

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

Resposta espectral da canola ao longo do ciclo em função da adubação nitrogenada

Daniele Gutterres Pinto
Engenheira Agrônoma/UFRGS

Dissertação apresentada como um dos requisitos
à obtenção do Grau de Mestre em Fitotecnia
Ênfase Agrometeorologia

Porto Alegre (RS), Brasil
Julho de 2015

CIP - Catalogação na Publicação

Gutterres Pinto, Daniele
Resposta espectral da canola ao longo do ciclo em
função da adubação nitrogenada / Daniele Gutterres
Pinto. -- 2015.
94 f.

Orientadora: Denise Cybis Fontana.
Coorientador: Genei Antônio Dalmago.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa
de Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, BR-RS,
2015.

1. Índices de vegetação. 2. Brassica Napus. 3.
Reflectância espectral. 4. Espectrorradiometria. I.
Cybis Fontana, Denise, orient. II. Antônio Dalmago,
Genei, coorient. III. Título.

DANIELE GUTTERRES PINTO
Engenheira Agrônoma - UFRGS

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM FITOTECNIA

Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 13.07.2015
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 13.10.2015
Por

DENISE CYBIS FONTANA
Orientadora - PPG Fitotecnia

SIMONE MUNDSTOCK JAHNKE
Coordenadora do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia

GENEI ANTONIO DALMAGO
Coorientador - EMBRAPA Trigo
Passo Fundo/RS

CHRISTIAN BREDEMEIER
PPG Fitotecnia/UFRGS

RICARDO WANKE DE MELO
Faculdade de Agronomia/UFRGS

AMANDA HEEMANN JUNGES
FEPAGRO/RS

PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade de
Agronomia

AGRADECIMENTOS

Agradeço e também dedico esta dissertação ao meu pai, pelo amor e apoio. Ele que sempre incentivou os meus estudos e proporcionou oportunidades que me trouxeram até aqui. Agradeço ao meu irmão pelo companheirismo e apoio que sempre me foi dedicado. Aos demais familiares agradeço por todo apoio e ajuda.

Agradeço a minha orientadora Denise Cybis Fontana que desde a iniciação científica me orienta, me ensina, é um exemplo profissional e pessoal.

Ao meu co-orientador Genei Antônio Dalmago pela oportunidade através da parceria com a Embrapa de realizar um experimento a campo, que contribuiu para a minha formação profissional. Também pela dedicação e conhecimentos compartilhados.

Aos professores, colegas, e mais que isso, amigos do departamento de Agrometeorologia, pelos ensinamentos técnicos e pela agradabilíssima convivência diária. Em especial à Ana Paula, Ricardo, Elizandro, Aldemir e Laura, amigos que eu pretendo manter na minha vida.

Aos meus amigos, agradeço pelos momentos de descontração, que muitas vezes deram o fôlego necessário para continuar e que tornam a caminhada neste plano mais alegre e leve. Em especial à Jessica que é um presente que a agronomia me deu. À Mariana e Marjoriê que me acompanham sempre, de muito perto, por toda a vida.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul onde estudo desde a graduação, e ao CNPq pela possibilidade me dada de continuar os estudos.

À Embrapa e toda equipe do Laboratório de Meteorologia que me acolheu e contribuiu fisicamente para o desenvolvimento do trabalho.

RESPOSTA ESPECTRAL DA CANOLA AO LONGO DO CICLO EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA¹

Autor: Daniele Gutterres Pinto
Orientadora: Denise Cybis Fontana
Coorientador: Genei Antônio Dalmago

RESUMO

O objetivo da pesquisa foi caracterizar o padrão espectral da canola ao longo do ciclo em função de diferentes níveis de adubação nitrogenada. Para isto, foram instalados experimentos nas safras de 2013 e 2014, em área experimental pertencente a EMBRAPA Trigo, em Coxilha, RS. O delineamento experimental foi de blocos casualizados com quatro repetições, sendo os tratamentos cinco doses de adubação nitrogenada: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹ de N. O comportamento espectral foi caracterizado por meio de medições com espectrorradiômetro (sensoriamento remoto passivo) e com o sensor *Greenseeker* (sensoriamento remoto ativo). A partir das medições com espectrorradiômetro, foram calculados os índices de vegetação razão simples (SR), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação realçado (EVI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e índice de vegetação por diferença normalizada verde (GNDVI). Também foram obtidos dados de matéria seca da parte aérea, índice de área foliar (IAF), fenologia e rendimento de grãos da canola. Por fim, foram estabelecidas correlações entre os dados espectrais, dados de matéria seca da parte aérea e rendimento de grãos de canola. Os resultados mostraram que a canola apresenta curvas de reflectância com padrão típico de culturas anuais: baixa reflectância no visível e alta no infravermelho, com variações de amplitude ao longo do ciclo associadas às mudanças estruturais do dossel. Os perfis temporais dos índices de vegetação apresentaram dois picos máximos, um antes e outro após o florescimento, o que pode ser usado para distinguir a canola de outras culturas anuais. A adubação nitrogenada em cobertura causou variações no IAF e no rendimento de grãos. Já o acúmulo de matéria seca da parte aérea, nas condições experimentais ocorridas, não variou em função das doses de adubação nitrogenada aplicadas em cobertura. Associado às variações no dossel, as diferentes doses de N causaram diferenças na reflectância do mesmo, as quais foram percebidas, principalmente, nos índices de vegetação SR, GNDVI e NDVI obtido com sensor *Greenseeker*. Entre as bandas do espectro eletromagnético estudadas, as que melhor se correlacionaram com a quantidade de matéria seca da parte aérea da canola, foram as bandas do vermelho e infravermelho próximo, durante o período vegetativo do ciclo de produção. Os índices com melhores respostas foram SR, EVI e SAVI também no período vegetativo. Para estudos do rendimento de grãos, os índices com melhores respostas foram o SAVI e o GNDVI.

¹ Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (94 p.) Julho, 2015.

SPECTRAL RESPONSE OF CANOLA OVER THE CYCLE ACCORDING TO NITROGEN FERTILIZATION²

Author: Daniele Gutterres Pinto
Adviser: Denise Cybis Fontana
Co-adviser: Genei Antônio Dalmago

ABSTRACT

The objective of the research is to characterize the spectral pattern of Canola throughout the cycle by having different levels of nitrogen fertilization. To do so, some experiments are taken from the harvests of 2013 and 2014. These ones belong to an experimental area at EMBRAPA wheat (Brazilian company that researches agriculture) in Coxilha (a city in South of Brazil). Randomized block design is used with four replications and treatments with five doses of nitrogen fertilization: 10, 20, 40, 80 160 kg ha⁻¹ of N. The spectral behavior is characterized by measurement with spectroradiometer (passive remote sensing) and the Greenseeker sensor (active remote sensing). From the measurements of spectroradiometer, the simple ratio (SR), the normalized difference vegetation index (NDVI), enhanced vegetation index (EVI), soil-adjusted vegetation index (SAVI) and green normalized difference vegetation index (GNDVI) were calculated. As another way of measurement, shoot dry matter data, leaf area index (LAI), phenology and yield of canola grain were obtained. As results, canola shows reflectance curves with the typical pattern of annual crops: low spectral reflectance and high spectral reflectance in infrared with variations in amplitude over the cycle associated with structural changes of the canopy. The temporal types of vegetation indices have two maximum peaks, one before and one after blossoming, which can be used to distinguish canola than the other annual crops. The nitrogen fertilization coverage causes variations in IAF and grain yield, wherein the highest yield is at a dose of 100 kg ha⁻¹ of N. But the accumulation of shoot dry matter, that occurred in experimental conditions, did not vary according to nitrogen fertilization rates applied in coverage. Different levels of nitrogen cause differences in reflectance of the canopy and these ones are associated with its variations, which are perceived mainly in rates of SR vegetation, GNDVI and NDVI obtained with Greenseeker sensor. Between the bands of the electromagnetic spectrum studied, those that the best correlated with the amount of shoot dry matter of canola are the bands of red and near-infrared, during the growing season of the production cycle. Indexes with the best responses are SR, EVI, and SAVI also in the growing season. Considering the yield studies, the indices with the best responses are SAVI and GNDVI that use the method of sum of the index throughout the production cycle.

