com palha (SUC), nos 41 DAE (A), 74 DAE (B) 95 DAE (C). EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	53
21. Reflectância do solo seco exposto (SSE), solo seco coberto com palha (SSC), solo úmido exposto (SUE) e solo úmido coberto com palha (SUC), nas porções do visível (A) e do infravermelho (B), sob a cultura da soja em relação aos dias após a emergência (DAE). EEA-UFRGS, Eldorado do Sul RS, 2003/04.....	55
22. Relação entre a reflectância do solo nas porções do vermelho e do infravermelho do espectro eletromagnético em diferentes condições: solo seco exposto (SSE), solo seco coberto com palha (SSC), solo úmido exposto (SUE) e solo úmido coberto com palha (SUC). EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	56
23. Curva da reflectância do dossel de soja no sistema de plantio direto irrigado (DI) e não irrigado (DNI) sistema de plantio convencional irrigado (CI) e não irrigado (CNI) ao longo do ciclo da cultura: 41 DAE (A), 102 DAE (B) e 144DAE (C). EEA-UFRGS, Eldorado do Sul –RS, 2003/04	58
24. Reflectância dos folíolos e do dossel de soja nos sistemas de plantio direto não irrigado (DNI) ao longo do ciclo da cultura: 41 DAE (A), 102 DAE (B) e 144DAE (C). EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	62
25. Reflectância do dossel de soja em quatro tratamentos: plantio direto irrigado (DI), plantio direto não irrigado (DNI), preparo convencional irrigado (CI) e preparo convencional não irrigado (DNI), na porção do vermelho e porção do infravermelho do espectro eletromagnético. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	63

26. Reflectância do dossel de soja em quatro tratamentos: plantio direto irrigado (DI), não irrigado (DNI), preparo convencional irrigado (CI) e convencional não irrigado (DNI) dias após a emergência (DAE), porção do vermelho (A) e porção do infravermelho (B). EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	64
27. Índices de vegetação SR, NDVI, TVI, PVI, WdVI e SAVI, para dossel de soja submetida aos tratamentos: plantio direto irrigado (DI), não irrigado (DNI), preparo convencional irrigado (CI) e convencional não irrigado (DNI), dias após a emergência (DAE). EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	66
28. Reflectância no vermelho (A) e no infravermelho (B) e o índice de área foliar (IAF) para dossel de soja. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	74
29. Funções de relação entre os índices de vegetação SR, NDVI, TVI, PVI, WdVI e SAVI e o índice de área foliar (IAF) em folíolos de soja. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	75
30. Reflectância no vermelho (A) e no infravermelho (B) e os teores de clorofila <i>a</i> e <i>b</i> para dossel de soja. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	78
31. Funções de relação entre os índices de vegetação SR, NDVI, TVI, PVI, WdVI e SAVI e clorofila <i>a</i> em folíolos de soja. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	80
32. Funções de relação entre os índices de vegetação SR, NDVI, PVI, TVI, WdVI e SAVI e clorofila <i>b</i> em folíolos de soja. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.....	81

1 INTRODUÇÃO

O cultivo da soja representa uma das atividades economicamente mais importantes no meio rural, estando presente em grande parte das indústrias alimentícias, na qual é usada como matéria-prima. Devido à grande produção desta oleaginosa, o Brasil tem aumentado suas exportações obtendo, assim, maior entrada de recursos financeiros.

O Estado do Rio Grande do Sul, situado no extremo sul do Brasil, é um dos grandes produtores nacionais de soja, sendo responsável por cerca de 17% da produção nacional. Apesar de grande produtor, as condições hídricas normais do Estado podem ser limitantes à produção desta cultura. Em longos períodos de estiagem pode haver uma queda significativa na produção de grãos. Como consequência, observa-se grande variabilidade interanual do rendimento da soja no Rio Grande do Sul, associado também à alta variabilidade das condições de precipitação pluvial.

De acordo com dados obtidos pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e pela CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), das últimas trinta safras agrícolas de soja no Rio Grande do Sul o maior e o menor rendimentos foram obtidos nas safras 2002/03 e 2004/05, quando os valores médios foram $2.600\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e $559\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente. O baixo rendimento ocorrido na safra 2004/05 foi consequência da forte estiagem que afetou o Estado, enquanto que o alto rendimento na safra 2002/03 pode ser atribuído à

ocorrência do fenômeno El Niño, que causa precipitação pluvial acima da média no Estado. A produção média nas últimas cinco safras de soja foi de 18.342 mil toneladas (CONAB, 2006).

Como forma de minimizar o impacto de estiagens no Estado, é crescente a introdução do sistema de plantio direto e do uso de irrigação. No caso de plantio direto, a redução de riscos se dá através da adoção de uma prática comprovadamente conservacionista de solo e de água.

Dada a importância econômica e social da cultura da soja e a alta variabilidade dos rendimentos observados no Estado do Rio Grande do Sul, é relevante o desenvolvimento de técnicas e métodos que possibilitem o monitoramento das condições de desenvolvimento das plantas, na região onde se concentra a produção. Uma das alternativas interessantes e, que têm contribuído muito neste sentido, é o uso de técnicas de sensoriamento remoto orbital, as quais permitem um estudo em escala regional e com adequada periodicidade. Na literatura são abundantes os trabalhos desenvolvidos neste tema, mostrando a contribuição de imagens de satélite em sistemas de previsão de safras, tanto para estimativa de área cultivada e rendimento, como para o acompanhamento da evolução temporal das plantas. Uma forma de dar suporte a essas atividades é a condução de estudos básicos, usando radiometria terrestre. Nestes, é possível estabelecer relações úteis entre as respostas espectrais da cultura da soja e parâmetros de crescimento das plantas, as quais podem auxiliar no entendimento das respostas observadas nas imagens orbitais.

A hipótese deste trabalho é de que práticas de manejo influenciam o crescimento das plantas, provocando alterações nas respostas espectrais das mesmas, cuja detecção permite a quantificação de parâmetros biofísicos da cultura.

O objetivo geral da pesquisa foi analisar as variações nas respostas espectrais da cultura da soja ao longo do ciclo, submetida a diferentes sistemas de preparo do solo e níveis de irrigação, com vistas a fornecer informações úteis possíveis de serem usadas em sistemas de monitoramento agrícola.

Como objetivos específicos foram propostos:

a) Avaliar mudanças ao longo do tempo na partição da radiação, nos componentes absorvância, reflectância e transmitância em folíolos individuais de soja;

b) Estabelecer a relação entre reflectância e absorvância nos folíolos de soja;

c) Caracterizar a curva de reflectância de um solo da Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS) e ajustar a equação para a linha do solo;

d) Analisar as variações temporais na curva de reflectância do dossel de soja submetida a diferentes condições de manejo e níveis de irrigação;

e) Calcular, para a cultura da soja, a partir da relação entre a reflectância no vermelho e no infravermelho, os índices de vegetação mais utilizados em trabalhos científicos;

f) Estabelecer funções para a estimativa de variáveis agronômicas para a cultura da soja a partir de índices de vegetação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância e caracterização da espécie

A cultura da soja (*Glycine max L.*) foi introduzida no Brasil por imigrantes japoneses em 1908, na Região de São Paulo. Até 1975, a maior parte a produção brasileira de soja era realizada com cultivares e técnicas importadas dos Estados Unidos. Neste período, a soja só produzia bem nos Estados do sul, onde as condições eram semelhantes às do país de origem. A criação de cultivares mais adaptados permitiu a introdução da cultura nas regiões de clima tropical no Brasil (Centro-Oeste, Nordeste e Norte). A cultura da soja trouxe benefícios para a economia do Brasil como a implantação de indústrias de óleo, o mercado de sementes e a estabilidade à exploração econômica (Ferri, 2002).

Historicamente, no Rio Grande do Sul, após as freqüentes frustrações com as lavouras de trigo, o cultivo da soja tornou-se uma alternativa para a economia regional e para milhares de famílias rurais. Os bons preços, a liquidez e o forte mercado interno e externo conquistaram rapidamente os produtores. Com o aumento da área cultivada também cresceu a demanda por tecnologia, exigindo mais trabalho de pesquisadores e extensionistas (Bisotto & Farias, 2001).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja. Na safra 2006/07, a cultura ocupou uma área de 20,687 milhões de hectares, o que totalizou uma produção de 58,4 milhões de toneladas. O rendimento médio da soja no Brasil é

de 2.823kg.ha⁻¹, sendo superior a 3.000kg.ha⁻¹ no Estado de Mato Grosso, o maior produtor brasileiro de soja (IBGE, 2007).

Dados do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior mostram que a soja tem uma importante participação nas exportações brasileiras. Em 2006 as exportações do grão contabilizaram US\$ 9,3 bilhões, o que representou 6,77% do total exportado.

Até 2006, o Rio Grande do Sul era o terceiro maior produtor de soja do Brasil, de acordo com os dados do IBGE (2007), com 14,4% da produção nacional, mesma posição que ocupava na média dos anos 2001 a 2003, com 16,8% do total produzido. Essa participação tem oscilado de ano para ano. Ela cresceu de forma lenta no início de sua implantação, teve uma retração no triênio 2004 a 2006, perdendo espaço para os Estados do Mato Grosso, Paraná e Goiás. Em 2007, o Rio Grande do Sul passou a ser o quarto maior produtor de soja do Brasil, com 10,1% do total produzido. Deve-se ressaltar que, enquanto o País teve uma expansão na produção de soja, no triênio 2004 a 2006, o Estado registrou queda na produção de 29,8%. Esta queda na produção se deveu à estiagem que ocorreu no Estado, principalmente no ano de 2005, onde os índices de produção foram os mais baixos dos últimos tempos.

Segundo o Censo Agropecuário de 1995/96 (IBGE, 2004) a soja era a cultura que detinha a maior área de cultivo no Estado do Rio Grande do Sul, oscilando ao redor de 4 milhões de hectares. Naquela época, a soja participava da economia de pequenos, médios e grandes estabelecimentos rurais do Estado e estava presente em 33,14% deles. Em relação aos estabelecimentos rurais que a cultivavam, 93,94% possuíam áreas com menos de 50 hectares. Um novo censo agropecuário foi realizado em 2007, mas os dados ainda não estão disponíveis (IBGE, 2008).

A soja é uma planta anual, que apresenta desenvolvimento relativamente rápido, cujo seu ciclo varia entre 75 e 210 dias dependendo do cultivar e das condições de ambiente. É uma planta epigênia (os cotilédones estão acima da superfície do solo) e, sob condições favoráveis (25 a 30°C), os cotilédones emergem 3 a 4 dias após a semeadura. Um dia depois, aparecem as folhas unifoliadas que estarão totalmente expandidas do quinto ao sétimo dia, e as primeiras folhas trifoliadas aparecerão no décimo primeiro dia (Ferri, 2002 citando Shibles et al., 1978). As plantas atingem de 75 a 125 cm de altura e possuem de 14 a 26 nós. No primeiro nó estão os cotilédones, no segundo encontram-se as folhas opostas unifoliadas e nos seguintes as folhas trifoliadas alternadas. Após o crescimento inicial, a produção foliar aumenta rapidamente, e a cultura atinge um máximo de Índice de Área Foliar (IAF) entre 5 e 8. Próximo à maturidade fisiológica o IAF declina, chegando a valores de 4 a 6 devido à abscisão foliar (Ferri, 2002).

Algumas informações sobre a cultura da soja, a influência de elementos meteorológicos e de fatores ambientais são descritas a seguir, resumidamente, conforme Bonato (2000).

A soja é uma planta de dias curtos, sendo que a temperatura também influencia na diferenciação floral. O florescimento é escasso a temperaturas inferiores a 20°C e aumenta com temperaturas próximas a 30°C.

O desenvolvimento da cultura da soja está condicionado ao regime hídrico local, sendo o estresse por deficiência hídrica causador de problemas de crescimento e desenvolvimento, resultando em plantas de pequena estrutura, raquíticas, com folhas pequenas e entrenós curtos. As plantas murcham e os folíolos tendem a “enrolar” diminuindo a área exposta.

A deficiência hídrica, no período vegetativo, reduz o crescimento e a área foliar, podendo alterar o rendimento de grãos. No período reprodutivo é entretanto, quando a deficiência hídrica causa reduções mais drásticas no rendimento. Durante o período reprodutivo, aumenta o abortamento de flores e vagens e o “chochamento” de grãos. Com a deficiência hídrica pode, ainda, ocorrer diminuição na taxa de acúmulo de matéria seca nos grãos e antecipação da maturação, como consequência da produção de grãos menores do que em condições hídricas normais. A deficiência hídrica associada à ocorrência de altas temperaturas no período de enchimento de grãos, pode causar enrugamento dos grãos de cultivares sensíveis, reduzindo o rendimento e a qualidade de grãos.

2.2 Aquisição de dados através de Sensoriamento Remoto

Sensoriamento remoto pode ser conceituado como o conjunto de atividades relacionadas com a aquisição e análise de dados de objetos da superfície terrestre, obtidos sem que haja contato físico entre objeto e sensor (Steffen, 1993; Moreira, 2004).

A principal fonte de energia para o sensoriamento remoto (passivo) é a radiação solar, sendo que dela dependem a vida no planeta, os fenômenos físicos e os mecanismos fisiológicos. A radiação solar influencia, ainda, a evolução dos seres vivos, bem como sua adaptação ao ambiente (Ometto, 1981). O espectro de emissão de radiação pelo sol abrange uma pequena parcela do espectro eletromagnético conhecido. Nos estudos envolvendo sensoriamento remoto algumas porções deste espectro são utilizadas: visível (400 a 700nm), infravermelho próximo (700 a 1100nm), infravermelho médio (1100 a 3000nm) e infravermelho distante ou termal (superior de 3000nm).

O espectro da radiação emitida pelo sol e que atinge o topo da atmosfera terrestre se assemelha ao espectro de emissão de um corpo negro a 6000°K (Figura 1). Quando a radiação solar penetra na atmosfera terrestre, sofre atenuações causadas por espalhamento e absorção pelos constituintes atmosféricos, por partículas dispersas e nuvens. Isso faz com que a radiação solar global que chega na superfície terrestre seja fortemente atenuada (Moreira, 2004).

A radiação solar que volta para o espaço corresponde a 37% da incidente, sendo 26% refletida pelas nuvens e 11% pela dispersão das partículas que se encontram na atmosfera (Moreira, 2004). Os gases e vapor d'água são responsáveis pela absorção de 16% da radiação. Dessa forma, somando as quantidades de radiações que voltaram para o espaço mais aquela que foi absorvida pelos gases e vapor d'água, tem-se 53% de perda da radiação solar. Assim, do total que chega ao topo da atmosfera somente 47% atinge a superfície terrestre. Esta radiação recebe o nome de radiação solar global (R_g) (Moreira, 2004).

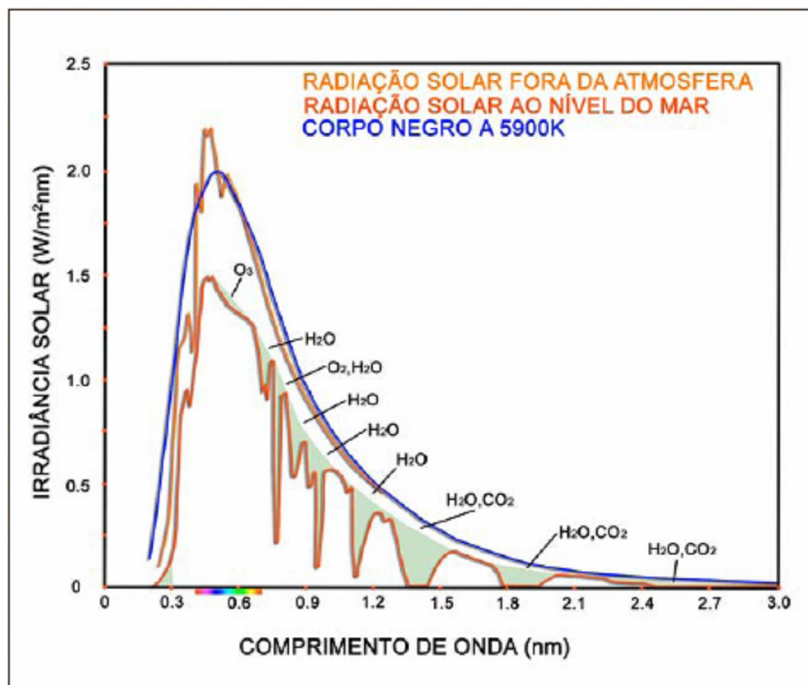


FIGURA 1. Curva de irradiância solar, mostrando a absorção da radiação pelos gases atmosféricos.

Fonte: <http://br.geocites.com.kawakami.enc/>

Na aquisição de dados através de sensoriamento remoto orbital, a interferência atmosférica não pode ser desprezada, sendo parte essencial, especialmente em estudos multitemporais. Já, através da radiometria ou espectroscopia de campo pode-se estabelecer uma base sólida para a interpretação de dados de sensoriamento remoto obtidos em diferentes níveis (aéreo ou orbital). A radiometria permite a eliminação do efeito da atmosfera na coleta de dados, uma vez que à distância entre o sensor e o alvo é mínima. Torna-se possível, também, um perfeito controle do ângulo de iluminação, eliminando dessa forma, fontes de variação na obtenção dos dados de sensoriamento remoto. Além disso, pode-se fazer uma descrição detalhada dos alvos que estão sendo observados, o que permite a construção de banco de dados com informações valiosas para a interpretação de alvos observados por outros sensores (Batista, 2005).

2.3 Comportamento espectral de folhas verdes

2.3.1 A estrutura das folhas

A folha é o órgão mais importante da planta, pois, além das trocas gasosas, é nela que estão localizadas as estruturas que interagem com a radiação. A interação da radiação incidente com a folha depende das características anatômicas, fisiológicas e morfológicas das mesmas (Ferri, 1984).

Das partes da planta, a folha é a que mais contribui em termos de energia refletida que será detectada pelos sensores óticos. Então, para entender o comportamento espectral e a interação da radiação eletromagnética com a vegetação, é necessário conhecer a anatomia e a fisiologia da folha.

A folha é constituída por três tecidos: epiderme, mesófilo fotossintético e tecido vascular (Figura 2). Ao redor da folha existe uma fina cutícula que protege e realiza as trocas gasosas, recebendo o gás carbônico e liberando o oxigênio. Internamente à cutícula existe uma camada de células unidas e desprovidas de clorofila, a epiderme (Cutter, 1986).

Os estômatos (poros da epiderme) ocorrem em todas as partes da planta, porém são mais abundantes na folha e podem ocorrer nas duas faces, ventral e dorsal, ou apenas na dorsal. Sua função é propiciar a comunicação do meio interno da folha com o meio externo, regulando as trocas gasosas. Os estômatos regulam a perda d'água da planta através do fechamento estomático. Este mecanismo fisiológico é fundamental para o estudo do comportamento espectral da vegetação no espectro do infravermelho termal, pois a redução da transpiração é acompanhada por um aumento da temperatura, o que ocasiona uma maior emissão da radiação eletromagnética (Cutter, 1986; Ferri, 1984).

O mesófilo é formado por células ricas em cloroplastos (partículas subcelulares, que ocorrem nos tecidos verdes das plantas, sendo responsáveis

pelo processo fotossintético), os quais contêm os pigmentos verdes (clorofilas). A clorofila é o elemento responsável pelo processo da fotossíntese (Nobel, 1970). Assim, para entender melhor a relação da folha com a energia solar é necessário conhecer a unidade básica e funcional da folha, a célula vegetal.

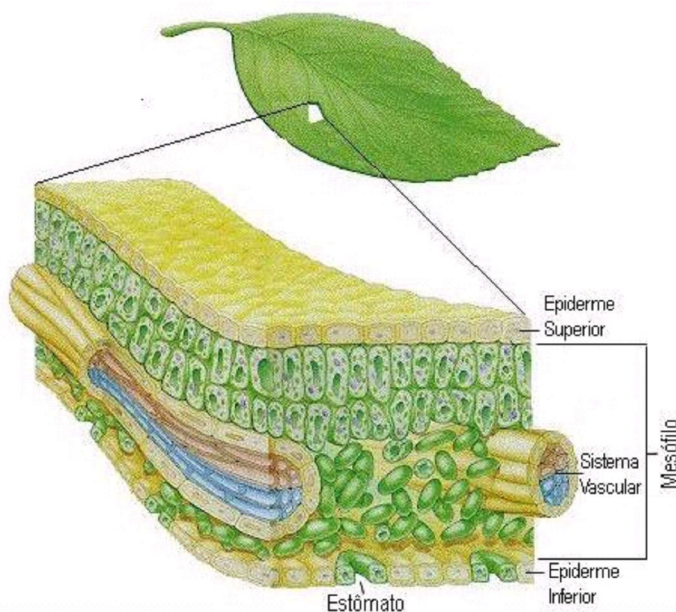


FIGURA 2. Diagrama característico da anatomia de uma folha típica.
 Fonte: <http://www.weslesley.edu/Biology/Courses/108/108.html>

A constituição de uma célula vegetal varia na quantidade e na forma de seus constituintes, implicando em formatos e tipologias diferentes para cada folha de uma dada espécie e entre espécies e, conseqüentemente, variações no seu comportamento espectral.

As células vegetais se diferenciam das animais por possuírem cloroplastos, parede celular e um vacúolo avantajado. Estes três elementos característicos da célula vegetal têm papel importante na interação com a radiação eletromagnética.

A parede celular é composta por três camadas celulares: a lamela média, a parede primária e a parede secundária. A presença de cutina na parede secundária restringe a perda de água pela célula (Taiz & Zeiger, 2004). A parede

celular é hidrófila, apresentando-se permanentemente hidratada. Quando hidratada, possui um índice de refração de 1,3, o que permite a ocorrência de reflexão na interface entre a parede celular e o ar.

Os vacúolos são regiões circundadas por uma membrana denominada tonoplasto, preenchidos pelo suco celular. O principal componente do suco celular é a água, sendo a presença dos demais componentes variáveis, de acordo com o tipo de planta e seu estado fisiológico. Nas células adultas, os vacúolos podem ocupar 90% do espaço total das células (Taiz & Zeiger, 2004). Isso influencia de forma indireta a interação da energia eletromagnética com a folha.

Valeriano (1988) explicou que a diferença de índice de refração entre o suco celular e o citoplasma é insuficiente para promover reflexão na sua interface. Entretanto, a pressão exercida pelo suco celular é capaz de modificar o tamanho e mesmo a forma da célula vegetal, ocasionando variações nas suas interfaces. Assim, modificações na área e orientação das interfaces acarretarão mudanças no padrão de reflexão das folhas. Isso explica porque a reflexão da radiação no interior da folha ocorre nas interfaces entre os espaços intercelulares e as paredes celulares.

2.3.2 Interação da radiação solar com a folha verde

Ao atingir um alvo a radiação solar pode ser refletida, absorvida ou transmitida. Os mesmos processos ocorrem nas folhas. Pela lei da conservação da energia, a soma das radiações refletida, absorvida e transmitida é igual à radiação incidente na folha. Em geral, se trabalha em termos relativos, utilizando as grandezas ditas absortância (α), transmitância (τ) e reflectância (ρ), cuja soma deve ser igual a 1 ou 100% (Steffen & Moraes, 1993).

A partição do fluxo de radiação incidente está diretamente relacionada às características de superfície da folha, bem como a outras características internas da espécie vegetal. Estudos mostram que há alta correlação entre a partição da radiação incidente nas folhas e as características fisiológicas de cada espécie (Moreira, 2004). Este é o fato que torna possível o monitoramento remoto da biomassa e estabelecimento de inferências sobre o estado das plantas.

O termo comportamento espectral da vegetação pode ser usado para representar as propriedades espectrais das folhas, dos galhos, de uma planta isolada ou de um conjunto de plantas (Ponzoni & Disperati, 1995).

A folha é o órgão mais importante da estrutura da planta para o estudo do comportamento espectral da vegetação. Nela, se processam todas as reações fotoquímicas, além de outras reações vitais para a planta como a respiração e transpiração (Moreira, 2004)

Na Figura 3 tem-se a representação teórica da partição da radiação em uma folha típica. Observa-se que os valores de reflectância e transmitância variam de forma muito semelhantes ao longo do espectro eletromagnético. Sabe-se, por outro lado, que a produção de biomassa é altamente relacionada com a quantidade total de energia absorvida pelas folhas (absortância). Como os valores de absortância são praticamente inversos aos de reflectância, e, considerando a possibilidade de medir os valores de reflectância com o uso de sensores remotos, é, portanto, viável estabelecer relações entre a reflectância e parâmetros de biomassa.

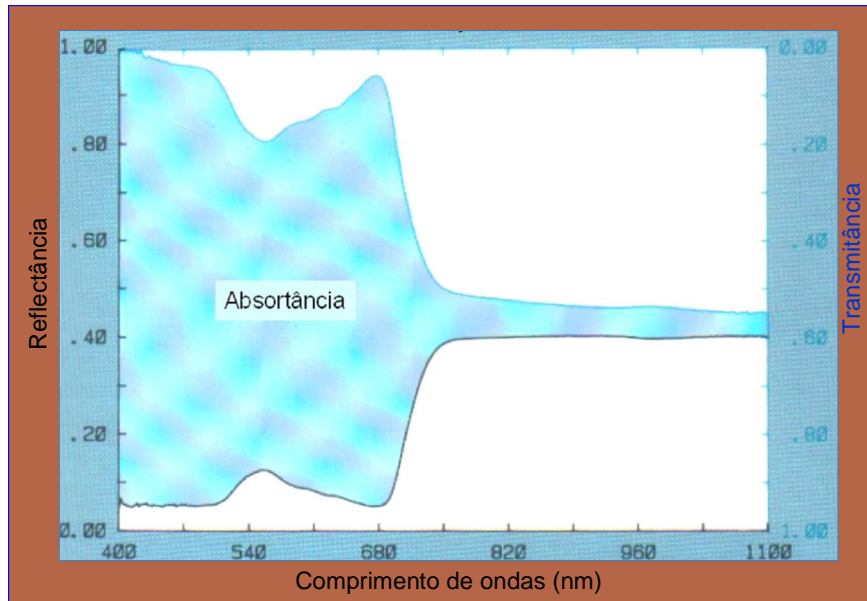


FIGURA 3. Reflectância, transmitância e absortância de folha típica (absortância = $1 - \text{transmitância} - \text{reflectância}$).
Fonte: Catálogo Li-Cor (1990).

Na Figura 4 é mostrada a curva de reflectância de folhas verdes ao longo do espectro solar, a qual varia de acordo com as faixas de comprimento de onda.

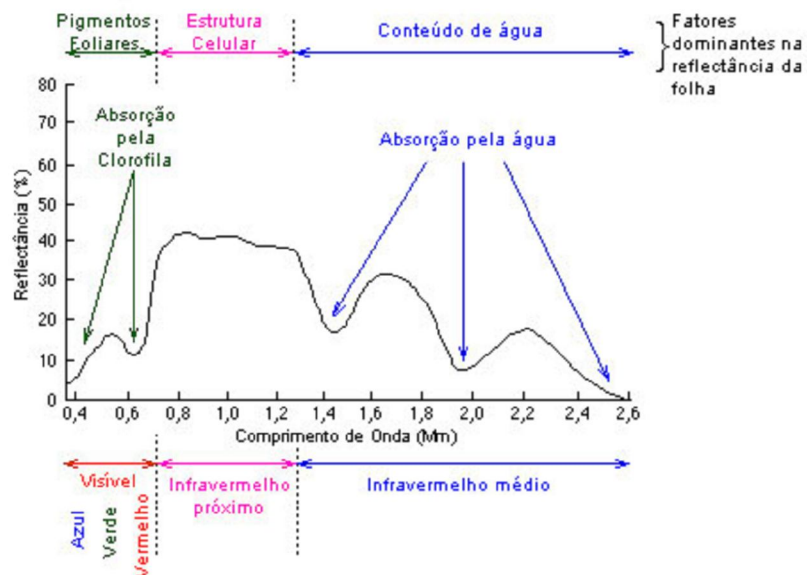


FIGURA 4. Curva de reflectância de uma folha típica sadia.
Fonte: SWAIN & DAVIS, 1978.

Na porção visível, como conseqüência da alta taxa de absorção, produzida pelos pigmentos presentes nos cloroplastos das folhas (Steffen & Moraes, 1993), tem-se uma baixa reflexão da radiação. A reflectância nesta faixa é, em média, 10% da radiação incidente.

As três principais classes de pigmentos encontrados em plantas são as clorofilas, os carotenóides e as ficobilinas. Os carotenóides e as ficobilinas são chamados de pigmentos fotossintéticos acessórios, uma vez que a energia absorvida por esses pigmentos pode ser transferida para a clorofila. As clorofilas são pigmentos que dão às plantas a cor verde. A clorofila *a* é verde-azulada e está presente em todos os organismos que liberam O_2 . A clorofila *b* é verde-amarelada, cujo teor é de cerca de 1/3 da clorofila *a*, está presente nas folhas de plantas superiores e nas algas verdes (Hall & Rao, 1980).

Os máximos de absorção da clorofila *a* em éter são 430 e 660 e da clorofila *b* 453 e 643nm (Figura 5). Os carotenóides são pigmentos amarelos ou alaranjados encontrados em todas as células fotossintetizantes. Possuem espectros de absorção entre 400 a 550nm e situam-se nas lamelas dos cloroplastos associados à clorofila. A energia absorvida por esses pigmentos pode ser transferida para a clorofila *a* para fotossíntese. Os carotenóides também podem proteger as moléculas de clorofila contra a foto-oxidação em luz excessiva (Hall & Rao, 1980).

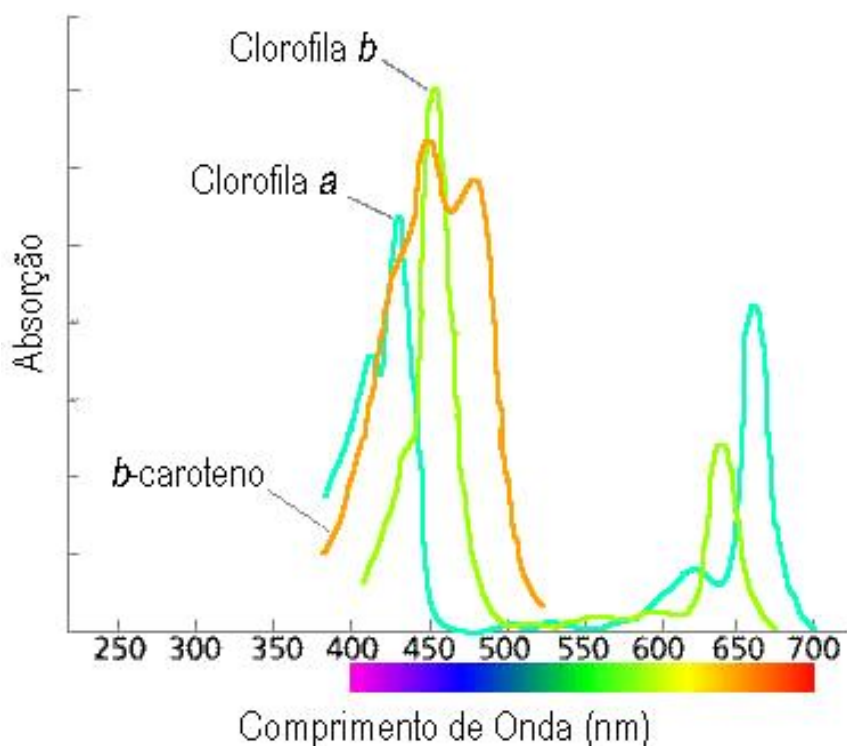


FIGURA 5. Espectro de absorção das clorofilas *a* e *b* e do β -caroteno.
Fonte: <http://www.merian.fr.schule.de/Beck/skripten/12/bs12-12.htm>.

Segundo Valeriano (1988), as proporções médias de pigmentos em plantas superiores são: 65% de clorofila, 6% de carotenos e 29% de xantofilas. Diversos fatores alteram essas proporções, como, por exemplo, a senescência foliar e a

desnutrição mineral. Reduções no teor de clorofila permitem a manifestação dos pigmentos auxiliares antes mascarados, num fenômeno denominado clorose.

Destaca-se, ainda, um pico na região visível do espectro eletromagnético de reflectância em torno de 500nm, correspondendo à região verde, o que explica a coloração verde das plantas.

A reflectância é maior na região do infravermelho próximo, devido ao maior espalhamento da radiação no mesófilo. A partir de 700nm, nota-se um gradiente acentuado que marca a transição para uma elevada reflectância nesta porção do espectro solar, a qual corresponde a, aproximadamente, 40 a 60% da radiação incidente. Até cerca de 1.300nm a reflectância mantém-se alta e está relacionada a características estruturais internas da folha, onde ocorrem múltiplas reflexões e refrações, associadas a descontinuidades de índices de refrações (Valeriano, 1988).

Nos comprimentos de onda correspondente ao infravermelho médio (1.100 a 3.000nm) a reflectância da vegetação passa a ser modulada pelas bandas de absorção da água, cujos picos ocorrem em 1.400, 1.900 e 2.700nm (Figura 4). Nestas bandas, então, valores muito baixos de reflectância são observados. Considera-se que a reflectância nesta faixa do espectro é função do teor de água presente na vegetação (Steffen & Moraes, 1993; Fontana, 1995).

Valeriano (1988) comenta a importância da região do infravermelho médio, por que ela integra as informações decorrentes da estrutura da folha àquelas decorrentes da presença de água, semelhante à região do infravermelho próximo. Esta faixa do espectro tem grande potencialidade de ser explorada na detecção de tipos de vegetação, permitindo um detalhamento muitas vezes não alcançado com a utilização das regiões do visível e do infravermelho próximo.

2.4 Comportamento espectral do solo

O solo apresenta uma contribuição variável ao conjunto do comportamento espectral de dosséis, especialmente no caso de culturas anuais como a soja. No início do ciclo, a contribuição do solo é grande, tendendo a diminuir à medida que ocorre o crescimento e desenvolvimento das plantas, com o conseqüente sombreamento do solo.

A reflectância espectral dos solos é influenciada por diversos fatores, dentre os quais destacam-se: a umidade, o teor de matéria orgânica, a estrutura, a granulometria, o material de origem e o teor de ferro (Ferri, 2002).

A Figura 6 mostra que a reflectância dos solos é crescente com o aumento do comprimento de ondas e tende a manter um padrão semelhante em diferentes classes de solos. Nesta figura são comparadas as reflectâncias dos horizontes A e B de duas classes de solo: Latossolo Vermelho distroférico típico (A) e Latossolo Amarelo ácrico típico (B). São apontadas as bandas de absorção no comprimento de onda de 900nm (Figura 6A) e a absorção pela goethita na porção visível do espectro eletromagnético (Figura 6B).

Informações detalhadas sobre o comportamento espectral de solos podem ser encontradas em Epiphanyo et al. (1992). Os autores realizaram um trabalho de revisão dos aspectos envolvidos no comportamento espectral dos solos, analisando 111 amostras das diversas classes de solos do Estado de São Paulo.

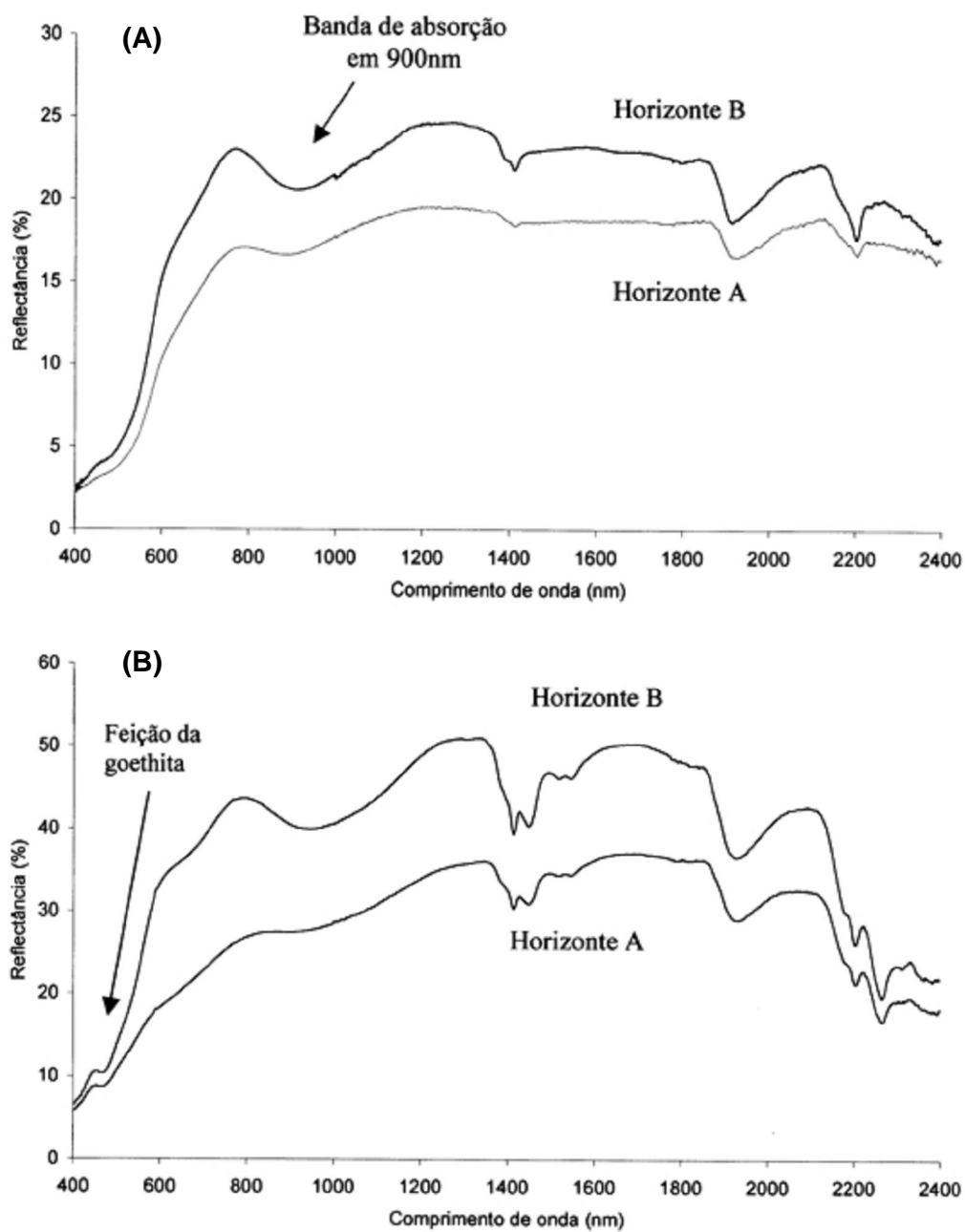


FIGURA 6. Curvas espectrais dos horizontes A e B de um Latossolo Vermelho distroférico típico (A) e de um Latossolo Amarelo ácrico típico (B). Fonte: Dalmolin (2002).

2.5 Comportamento espectral de dosséis

No item 2.3. foram discutidos aspectos da interação da radiação eletromagnética com a vegetação, em um enfoque direcionado a uma única folha verde isolada e sadia. Entretanto, quando se pretende utilizar o sensoriamento remoto para obter informações a respeito da cobertura vegetal de uma região da superfície terrestre, é preciso levar em consideração a interação da energia solar com a comunidade vegetal. As comunidades podem ser quase homogêneas, como áreas agrícolas, ou bastante heterogêneas, como é o caso de uma área ocupada por matas naturais, constituídas por diferentes espécies. É importante salientar que, mesmo em uma comunidade bastante homogênea, sempre há outros tipos de vegetação que ocupam o estrato inferior do solo e que, em certas fases do ciclo de crescimento e desenvolvimento, disputam água e nutrientes com as plantas predominantes, além disso terão maior ou menor participação na resposta espectral do conjunto (Moreira, 2004).

Portanto, o padrão de folha não pode ser generalizado para uma formação vegetal. Mesmo que os formatos das curvas sejam semelhantes, a reflectância espectral de dosséis depende de uma série de fatores como: espécie; índice de área foliar (mede a densidade de área foliar da qual é dependente a capacidade da vegetação de interceptar a radiação eletromagnética); distribuição horizontal das folhas (capacidade destas de conter 100% da radiação eletromagnética); distribuição vertical (distância que essas folhas estão no sentido vertical); ângulo de inserção foliar (regula o grau de penetração da radiação no interior da copa da planta); idade da planta (a capacidade das folhas de realizar fotossíntese aumenta até a maturidade fisiológica da planta, decrescendo até a completa maturação da folha); teor de água, conteúdo de pigmentos, características do solo (granulometria, água e seus nutrientes), tipo de sistema sensor, assim como das

condições atmosféricas. Todos estes fatores, portanto, devem ser levados em consideração para que se obtenha uma adequada identificação e quantificação da vegetação.

Dependendo do estágio de desenvolvimento e do arranjo de semeadura, a influência do solo na reflectância do dossel pode ser grande. Alguns autores, como Tucker (1979), Kollenkark et al. (1982) e Jackson et al. (1983) apontaram a influência da reflectância do solo sobre a reflectância espectral de dosséis (culturas agrícolas). Kollenkark et al. (1982) afirmaram que dados coletados sobre alvos vegetais, freqüentemente, representam uma mistura complexa das contribuições espectrais de plantas individuais, de sombras e de solos. Por exemplo, durante o dia os autores observaram grande variação de reflectância na banda espectral do vermelho, sendo os maiores valores encontrados quando o solo entre as fileiras estava iluminado, e os menores valores de reflectância quando o solo estava sombreado pelas plantas. No infravermelho próximo, as variações diurnas de reflectância foram menores do que as observadas no visível e não estavam, claramente, relacionadas com as interações sol / fileiras, como no visível. À medida que a cobertura do solo se aproximava de 100%, as variações diurnas de reflectância diminuiram.

Luz et al. (2003) analisaram os efeitos do cobre no solo sobre plantas de *Avena sativa* a partir de medidas de reflectância. Os resultados observados foram que plantas em solos com menores teores de matéria orgânica apresentaram maiores alterações na resposta espectral. As maiores alterações ocorreram na faixa do visível, enquanto que as mais sutis ocorreram na faixa do infravermelho. Plantas contaminadas apresentaram um maior crescimento em solo com alto teor de matéria orgânica natural, o oposto foi observado em plantas contaminadas em solo com baixo teor de matéria orgânica. Plantas fortemente intoxicadas

apresentaram alta reflectância, conseqüência das menores quantidades de energia absorvidas. As diferenças de reflectância na porção infravermelha do espectro, apesar de pequenas, foram significativas estatisticamente. Tratamentos com adição de matéria orgânica não produziram diferenças espectrais acentuadas.

Também, variação importante na reflectância de um dossel pode estar associada ao estado nutricional ou hídrico das plantas. Em termos de comportamento espectral da vegetação verde e sadia, o déficit hídrico provoca um aumento da porcentagem de reflectância próximo a 500nm, resultado da redução da atividade fotossintética e conseqüente ausência das bandas de absorção. Ocorre ainda um aumento nos valores de reflectância nos comprimentos de onda superiores a 1.300nm, atestando a ausência de absorção pela molécula de água (Steffen & Moraes, 1993).

O efeito secundário do conteúdo de água nas folhas decorre de variações na concentração de clorofila e desarranjo nas estruturas internas da folha. A redução do conteúdo de clorofila nas folhas propicia uma menor absorção de energia na região do visível e conseqüentemente, aumenta a reflectância nesta faixa espectral. Na região do infravermelho próximo, a reflectância aumenta em conseqüência de mudanças nas estruturas internas da folha e na região do infravermelho médio, a quantidade de água na folha expressa a baixa reflectância nessa faixa espectral.

Quando uma planta é submetida a um déficit hídrico, várias reações bioquímicas ocorrem em suas células. A primeira reação é o fechamento estomático que proporciona uma redução na perda de água, mas também reduz a taxa fotossintética devido à menor absorção do CO₂ do meio (Moreira, 2004).

O déficit hídrico reduz o Índice de Área Foliar (IAF) e também altera as condições de interação da radiação solar com o dossel, como consequência de alterações estruturais, assim como, de movimentos foliares.

2.6 Índices de vegetação

Índices de vegetação têm sido extensamente utilizados como sensíveis indicadores da presença e da condição de vegetação. Estes índices baseiam-se em combinações lineares, razões ou transformações ortogonais de várias bandas espectrais. Assim, reduzem-se todos os dados espectrais a um único valor, realçando a contribuição espectral da vegetação verde, minimizando a do solo, a do ângulo solar, a da vegetação senescente e a da atmosfera.