² Master of Science dissertation in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (94 p.) July, 2015.

SUMÁRIO

| | Página |
|---|--------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1 A cultura da canola | 4 |
| 2.2 Fenologia da canola | 6 |
| 2.3 Adubação nitrogenada | 10 |
| 2.4 Radiação fotossinteticamente ativa | 12 |
| 2.5 Interação da radiação eletromagnética com a vegetação | 13 |
| 2.6 Reflectância de dosséis | 16 |
| 2.7 Sensores remotos | 19 |
| 2.8 Índices de vegetação | 21 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 24 |
| 3.1 Área de estudo | 24 |
| 3.2 Delineamento experimental | 25 |
| 3.3 Dados meteorológicos | 26 |
| 3.4 Balanço hídrico sequencial | 27 |
| 3.5 Cálculo da soma térmica pelo método de graus dia | 28 |
| 3.6 Determinações das variáveis de planta | 29 |
| 3.6.1 Determinações fenológicas | 29 |
| 3.6.2 Determinações da matéria seca da parte aérea | 30 |
| 3.6.3 Determinações do índice de área foliar | 31 |
| 3.6.4 Determinações do rendimento de grãos | 31 |
| 3.7 Medições espectrais | 32 |
| 3.7.1 Medições de NDVI com sensor ativo <i>GreenSeeker</i> | 32 |
| 3.7.2 Medições de reflectância do dossel com sensor remoto passivo espectrorradiômetro | 33 |
| 3.7.3 Cálculo dos índices de vegetação | 34 |
| 3.8 Análises estatísticas..... | 35 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 36 |
| 4.1 Caracterização das condições meteorológicas | 36 |
| 4.2 Necessidades térmicas da canola | 40 |
| 4.3 Resultados de planta..... | 41 |
| 4.3.1 Acúmulo de matéria seca da parte aérea..... | 41 |
| 4.3.2 Índice de área foliar | 46 |
| 4.3.3 Rendimento de grãos | 50 |
| 4.4 Resultados espectrais | 52 |

| | Página |
|--|--------|
| 4.4.1 Reflectância do dossel medida com espectrorradiômetro | 52 |
| 4.4.2 Índices de vegetação calculados a partir dos dados hiperespectrais..... | 60 |
| 4.4.3 NDVI obtido com sensor óptico ativo <i>Greenseeker</i> | 68 |
| 4.5 Correlação dos dados de planta com os dados espectrais..... | 71 |
| 5 CONCLUSÕES | 76 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 78 |
| 7 APÊNDICES | 85 |

RELAÇÃO DE TABELAS

| | Página |
|--|--------|
| 1. Estádios fenológicos da canola adaptados de CETIOM (Iriarte & Valetti, 2008).. | 9 |
| 2. Datas das avaliações de biomassa, nas duas safras de 2013 e 2014, com os respectivos estádios fenológicos em que as plantas estavam na data da coleta. Coxilha, RS. | 30 |
| 3. Datas das medições do dossel de canola realizadas com sensor ativo <i>Greenseeker</i> , nas duas safras avaliadas 2013 e 2014, com os respectivos estádios fenológicos em que as plantas estavam na data da medição. Coxilha, RS. | 32 |
| 4. Datas das medições do dossel de canola realizadas com espectrorradiômetro, nas duas safras avaliadas 2013 e 2014, com os respectivos estádios fenológicos em que as plantas estavam na data da medição. Coxilha, RS. | 33 |
| 5. Soma térmica necessária para a ocorrência das fases fenológicas da canola e para completar o ciclo de desenvolvimento, nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS. .. | 40 |
| 6. Matéria seca da parte aérea acumulada pela canola (g m^{-2}), em função de cinco doses de nitrogênio aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha^{-1} , nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS. | 43 |
| 7. Índice de área foliar (IAF) estimado da canola, em função de cinco doses de nitrogênio aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha^{-1} , nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS. | 46 |
| 8. Índices de vegetação da canola, razão simples (SR), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação realçado (EVI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e índice de vegetação por diferença normalizada verde (GNDVI), para as cinco doses de adubação nitrogenada aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha^{-1} , em três etapas do ciclo fenológico: vegetativo (Veg.), florescimento (Flor.) e maturação (Mat.), nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS. | 66 |
| 9. NDVI da canola, obtido com sensor óptico ativo, <i>Greenseeker</i> , para as cinco doses de adubação nitrogenada, aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha^{-1} , nos períodos vegetativo (Veg), florescimento (Flor) e maturação (Mat), nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS. | 70 |

RELAÇÃO DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| 1. Folha de canola (A), folhas alternas (B), inflorescência de canola (C). Fonte: Adaptado de <i>Canola Council of Canada</i> , Thomas (2003). | 4 |
| 2. Mudanças físicas ocorridas no dossel de canola ao longo das fases fenológicas. A) Lavoura em fase de plântula, B) lavoura em fase de alongamento, C) lavoura em fase de florescimento, D) lavoura em fase de maturação. Coxilha, RS. | 8 |
| 3. Curvas típicas de reflectância, transmitância e absortância de uma folha (Absortância=1-transmitância-reflectância). Fonte: Li-cor (1990). | 14 |
| 4. Curva característica de reflectância dos alvos (água, vegetação e solo). Fonte: Adaptada de Rizzi (2004) e Hoffer (1976). | 15 |
| 5. Área experimental da Embrapa Trigo. O polígono um corresponde ao experimento da safra de 2013, o polígono dois corresponde ao experimento da safra de 2014 e o polígono três corresponde a localização da estação meteorológica. Coxilha, RS. | 24 |
| 6. Temperatura média do ar ocorrida nas safras de 2013 e 2014 e a normal climatológica 1961-1990 de Passo Fundo (INMET, 2015). Coxilha, RS. | 36 |
| 7. Precipitação pluvial mensal das safras de 2013 e 2014 e a normal climatológica 1961-1990 de Passo Fundo. Coxilha, RS. | 37 |
| 8. Déficits e excessos hídricos ocorridos no período de abril a outubro nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS. | 38 |
| 9. Radiação solar global ocorrida nas safras de 2013 e 2014 e normal climatológica 1961-1990. Passo Fundo, R..... | 39 |
| 10. Acúmulo de matéria seca da parte aérea pela canola, em função de doses de nitrogênio aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg de N ha ⁻¹ , nas safras de 2013 (A) e 2014 (B). As barras acima no gráfico indicam os períodos: vegetativo (em branco); florescimento (em preto) e enchimento de grãos (hachurado). Coxilha, RS. | 42 |