Os índices de vegetação possuem uma relação de dependência com as características estruturais e fisiológicas da vegetação. A geometria do dossel (ângulo de inserção, distribuição, orientação e espaçamento das folhas), as propriedades espectrais das folhas, bem como do solo, o teor de pigmentos, principalmente a clorofila, o conteúdo de água, o grau de senescência e os estresses ambientais ou nutricionais aos quais as plantas estão submetidas, são os fatores que modificam a reflectância de um dossel e podem ser caracterizados de forma adequada através dos índices de vegetação (Baret & Guyot, 1991).

Os principais índices de vegetação conhecidos são obtidos através de uma combinação de valores de reflectância da vegetação em duas faixas de comprimento de onda, visível (350-700nm) e infravermelho (730-1.100nm). Na faixa do visível há grande absorção da radiação incidente pelas clorofilas das plantas, enquanto que no infravermelho próximo há grande reflectância do mesófilo. O contraste entre as duas faixas de comprimento de ondas ressalta a vegetação, permitindo a identificação desta e das suas propriedades.

Na literatura são encontrados mais de 50 índices de vegetação. Entretanto, os índices de vegetação mais conhecidos e utilizados têm sido: a Razão Simples (SR do inglês *Simple, Ratio*), o Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada (NDVI do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*), o Índice de Vegetação Transformado (TVI do Inglês *Transformed Vegetation Index*), o Índice de Vegetação Perpendicular (PVI do inglês *Perpendicular Vegetation Index*), o Índice de Vegetação Ponderado (WDVI do inglês *Weight Difference Vegetation Index*) e o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI do inglês *Soil Adjusted Vegetation Index*).

Os resultados obtidos para os índices de vegetação podem ser números totalmente diferentes, devido ao emprego de equações diferentes, na mesma área amostral e na mesma medida radiométrica. Apesar da interpretação numérica ser diferente em cada tipo de índice de vegetação considerado, o importante é ter o conhecimento do índice e da aplicabilidade antes de optar por um ou outro índice (Moreira, 2004).

2.6.1 Relação com propriedades biológicas da vegetação

Diversos índices de vegetação têm sido propostos na literatura para derivar modelos de estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação como: teor de clorofila nas folhas, Índice de Área Foliar (IAF), densidade de biomassa, percentagem de cobertura de solo, radiação fotossinteticamente ativa absorvida, entre outros.

Antunes et al. (1993) estudaram a dinâmica do IAF, da fitomassa e dos índices de vegetação durante o ciclo de cinco variedades de soja para fins de monitoramento remoto. Os autores concluíram que a Razão Simples (SR) apresentou associação com as variáveis agrônômicas testadas, mas foram o

Índice de Vegetação Perpendicular (PVI) e o Índice De Vegetação Ponderado (WDVI) que apresentaram as melhores correlações, mostrando-se mais adequados para o monitoramento de culturas através de dados de sensoriamento remoto. Além disso, os autores sugeriram que as diferenças entre as parcelas, ao longo do ciclo da cultura, mostram a possibilidade de utilização para a separação de variedades através de índices.

Para a cultura do feijoeiro, Fideles Filho (2005) obteve coeficientes de determinação altos e significativos entre IAF e NDVI, o que demonstra que o NDVI é uma combinação espectral poderosa para estimar o IAF do feijoeiro em qualquer situação de tratamento hídrico.

Fonseca (1999) mediu a reflectância do dossel de *Paspalum notatum* submetido a diferentes níveis de nitrogênio e determinou os índices de vegetação NDVI e SR. O aumento de biomassa foi observado através dos valores de IAF. A autora verificou que os índices de vegetação apresentaram correlação significativa com as variáveis agrônômicas: índice de área foliar e matéria seca total, sendo que os coeficientes de correlação com o SR foram mais altos do que com o NDVI. Os altos valores de correlação obtidos entre os índices de vegetação e as variáveis agrônômicas mostraram ser possível a estimativa destas a partir dos valores dos índices de vegetação. O NDVI, entretanto, apresentou tendência de saturação em altos valores de IAF e biomassa, o que repetidamente aparece em trabalhos deste tipo (Antunes et al., 1993; Fideles Filho, 2005). Isto evidencia uma das principais limitações ao uso do NDVI: a falta de sensibilidade do índice em diferenciar a vegetação em condições de alta biomassa.

Hamada (2000) relacionou as variáveis biofísicas com os dados espectrais de campo obtidos por radiometria nos diferentes estádios de crescimento da cultura do trigo, avaliando a possibilidade de se estimar variáveis biofísicas a

partir de dados espectrais do NOAA e a possível dependência do estágio fenológico da cultura. As correlações estatisticamente significativas foram observadas nas datas referentes aos estádios de emborrachamento, início do espigamento e início e meio da maturação. No início do estágio de maturação, sete variáveis biofísicas foram correlacionadas significativamente, entre elas, a área foliar por planta, que também teve correlação significativa com os três índices de vegetação (RATIO, NDVI e TVI). As melhores correlações estatísticas entre as variáveis biofísicas e espectrais foram observadas entre o espigamento e a maturação média. De uma forma geral, as variáveis espectrais e biofísicas foram pouco ou nada correlacionadas no início e no final do ciclo de crescimento do trigo. Antes do início do espigamento, a evolução da reflectância foi, provavelmente, influenciada pela fração de área do solo, com restos de palhada da cultura anterior, no campo de visada do radiômetro.

2.6.2 Relação com padrões de crescimento e desenvolvimento

Outro enfoque no uso de técnicas de sensoriamento remoto aplicadas à vegetação é a utilização de dados de índices de vegetação para detecção de mudanças na condição da vegetação ao longo do tempo, o que tem sido denominado de perfis temporais. Segundo Fontana (1995), os perfis são baseados no desenvolvimento fenológico da vegetação, ou seja, nas mudanças estruturais da vegetação ao longo da estação de crescimento. As mudanças estruturais são gradativas com o tempo e resultam em correspondente mudança gradativa na reflectância espectral da vegetação. A caracterização dos perfis permite a diferenciação entre os diferentes tipos de vegetação. As mudanças na forma do perfil característico de uma determinada cultura podem estar associadas à condição e, em última instância, ao rendimento da mesma.

Monitorando a cultura do feijoeiro, Fideles Filho (2005) analisou a evolução do NDVI desde a semeadura até a colheita. O valor do NDVI, no dia da semeadura, correspondeu ao NDVI para o solo descoberto. Após, o NDVI aumentou em consequência do aumento do IAF da cultura do feijoeiro até o ponto máximo de área foliar. Na senescência, ocorreu perda total das folhas do feijoeiro, o IAF chegou a zero, mas devido a reflectância dos ramos, vagens e do solo, o NDVI apresentou valores diferentes de zero.

Para a cultura da soja no Rio Grande do Sul, a variação temporal de índices de vegetação obtido em imagens orbitais tem sido utilizada para fins de determinação de anomalias de crescimento (Jacóbsen et al., 2002), para a estimativa do rendimento de grãos de soja (Melo et al., 2008; Kruger, 2007) e também para fins de estimativa de área cultivada (Wagner et al., 2007). Estes resultados evidenciam o grande potencial de uso de informações derivadas de sensoriamento remoto em programas de monitoramento e previsão de safras.

3 Material e Métodos

3.1 Descrição da área experimental

Os dados apresentados nesta dissertação fazem parte de um conjunto amplo de medições obtidas em um experimento de campo conduzido durante o ano agrícola 2003/04 em uma área de 0,5ha, pertencente ao Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Eldorado do Sul.

A Estação Experimental Agronômica da UFRGS está localizada na Região Ecoclimática da Depressão Central. A sede da EEA/UFRGS está localizada à latitude 30°05'27" Sul, longitude 51°40'18" Oeste e altitude 46m. Segundo Bergamaschi et al. (2003) o clima na Estação Experimental Agronômica da UFRGS e áreas circunvizinhas pertence à variedade Cfa (Köppen, 1948) – subtropical úmido com verão quente. Ele se caracteriza pela forma B₁rB'₃a' – mesotérmico úmido, com pouca deficiência hídrica e com evapotranspiração do verão inferior a 48% da total anual (Thorntawaite, 1948).

A maior extensão da EEA é ocupada pelas unidades de mapeamento São Jerônimo (Argiloso Vermelho Distrófico) e Arroio dos Ratos (Argiloso Vermelho Distrófico típico), segundo a classificação da Embrapa (1999).

3.2. Condições hídricas do período experimental

A partir de dados meteorológicos decendiais da Estação Experimental Agronômica da UFRGS, foram calculados os balanços hídricos: normal (1971-2000) e do período experimental (2003/04). Utilizou-se o método Thornthwaite & Mather (1955), sendo a evapotranspiração foi calculada pelo método de Penman (1948) utilizando uma capacidade de armazenamento de água disponível no solo (CAD) de 75mm. O déficit hídrico foi representado de forma gráfica.

3.3 Cultura e delineamento experimental

A cultivar de soja utilizada foi a Fepagro-RS10 de ciclo tardio, semeada em 20 de novembro de 2003, com espaçamento entre linhas de 0,40m e população de 300 mil plantas.ha⁻¹. O delineamento experimental adotado foi o trifatorial em blocos ao acaso, em faixas para os fatores sistema de preparo do solo e níveis de irrigação, com subparcela no tempo (épocas de avaliação). Uma visão geral da área é mostrada nas Figuras 7 e 8. Os tratamentos foram: plantio direto não irrigado (DNI), plantio direto irrigado (DI), preparo convencional irrigado (CI) e preparo convencional não irrigado (CNI).



FIGURA 7. Área experimental de 0,5ha, localizada na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, Município de Eldorado do Sul – RS. Vizinha a área experimental encontra-se a estação meteorológica.

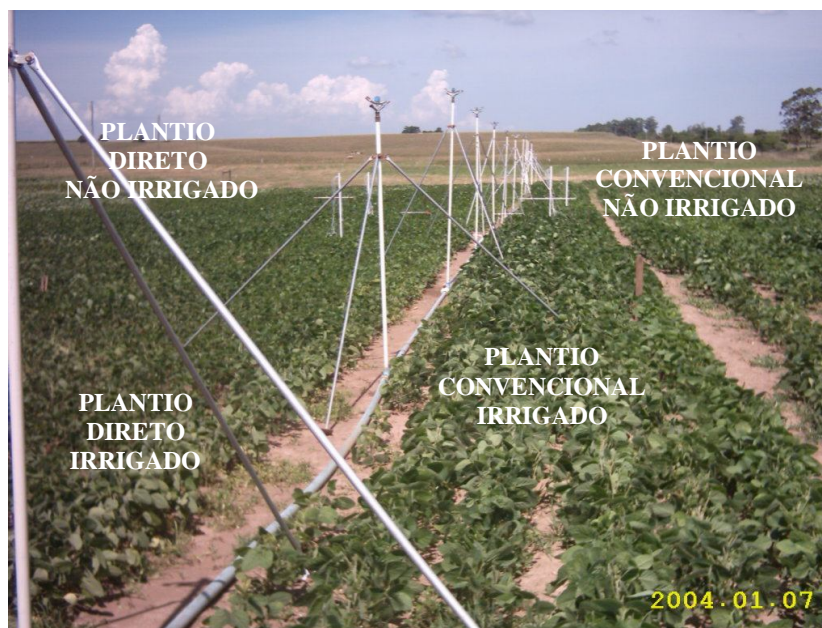


FIGURA 8. Detalhe do delineamento experimental, com a distribuição dos tratamentos e posição da linha de aspersores.

3.4 Medições e determinações espectrais

Durante o desenvolvimento da cultura foram realizadas campanhas de monitoramento para avaliar as respostas espectrais das plantas, sob diferentes condições hídricas e sistemas de preparo do solo.

3.4.1 Equipamento

O equipamento utilizado foi um espectrorradiômetro marca LI-COR, modelo LI-1800, com uma resolução espectral de 2nm, nos comprimentos de onda compreendidos entre 300nm e 1.100nm, pertencente à Embrapa –Trigo de Passo Fundo - RS.

O espectrorradiômetro utilizado é um equipamento óptico-eletrônico que foi utilizado para medir as radiâncias das amostras em um conjunto de bandas espectrais estreitas e sucessivas. Os principais componentes deste equipamento são mostrados na Figura 9 (Steffen & Moraes 1993):

Receptor ou coletor - concentra o fluxo de radiação, contido no campo de visada, proveniente da amostra sobre o detector.

Filtro – seleciona a banda espectral do fluxo de radiação que atinge o detector.

Detector – é um dispositivo de estado sólido, feito de materiais cujas propriedades elétricas variam ao absorver um fluxo de energia radiante; podendo ser medidas, então o sinal elétrico produzido é amostrado pelo processador. O sinal de saída do detector é bastante pequeno e deve ser amplificado e filtrado pelo processador para diminuir o ruído antes de ser liberado para o dispositivo de digitalização e gravação. Se o fluxo de radiação no detector for nulo, o sinal de saída ainda tem um pequeno valor que varia aleatoriamente ao longo do tempo e cuja intensidade depende da qualidade e da temperatura do detector. Mesmo

quando o fluxo de radiação é significativo, o ruído está presente, degradando o sinal de saída. A degradação é tanto maior quanto maior for a temperatura do detector. Para minimizar o ruído, o radiômetro pode incorporar um sistema para a refrigeração dos detectores.

Processador – sistema eletrônico capaz de realizar a amplificação do foco sinal elétrico gerado pelo detector; o processador pode filtrar esse sinal para diminuir o seu nível de ruído e realizar a sua conversão para valores binários.

Unidades de saída – registram ou indicam a amplitude dos sinais provenientes do processador.

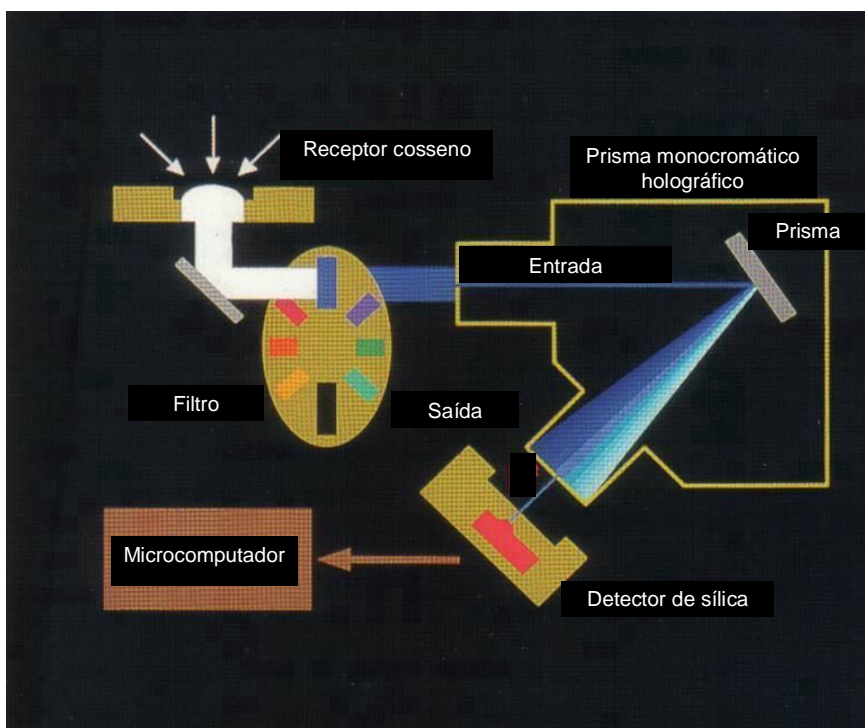


FIGURA 9. Esquema de funcionamento do espectrorradiômetro.
Fonte: Li-Cor, 1990.

3.4.2 Partição da radiação em folíolos

Durante o ciclo, foi determinada a partição da radiação incidente sobre os folíolos de soja nos componentes: transmitância, reflectância e absortância. O trabalho consistiu na coleta aleatória de folíolos da última folha expandida dos quatro tratamentos utilizando-se três repetições para cada um deles. Este procedimento foi realizado em laboratório, sendo que as folhas foram coletadas e armazenadas, por um curto espaço de tempo, em sacos plásticos para evitar a desidratação. As medições foram realizadas imediatamente após a coleta de cada um dos tratamentos.

Para a realização das determinações em laboratório, a esfera integradora foi acoplada ao espectrorradiômetro LI-1800.

A esfera integradora LI-1800 é um instrumento que mede a radiação refletida e a transmitida do material amostral (Figura 10 e 11). A iluminação é feita por uma fonte externa de luz (lâmpada) halógena, presente em um cone com um diâmetro de 1,14cm, que restringe a iluminação na folha. A esfera possui cinco entradas, sendo que a entrada onde é colocada a amostra de folha mede 1,45cm de diâmetro e a entrada para observação mede 0,64cm de diâmetro. A parte interna da esfera é recoberta com sulfato de bário, assim como a placa de referência utilizada.



FIGURA 10. Funcionamento da esfera integradora do espectrorradiômetro LI-1800.

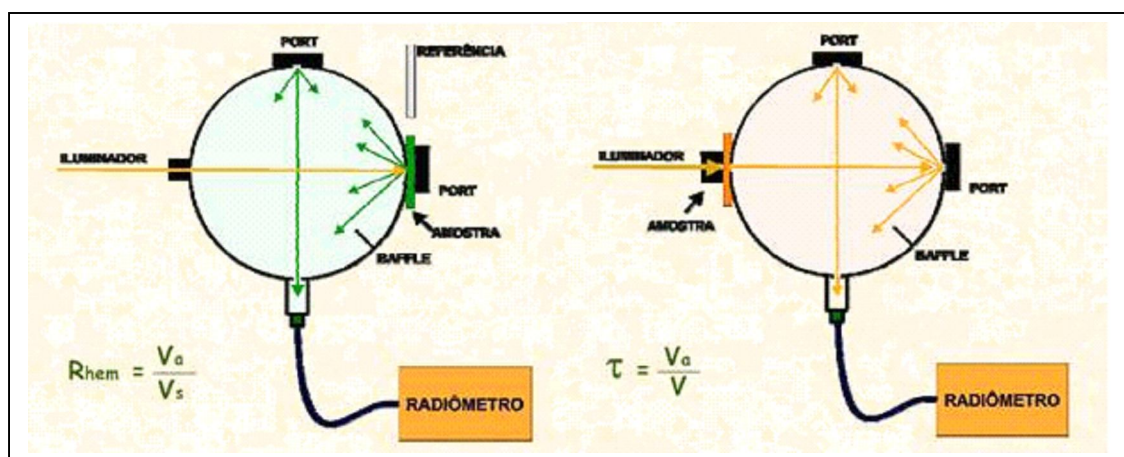


FIGURA 11. Esquema de funcionamento da esfera integradora do espectrorradiômetro LI-1800. À esquerda está representada a medição da energia refletida pela amostra e à direita a energia transmitida. Fonte: Steffen, 2004.

Com o uso da esfera integradora foram medidas a energia incidente (referência), a energia refletida e a energia transmitida pelos folíolos de soja. Após, foram determinados os componentes: transmitância (τ_λ - razão entre a energia transmitida e a incidente) e reflectância (ρ_λ - razão entre a energia

refletida e a incidente). Os valores do componente absorptância (α_λ - razão entre a energia absorvida e a incidente) foram obtidos através da equação:

$$\alpha_\lambda = 1 - (\rho_\lambda + \tau_\lambda) \quad (1)$$

As determinações em laboratório foram feitas nos dias: 7 de janeiro, 9 de fevereiro, 2, 9, 24 e 30 de março e 15 e 20 de abril de 2004, o que correspondeu aos 41, 74, 95, 102, 117, 123, 139 e 144 dias após a emergência (DAE), respectivamente.

3.4.3 Reflectância no solo

As medições da reflectância do solo foram realizadas em três datas: 7 de janeiro, 9 de fevereiro e 2 de março de 2004 (41, 74 e 95 DAE) para quatro condições de solo: exposto (seco e úmido) e coberto com palha (seco e úmido).

3.4.4 Reflectância no dossel

As medições de reflectância do dossel foram feitas com o telescópio do espectrorradiômetro LI -1800, o qual foi instalado em um tripé, de forma que as medidas foram tomadas a 1m acima do topo da cultura ou da superfície do solo.

A referência utilizada foi uma placa lambertiana, cujo espectro de reflectância é conhecido, marca Labsphere modelo SRT-50-050.

As medições foram realizadas em dias de céu com ausência de nebulosidade (preferencialmente), entre 11 e 13h (horário local), quando o ângulo de elevação solar é superior a 75°. A reflectância do dossel de soja foi calculada a partir da razão entre a medida de radiância do dossel e da radiância da placa de referência, realizada imediatamente após. Para cada um dos tratamentos foram feitas três medições (repetições). As determinações de dossel ocorreram em

quatro datas: 7 de janeiro, 2 e 9 de março e 20 de abril de 2004 (41, 95 102 e 144 DAE, respectivamente).



Figura 12. Determinações de campo. Medições da radiação no dossel de soja (A) e do solo coberto com palha (B), placa de referência (C) e teclado para operação do sistema (D). Eldorado do Sul, RS, 2003/04.

3.5 Medições e determinações de planta

3.5.1 Área foliar

Para a obtenção do Índice de Área Foliar (IAF) foram realizadas coletas semanais de plantas de um segmento de linha de 0,5m de cada uma das repetições dos quatro tratamentos. A área foliar foi medida em planímetro eletrônico marca LI-COR 3100+100. Inicialmente, foram utilizadas todas as plantas coletadas. Posteriormente, devido à grande produção de biomassa, foram

medidas somente trinta por cento das folhas das plantas coletadas de cada parcela. Nesta dissertação, os dados de IAF dos dias de determinações foram estimados por um modelo ajustado em função de dias após a emergência (DAE), estabelecido por Martorano et al. (2005) (Apêndice 1).

3.5.2 Teor de clorofila

A determinação dos teores de clorofila foi feita a partir dos folíolos coletados para as determinações da partição da radiação, realizadas com a esfera integradora (item 3.4.2). O trabalho consistiu na retirada de cinco discos foliares de 1cm de diâmetro de cada folíolo, com três repetições. O material armazenado, foi mergulhado em álcool a 96° (P. A), por quatro dias ao abrigo de luz, calor e umidade excessivos.

A partir deste material foram medidos os teores de clorofila *a* e *b* através da determinação da absorvância nos comprimentos de onda 649 e 665nm, usando um espectrofotômetro marca Beckman, modelo DU-65, conforme metodologia descrita por Wintermans e De Mots (1965). Este procedimento foi feito nas datas de medições: 9 de março e 20 de abril de 2004 (102 e 144 DAE, respectivamente).

Os discos retirados das folhas foram secos em estufa. Com os resultados de matéria seca obtidos, após a pesagem foi possível relacionar a matéria seca das folhas e o teor de clorofila.

3.5.3 Índices de vegetação

Com os valores da reflectância medidos nas faixas de comprimento de ondas correspondentes ao vermelho (630-690nm) e ao infravermelho próximo (760-900nm) do espectro eletromagnético, comprimentos compatíveis com os satélites de recursos naturais mais utilizados, foram determinados alguns dos índices de vegetação, os quais freqüentemente aparecem na literatura. As equações utilizadas para o cálculo de cada índice de vegetação foram as seguintes:

Razão Simples (SR) (Rouse et al., 1973):

$$SR = \frac{\rho_{iv}}{\rho_v} \quad (2)$$

Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Rouse et al., 1973):

$$NDVI = \frac{(\rho_{iv} - \rho_v)}{(\rho_{iv} + \rho_v)} \quad (3)$$

Índice de Vegetação Transformado (TVI) (Rouse et al., 1974):

$$TVI = \sqrt{\left[\frac{\rho_{iv} - \rho_v}{\rho_{iv} + \rho_v} \right]} + 0,5 \quad (4)$$

Índice de Vegetação Perpendicular (PVI) (Richardson e Wiegand, 1977):

$$PVI = \sqrt{(\rho_{v:so} - \rho_{v:vg})^2 + (\rho_{iv:so} - \rho_{iv:vg})^2} \quad (5)$$

Índice de Vegetação Ponderado (WDVI) (Clevers, 1989):

$$WDVI = \rho_{iv} - \left[\left(\rho_{iv:so} / \rho_{iv:so} \right)_{\rho_v} \right] \quad (6)$$

Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) (Huete, 1988):

$$SAVI = \left[\frac{(\rho_{iv} - \rho_v)}{(\rho_{iv} + \rho_v + L)} \right] (1 + L) \quad (7)$$

Onde ρ_{iv} é a reflectância no infravermelho; ρ_v é a reflectância no vermelho; $\rho_{iv:so}$ e $\rho_{iv:vg}$ é a reflectância no infravermelho do solo e da vegetação, respectivamente; $\rho_{v:so}$ e $\rho_{v:vg}$ é a reflectância no vermelho do solo e da vegetação, respectivamente; e L é a soma dos valores das coordenadas x e y do ponto em que a linha do solo intercepta a linha gerada pela resultante entre PVI e NDVI.

3.6 Análises

A partir dos dados coletados durante o período experimental procedeu-se a:

a) Confecção de gráficos da absorptância, transmitância e reflectância dos folíolos de soja ao longo do espectro de medição, nos diferentes tratamentos, ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura;

b) Confecção de gráficos da reflectância do solo ao longo do espectro de medição nas condições: seco, úmido, exposto e coberto;

c) Confecção de gráficos da reflectância do dossel da soja ao longo do espectro de medição, para todas as datas de medição e para os dois sistemas de manejo e de irrigação;

d) Confecção de gráficos comparativos da evolução temporal da reflectância do dossel nas bandas do vermelho e do infravermelho ao longo do período experimental;

Para a confecção de gráficos foram descartados os intervalos de comprimento de onda que apresentaram ruídos (abaixo de 420nm e acima de

1000nm). Os dados de algumas determinações de campo não puderam ser utilizados, devido a problemas de funcionamento do equipamento.

e) Estabelecimento de correlação entre os valores da reflectância no vermelho e no infravermelho e parâmetros de crescimento das plantas como o IAF (índice de área foliar) e teor de clorofila;

Foi testada a significância dos coeficientes de correlação através do teste *T-student* para o nível de significância de 95%.

f) Comparação entre os índices de vegetação avaliados nos diferentes tratamentos;

O teste de comparação de médias entre tratamentos foram feitos no programa estatístico SAS, considerando o nível de probabilidade de 95%.

g) Análise do desempenho dos índices de vegetação testados e dos indicadores de crescimento das plantas de soja, com ajuste de funções de estimativa.

As funções foram ajustadas no programa SigmaPlot e testados os coeficientes de determinação considerando o nível de probabilidade de 95%. O critério de escolha da melhor função foi baseado no valor do coeficiente de determinação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das condições meteorológicas do período experimental

Durante o período experimental foi observada a ocorrência de déficit hídrico superior à condição normal da região (Figura 13). O maior déficit hídrico foi de 39mm, ocorrido no segundo decêndio de janeiro, quando a cultura estava em início de ciclo. Após, ocorreram déficits hídricos importantes no primeiro decêndio de fevereiro, com 33mm, no segundo decêndio de março, com 29mm e no primeiro decêndio de abril, com 32mm. Esta condição impôs uma restrição hídrica à cultura durante todo o período experimental, tanto nos períodos vegetativos como reprodutivos, diferenciando as condições de crescimento e desenvolvimento entre os tratamentos irrigados e não irrigados. Mesmo nos tratamentos irrigados ocorreu uma deficiência hídrica de 111mm ao longo do ciclo, provavelmente decorrentes de problemas temporários nos equipamentos de irrigação. Estas diferenças foram amplamente avaliadas por Martorano (2007).

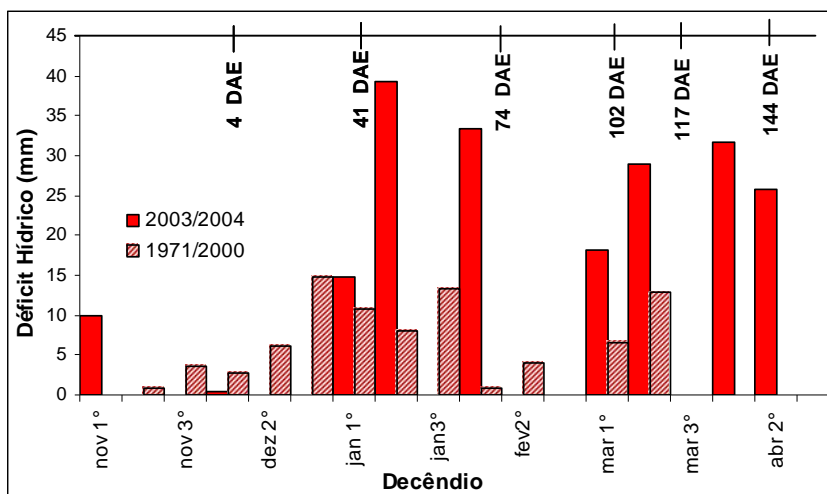


FIGURA 13. Déficit hídrico decendial para os meses de novembro a abril na EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, normal de 1971 a 2000 (Bergamaschi et al. 2003) e no período experimental 2003/04. Números acima representam os dias de realização de medições espectrais expressos em termos de dias após a emergência (DAE).

4.2 Resposta espectral dos folíolos de soja

Da análise realizada com os folíolos de soja para diversos dias, a Figura 14 mostra a partição da radiação para o dia 9 de março (102 DAE), quando a cultura estava em pleno crescimento. Verifica-se, nesse dia, o padrão esperado para folíolos verdes bem desenvolvidos. A reflectância e a transmitância foram semelhantes, apresentando valores menores no espectro visível e maiores no infravermelho em relação à absorptância, que apresentou um padrão inverso.

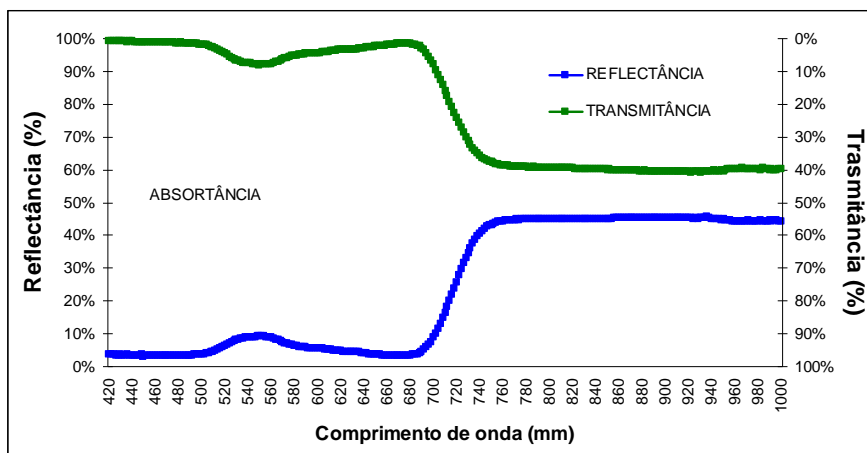


FIGURA 14. Reflectância, transmitância e a absortância em folíolos de soja, 102 DAE. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

Diferenças na partição da radiação incidente sobre os folíolos de soja foram observadas entre as datas de medições, ou seja, ao longo do ciclo. Mas, em cada data, quando comparados os quatro tratamentos avaliados, o padrão observado para os componentes absortância, reflectância e transmitância foi semelhante (Figuras 15 a 18).

De forma geral, no início do ciclo (41 DAE) as folhas jovens e com menor espessura foram caracterizadas, na porção visível do espectro eletromagnético, por valores intermediários de reflectância, transmitância e absortância em relação aos demais dias de medição. Na porção do vermelho, como consequência da alta taxa de absorção, produzida pelos pigmentos presentes nos cloroplastos das folhas (Steffen & Moraes, 1993), teve-se uma baixa reflectância. No final do período de desenvolvimento (102 DAE), com os folíolos bem estruturados, foi observado que a reflectância e a transmitância foram menores e a absortância passou a ter a maior magnitude.

No período de senescência (139 DAE) e conseqüente colapso das estruturas celulares, foi observado padrão semelhante ao início do ciclo, somente com o componente reflectância bastante superior (Figuras 15, 16, 17 e 18A).

Analisando as diferenças entre tratamentos nas diferentes datas, verifica-se que, na porção visível, os padrões espectrais foram semelhantes nos quatro tratamentos. Os maiores valores de reflectância foram observados no final do ciclo (139 DAE) e os menores valores quando a cultura estava em pleno desenvolvimento (102 DAE) (Figuras 15, 16, 17 e 18A).

Quando o componente analisado foi a transmitância no espectro visível, os maiores valores para os tratamentos DNI e DI (Figuras 15 e 16B) foram observados no início do ciclo (41 DAE), enquanto que os tratamentos CNI e CI (Figuras 17 e 18B) apresentaram os maiores valores no final do ciclo (139 DAE). Os menores valores de transmitância ocorreram no período de pleno desenvolvimento (102 DAE) para todos os tratamentos.

Ainda no espectro visível, a absortância (Figuras 15, 16, 17 e 18C) foi maior no período de pleno desenvolvimento (102 DAE), sendo que os menores valores ocorreram no final do ciclo (139 DAE), no período de senescência, caracterizando um padrão inverso aos anteriores. Na porção infravermelha do espectro eletromagnético, foram observadas pequenas diferenças entre tratamentos ao longo do ciclo.

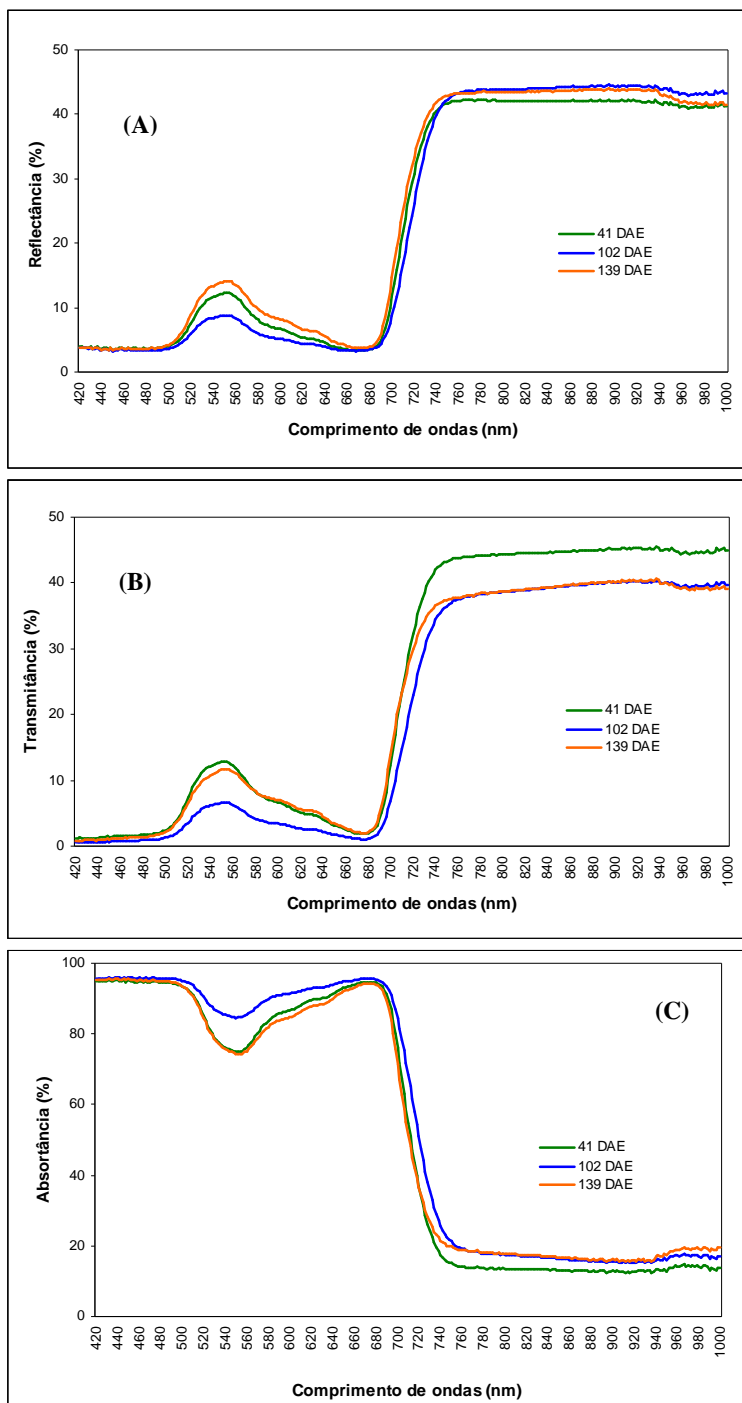


FIGURA 15. Reflectância (A), transmitância (B) e a absorvância (C) em folíolos de soja aos 41, 102 e 139 dias após a emergência (DAE) para o tratamento plantio **direto não irrigado (DNI)**. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

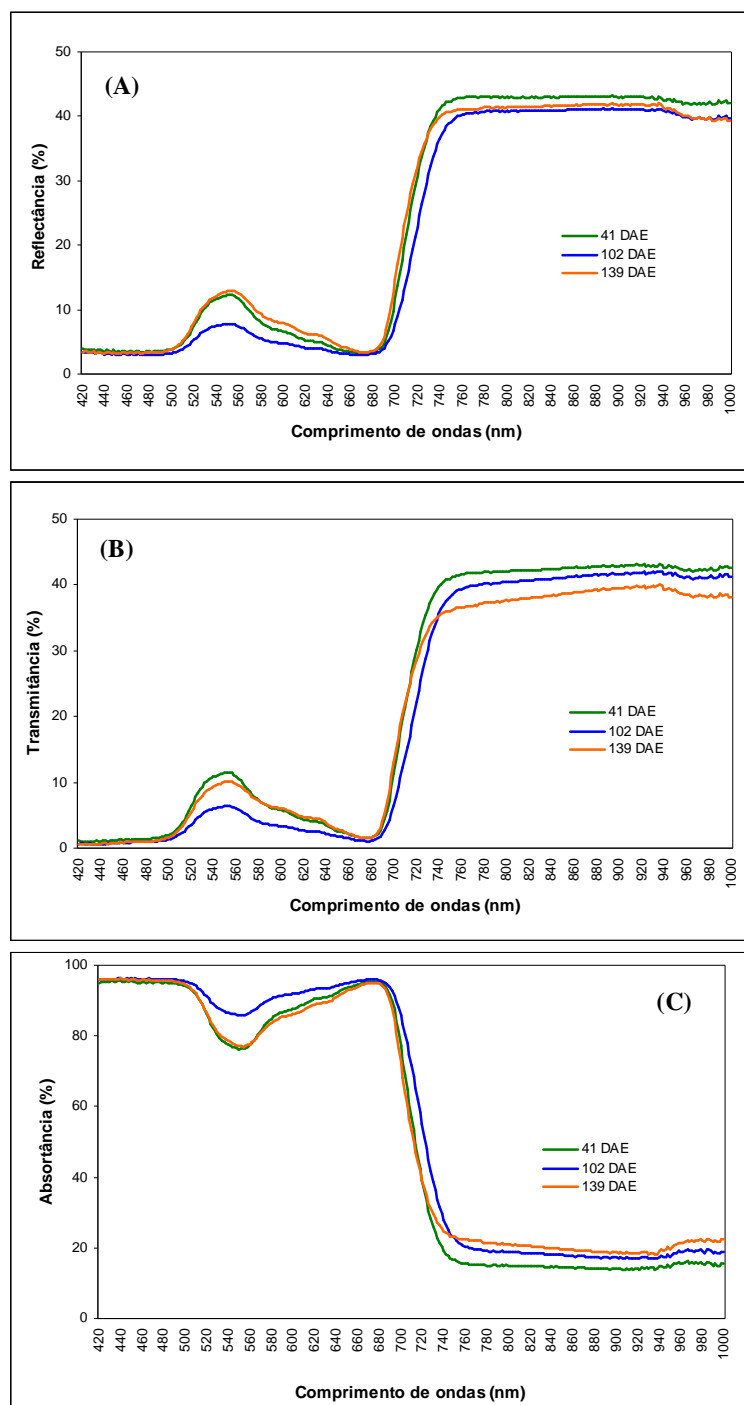


FIGURA 16. Reflectância (A), transmitância (B) e a absorvância (C) em folíolos de soja aos 41, 102 e 139 dias após a emergência (DAE) para o tratamento plantio **direto irrigado (DI)**. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

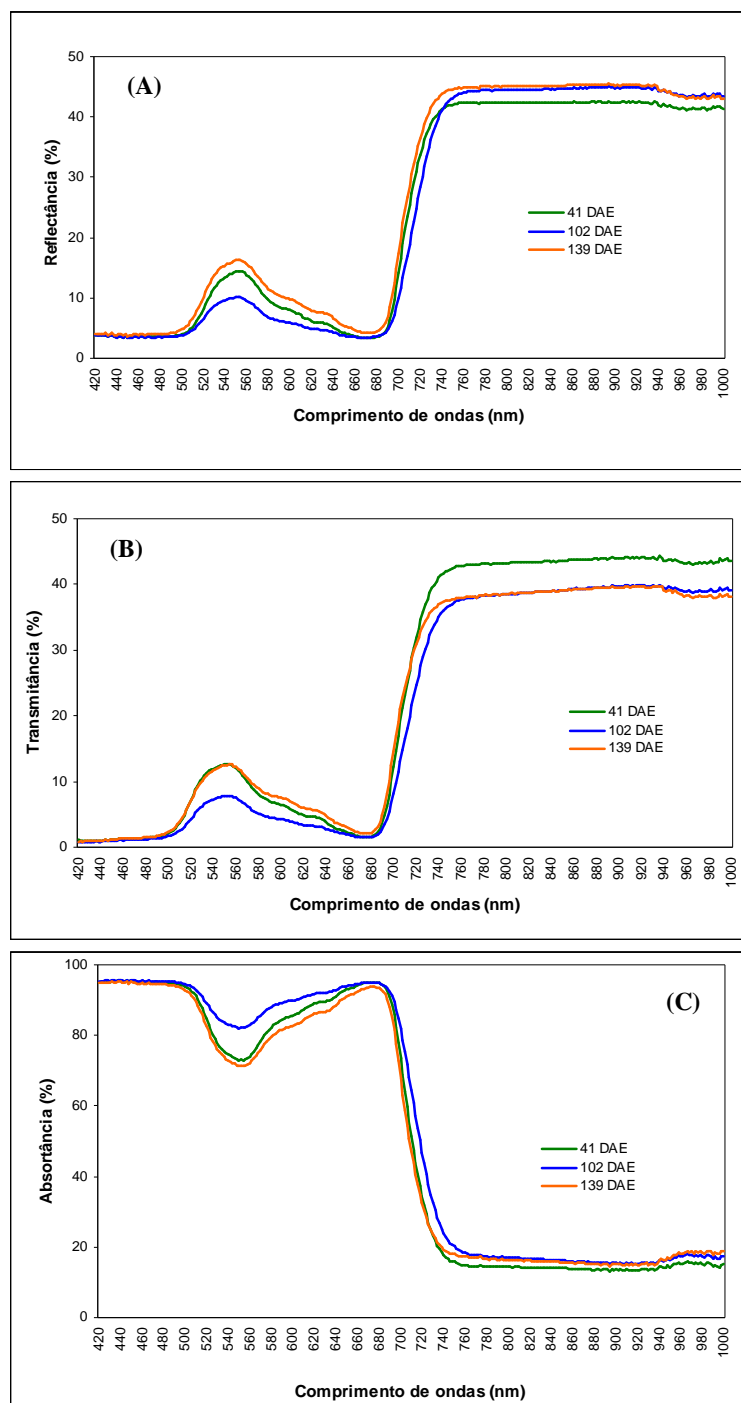


FIGURA 17. Reflectância (A), transmittância (B) e a absorvância (C) em folíolos de soja aos 41, 102 e 139 dias após a emergência (DAE) para o tratamento preparo **convencional não irrigado (CNI)**, EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

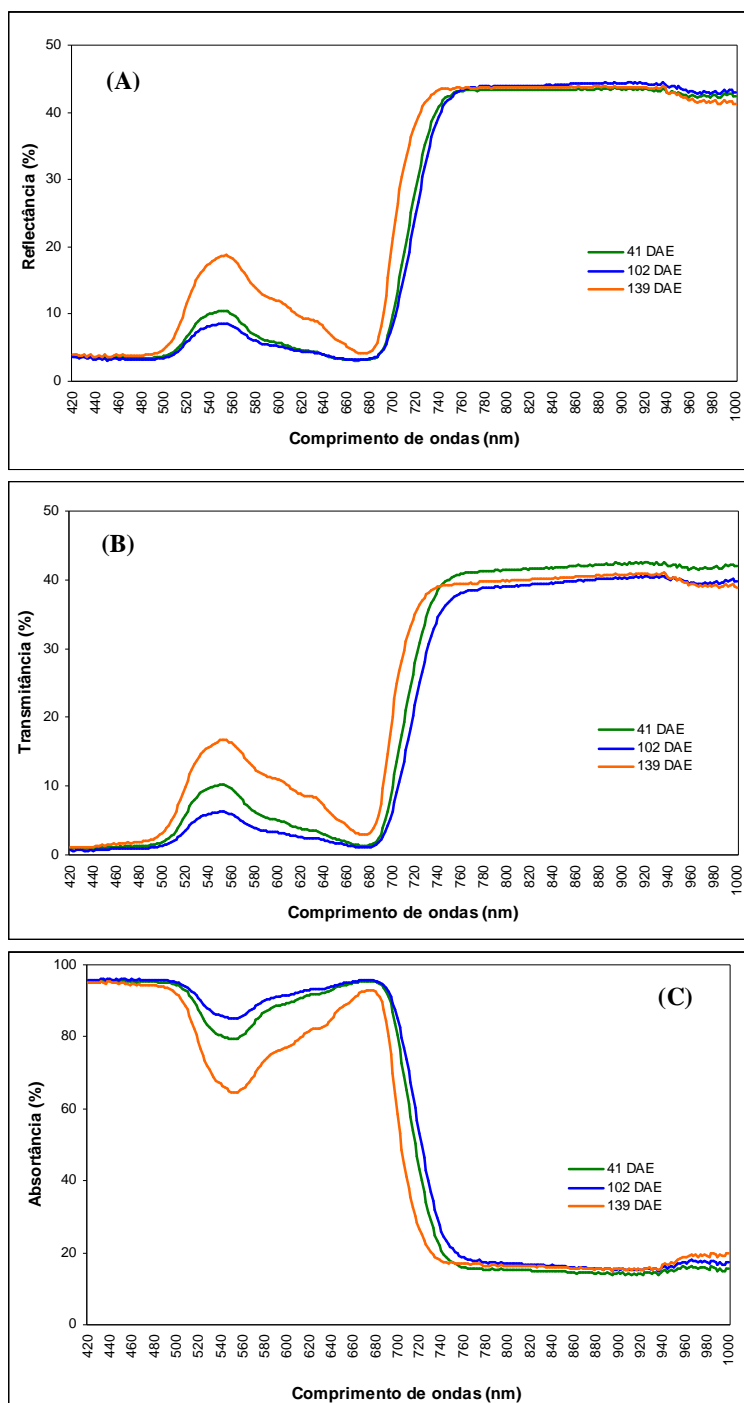


FIGURA 18. Reflectância (A), transmitância (B) e a absortância (C) em folíolos de soja aos 41, 102 e 139 dias após a emergência (DAE) para o tratamento preparo **convencional irrigado (CI)**. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

Os resultados da reflectância em folíolos nas porções do vermelho e do infravermelho do espectro eletromagnético ao longo do período experimental (Figura 19), mostraram a tendência esperada: valores mais baixos na porção vermelha e, mais altos na porção infravermelha, apresentando algumas variações ao longo do ciclo da cultura.