| | Página |
|---|--------|
| 11. Diagramas de caixa da matéria seca da parte aérea acumulada pela canola, nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS. | 43 |
| 12. Partição da matéria seca da parte aérea em estruturas vegetativas (hastes e folhas) e reprodutivas (síliquas e flores) da canola, nas safras de 2013 (A) e 2014 (B). As barras acima no gráfico indicam os períodos: vegetativo (em branco); florescimento (em preto) e enchimento de grãos (hachurado). Coxilha, RS. | 44 |
| 13. Modelos de ajuste do incremento de biomassa da canola, em função do acúmulo da soma térmica, para as safras de 2013 (A) e 2014 (B). Coxilha, RS. | 45 |
| 14. Modelos de ajuste do índice de área foliar (IAF) da canola, em função do acúmulo da soma térmica, para cinco doses de nitrogênio aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg de N ha ⁻¹ , na safra de 2013. Coxilha. | 48 |
| 15. Modelos de ajuste do índice de área foliar (IAF) da canola em função do acúmulo da soma térmica, para cinco doses de nitrogênio aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg de N ha ⁻¹ , na safra de 2014. Coxilha, RS. | 49 |
| 16. Modelos de ajuste do rendimento de grãos da canola em função da dose de adubação nitrogenada aplicada em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg de N ha ⁻¹ , na safra de 2013 (A) e 2014 (B). Coxilha, RS. | 51 |
| 17. Reflectância espectral da canola, em função de cinco doses de adubação nitrogenada aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha ⁻¹ , e a média dos tratamentos, em cada data de medição, na safra de 2013. Coxilha, RS. | 53 |
| 18. Curvas de reflectância da canola, em função de cinco doses de adubação nitrogenada aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha ⁻¹ , e a média dos tratamentos, em data de medição, da safra de 2014. Coxilha, RS. | 56 |
| 19. Variação da reflectância espectral nas bandas do azul, do verde do amarelo, do vermelho e do infravermelho próximo, em três fases distintas do ciclo de desenvolvimento da canola, no ano de 2013 (A) e 2014 (B). Coxilha, RS. | 58 |
| 20. Relação entre reflectância na banda do vermelho e do infravermelho próximo, para a canola, nos anos de 2013 e 2014, Coxilha, RS. | 59 |
| 21. Dinâmica temporal dos índices de vegetação da canola: razão simples (SR), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação realçado (EVI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e índice de vegetação por diferença normalizada verde (GNDVI), em função de cinco doses de adubação nitrogenada, aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha ⁻¹ , no ano de 2013. As barras acima no gráfico indicam os períodos: vegetativo (em branco); florescimento (em preto) e enchimento de grãos (hachurado). Coxilha, RS. | 61 |

22. Dinâmica temporal dos índices de vegetação da canola: razão simples (SR), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação realçado (EVI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e índice de vegetação por diferença normalizada verde (GNDVI), em função de cinco doses de adubação nitrogenada, aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹, no ano de 2014. As barras acima no gráfico indicam os períodos: vegetativo (em branco); florescimento (em preto) e enchimento de grãos (hachurado). Coxilha, RS. 63
23. Diagramas de caixa do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação realçado (EVI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e índice de vegetação por diferença normalizada verde (GNDVI) da canola (A) e razão simples (SR) (B), da safra de 2013 e 2014. Coxilha, RS. 64
24. Relação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em função do índice de vegetação realçado (EVI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI), índice de vegetação por diferença normalizada verde (GNDVI) e razão simples (SR) nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS. 67
25. Dinâmica temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para a canola, obtido com sensor óptico ativo - Greenseeker, em função de cinco doses de adubação nitrogenada, aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹, no ano de 2013 (A) e 2014 (B). Coxilha, RS. 69
26. Coeficientes de correlação de Pearson entre a matéria seca da parte aérea da canola e a refletância da REM nas bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético, nos períodos do ciclo: vegetativo, florescimento e maturação. **Significativo a 5%. Nas safras de 2013 (A) 2014 (B), Coxilha, RS. 72
27. Coeficientes de correlação de Pearson entre a biomassa acumulada pela canola e os índices de vegetação NDVI, EVI, SAVI e GNDVI nos períodos do ciclo: vegetativo (Veg), florescimento (Flor) e maturação (Mat). As correlações acima de 0,30 são significativas a 5%. Safras de 2013 (A) e 2014 (B), Coxilha, RS. 74
28. Coeficientes de correlação de Pearson entre o rendimento de grãos da canola e os índices de vegetação NDVI, EVI, SAVI e GNDVI. Na linha tracejada correlações significativas a 5%. Nas safras de 2013 (A) e 2014 (B), Coxilha, RS. 75

RELAÇÃO DE APÊNDICES

| | Página |
|---|--------|
| 1. Curvas de reflectância da canola. das sete datas de medições, para cinco doses de adubação nitrogenada: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha ⁻¹ de N. Na safra de 2013. Coxilha, RS. | 86 |
| 2. Curvas de reflectância da canola. das sete datas de medições, para cinco doses de adubação nitrogenada: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha ⁻¹ de N. Na safra de 2014. Coxilha, RS. | 90 |
| 3. Laudo de análise química do solo da área experimental da safra de 2013. Coxilha, RS. | 94 |
| 4. Laudo de análise química do solo da área experimental da safra de 2014, Coxilha, RS. | 94 |

1 INTRODUÇÃO

A canola (*Brassica napus* L. var. oleifera) é uma oleaginosa extremamente interessante para os sistemas de produção de grãos no Sul do Brasil. É possível introduzi-la como alternativa ao trigo para a rotação de culturas no período de outono-inverno-primavera, sem a necessidade de maquinário específico. Isto possibilita geração de renda ao agricultor e melhora a capacidade de cultivo do solo, visto que, com a prática da rotação de culturas, ocorre diminuição de inóculo de doenças, ciclagem de nutriente e melhoria da condição física do solo. Além disso, o óleo proveniente dos grãos é um dos mais saudáveis para alimentação humana e vem sendo bastante utilizado pela indústria do biodiesel, cuja demanda vem crescendo ao longo dos anos. O resíduo da extração do óleo pode, ainda, ser utilizado na alimentação animal, pois o farelo é rico em proteínas. O processo produtivo da canola garante preços semelhantes aos da soja, a oleaginosa mais produzida no Brasil e, por isso, tem grande procura pelos agricultores, necessitando avanços constantes na formação do conhecimento sobre a cultura.

O conjunto de informações e conhecimentos a respeito da canola e do seu cultivo ainda é limitado no país. As técnicas de cultivo, em grande parte, foram adaptadas de outros cultivos ou de outros países, visto que no Brasil a pesquisa em canola é recente em relação a outras culturas produtoras de grãos. Um aspecto que demonstra esse déficit de conhecimento para a cultura da canola é o rendimento de grãos, que no Brasil varia de 680 a 1.503 kg ha⁻¹, enquanto os genótipos possuem potencial para produzir em torno de 4.500

kg ha⁻¹. Isto mostra a necessidade da geração de informações locais, possibilitando maior entendimento da interação dos fatores de produção e geração de técnicas de cultivo específicas para a canola cultivada nas diferentes regiões do Brasil.

A cultura da canola é muito responsiva a adubação nitrogenada e o nitrogênio é um nutriente essencial às plantas, visto que ele participa da constituição das proteínas, da clorofila e participa de diversos processos metabólicos essenciais às plantas. Uma adequada adubação nitrogenada incrementa a produção de canola, trazendo maiores rendimentos financeiros ao produtor, além de fazer uso racional dos insumos agrícolas.

O sensoriamento remoto, tanto orbital quanto terrestre, é uma forma possível de geração de informações para diversos fins no setor agrícola, como a previsão de safras, através da modelagem agrometeorológica-espectral de crescimento/rendimento de grãos e da identificação da área cultivada, e monitoramento da dinâmica de cultivos agrícolas. Através de sensores remotos é possível determinar a resposta espectral de alvos de interesse, como a vegetação agrícola. A resposta espectral ou assinatura espectral do dossel é uma variável extremamente importante, pois nele estão inseridas diversas informações da cultura, como estágio de desenvolvimento, nível nutricional, estresse hídrico e incidência de doenças e pragas, entre outros. Além disto, é possível estimar a biomassa verde aérea da cultura através dos índices de vegetação, calculados através da porção da radiação refletida em determinadas faixas do espectro eletromagnético (especialmente o visível e o infravermelho próximo). É possível buscar essa gama de informações também para a cultura da canola cultivada no Sul do Brasil e, assim, contribuir no entendimento da dinâmica espaço-temporal da cultura e de sua produtividade.

Portanto, dada a importância da cultura da canola para o Rio Grande do Sul, a disponibilidade de técnicas de sensoriamento remoto e a existência de diferentes tipos de sensores remotos que permitam a obtenção de informações relevantes sobre o cultivo, a

hipótese deste trabalho é que as alterações no crescimento e desenvolvimento das plantas como também a resposta espectral da canola sejam influenciados pelas condições ambientais.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo geral verificar se as mudanças morfológicas ocorridas em um dossel de canola, causadas por distintas condições ambientais, determinam mudanças perceptíveis na resposta espectral do mesmo.

Os objetivos específicos serão:

- 1) Caracterizar as variáveis fenométricas (IAF e matéria seca da parte aérea) e o rendimento de grãos, assim como, estabelecer funções de resposta da canola em diferentes condições ambientais (meteorológicas e níveis de adubação nitrogenada);
- 2) Caracterizar a reflectância e os índices de vegetação obtidos no dossel de canola, em função da evolução do ciclo, da adubação nitrogenada e de condições meteorológicas distintas;
- 3) Correlacionar a resposta espectral da canola ao longo do ciclo, através da reflectância e dos índices de vegetação, com as variáveis fenométricas e rendimento de grãos em diferentes condições ambientais (meteorológicas e níveis de adubação nitrogenada);

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da canola

A canola (*Brassica napus* L. var. *oleifera*) é uma planta da família Brassicaceae. Foi originada através do cruzamento entre as espécies *Brassica rapa* e *Brassica oleracea* (Raymer, 2002; Thomas, 2003).

As plantas pertencentes ao gênero *Brassica* sp, na maioria das vezes, são anuais e possuem porte herbáceo. Suas folhas (Figura 1A) podem ser inteiras bem como compostas, a alternas e sem estípulas (Figura 1B). Suas flores (Figura 1C) são inflorescências localizadas na parte superior dos ramos. Os frutos são secos, do tipo siliqua, com um falso septo (Joly, 1993).



FIGURA 1. Folha de canola (A), folhas alternas (B), inflorescência de canola (C). Fonte: Adaptado de *Canola Council of Canada*, Thomas (2003).

A canola cultivada atualmente foi obtida através de melhoramento genético convencional das cultivares de colza mais antigas, cujo objetivo principal foi a diminuição dos níveis de glucosinolatos e ácido erúico, compostos tóxicos que impossibilitam o consumo humano e animal. Com o melhoramento genético convencional, conseguiu-se cultivares livres ou com baixos teores destes compostos (Thomas, 2003; Valetti, 2008). O óleo de canola deve conter menos que 2% de ácido erúico e menos que 30 $\mu\text{mol g}^{-1}$ de glucosinatos (Edwards & Hertel, 2011). Assim as cultivares com menores teores de glucosinatos e ácidos erúicos deram origem ao nome "canola", que deriva da expressão: "*Canadian oil low acids*" (Edwards & Hertel, 2011).

Existem dois tipos de canola cultivados no mundo, denominados como o tipo de primavera e o tipo de inverno. Os genótipos de inverno necessitam de um período de baixas temperaturas do ambiente para que ocorra a indução ao florescimento, conhecido como vernalização. Estes genótipos são cultivados, principalmente, na Europa. Já os genótipos de primavera apresentam menor necessidade de horas de frio para florescer (Walton *et al.*, 1999). No Brasil, são cultivados apenas os genótipos de primavera.

A produção de canola é destinada à fabricação de óleos vegetais, sendo que os grãos possuem um teor de óleo em torno de 30 a 45% do seu peso. O resíduo da extração de óleo pode ser destinado à produção animal, já que o grão possui um alto teor de proteínas, em torno de 20 a 25%. O óleo se apresenta hoje como um dos que têm maior qualidade entre os óleos vegetais, por apresentar baixo teor de ácidos graxos saturados (Valetti, 2008). No Brasil, a produção de canola está concentrada nos estados da região Sul, principalmente no Rio Grande do Sul, que, concentra cerca de 65% da área plantada brasileira com 39.000 ha na safra de 2014 (CONAB, 2015), enquanto no mundo, a União Europeia é o maior produtor de canola, seguida de Canadá e China (USDA, 2013).

Na região sul do Brasil, a canola é uma espécie alternativa aos cereais de estação fria para a rotação de culturas, possibilitando geração de renda para os agricultores. Em rotação com o trigo diminui a incidência de doenças fúngicas e também tem impactos positivos sobre as culturas de verão, como soja e milho. Além disso, de maneira geral, a canola não necessita de maquinário específico para seu cultivo, utilizando a mesma estrutura de máquinas e equipamentos disponíveis nas propriedades (Tomm, 2007).

A indicação para a semeadura da canola no Rio Grande do Sul, segundo o zoneamento agroclimático, varia de acordo com o tipo de solo: sendo solo tipo 1 um solo com capacidade de água disponível (CAD) de 35 mm, solo tipo 2 com CAD de 50 mm e solo tipo 3 com CAD de 75mm. A recomendação indica que os genótipos de ciclo precoce (ciclo de 130 dias) devem ser semeados de 15/04 a 25/06 (solo tipo 3) de 15/04 a 25/05 (solo tipo 2) e de 15/04 a 05/05 (solo tipo 1). Os genótipos de ciclo médio (ciclo de 140 dias) devem ser semeados de 15/04 a 25/05 (solo tipo 3) 15/04 a 15/05 (solo tipo 2) e 15/04 a 25/04 (solo tipo 1). Os genótipos de ciclo tardio (ciclo de 150 dias) devem ser semeados de 15/04 a 25/05 (solo tipo 3), 15/04 a 15/05 (solo tipo 2), 15/04 (solo tipo 1) (Dalmago et al., 2008).

2.2 A fenologia da canola

A fenologia é o ramo da ecologia que estuda os fenômenos periódicos dos seres vivos e suas relações com as condições ambientais como luz, temperatura e umidade (De Fina e Ravelo, 1973).

A fenologia estuda as mudanças morfológicas e as transformações que estão associadas ao desenvolvimento dos vegetais. Representa, portanto, o estudo de como a planta se desenvolve ao longo de suas diferentes fases: germinação, emergência, crescimento, florescimento, frutificação, formação das sementes e maturação. Para

favorecer a compreensão das fases do desenvolvimento, existem escalas fenológicas, que nada mais são do que um conjunto de fases apresentadas em sequência, de forma a descrever o crescimento e o desenvolvimento desde a emergência até a maturação (Marin, 2013). A fenologia pode ter diversas aplicações, como subdivisão do ciclo, determinação das necessidades ecoclimáticas, determinação dos períodos críticos das culturas, classificação de cultivares, segundo sua precocidade, zoneamentos agrícolas e manejo das culturas.