Aos 41 DAE todos os tratamentos apresentaram valores de reflectância na porção visível do espectro eletromagnético em torno de 4%, que se manteve aproximadamente constante ao longo do período de avaliação.

Três dos quatro tratamentos, DI (Figura 19C), CI (Figura 19D), e CNI (Figura 19B), apresentaram queda nos valores de reflectância na porção visível do espectro eletromagnético aos 74 DAE, logo após a ocorrência de déficit hídrico de 33mm. O fato de ocorrer uma redução dos valores de reflectância mesmo nos tratamentos irrigados, possivelmente seja decorrente dos problemas temporários ocorridos nos equipamentos de irrigação, conforme descritos por Martorano (2007).

Os menores valores de reflectância na porção vermelha do espectro eletromagnético foram observados aos 144 DAE em três dos tratamentos (CI, DI e DNI). Nesta data, as plantas já se encontravam em senescência e, conseqüentemente, seus folíolos já mostravam algum grau de desestruturação dos tecidos. O tratamento CNI, à exceção dos demais, apresentou valores mais elevados de reflectância, o que pode ser decorrência do fato de que este tratamento, mesmo no final de ciclo, apresentava ainda folhas verdes. Durante o período experimental foram observados períodos de déficits hídricos significativos, desta forma as plantas que não receberam irrigação sofreram estresse hídrico, comprometendo a formação de grãos. Isto ocasionou a retenção foliar ou "soja louca", que é uma reação natural da planta à falta de grãos (dreno)

e legumes. As plantas em sistema de plantio direto, que conserva o solo e a água, mesmo sem receberem irrigação, não apresentaram esta reação. Isto, segundo Martorano (2007), reforça a premissa de que plantas em sistema convencional tendem a manter as folhas por mais tempo, enquanto que as plantas em plantio direto perdem as folhas drenando suas reservas para a formação de grãos.

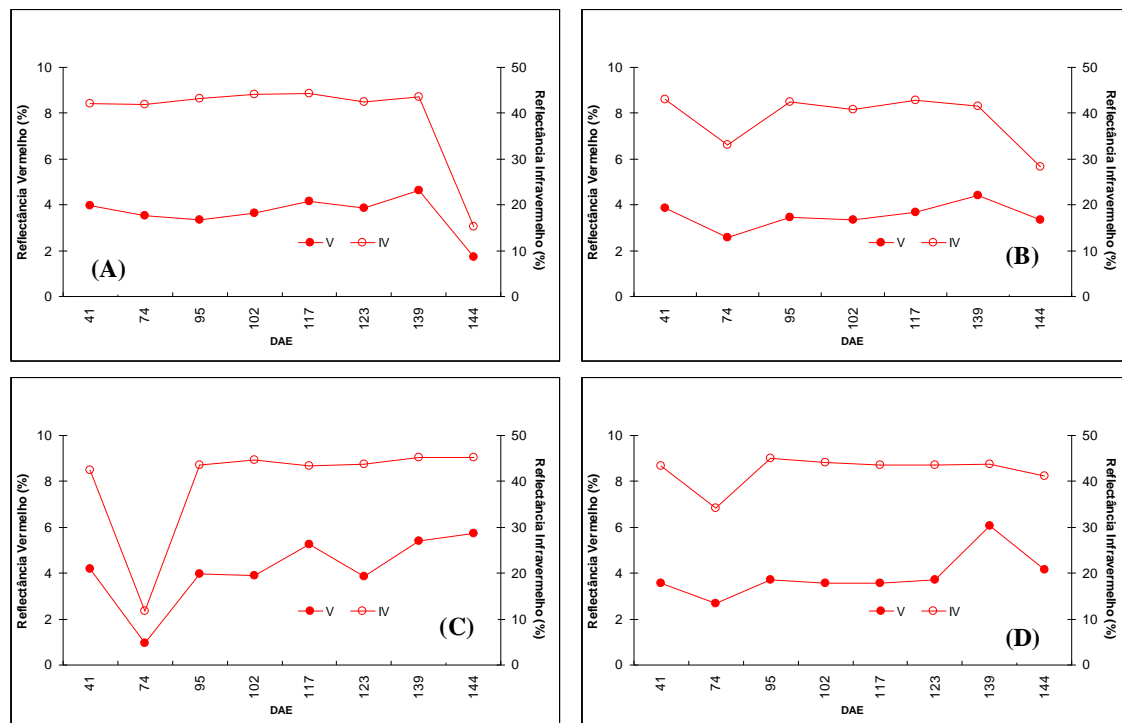


FIGURA 19. Reflectância em folíolos de soja nas porções do vermelho e do infravermelho em relação aos dias após a emergência (DAE) **A**, **B**, **C** e **D** representam os tratamentos direto não irrigado (DNI), direto irrigado (DI), convencional não irrigado (CNI) e convencional irrigado (CI), respectivamente. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

Na porção infravermelha do espectro foram observados resultados semelhantes aos obtidos na porção vermelha, porém, os valores de reflectância foram maiores nesta porção.

A reflectância dos folíolos em ambas porções do espectro mostrou-se relativamente estável no período de medição. A análise de correlação evidenciou

uma relação inversamente proporcional entre as reflectâncias e as absorvâncias nas porções do vermelho e do infravermelho do espectro eletromagnético (Tabela 1). Os coeficientes foram altos e significativos nos dois sistemas (direto e convencional), todos acima de -0,94. Em última instância a absorvância é o parâmetro de interesse, visto que é a partir da energia absorvida que as plantas realizam fotossíntese, mas não mensurável com sensores remotos. Estes resultados comprovam, portanto, que é viável utilizar medidas de reflectância em monitoramento de culturas.

TABELA 1. Coeficientes de correlação entre as reflectâncias e as absorvâncias no vermelho e no infravermelho para a cultura da soja nos sistemas direto e convencional. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

Sistemas	Correlações	Absorvância V	Absorvância IV
Convencional	Reflectância V	-0,97*	-0,97*
	Reflectância IV		
Direto	Reflectância V	-0,98*	-0,99*
	Reflectância IV		
Ambos	Reflectância V	-0,94*	-0,94*
	Reflectância IV		

*diferença significativa ao nível de 1% de significância.

4.3 Resposta espectral do solo

4.3.1 Curvas de reflectância

A reflectância do solo, de forma geral, foi crescente com o aumento do comprimento de ondas e tendeu a manter um padrão característico deste tipo de alvo (Figura 20). A semelhança de padrão pode ser verificada comparando os resultados obtidos neste trabalho às curvas obtidas no estudo realizado por Epiphanyo et al. (1992), os quais analisaram o comportamento espectral das diversas classes de solos.

Na Figura 20 podem-se analisar as diferentes condições ocorridas na superfície de fundo (solo e palha) durante o período experimental: reflectância aos 41 (A), 74 (B) e 95 (C) DAE. Nas três datas de medição, o comportamento espectral do solo foi semelhante.

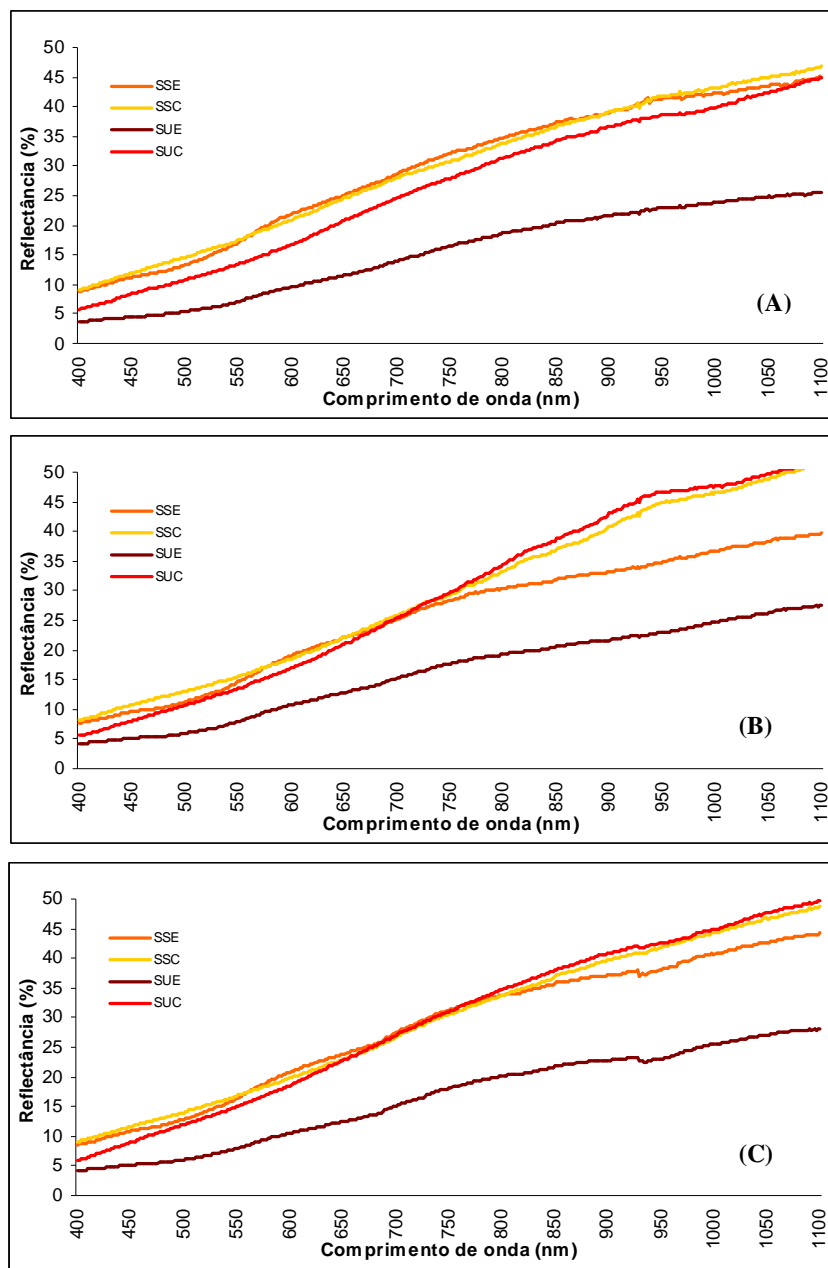


FIGURA 20. Curva da reflectância: solo seco exposto (SSE), solo seco coberto com palha (SSC), solo úmido exposto (SUE) e solo úmido coberto com palha (SUC), aos 41 dias após a emergência (DAE) (A), 74 DAE (B) e 95 DAE (C) EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

As condições de solo: seco coberto com palha (SSC) e exposto (SSE) e o solo úmido coberto com palha (SUC) apresentaram os maiores valores de reflectância em todo o espectro de medição. O solo úmido exposto (SUE) se destacou dos três primeiros, apresentando valores de reflectância menores dos demais. No visível a menor reflectância foi consequência da adição de água tornando-se mais escuro, que determinou maior absorvância da radiação solar e menor reflectância. Na porção infravermelha, novamente é a presença da água, molécula grande absorvedora de radiação, que determinou a menor reflectância nesta faixa de comprimento de ondas.

4.3.2 Variação temporal da reflectância no visível e no infravermelho

Quando foram comparados os valores de reflectância do solo considerando dias após a emergência (DAE) somente para a porção do vermelho do espectro (Figura 21A), observou-se que, em todos os dias de medição, os solos mais claros (SSE, SSC e SUC) apresentaram maiores valores de reflectância, enquanto o solo mais escuro (SUE) se diferenciou dos demais. Também, observou-se que aos 74 e 95 DAE as três condições apresentaram valores muito próximos, comportamento já observado na comparação entre datas (Figura 20).

Na porção do infravermelho do espectro (Figura 21B) também foi observada menor reflectância para o SUE. As demais condições de solo (SSE, SSC e SUC) apresentaram valores bem próximos de reflectância, especialmente aos 71 DAE.

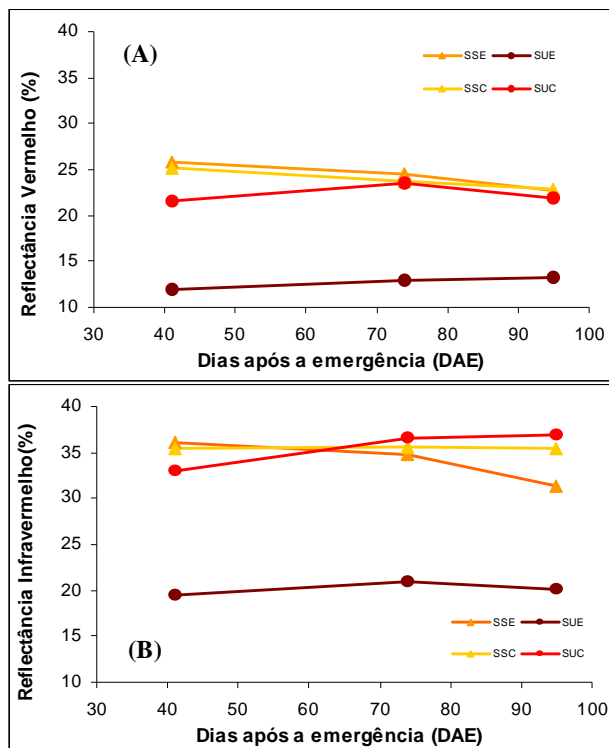


FIGURA 21. Reflectância do solo seco exposto (SSE), solo seco coberto com palha (SSC), solo úmido exposto (SUE) e solo úmido coberto com palha (SUC), nas porções do visível (A) e do infravermelho (B), sob cultura da soja, em relação aos dias após a emergência (DAE). EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

4.3.3 Ajuste da linha do solo

Para o tipo de solo sobre o qual o experimento foi realizado (Argiloso Vermelho Distrófico Típico), no ajuste da linha do solo se obteve um coeficiente de determinação de 0,925 (Figura 22). O coeficiente de regressão linear foi de 1,316, indicando que incrementos de reflectância no visível resultam em incrementos um pouco superiores no infravermelho.

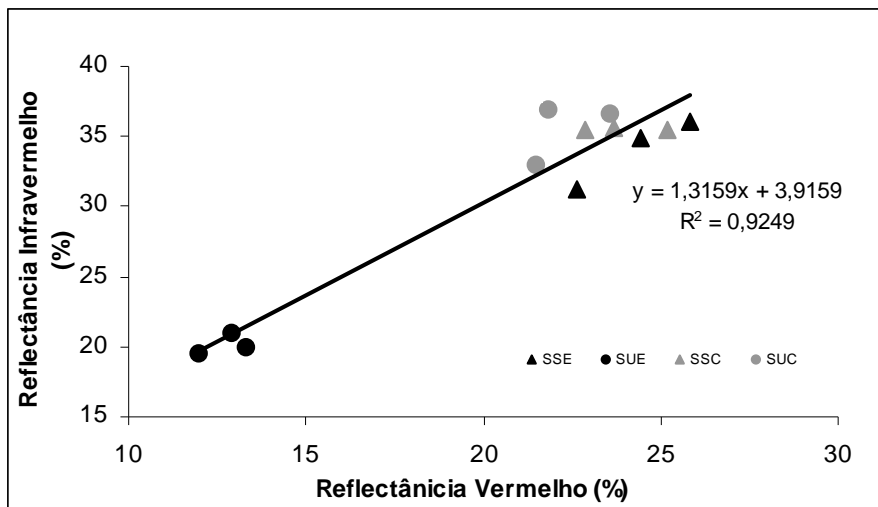


FIGURA 22. Relação entre a reflectância do solo nas porções do vermelho e do infravermelho do espectro eletromagnético em diferentes condições: solo seco exposto (SSE), solo seco coberto com palha (SSC), solo úmido exposto (SUE) e solo úmido coberto com palha (SUC). EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

As variações na reflectância do solo (fundo) contribuem para a magnitude da reflectância do dossel, de forma diferenciada ao longo do ciclo das culturas. Portanto, a análise deste componente é importante para o entendimento das diferenças de reflectância entre os tratamentos e datas de medição. Além disso, alguns índices de vegetação objetivam retirar o efeito do fundo (solo), considerando, em suas equações, a reflectância do solo, também denominada linha do solo. Este é o caso do Índice de Vegetação Perpendicular (PVI), Índice de Vegetação Ponderado (WDVI) e Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) calculados neste trabalho.

4.4 Resposta espectral do dossel de soja

Nos itens a seguir são apresentados resultados decorrentes dos tratamentos aplicados, em termos de resposta espectral do dossel de soja nos dias de medição ao longo do ciclo da cultura. Neste caso, tem-se a integração de todos os componentes que compõem o campo de visada do aparelho: a vegetação (folhas, ramos e flores) e a superfície de fundo (palha e solo).

4.4.1 Variabilidade da reflectância entre os tratamentos

Na Figura 23 foram plotados os dados dos quatro tratamentos para as três datas de medição. Os resultados mostraram alterações na reflectância do dossel de soja ao longo do período de medições, como consequência das diferenças de crescimento e desenvolvimento, resultantes das também diferenciadas condições de manejo. As curvas obtidas mostram o padrão espectral esperado, visto que é amplamente conhecido que a reflectância de dosséis vegetais mostram um padrão típico e distinto dos outros alvos. A baixa reflectância na faixa vermelho decorre da alta absorção que se dá nas faixas do azul e do vermelho devido à atividade dos pigmentos presentes na folha. Na porção do infravermelho os pigmentos foliares são transparentes à radiação solar e, conseqüentemente, a reflectância é maior nestes comprimentos de onda (Steffen & Moraes, 1993).

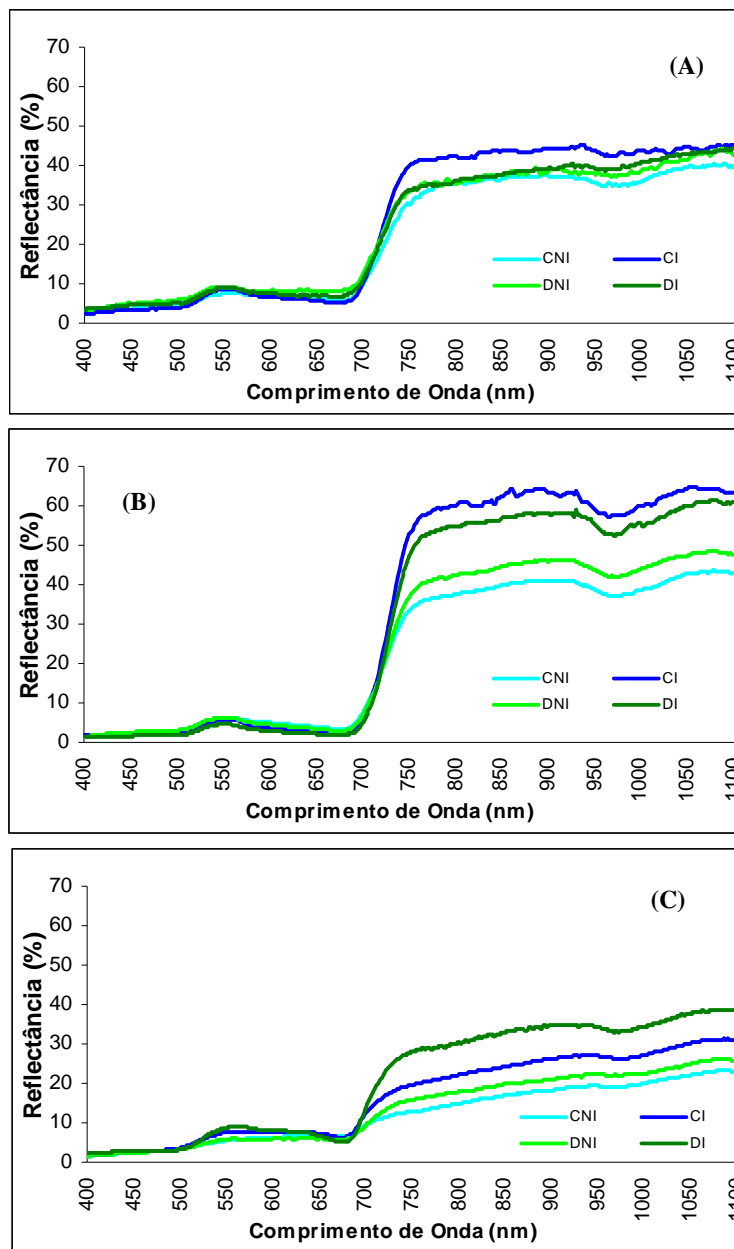


FIGURA 23. Curva da reflectância do dossel de soja no sistema de plantio direto irrigado (DI) e não irrigado (DNI) sistema de preparo convencional irrigado (CI) e não irrigado (CNI) ao longo do ciclo da cultura: 41 dias após a emergência (DAE) (A), 102 DAE (B) e 144 DAE (C). EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

Em 41 DAE (07/01/2004) (Figura 23A), início de ciclo, verificou-se a menor diferença entre os valores de reflectância, durante o período experimental, quando comparada às porções visível e infravermelho do espectro. Na porção visível os valores de reflectância obtidos foram semelhantes entre os tratamentos, sendo que somente no infravermelho foi possível distinguir o tratamento convencional irrigado (CI) dos demais. Neste dia de medição, as plantas se encontravam em crescimento vegetativo, apresentando no tratamento CI valores de Índice de Área Foliar (IAF) acima de 2 e superiores aos demais (Apêndice 1).