A canola tem o seu ciclo descrito por uma escala fenológica. Segundo Iriarte & Valetti (2008), o ciclo da canola é subdividido em seis períodos: germinação, plântula, roseta, alongamento, florescimento e maturação. Esses períodos ainda são subdivididos em subperíodos (Tabela 1). Ao longo das fases fenológicas o dossel sofre uma série de mudanças físicas, basicamente pela formação das estruturas reprodutivas (inflorescências e síliquas (Figura 2).

A duração destes períodos é altamente dependente de fatores como temperatura do ar, fotoperíodo e umidade relativa do ar, sendo a temperatura do ar o fator mais importante para o crescimento e desenvolvimento das plantas de canola (Thomas, 2003). A temperatura basal inferior da canola, abaixo da qual o crescimento e o desenvolvimento das plantas não ocorrem, é 5°C, se desenvolvendo bem até temperaturas em torno de 30°C (temperatura basal superior). No entanto estresses térmicos podem ocorrer em temperaturas de 25°C (Thomas, 2003).

A primeira fase do ciclo é a germinação da semente e a emergência das plântulas, que é iniciada com a absorção de água pelas sementes e o desencadeamento de inúmeros processos bioquímicos. Inicia o crescimento radicular, que ancora a plântula, e os cotilédones são expostos. Estes iniciam os processos de fotossíntese. A germinação é afetada pela viabilidade das sementes, o tamanho das sementes, microrganismos presentes

no solo e doenças que possam afetar as sementes (Thomas, 2003). Após aproximadamente uma semana, surge a primeira folha verdadeira (Iriarte & Valetti, 2008).

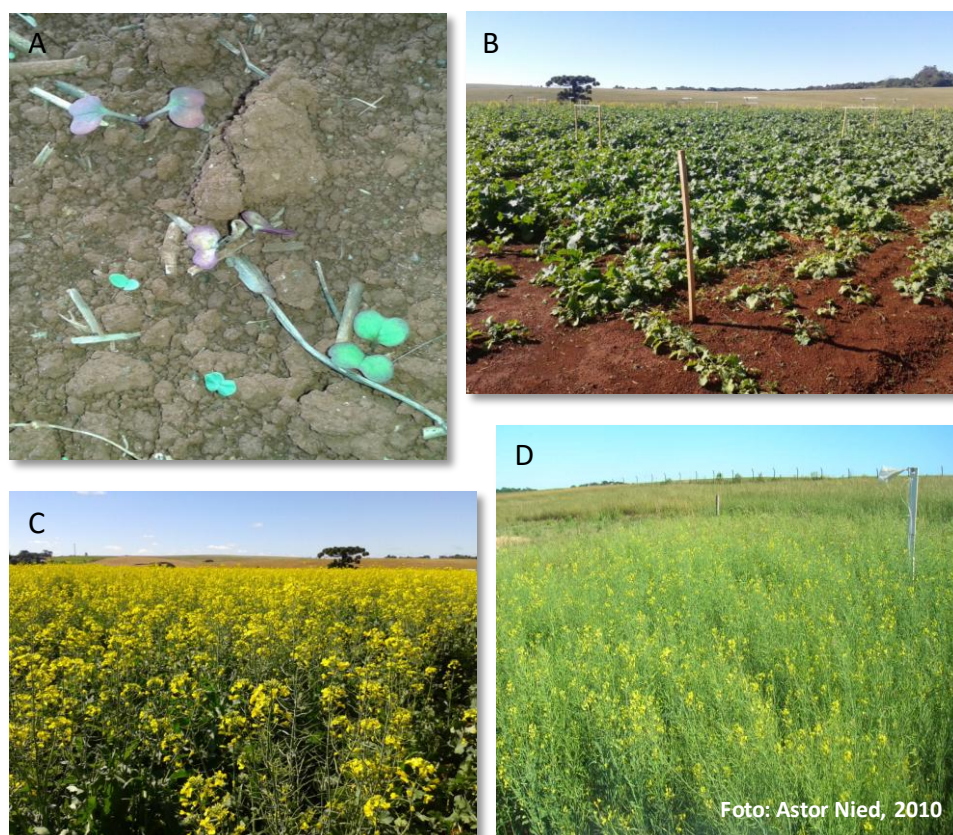


FIGURA 2. Mudanças físicas ocorridas no dossel de canola ao longo das fases fenológicas. A) Lavoura em fase de plântula, B) lavoura em fase de alongamento, C) lavoura em fase de florescimento, D) lavoura em fase de maturação. Coxilha, RS.

Após as plantas emitirem duas folhas verdadeiras elas, passam na fase denominada roseta. Nesta fase, as folhas mais velhas se situam na base e as mais jovens no centro. É importante que a planta se desenvolva rapidamente para que consiga interceptar maior quantidade de radiação, e não seja atingida por doenças (Iriarte & Valetti, 2008).

A fase reprodutiva inicia quando cessa a emissão de novas folhas e começam a serem formados os botões florais no centro da roseta. A floração inicia na base da haste principal e sobe até o topo da mesma. O mesmo acontece nas hastes secundárias. As flores permanecem receptivas à polinização durante três dias, sendo que a fecundação ocorre um

dia após a polinização (Dalmago *et al.*, 2009). O período em que ocorre a abertura das flores na canola é variável em função da variedade e umidade do solo, se estendendo em torno de 26 a 30 dias (Edwards & Hertel, 2011). Segundo Tomm (2007), em variedades de ciclo longo o florescimento pode chegar a até 45 dias.

TABELA 1. Estádios fenológicos da canola adaptados de CETIOM (Iriarte & Valetti, 2008).

| Estádio | Caracterização | Sub-período |
|----------------|--|--------------------|
| S | Semeadura | Germinação |
| A | Cotilédones visíveis (emergência) | Plântula |
| B1 | Uma folha verde desenvolvida | |
| B2 | Duas folhas verdes desenvolvidas | |
| B3 a B6 | Três a seis folhas verdes desenvolvidas | Roseta |
| C1 | Aparecimento de folhas novas | Alongamento |
| C2 | Entrenós visíveis e vestígios de ramificações principais | |
| D1 | Inflorescência visível | |
| D2 | Botão coberto com inflorescências secundárias visíveis | |
| E | Botão separado | |
| F1 | Primeiras flores abertas | Florescimento |
| F2 | Alongamento do ramo floral com numerosas flores abertas | |
| G1 | Queda de pétala com 10 primeiras síliquas com 2 cm | |
| G3 | Síliquas com mais de 4 cm | Maturação |
| FF | Final do florescimento | |
| G4 | 10% das síliquas com grão de coloração escura | |
| G5 | 90% das síliquas com grão de coloração escura | |

A maturação dos grãos é iniciada com a queda da última flor aberta no ramo principal, assim continuando a floração nos ramos secundários. De 40 a 60 dias após a floração os grãos atingem a maturação. Os grãos apresentam primeiro coloração verde claro, após passam à coloração verde escuro e, ao final da maturação, ficam escuros

apresentando coloração marrom (Iriarte & Valetti, 2008). Normalmente, as primeiras vagens a serem formadas, são maiores e possuem mais sementes. Quando 30 a 40% das sementes da haste principal mudaram a cor, a maioria das sementes atingiu a maturidade fisiológica e a umidade das sementes é em torno de 30 a 35% (Thomas, 2003).