No que se refere à estatura média das plantas e à evolução do IAF, Martorano (2007), no mesmo experimento, observou que aos 30 DAE (27/12/2003) as plantas em preparo convencional (CI e CNI) apresentaram maior estatura e maior IAF quando comparadas às plantas em plantio direto (DI e DNI). No início do ciclo da cultura, o desenvolvimento das plantas está condicionado aos nutrientes presentes e disponíveis no solo. Desta forma, em preparo convencional a cultura tem maior disponibilidade de nutrientes do que em plantio direto, pois ocorre a incorporação dos resíduos culturais no solo facilitando a decomposição da matéria orgânica. Enquanto isto, em sistema de plantio direto os resíduos permanecem na superfície do solo e a mineralização da matéria orgânica é mais lenta. Assim, principalmente devido à maior disponibilidade de nitrogênio, as plantas em preparo convencional apresentaram maior desenvolvimento inicial (Martorano, 2007).

Analisando as condições do dossel aos 102 DAE (09/03/2004) (Figura 23B), quando a cultura se encontrava em plena floração, com IAF acima de 5, verifica-se que, na faixa do visível, praticamente não foram perceptíveis diferenças nas reflectâncias entre os sistemas de manejo. Por outro lado, foi a partir de 750nm, no infravermelho, que se verificaram as maiores diferenças. Nos

tratamentos irrigados, tanto em preparo convencional como no plantio direto, a reflectância no infravermelho foi superior aos tratamentos não irrigados, ultrapassando 50%. Os maiores valores foram observados em preparo convencional irrigado, o que ainda é influência do crescimento inicial diferenciado entre os sistemas de preparo. Nas parcelas não irrigadas a reflectância ficou abaixo de 47%, com valores mais elevados na soja em plantio direto. Aos 104 DAE (11/03/2004) Martorano et al. (2004) observaram valores de potenciais mínimos de água na folha menores em plantio direto não irrigado do que no preparo convencional não irrigado, o que foi atribuído à maior manutenção de folhas, coerente com a maior reflectância obtida nas leituras radiométricas.

Aos 144 DAE (20/04/2004) (Figura 23C), ao final do enchimento de grãos, como consequência da senescência das plantas e da maior contribuição do solo na resposta espectral em função do baixo IAF, houve um menor contraste entre as duas porções do espectro, com reflectâncias no infravermelho abaixo de 40%. Mesmo ao final do ciclo de desenvolvimento da cultura, as reflectâncias dos tratamentos irrigados se mantiveram superiores aos tratamentos não irrigados. Neste dia de medição a maior reflectância no infravermelho foi observada no sistema de plantio direto.

Observou-se, portanto, que a soja irrigada apresentou maiores valores de reflectância do que a não irrigada na porção do infravermelho. Nos dois primeiros dias de medição o tratamento convencional irrigado (CI) foi o que apresentou os maiores valores de reflectância. Já aos 144 DAE a maior reflectância ocorreu no tratamento direto irrigado (DI). Na porção do visível, observaram-se pequenas diferenças entre os tratamentos, sendo que a tendência foi oposta ao ocorrido no infravermelho, ou seja, a reflectância foi menor nos tratamentos irrigados e maior nos tratamentos não irrigados. Além disso, a 144 DAE houve menor amplitude de

variação entre as porções visível e infravermelha do espectro. Esta menor amplitude é consequência da senescência das plantas e da maior contribuição do solo em função do menor IAF.

4.4.2 Comparação entre a reflectância do folíolo e do dossel

As curvas de reflectância para os folíolos e para o dossel de soja são mostradas na Figura 24. Novamente, nas três datas de medições, observou-se o padrão esperado. Nestas datas, os valores de reflectância, na porção visível do espectro eletromagnético, foram maiores nos folíolos do que no dossel, indicando menor absorção de radiação incidente pelos pigmentos. Na porção infravermelha, entretanto, foram verificadas diferenças entre as datas. Na primeira data (41 DAE), tanto folíolos como dossel mostraram reflectâncias semelhantes. Aos 102 DAE observou-se que o dossel apresentou maior reflectância do que os folíolos. Isto pode ser explicado pelo fato do dossel ser constituído por um número maior de camadas de folhas, o que resulta em maior caminho ótico para reflexão da radiação (reflexão aditiva) (Steffen & Moraes, 1993). Ao final do ciclo (144 DAE) o comportamento foi inverso. Nos folíolos a reflectância foi maior do que no dossel. Isto, possivelmente, seja consequência da influência da reflectância do solo (menor) na resposta do conjunto, já que havia um reduzido número de folhas nesta data.

A comparação expressa na Figura 24 enfatiza a diferença entre as curvas de reflectância, quando obtidas em folíolos e em dossel. Mas, evidencia, também, que o folíolo é o órgão da planta especializado na captação da radiação, determinando o padrão de resposta da reflectância do dossel.

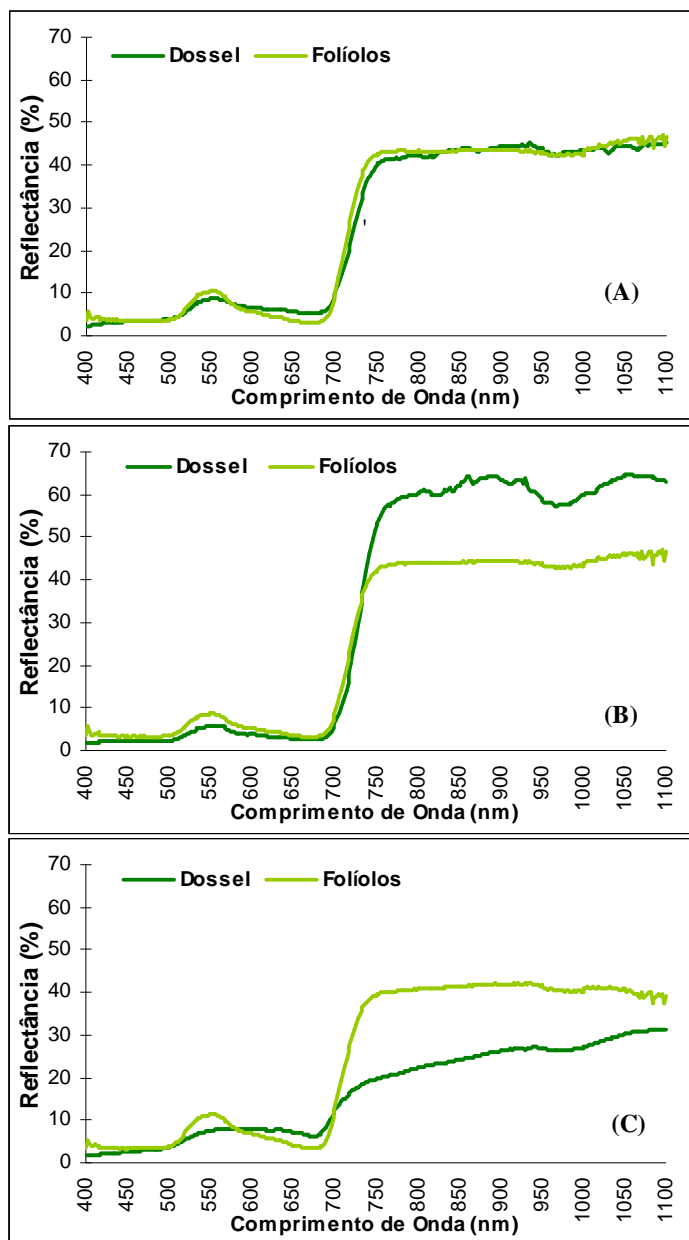


FIGURA 24. Reflectância dos folíolos e do dossel de soja nos sistemas de plantio direto não irrigado (CI) ao longo do ciclo da cultura: 41 dias após a emergência (DAE) (A), 102 DAE (B) e 144 DAE (C). EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

4.4.3 Reflectância no vermelho e no infravermelho

Na Figura 25 foram plotados os dados de reflectância nas porções do vermelho e do infravermelho do espectro eletromagnético para o dossel de soja nos quatro tratamentos. Observa-se a relação inversa entre as reflectâncias no vermelho e no infravermelho o que, como será abordado no item 4.5, é o fundamento para tornar possível o uso de índices de vegetação.

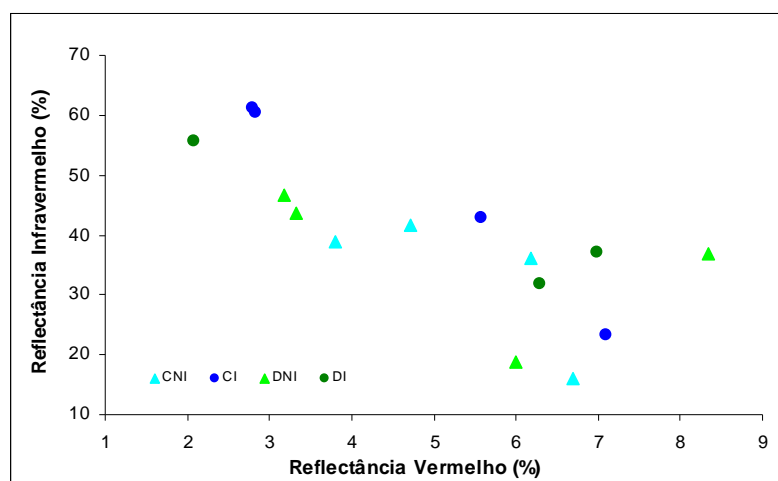


FIGURA 25. Reflectância do dossel de soja em quatro tratamentos: plantio direto irrigado (DI), plantio direto não irrigado (DNI), preparo convencional irrigado (CI) e preparo convencional não irrigado (CNI), na porção do vermelho e porção do infravermelho do espectro eletromagnético. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

Estes mesmos dados podem ser analisados quanto à sua variação temporal, o que é mostrado na Figura 26. No vermelho (Figura 26A), a reflectância foi alta no início do ciclo, apresentando decréscimo com o desenvolvimento das plantas e novamente aumentando no final do ciclo. Nesta faixa do espectro eletromagnético a maior absorvância da cultura ocorreu entre 100 e 110 dias após a emergência, no estágio de desenvolvimento R4 (vagem totalmente formada). Isto é consequência do aumento da absorção da energia que incide na folha, já que as clorofilas *a* e *b* têm seus picos de absorção nos

comprimentos de 649 e 665nm (Valeriano, 1988). Desta forma, uma menor quantidade de energia é refletida.

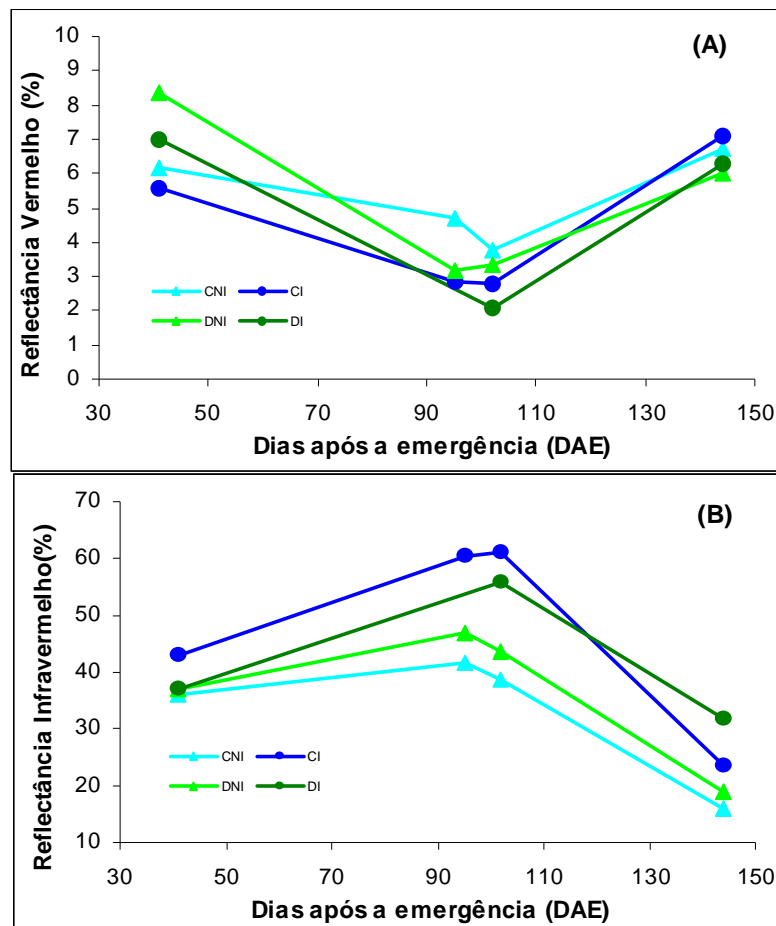


FIGURA 26. Reflectância do dossel de soja em quatro tratamentos: plantio direto irrigado (DI) e não irrigado (DNI), preparo convencional irrigado (CI) e convencional não irrigado (CNI) em relação aos dias após a emergência (DAE), porção do vermelho (A) e na porção do infravermelho (B). EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

Padrão inverso foi observado na porção infravermelha do espectro (Figura 26B). Nesta faixa ocorreram os maiores valores de reflectância, atingindo 61,2% aos 110 DAE. O aumento na reflectância é função do aumento na taxa de espalhamento da radiação no mesófilo, provocado pelo aumento do número de

folhas. Os tratamentos submetidos à irrigação apresentaram também as maiores reflectâncias na porção do infravermelho.

4.5 Índices de vegetação

4.5.1 Evolução temporal

Na Figura 27 foram plotados os valores dos seis índices de vegetação determinados em função de dias após a emergência (DAE), o que é denominado de perfil temporal. Estes são muito utilizados em monitoramento regional da biomassa feito com imagens de satélite, pois evidenciam as variações temporais da biomassa (Fontana et al., 2002; Motta et al., 2003). Para todos os índices de vegetação foi observado um padrão semelhante, porém com diferentes valores, devido à faixa de variação de cada um deles. Os índices apresentaram valores menores no início do ciclo, aumentaram com o crescimento das plantas e diminuíram com a senescência, ao final do ciclo.

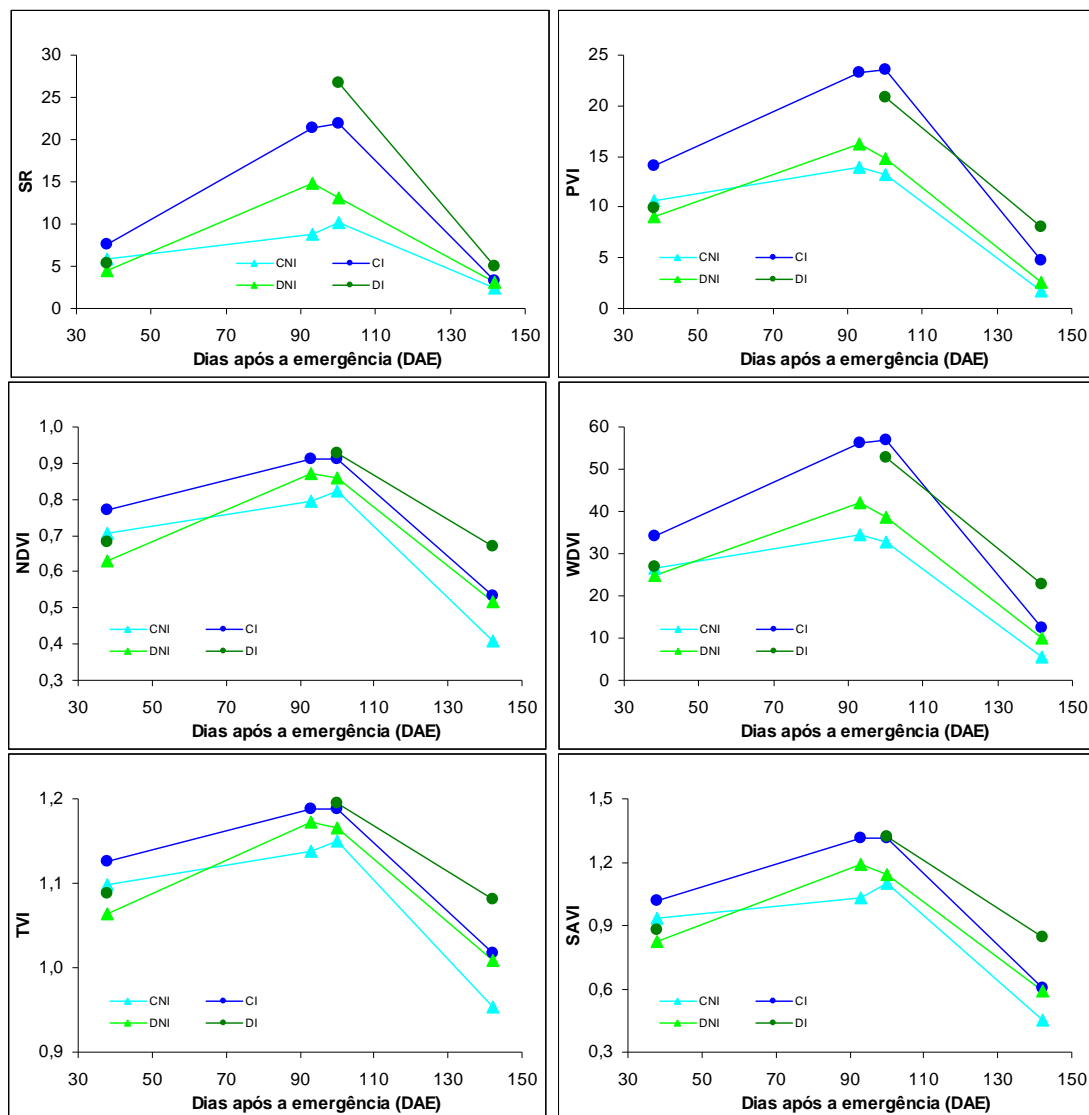


FIGURA 27. Índices de vegetação SR, NDVI, TVI, PVI, WDWI e SAVI, para dossel de soja submetida aos tratamentos: plantio direto irrigado (DI) e não irrigado (DNI), preparo convencional irrigado (CI) e convencional não irrigado (CNI), em relação aos dias após a emergência (DAE). EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os valores dos índices de vegetação para a cultura da soja nas três datas (41, 102 e 144 DAE) em que não houve dados faltantes, nas diferentes condições de preparo e de irrigação, assim como o teste das diferenças entre os índices (teste *Least Significant Difference* - LSD ao nível de significância de 5%).

Verificou-se que houve interação entre sistema de manejo e época de avaliação, evidenciando que os sistemas de manejo influenciaram de maneira diferente durante o período de avaliação. Aos 102 DAE foram observados os maiores valores em todos os índices testados, o que esteve associado com o pleno desenvolvimento da cultura, período em que se observaram os maiores valores de IAF (6,2, 5,4, 5,0 e 4,7 para os tratamentos CI, CNI, DI e DNI, respectivamente). Neste dia os valores diferiram estatisticamente dos demais. Para a maioria dos índices houve, ainda, diferença estatística entre o primeiro (41 DAE) e o último dia de medição (144 DAE) (Tabela 2).

TABELA 2. Teste de diferença de médias para os índices de vegetação (SR, NDVI, TVI e SAVI) para a cultura da soja submetida a diferentes sistemas de preparo do solo (C - convencional e D - direto) ao longo do período experimental (41, 102 e 144 DAE – dias após a emergência) EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

SR			NDVI			TVI			SAVI						
Sist	DAE	média	Sist	DAE	média	Sist	DAE	média	Sist	DAE	média				
C	41	0,838	b	C	41	0,740	b	C	41	11,130	b	C	41	0,978	b
C	102	11,880	a	C	102	0,868	a	C	102	11,696	a	C	102	12,088	a
C	144	0,454	c	C	144	0,746	c	C	144	0,987	c	C	144	0,530	c
D	41	0,703	b	D	41	0,664	b	D	41	10,780	b	D	41	0,866	b
D	102	12,895	a	D	102	0,895	a	D	102	11,811	a	D	102	12,131	a
D	144	0,598	b	D	144	0,591	b	D	144	10,436	b	D	144	0,711	c
C	41	0,838	a	C	41	0,740	a	C	41	11,130	a	C	41	0,978	a
D	41	0,703	a	D	41	0,664	a	D	41	10,780	a	D	41	0,866	b
C	102	11,880	a	C	102	0,868	a	C	102	11,696	a	C	102	12,088	a
D	102	12,895	a	D	102	0,895	a	D	102	11,811	a	D	102	12,131	a
C	144	0,454	a	C	144	0,476	b	C	144	0,987	b	C	144	0,530	b
D	144	0,598	a	D	144	0,591	a	D	144	10,436	a	D	144	0,711	a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo teste LSD (*Least Significant Difference*) ao nível de significância de 5%.