2.3 Adubação nitrogenada

O nitrogênio (N) é um nutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, visto que é constituinte dos aminoácidos, nucleotídeos e ácidos nucleicos. Além disto, o N faz parte da molécula de clorofila, que é responsável pelo processo fotossintético (Grant, 1993, Aminpanah, 2013).

Plantas de canola saudáveis com adequado suprimento de nitrogênio apresentam coloração verde escuro. Como o nitrogênio é um elemento muito móvel no interior da planta, quando há deficiência, os sintomas acontecem primeiro nas folhas e caules mais velhos, tornando-se amarelo esverdeado e, possivelmente, apresentando coloração púrpura. As folhas mais velhas, em condições de adubação nitrogenada insuficiente, podem apresentar necroses, o crescimento é retardado, as plantas apresentam porte pequeno, as folhas são pequenas e o número de ramos é reduzido, o dossel é aberto, o tempo de florescimento é curto e o número de síliquas é reduzido (Grant, 1993).

Diversas são as pesquisas que buscam estabelecer a dose adequada de adubação nitrogenada para canola, em geral testando várias dosagens. Ramsay & Callinan (1994) obtiveram incrementos lineares no rendimento de grão de canola ao aplicarem doses crescentes de nitrogênio: 0, 25, 50 e 100 kg ha⁻¹ de N na semeadura e 0, 25, 50, 100 e 200 kg N ha⁻¹ em cobertura em três experimentos subsequentes (1988-1990). Aminpanah (2013) ao submeter plantas de canola a doses de adubação nitrogenada de 0, 50, 100, 150 e

200 kg ha⁻¹ de N, obteve como resultados maiores rendimentos de grãos nas doses de adubação nitrogenada maiores.

Kaefer *et al.* (2014) submeteram plantas de canola a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 20, 40, 60, 80, 100 e 120 kg de N ha⁻¹) no Estado do Paraná em duas safras 2009 e 2010. Os autores obtiveram como resultados que as doses de adubação nitrogenada produziram efeito significativo sobre a altura de plantas, massa de matéria seca da parte aérea, área foliar e massa de matéria seca de siliques por planta. Os maiores valores de massa de matéria seca da parte aérea foram alcançados com 74 (2009) e 73 (2010) kg ha⁻¹ de N e as maiores áreas foliares foram obtidas com 72 (2009) e 73 (2010) kg ha⁻¹ de N. Quanto ao rendimento de grãos, os maiores rendimentos de grãos foram obtidos com as doses de adubação nitrogenada de 88 e 89 kg ha⁻¹ de N, 1.465 e 1598 kg ha⁻¹ nas safras de 2009 e 2010, respectivamente com.

Öztürk (2010) ampliou a dosagem máxima e submeteu plantas de canola de inverno a doses de adubação nitrogenada de 0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N, na Turquia. Como resultados o autor obteve que a adubação nitrogenada produziu efeito significativo sobre a altura de plantas e rendimento de grãos, entre outras variáveis. A maior altura de planta foi obtida no tratamento de 150 kg ha⁻¹ de N e o maior rendimento de grãos (3.165 kg ha⁻¹) foi atingido também no tratamento de 150 kg ha⁻¹ de N.

Verifica-se que a canola é uma planta muito responsiva a adubação nitrogenada. A indicação de adubação nitrogenada no Rio Grande do Sul varia em função da quantidade de matéria orgânica do solo, sendo 60 kg ha⁻¹ de N quando o solo tem até 2,5% de matéria orgânica ou menos, 40 kg ha⁻¹ de N quando o solo tem de 2,6 a 5% de MO e 30 kg ha⁻¹ de N quando o solo tem mais do 5% de matéria orgânica. Destas doses, 15 kg ha⁻¹ de N devem ser aplicados na semeadura e o restante em cobertura quando as plantas apresentarem quatro folhas verdadeiras (subperíodo B4). Esta indicação é referente a rendimento de

grãos de 1.500 kg ha^{-1} . Para rendimentos superiores que este, deve-se adicionar 20 kg de N por tonelada de grãos adicional. (CQFS-RS/SC, 2004).

2.4 Radiação fotossinteticamente ativa

O sol emite radiação eletromagnética em uma ampla faixa de comprimentos de onda. Porém, apenas uma fração (cerca de 50%) da radiação solar global (R_g) incidente pode ser absorvida pelas plantas, conhecida como radiação fotossinteticamente ativa (RFA), compreendendo a faixa de comprimento de onda visível do espectro eletromagnético (400 a 700 nm) (Moreira, 2001). A radiação solar absorvida é utilizada para o processo fotossintético, o qual possibilita o crescimento e desenvolvimento dos vegetais. Por isso, é importante um rápido desenvolvimento foliar para que ocorra a máxima absorção da radiação solar disponível. Para a cultura da canola, a interceptação de 90% da radiação ocorre quando a cultura atinge índice de área foliar (IAF) próximo a quatro (Edwards & Hertel, 2011). Em experimento realizado nas safras de 2010 e 2011 em Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Nied (2013) encontrou que a eficiência de interceptação máxima da canola ocorre com IAF próximo a dois.

A energia interceptada e absorvida pela planta é convertida em biomassa através da fotossíntese. A eficiência de conversão da energia solar em biomassa é conhecida como eficiência do uso da radiação (EUR) (Montheith, 1972), a qual pode ser definida pela quantidade de biomassa seca produzida por unidade de radiação interceptada ou absorvida pelo dossel (Varlet-Grancher, 1989). Para a cultura da canola, Mendham *et al.* (1981) estimaram a eficiência do uso da radiação interceptada pelo dossel até o florescimento, sem estresses, encontrando valores médios de $2,4 \text{ g MJ}^{-1}$. Nied (2013), em experimento com diferentes datas de semeadura ocorrido na safra de 2010, encontrou valor de $2,8 \text{ g MJ}^{-1}$, de eficiência do uso da radiação (EUR), enquanto que, na safra de 2011, encontrou valores de

2,28 g MJ⁻¹ e 1,92 g MJ⁻¹. Variações na eficiência do uso da radiação solar podem estar associadas a fatores ambientais e características intrínsecas da canola, como temperaturas extremas (Mendham & Salisbury, 1995); estágio de desenvolvimento (Gosse *et al.*, 1983) densidade de semeadura (Morrison & Stewart, 1995) e ocorrência de estresses por déficit hídrico (Mendham & Salisbury, 1995).

2.5 Reflectância de folhas

A radiação eletromagnética interage com os vegetais principalmente através das folhas, que a utilizam para o processo fundamental da fotossíntese. Este processo é fundamentado pela absorção da radiação solar pelos pigmentos fotossintetizantes, como as clorofilas, xantofilas e carotenos. Os pigmentos fotossintetizantes não absorvem todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético, restringindo-se apenas na região do visível (400 a 700 nm) (Ponzoni *et al.*, 2012).

A folha é constituída por três tecidos básicos: a epiderme, o mesófilo fotossintético, também conhecido por parênquima paliçádico, e o tecido vascular. Ao redor da folha ainda existe uma camada superior à epiderme, que realiza as trocas gasosas (Cutter, 1986). A epiderme é composta por células de formato alongado e nela também estão localizados os estômatos (Ponzoni *et al.*, 2012). Os estômatos ocorrem em todos os órgãos da planta, porém são encontrados em maior abundância nas folhas. Sua função é realizar as trocas gasosas da planta com o meio externo. O mesófilo é dividido em parênquima paliçádico, onde está a maioria dos pigmentos fotossintetizantes, principalmente as clorofilas e, abaixo deste, vem o parênquima esponjoso, caracterizado por apresentar uma organização das células menos compacta em relação ao anterior (Esau, 1974). A radiação eletromagnética interage com as folhas particularmente no mesófilo, pois a cutícula é praticamente

transparente. Então o fluxo radiante é difundido através da cutícula e da epiderme para as células e espaços intercelulares do mesófilo, preenchidos por ar (Gates *et al.*, 1965).

O processo de interação da radiação eletromagnética com as folhas é descrito por três fenômenos: a reflexão, a absorção e a transmissão (Ponzoni *et al.*, 2012). Esta partição do fluxo de radiação incidente está diretamente relacionada com as características da superfície da folha e características intrínsecas da espécie (Moreira, 2001).

Na Figura 3, pode ser observada a representação da partição do fluxo de radiação solar. Ao entrar em contato com o dossel a REM pode ser particionada em três diferentes processos: absorção (REM absorvida pelos tecidos vegetais), transmissão (REM que atravessa os tecidos vegetais sem interagir com estes) e reflexão (REM que ao entrar em contato com os tecidos vegetais é refletida por estes). Os valores de reflectância e transmitância variam de forma semelhante ao longo do espectro eletromagnético, como se fosse o espelho da outra. Como a absorptância é a parcela da radiação solar que não foi transmitida através dos tecidos vegetais tampouco refletida por estes, está indicada na área entre as duas curvas. Pode-se observar que a maior parte da radiação solar absorvida encontra-se na região do visível do espectro eletromagnético.

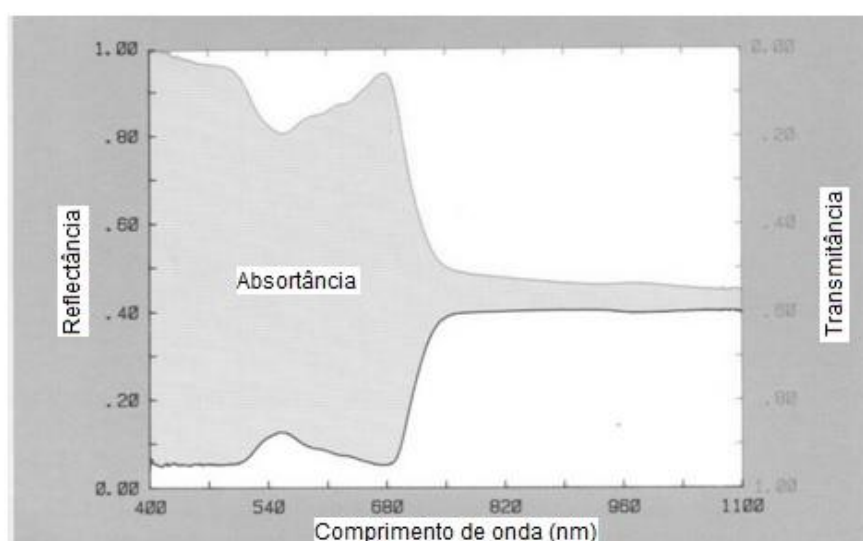


FIGURA 3. Curvas típicas de reflectância, transmitância e absorptância de uma folha (Absortância=1-transmitância-reflectância). Fonte: Li-cor (1990).

Os pigmentos fotossintetizantes de uma planta verde típica absorvem a radiação solar preferencialmente na região do visível (400 a 700 nm) (Jensen, 2009; Ponzoni *et al.*, 2012), como pode ser observado na Figura 4. As clorofilas “a” e “b” são os principais pigmentos que absorvem a luz azul e vermelha: a clorofila “a” nos comprimentos de onda 430 e 660 nm e a clorofila “b” nos comprimentos de onda 450 e 650 nm (Farabee, 1997). Existem também outros pigmentos que absorvem a radiação visível; são eles os carotenóides e as xantofilas, mas sua absorção é mascarada pela maior abundância das clorofilas.

Entre as bandas preferenciais de absorção das clorofilas há uma diminuição na absorção aproximadamente no comprimento de onda 540 nm (verde) que faz com que as plantas pareçam verdes aos nossos olhos (Jensen, 2009).

Na região do infravermelho próximo a fração da radiação que é absorvida é comparativamente menor. Nesta faixa de comprimento de ondas (700 a 1100 nm) a vegetação reflete de 40 a 60%, transmite de 40 a 60% e absorve em torno de 5 a 10% da REM que nela incide (Jensen, 2009).

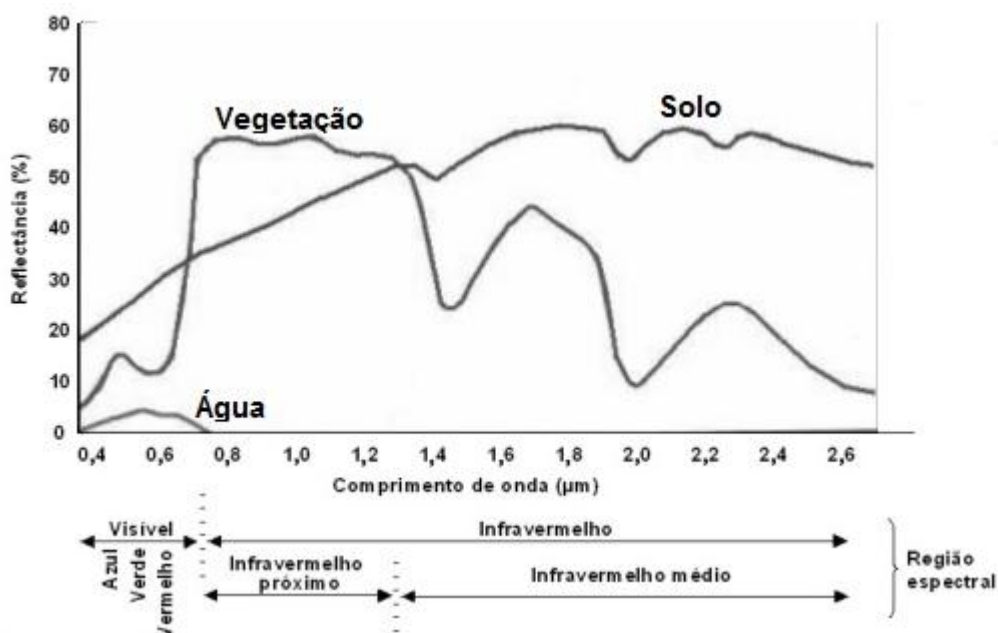


FIGURA 4. Curva característica de reflectância dos alvos água, vegetação e solo. Fonte: adaptada de Rizzi (2004) e Hoffer (1976).

Como no infravermelho próximo de 40 a 60% da radiação incidente é refletida e o restante é quase totalmente transmitido através das folhas, este é o motivo pelo qual as curvas de reflectância e transmitância são altamente semelhantes (Ponzoni *et al.*, 2012). As plantas absorvem apenas uma mínima parte da radiação no infravermelho próximo, pois se absorvessem esta energia possivelmente elas superaqueceriam, danificando irreversivelmente as proteínas. Então desenvolveram esta adaptação de simplesmente refletir ou transmitir a energia nestes comprimentos de onda (Jensen, 2009).