TABELA 3. Teste de diferença de médias para índices de vegetação (PVI e WdVI) para a cultura da soja submetida a diferentes tratamentos (CI – convencional irrigado, CNI - convencional não irrigado, DI - direto irrigado e DNI - direto não irrigado) ao longo do período experimental (41, 102 e 144 DAE – dias após a emergência) EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

PVI				WdVI			
Trat	DAE	média		Trat	DAE	média	
CI	41	14,020	b	CI	41	34,224	b
CI	102	23,590	a	CI	102	56,866	a
CI	144	4,672	c	CI	144	12,412	c
CNI	41	10,682	a	CNI	41	26,519	a
CNI	102	12,804	a	CNI	102	31,908	a
CNI	144	1,696	b	CNI	144	5,687	b
DI	41	10,452	b	DI	41	28,118	b
DI	102	20,830	a	DI	102	52,746	a
DI	144	8,000	c	DI	144	22,594	b
DNI	41	9,081	b	DNI	41	24,766	b
DNI	102	14,809	a	DNI	102	38,708	a
DNI	144	25,617	c	DNI	144	10,130	c
CI	41	14,020	a	CI	41	34,224	a
DI	41	10,452	b	DI	41	28,118	b
CI	102	23,590	a	CI	102	56,866	a
DI	102	20,830	b	DI	102	52,746	a
CI	144	4,672	b	CI	144	12,412	b
DI	144	8,000	a	DI	144	22,594	a
CNI	41	10,682	a	CNI	41	26,519	a
DNI	41	9,081	a	DNI	41	24,766	a
CNI	102	12,804	a	CNI	102	31,908	b
DNI	102	14,809	a	DNI	102	38,708	a
CNI	144	16,960	a	CNI	144	5,687	a
DNI	144	25,617	a	DNI	144	10,130	a
CI	41	14,020	a	CI	41	34,224	a
CNI	41	10,682	b	CNI	41	26,519	b
CI	102	23,590	a	CI	102	56,866	a
CNI	102	12,804	b	CNI	102	31,908	b
CI	144	4,672	a	CI	144	12,412	a
CNI	144	1,696	b	CNI	144	5,687	b
DI	41	10,452	a	DI	41	28,118	a
DNI	41	9,081	a	DNI	41	24,766	a
DI	102	20,830	a	DI	102	52,746	a
DNI	102	14,809	b	DNI	102	38,708	b
DI	144	8,000	a	DI	144	22,594	a
DNI	144	2,562	b	DNI	144	10,130	b

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo teste LSD (*Least Significant Difference*) ao nível de significância de 5%.

Na Figura 27 observa-se que, para todos os índices de vegetação, a tendência foi dos tratamentos irrigados apresentarem valores maiores quando foram comparados aos tratamentos não irrigados. Este tipo de resposta espectral

já era esperado, visto que os tratamentos irrigados apresentaram maior crescimento da vegetação. Analisando somente o fator irrigação, evidenciou-se diferença significativa entre as médias de todos os índices de vegetação testados ao nível de 5% de significância, sendo a condição hídrica a maior causa da variação. A média dos tratamentos irrigados foi significativamente superior àquela dos não irrigados. Entretanto, apenas os índices PVI e WdVI (Tabela 3) permitiram diferenciar estatisticamente os níveis de irrigação entre os sistemas de manejo.

No início do ciclo (41 DAE) a tendência mostrada na Figura 27 foi do sistema de preparo convencional apresentar os maiores valores de índice de vegetação do que em plantio direto. Verifica-se, no entanto, que neste dia as diferenças entre os sistemas de preparo do solo foram estatisticamente significativas somente para o SAVI (Tabela 2). Para o SR, NDVI e TVI as diferenças não foram significativas. Ainda neste dia, mas para os índices PVI e WdVI (Tabela 3), foi possível diferenciar os tratamentos CI e DI. No tratamento convencional, se diferenciaram, ainda, os níveis de irrigação (CI e CNI). Quando comparados os tratamentos não irrigados (CNI e DNI), não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os índices de vegetação testados.

Aos 102 DAE, quando a cultura estava em pleno desenvolvimento, o PVI foi o único índice que diferenciou estatisticamente os tratamentos CI e DI (Tabela 3), tendo o tratamento CI apresentado valores superiores ao DI. Segundo Martorano (2007), trabalhando com dados do mesmo experimento, o maior índice de área foliar se deve ao fato das plantas em sistema de preparo convencional apresentarem maior crescimento inicial do que as plantas em sistema de plantio direto, devido ao maior crescimento, que está diretamente relacionado à disponibilidade de nitrogênio no solo, como conseqüência da incorporação de

restos culturais, o que não ocorre no sistema de plantio direto. Ambos os índices PVI e WdVI diferenciaram os níveis de irrigação (I e NI) para os dois sistemas de preparo (Tabela 3).

Nesta mesma data de medição, à exceção dos demais índices, o WdVI mostrou diferenças estatisticamente significativas entre os dois sistemas de preparo em condições não irrigadas, sendo que a média de DNI foi significativamente superior a CNI ao nível de 5% de significância. Isto foi consequência da maior manutenção de folhas em DNI, já abordado no item 4.4.1. Para os índices SR, NDVI, TVI e SAVI não foram observadas diferenças estatisticamente significativas (Tabela 2).

A 144 DAE, quando as plantas encontravam-se em senescência, índices de vegetação apresentaram queda acentuada, sendo observados valores inferiores aos observados no início do ciclo (Figura 27). Nesta data de medição, por consequência da condição de planta, a tendência foi inversa às datas anteriores. O tratamento DI apresentou valores superiores ao CI. Em termos estatísticos, as diferenças entre estes dois tratamentos, apareceram nos índices PVI e WdVI (Tabela 3). Quando foram comparados apenas os sistemas de preparo do solo (direto e convencional), também foram observadas diferenças estatisticamente significativas, sendo que o sistema de plantio direto apresentou médias superiores às do sistema de preparo convencional nos índices NDVI, TVI e SAVI (Tabela 2).

De forma geral, os índices PVI e WdVI foram mais eficientes, possibilitando a diferenciação tanto dos níveis de irrigação, como os sistemas de preparo do solo. Este resultado é coerente com o obtido por Antunes et al. (1993).

4.5.2 Relações com parâmetros de planta

4.5.2.1 Análise de correlação

Na Tabela 4 são apresentados os coeficientes de correlação obtidos para todos os dados avaliados, entre parâmetros de planta (IAF e teores de clorofilas *a* e *b*), as reflectâncias (vermelho e infravermelho) e os índices de vegetação testados neste experimento. Verifica-se que a maior parte dos coeficientes de correlação foram significativos, mostrando a consistência da relação entre os parâmetros de planta avaliados e as medidas espectrais.

Os coeficientes de correlações entre IAF e as reflectâncias foram negativos na faixa do vermelho, pois o crescimento da vegetação provoca maior absorção pelas plantas nesta porção do espectro. Na faixa do infravermelho, foi observada a relação inversa em consequência da alta taxa de espalhamento da radiação, típica das plantas nesta porção do espectro. O mesmo tipo de relação foi obtido para teores de clorofilas *a* e *b*, quando correlacionadas com as reflectâncias no vermelho e no infravermelho. Para IAF os maiores valores de correlação ocorreram no sistema de plantio direto e os menores, no sistema de preparo convencional. Para os teores de clorofila *a* e *b*, os coeficientes de correlação nas três análises foram semelhantes e superiores aos observados para IAF.

Cinco dos índices testados apresentaram correlações com IAF acima de 0,9 para as plantas neste sistema de plantio. Apenas o SR apresentou correlação abaixo de 0,9, neste sistema. Para o sistema de preparo convencional as correlações entre o IAF e os índices de vegetação ficaram acima de 0,7, sendo que o mesmo foi observado para correlações com ambos sistemas. Porém, neste caso os valores de correlações foram um pouco mais altos, alguns se aproximando de 0,8. A magnitude dos coeficientes de correlação é compatível com o encontrado por Antunes et al. (1993) em trabalho com a cultura da soja

correlacionando variáveis agrônômicas como IAF, fitomassa fresca de folhas e fitomassa total com índices de vegetação.

TABELA 4. Coeficientes de correlação entre índice de área foliar (IAF) e teor das clorofilas *a* e *b*, com reflectâncias no vermelho (RV) e no infravermelho (RI) e índices de vegetação para a cultura da soja no sistema de plantio direto, em preparo convencional e para o conjunto total de dados (ambos sistemas). EAA –UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

Parâmetros	Preparo Convencional			Plantio Direto			Ambos Sistemas		
	IAF	clorofila <i>a</i>	clorofila <i>b</i>	IAF	clorofila <i>a</i>	clorofila <i>b</i>	IAF	clorofila <i>a</i>	clorofila <i>b</i>
IAF		0,68	0,67		0,98**	0,97**		0,70*	0,69*
Rv	-0,77**	-0,99**	-1,00**	-0,92**	-0,99**	-0,99**	-0,80**	-0,99**	-0,98**
Ri	0,71**	0,94*	0,90*	0,83**	0,96**	0,96**	0,73**	0,93**	0,90**
SR	0,73**	0,95**	0,90*	0,87**	0,96**	0,97**	0,75**	0,95**	0,94**
NDVI	0,74**	0,93*	0,93*	0,95**	0,96**	0,95**	0,77**	0,94**	0,92**
TVI	0,74**	0,92*	0,93*	0,94**	0,95**	0,94*	0,77**	0,93**	0,91**
PVI	0,72**	0,95**	0,92*	0,90**	0,98**	0,98**	0,78**	0,94**	0,91**
WDVI	0,72**	0,95**	0,92*	0,91**	0,98**	0,98**	0,76**	0,95**	0,92**
SAVI	0,72**	0,96**	0,95**	0,93**	0,96**	0,96**	0,76**	0,95**	0,93**

*significativo ao nível de significância de 5%.

**significativo ao nível de significância de 1%

Para índices de vegetação testados a correlação com teores de clorofilas foi superior a 0,9. O sistema de plantio direto foi o que apresentou os maiores valores de correlação, sendo que os índices PVI e WDVI apresentaram correlação de 0,98, para ambas clorofilas. Os coeficientes de correlação entre os parâmetros de planta e os dados espectrais foram consistentemente superiores no sistema de plantio direto, o que, provavelmente, decorre das maiores correlações verificadas entre IAF e teores de clorofilas. Neste sistema os valores foram de 0,98 e 0,97 para teores de clorofila *a* e *b*, respectivamente. No caso do sistema convencional os coeficientes encontrados foram 0,68 e 0,67, respectivamente.

4.5.2.2 Ajuste de funções

a) Índice de área foliar

O IAF é um parâmetro importante para o sensoriamento remoto, pois está relacionado com a capacidade do dossel em interceptar a radiação fotossinteticamente ativa.

Na Figura 28A são mostrados os dados de reflectância no vermelho e índice de área foliar (IAF) de soja em sistema de preparo do solo convencional e plantio direto. Observa-se que, a reflectância do dossel diminuiu à medida que o índice de área foliar aumentou. Isto é consequência do aumento da absorção da energia que incide nas folhas, já que as clorofilas *a* e *b* têm picos de absorção nos comprimentos de 649 e 665nm. Desta forma, menor quantidade de energia é refletida.

Já na porção infravermelha do espectro, os resultados mostram um padrão inverso (Figura 28B), pois aumentos de IAF determinam maior na reflectância. Neste intervalo espectral há um aumento na reflectância como função da maior taxa de espalhamento da radiação no mesófilo, devido ao aumento do número de folhas (IAF), conforme discutido anteriormente.

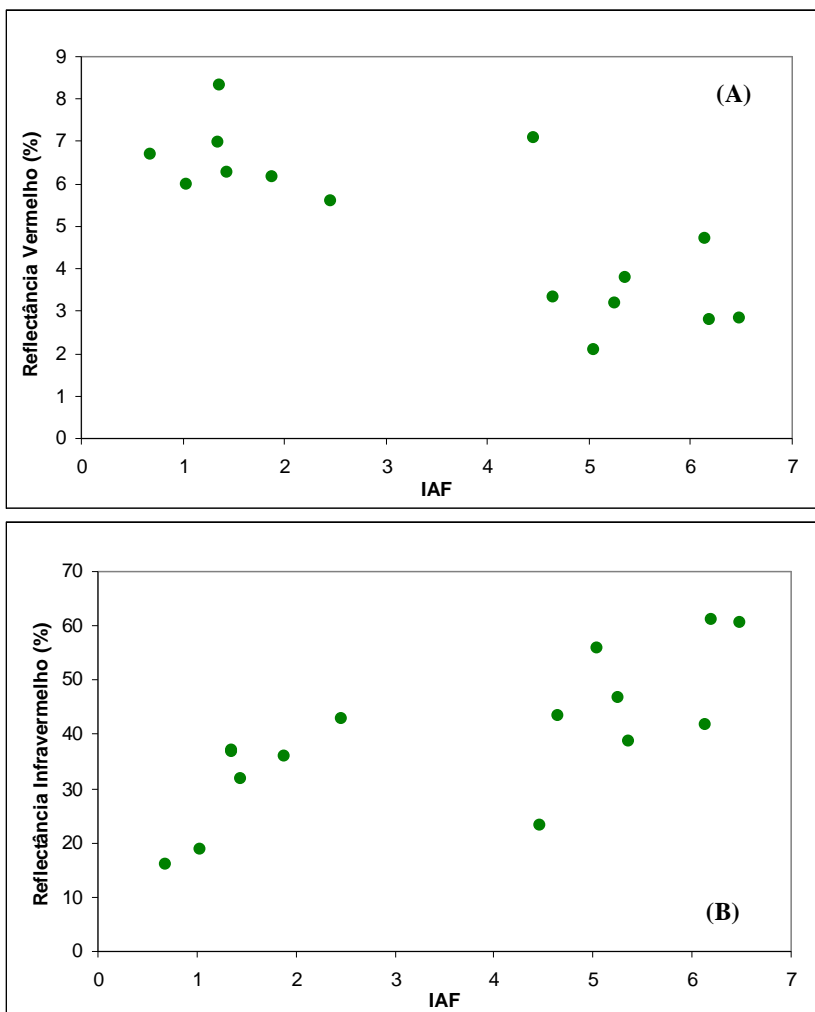


FIGURA 28. Reflectância no vermelho (A) e no infravermelho (B) em função do índice de área foliar (IAF) para dosséis de soja. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

Funções entre índice de área foliar (IAF) e índices de vegetação podem ser observadas na Figura 29. Em todas elas verifica-se que, à medida que há incrementos de IAF, há incrementos nos índices de vegetação. A forma da relação, entretanto, é distinta entre os índices.

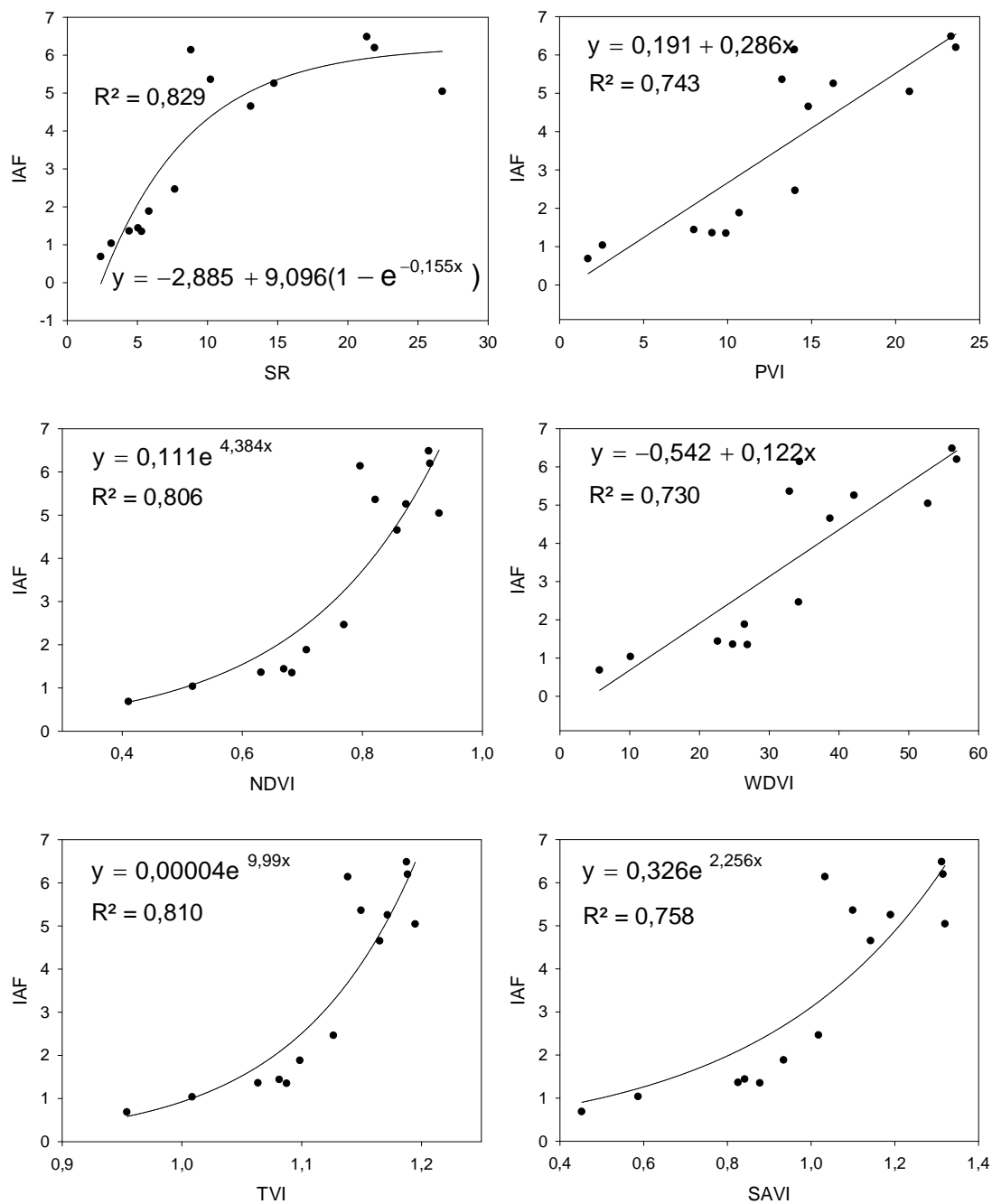


FIGURA 29. Funções de relação entre os índices de vegetação SR, NDVI, TVI, PVI, WdVI e SAVI e índice de área foliar (IAF) em dossel de soja. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

Os mais altos coeficientes de determinação foram obtidos para os índices SR, TVI e NDVI, sendo de 0,829, 0,810 e 0,806, respectivamente.

Para NDVI, TVI e SAVI houve tendência de saturação nas curvas ajustadas, ou seja, com valores elevados de IAF (acima de 4) estes índices perdem a sensibilidade. Este padrão também foi observado em outros trabalhos (Antunes et al. 1993 e Fonseca, 2002, entre outros), que constitui a maior limitação no uso destes índices.

Já PVI e WdVI apresentaram relação linear, mesmo para IAF altos. Estes índices consideram a linha do solo nas suas equações, como forma de reduzir a influência do fundo (no caso solo) na resposta do dossel.

Antunes et al. (1993) observaram que os índices caracterizados por uma distância da linha do solo, como PVI e WdVI, apresentaram padrão semelhante entre si, tendo melhor resposta em relação ao IAF da soja, respondendo melhor às variáveis agrônômicas. Os resultados obtidos neste trabalho são semelhantes aos obtidos naquele.

b) Teor de clorofila

O teor de clorofila presente nas folhas tem sido apontado como um indicador tanto do estado hídrico como do próprio processo fotossintético (Pereira, 2001; Martorano, 2004a). As curvas espectrais apresentaram um pico na região do verde, próximo a 550nm, exceto para o início de desenvolvimento da cultura. Segundo alguns autores, este pico está relacionado com a presença de Clorofila *a* e total nas folhas.

Ferri (2002) analisou a existência de uma relação entre a concentração de clorofila e a reflectância de plantas de soja. O autor verificou que, com o aumento da concentração de clorofila, não houve variações da reflectância em 550nm.

Para os comprimentos de ondas de 530 a 630nm houve diminuição da reflectância devido ao aumento da concentração de clorofila e, também, da estrutura das plantas. Em 670 a 680nm o aumento da concentração de clorofila causou uma variação mínima na reflectância e não significativa, sofrendo um decréscimo aproximado de 10% para 5% nesta região, mesmo com o aumento de mais de 30g/cm² de clorofila. Portanto, a baixa relação entre estas duas regiões do espectro sugere que existe uma influência diferente da concentração de clorofila.

Na Figura 30 é mostrada a relação entre a reflectância no visível e no infravermelho e os teores de clorofila *a* e *b* nos folíolos de soja, para todos tratamentos e para dois dias de determinação (08/03/04 e 15/04/04). Verifica-se diminuição de reflectância na faixa do vermelho (dentro da faixa visível), associada a aumentos de absorvância pelas clorofilas *a* e *b*, cujos picos de absorção se dão em 649 e 665nm, respectivamente. Padrão inverso foi observado na faixa do infravermelho (Figura 30B), em que a reflectância e os teores das clorofilas *a* e *b* mostraram uma relação diretamente proporcional. Por outro lado, o aumento de reflectância no infravermelho pode ser atribuído a um maior espalhamento da radiação ao nível de mesófilo, provocado pelo aumento de IAF (Steffen & Moraes, 1993), não estando condicionado a aumentos nos teores de pigmentos.

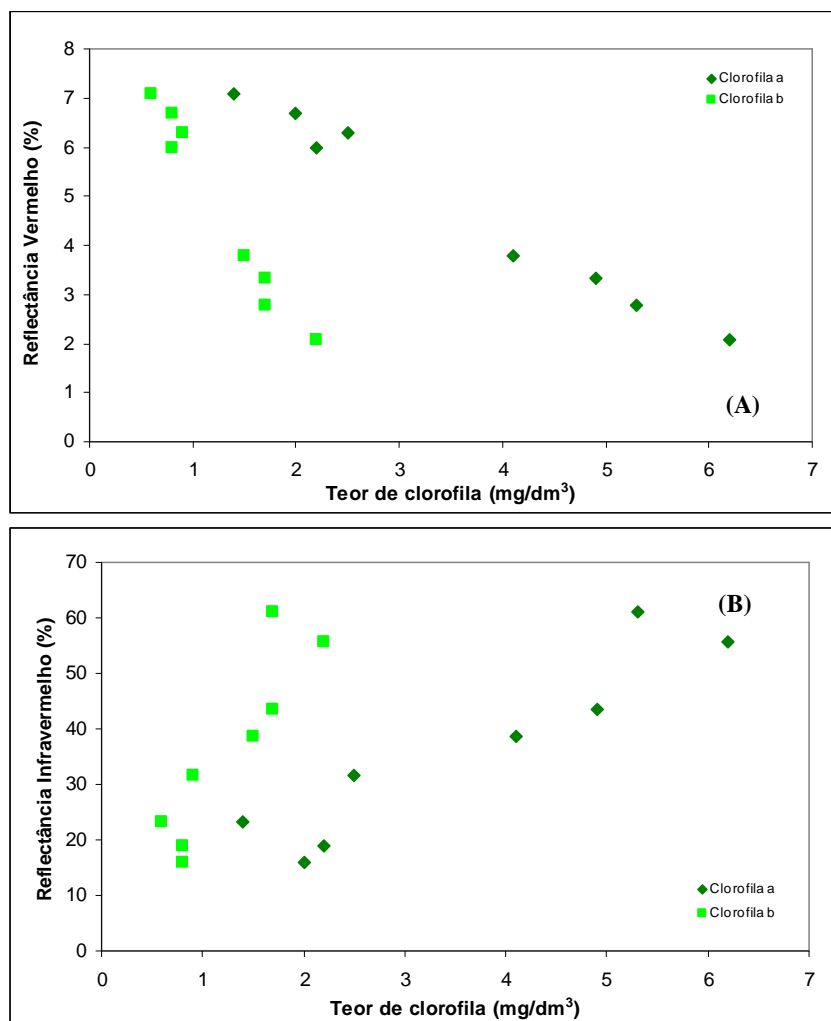


FIGURA 30. Reflectância no vermelho (A) e no infravermelho (B) em função de teores de clorofila *a* e *b* para folíolos de soja. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

Nas Figuras 31 e 32 foram plotados os valores obtidos para os seis índices de vegetação testados neste trabalho em função de teores de clorofila *a* e *b*. Em todas elas observa-se uma relação diretamente proporcional entre os teores de clorofila *a* e *b* e os valores dos índices de vegetação, indicando que à medida que os valores de índice de vegetação aumentam, os teores de clorofila *a* e *b* também aumentam. Porém, a forma da relação, assim como ocorreu para o IAF, é distinta entre os índices. Observa-se que os modelos ajustados apresentaram elevação

nos coeficientes de determinação em relação aos obtidos para o IAF, sendo todos superiores a 0,8.

Os modelos ajustados com o teor de clorofila *a* e *b* foram os mesmos dos ajustados para o IAF. Os índices SR, NDVI, TVI e SAVI apresentaram coeficiente de determinação semelhantes, todos maiores do que 0,9. Os índices PVI e WdVI apresentaram relações lineares.

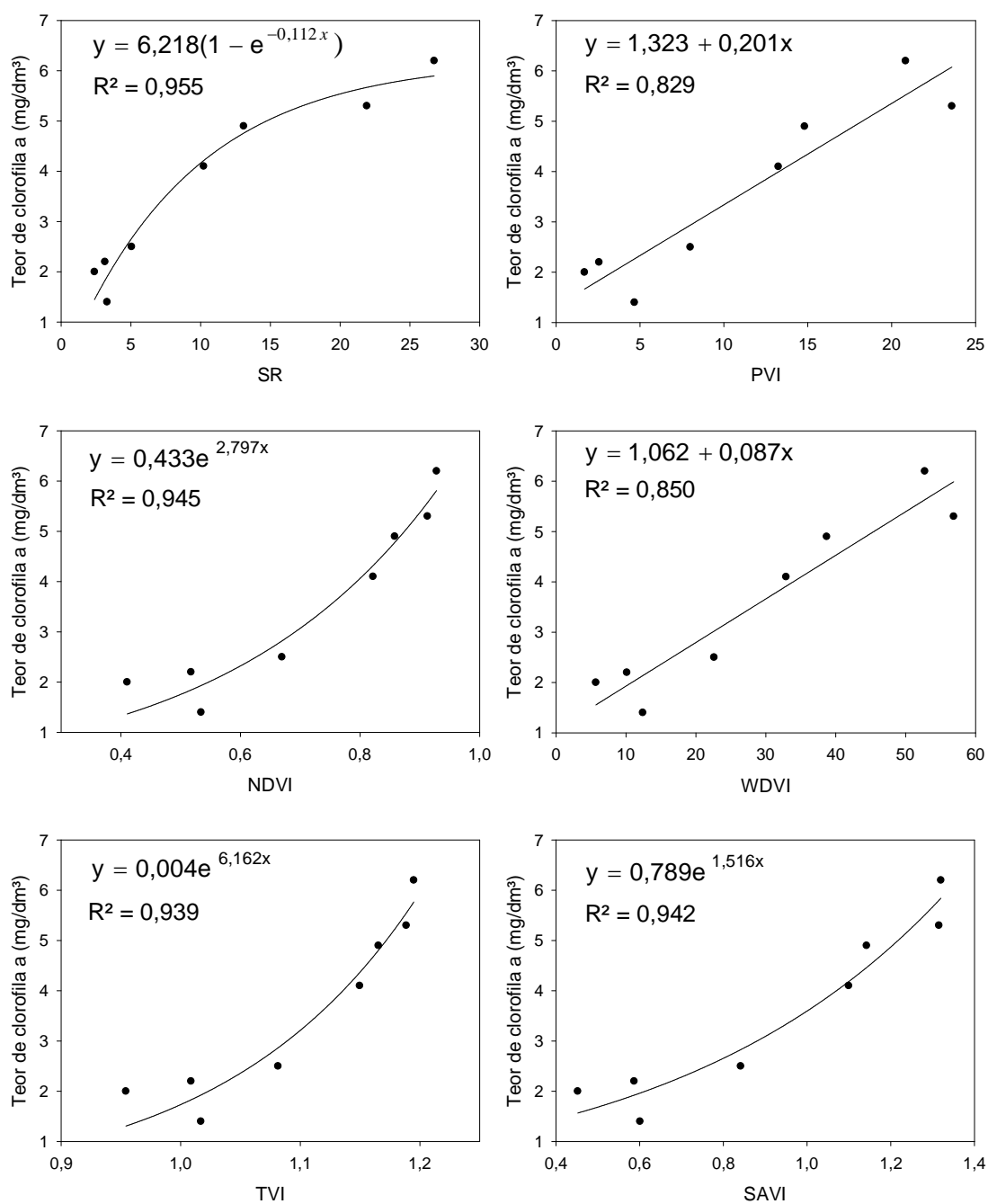


FIGURA 31. Funções de relação entre os índices de vegetação SR, NDVI, TVI, PVI, WDWI e SAVI e teor de clorofila a em folíolos de soja, EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

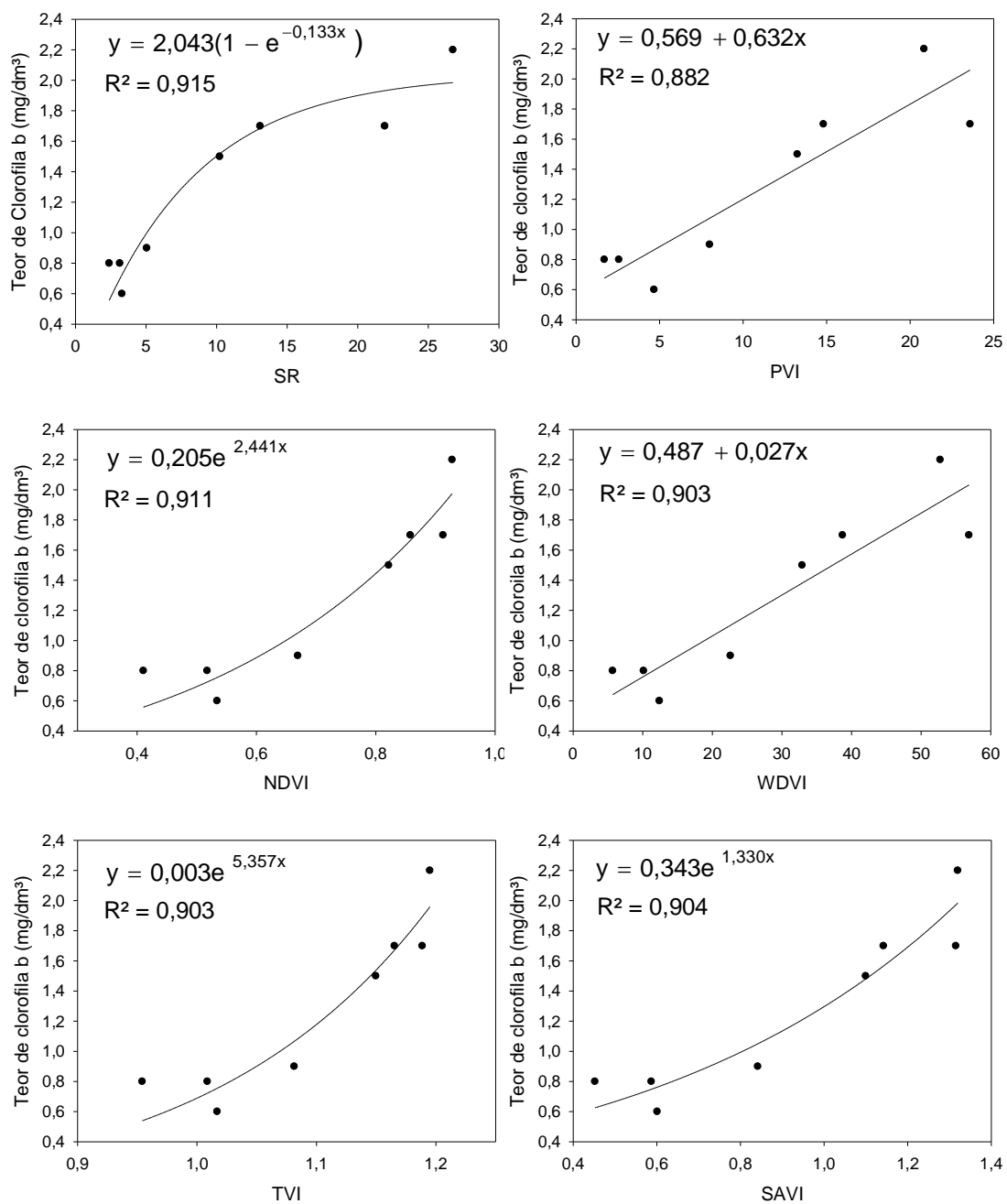


FIGURA 32. Funções de relação entre os índices de vegetação SR, NDVI, TVI, PVI, WDV, SAVI e teor de clorofila *b* em folíolos de soja, EEA-UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003/04.

5 Conclusões

O sistema de preparo do solo e o déficit hídrico influenciam o crescimento das plantas de soja, alterando as respostas espectrais das mesmas, o que torna possível o monitoramento da cultura através de técnicas de sensoriamento remoto.

A relação inversamente proporcional entre absorvância e reflectância durante a evolução da área foliar da soja evidencia a viabilidade do uso de medidas de reflectância em monitoramento de culturas agrícolas.

O solo descoberto úmido, com reflectância menor, se diferencia do solo seco e do solo coberto com palha, o que reforça a necessidade do uso de índices de vegetação que considerarem a reflectância do solo.

Diferenças de reflectância de dosséis de soja entre datas de observação demonstram que a reflectância é um indicador da condição de crescimento e desenvolvimento das plantas. As maiores diferenças de reflectância são observadas na porção do infravermelho próximo, sendo que a soja sem déficit hídrico apresenta valores de reflectância superiores à cultura sob déficit hídrico.

Todos os índices de vegetação testados são eficientes em monitoramento da cultura da soja. Mas somente os índices PVI (Índice de Vegetação Perpendicular) e WDVI (Índice de Vegetação Ponderado) diferenciam dosséis segundo a condição hídrica e sistemas de preparo do solo (convencional e direto).

Funções ajustadas entre índices de vegetação e parâmetros de planta podem ser utilizadas para o monitoramento da cultura da soja através de técnicas de sensoriamento remoto.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, M. A. H.; ASSAD, E. D.; BATISTA, G. T. Variação das medidas espectrais tomadas com espectrorradiômetro ao longo do ciclo de crescimento da soja. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 1993. v. 3. p. 1-9.

BATISTA G. T. **Estudo do comportamento espectral das principais classes de cobertura do solo do Vale do Paraíba e relação com o índice de área foliar.** Taubaté: Departamento de Ciências Agrárias. Universidade de Taubaté, 2005. 11p. Proposta de Projeto.

BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, Basingstoke, v. 35, n. 2-3, p. 161-173, 1991.

BERGAMASCHI, H. et al. **Clima da Estação Experimental da UFRGS** (e Região de Abrangência). Porto Alegre: UFRGS, 2003. 78p.

BISOTO, V.; FARIAS, A. D. Algumas considerações sobre a cultura da soja. In: REUNIÃO DE PESQUISA DA SOJA DA REGIÃO SUL, 29., 2001, Porto Alegre. **Indicações Técnicas...** Porto Alegre: FEPAGRO, 2001. p. 7-17.

BONATO, E. R. **Estresses em soja.** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. p. 21-43.

CANADIAN Remote Sensing Society. **Bases de dados.** Disponível em: <http://www.ucalgary.ca/UofC/faculties/SS/GEOG/Virtual/Remote%20Sensing/rsve.htm>. Acesso em 08 de jul. 2004.

CLEVERS, J. G. P. W. The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. **Remote Sensing of Environment**, Basingstoke, v.29, n.1, p. 25-37, 1989.

CONAB. **Bases de dados.** Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em 10 de out. 2006.

CUTTER, E. G. **Anatomia vegetal** : células e tecidos. São Paulo: Roca, 1986. 304p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1999. 412 p.

EIPHANIO, J. C. N. et al. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1992. 132p. (INPE-5424-PRP/172).

FERRI, C. P. **Utilização da reflectância espectral para a estimativa de pigmentos fotossintéticos em dosséis de soja [glycine max (L.), merril]**. S.J. dos Campos, INPE, 2002. 152f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – INPE, São José dos Campos, 2002.

FERRI, M. G. **Botânica: morfologia interna das plantas: anatomia**. 9. ed. São Paulo: Nobel, 1984. 113 p.

FIDELES FILHO, J. et al. Monitoramento de área foliar e biomassa do feijoeiro usando índice de vegetação por diferença normalizada. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, SP, v. 13, n. 2, p. 212-218, 2005.

FONSECA, E. L. **Caracterização espectral de Paspalum notatum flügge var. notatum com vistas à modelagem de crescimento**. 1999. 61f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

FONSECA, E. L.; ROSA, L. M. G.; FONTANA, D. C. Caracterização espectral de Paspalum notatum em diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 3, p. 365-371, 2002.

FONTANA, D. C. **Índice de vegetação global para o monitoramento da vegetação e a sua correlação com elementos agrometeorológicos e rendimento de grãos de soja**. 1995. 133f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

FONTANA, D. C. et al. Monitoramento da cultura da soja no centro-sul do Brasil durante La Niña 1998/2000. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 343-351, 2002.

GEOCITES. **Bases de dados**. Disponível em: <http://br.geocites.com.kawakami.enc>. Acesso em 08 de jul. 2004.

HALL, D. O.; RAO, K. K. **Fotossíntese**. São Paulo: E.P.U., 1980. 89 p.

HAMADA, E. **Desenvolvimento fenológico do trigo (cultivar iac 24 - tucuruí), comportamento espectral e utilização de imagens noaa-avhrr**. Campinas : UNICAMP, 2000. 152f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2000.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, Basingstoke v. 25, p. 295-309, June, 1988.

IBGE. **Bases de dados**. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>
Acesso em 08 de jul. 2004.

IBGE. **Bases de dados.** Disponível em:
<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>
Acesso em 09 de set. 2007.

IBGE. **Bases de dados.** Disponível em:
<http://censos2007.ibge.gov.br/resultado.shtm>. Acesso em 03 de dez. 2008.

JACKSON, R. D. Spectral indices in n-space. **Remote Sensing of Environment**, Basingstoke, v.13, p. 409-421, 1983.

JACÓBSEN, L.; FONTANA, D. C.; SHIMABUKURO, Y. Efeitos associados ao El Niño e La Niña na cobertura vegetal do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 7., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: SBMet, 2002. v. 1. p. 849-855.

KOLLENKARK et al. Effect of cultural practices on agronomic and reflectance characteristics of soybean canopy. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, n. 4, p. 751-8, 1982.

KÖPPEN, W. **Climatologia:** con un estudio de los climas de la Tierra. México: Fondo de Cultura Econômica, 1948. 478p.

KRUGER, C.A.M.B.; FONTANA, D. C.; MELO, R. W. Estimativa do rendimento de grãos da soja no Rio Grande do Sul usando um modelo agrometeorológico-espectral regionalizado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 15, p. 210-219, 2007.

LI-COR. **Instruction Manual:** Li-1800 Postable Spectroradiometer. Lincoln, Nebraska, 1990.

LUZ, N. B.; SANTOS, H. P.; MELO, G. W. Avaliação da Resposta Espectral de Folhas de Aveia Preta (*Avena strigosa*) Cultivadas em Diferentes Solos da Serra Gaúcha, com Adição de Cobre e Matéria Orgânica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 2343-2349.

LUZ, N. B.; FONSECA, D. L. Viabilidade da identificação de variedades de videiras pelas diferenças observadas na resposta espectral das folhas. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 3., 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: CPGCG, 2003. 1 CD-ROM.

MARTORANO, L. G. et al. Potencial da água e teor de clorofila em folhas de soja em resposta a sistemas de cultivo e irrigação. In: REUNIÓN ARGENTINA, 10.; REUNIÓN LATINOAMERICANA DE AGROMETEOROLOGÍA, 4., 2004. Mar del Plata. **Anais...** Mar del Plata: AADA, 2004a. 1 CD-ROM.

MARTORANO, L. G. et al. Evapotranspiração e coeficiente de cultura da soja na região subtropical do Brasil, determinado em lisímetro de pesagem. In: REUNIÓN

ARGENTINA, 10.; REUNIÓN LATINOAMERICANA DE AGROMETEOROLOGÍA, 4., 2004. Mar del Plata. **Anais...** Mar del Plata: AADA, 2004b. 1 CD-ROM.

MARTORANO, L. G. et al. Eficiências de interceptação e uso da radiação solar pela soja irrigada e não irrigada, em plantio direto e preparo convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: SBA, 2005. 1 CD-ROM.

MARTORANO, L. G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas dos sistema solo-planta-atmosfera, observados nos campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT.** 2007.151f. Tese. (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MDIC. **Bases de dados.** Disponível em:
<http://www.mdic.gov.br/sitios/> Acesso em 10 de out. 2007.

MELO, R. W. ; FONTANA, D. C. ; BERLATO, M. A. ; DUCATI, J. R. An agrometeorologica-spectral model to estimate soybean yield, applied to southern Brazil. **International Journal of Remote Sensing** (Online), v. 29, p. 4013-4028, 2008.

MERIAN SCHULE. **Bases de dados.** Disponível em:
<http://www.merian.fr.schule.de/Beck/skripten/12/bs12-12.htm>. Acesso em 08 de jul. 2004.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.** 2 ed. São José dos Campos: UFV, 2004. 250p.

MOTTA, J. L. G.; FONTANA, D. C.; WEBER, E. **Análise da evolução temporal o NDVI/NOAA em região de soja no Rio Grande do Sul.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2003. p. 197-204.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil.** 2.ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 421p.

NOBEL, P. S. **Plant cell physiology: a physicochemical approach.** San Francisco: W. H. Freeman, 1970. 267 p.: il.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal.** São Paulo: Agronômica Ceres,1981. 425p.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. **Proceedings of the Royal Society**, London, v. 193. p.120-146, 1948.

PEREIRA, P. G. **Indicadores fisiológicos relacionados à fotossíntese do milho sob déficit hídrico.** 2001. 100f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

PONZONI, F. J.; DISPERATI, A. A. **Comportamento espectral da vegetação**. São José dos Campos: INPE, 1995. 37p. (INPE-5619 – PUD/065).

RICHARDSON, A. J.; WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering Remote Sensing**, Reston, v. 43, n.12, p. 1541-1552, 1977.

ROUSE, J. W. et al. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation of the natural vegetation**. Grenbelt, MD : NASA/GSFC, 1974. 371p. Type III. Final Report.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring Vegetation systems in the great plains with ERTS. In: NASA ERTS SYMPOSIUM, 3, 1973, Maryland. **Anais...** Washington D.C, 1973. v.1, p.309-317.

SILVA, E. S. [**Notas de aula**]. Presidente Prudente : UNESP, 2002.

STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C. Introdução à radiometria. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...**Curitiba, 1993. p. 2-12.

STEFFEN, C. A. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Bases de dados INPE Disponível em: <http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>. Acesso em 10 de out. 2004.

SWAIN, P. A.; DAVIS, S. M. **Remote Sensing: The Quantitative Approach**. New York : McGraw-Hill, 1978. 396p.

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

THORNTHWAITE, C.M. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**. New Work, v. 38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Publications in Climatology**, Centerton, v.3, n.10, p.1-104, 1955.

TUCKER, C. J.; GARRATT, M. W. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetations. **Remote Sensing of Environment**, Basingstoke, v. 8, n. 2., p.127-50, 1979.

VALERIANO, D. M. **Interações da radiação solar com a vegetação**. São José dos Campos : INPE, 1988. 31p. (INPE-4697-MD/038).

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV. Impr Univ., 2000. 449 p.

WAGNER, A. P. L. et al. Estimativa de Área de Soja no Rio Grande do Sul Utilizando Imagens NDVI/MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2007. p. 457- 464.

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

WESLLESLEY College. **Bases de dados**. Disponível em:
<http://www.wesllesley.edu/Biology/Courses/108/108.html>. Acesso em 08 jul 2004.

APÊNDICE 1. Índice de área foliar (IAF) em função de dias após a emergência (DAE) em soja. A emergência ocorreu em 27 de novembro de 2003. Eldorado do Sul, RS, 2003/04. (Fonte: Martorano et al., 2005). As datas assinaladas correspondem aos dias com medições espectrais em nível de dossel.