2.6 Reflectância de dosséis

A reflectância de uma única folha verde é a base para o entendimento da reflectância de um dossel vegetal. No entanto, a reflectância de um dossel é apenas uma fração da reflectância de uma única folha, pois a radiação incidente sofre atenuação ao chegar ao dossel, causada pelo ângulo de iluminação, orientação foliar, sombreamento causado pelas próprias plantas e o solo (Knipling, 1970). Os níveis de reflectância de um dossel são 40 e 70% daqueles de uma única folha, nas regiões do visível e do infravermelho próximo, respectivamente. A menor redução da reflectância no infravermelho próximo é devido ao mecanismo de múltiplas camadas (Ponzoni *et al.*, 2012), também conhecido como reflectância foliar aditiva. A fração da REM no infravermelho próximo que é transmitida pelas folhas superiores chega às camadas inferiores do dossel, podendo ser refletida novamente. (Knipling, 1970; Jensen, 2009).

Diversos fatores podem causar alterações na reflectância de um dossel como a incidência de doenças, deficiência de nutrientes, déficit hídrico, estádios fenológicos e estresses fisiológicos em geral.

Quando as plantas são afetadas por doenças ou estresses fisiológicos, normalmente, as mudanças iniciais na reflectância são mais pronunciadas na região do visível, devido à

sensibilidade da clorofila a distúrbios fisiológicos. No entanto, a expressão dos efeitos causados por estes estresses é detectada principalmente pela diminuição da massa de folhas, como também na mudança de orientação e interrupção do crescimento das plantas. Assim, a reflectância na região do infravermelho próximo também é alterada, devido à diminuição do mecanismo de múltiplas camadas, causada pela diminuição da massa de folhas, e aumento da exposição do solo (Knipling, 1970).

A deficiência de nutrientes para as plantas resulta em diferenças na resposta espectral do dossel em relação a um dossel composto por plantas bem nutridas. Segundo Hinzman *et al.* (1986), o nível de nitrogênio na cultura do trigo influencia diretamente o crescimento das plantas, em consequência altera a reflectância. Os autores observaram que a resposta a níveis crescentes de nitrogênio foi caracterizada por um decréscimo na reflectância na região do visível e acréscimo na região do infravermelho próximo. Segundo Souza *et al.* (2009), ao aplicar doses crescentes de nitrogênio em milho, os índices de vegetação aumentaram. Isso ocorreu porque as plantas com maior nível de adubação nitrogenada responderam aumentando a absorção no visível e aumentando a reflectância no infravermelho próximo.

Resultados semelhantes foram encontrados por Fonseca *et al.* (2002), ao aplicar doses crescentes de nitrogênio em *Paspalum notatum*, em que as plantas com maiores níveis de nitrogênio apresentaram menor reflectância na região do visível do espectro (400 a 700 nm). Além disto, os menores valores de reflectância estavam associados aos maiores índices de área foliar e matéria seca (total e verde). Na região do infravermelho próximo (700 a 950 nm) ocorreu o oposto, sendo que os maiores valores de reflectância ocorreram em resposta aos maiores níveis de nitrogênio. Isto ocorre porque o nitrogênio estimula o crescimento vegetal, atrasa a senescência das plantas e até muda a sua morfologia. Além

disto, a adubação pode causar aumento significativo nos níveis de clorofila (Fernández *et al.*, 1994).

O conteúdo de água nas plantas é outro aspecto importante ao se tratar de resposta espectral. Quando as plantas passam por um período de déficit hídrico, a reflectância aumenta na região visível do espectro eletromagnético, devido à redução da absorção de radiação visível pelos pigmentos fotossintetizantes para o processo fotossintético. Isto ocorre porque em situações de estresse hídrico a atividade fotossintética é reduzida. Além disto, devido à diminuição das moléculas de água presentes no vegetal, também ocorre aumento da reflectância nas bandas de absorção de água, situadas nas faixas de comprimento de onda de 1.400 e 1.900 nm (Figura 4) (Steffen & Moraes, 1993). Almeida (2008) encontrou, para a cultura da soja, que plantas com estresse hídrico apresentaram reflectância inferior na região do infravermelho próximo, em relação a plantas sem estresse hídrico. A maior diferença na reflectância foi percebida na região do infravermelho próximo, como resposta ao menor acúmulo de biomassa.

Para culturas anuais, o espectro de reflectância do dossel, evolui concomitante à sucessão de estádios fenológicos das plantas (Valeriano, 2003). O florescimento causa intensa extração de nitrogênio das plantas, chegando a induzir a abscisão foliar. Antes desse período, o espectro de reflectância é descrito como relativamente constante. No final do ciclo acontece uma intensa degradação dos pigmentos fotossintetizantes (carotenóides), que absorvem a radiação solar na região do azul. Devido a isto acontece maior reflectância nesta faixa, quando as plantas entram em senescência (Gausman, 1985).

Warren & Metternicht (2004) correlacionaram o índice de área foliar da canola com as reflectâncias das bandas azul, verde, vermelho, infravermelho próximo e também com índices de vegetação. Os resultados mostraram que o índice de área foliar (IAF) apresentou correlações negativas com as reflectâncias das bandas azul e vermelha e as correlações

foram positivas com a reflectância da banda do infravermelho próximo e com os índices de vegetação. Essa resposta é facilmente explicável, pois quanto maior a densidade de plantas maior é a quantidade de pigmentos fotossintetizantes absorvendo a radiação nas bandas do visível (azul e vermelho), diminuindo a reflectância nestas. O contrário acontece com a reflectância do infravermelho próximo, quanto maior a densidade de plantas, maior o número de camadas de folhas causando maior espalhamento da radiação, nestes comprimentos de onda, incidentes no dossel.

2.7 Sensores remotos

Os sensores remotos são equipamentos capazes de detectar e registrar a REM em determinados comprimentos de onda, gerando informações capazes de serem transformadas em produtos como imagens, gráficos e tabelas (Moreira, 2001; Moraes, 2002).

Os sensores remotos são classificados, primeiramente, quanto ao nível de aquisição dos dados. Eles podem ser orbitais, aéreos ou terrestres. Os sensores orbitais são os satélites, que orbitam em torno da Terra. Os terrestres são os que realizam a aquisição de dados no solo ou em laboratório, próximos ao alvo (Moraes, 2002).

Os sensores também são caracterizados quanto à fonte de radiação, quanto ao tipo de funcionamento e quanto ao tipo de produto. Quanto à fonte de radiação, os sensores podem ser ativos ou passivos. Os sensores passivos dependem de uma fonte externa de radiação eletromagnética, como o sol, enquanto os sensores ativos emitem a própria radiação eletromagnética. Quanto ao tipo de produto gerado, os sensores podem ser fotográficos e não fotográficos. Dentro da categoria dos sensores não fotográficos estão os imageadores e os não imageadores. Os sensores não imageadores registram o fluxo radiante proveniente de um alvo na superfície terrestre em determinadas faixas espectrais

do espectro eletromagnético (Moreira, 2001). São diversas as opções disponíveis de sensores não imageadores para utilização no contexto de monitoramento de lavouras, passivos e ativos.

Um exemplo de sistema sensor passivo não imageador são os chamados radiômetros ou espectrorradiômetros, pois dependem da REM proveniente do sol para o seu funcionamento (Moreira, 2001). O espectrorradiômetro permite um maior detalhamento do alvo, pois possui bandas de alta resolução espectral (à partir de 1 nm). Com isto pode-se investigar a reflectância no comprimento de onda desejado.

Um exemplo de sensor ativo não imageador que pode ser citado o *Greenseeker*. Este sensor foi desenvolvido na década de 1990 pela Universidade de Oklahoma, mas a tecnologia foi disponibilizada somente em 2001, pela N-Tech Industries. É um sensor ativo que emite radiação nos comprimentos de onda 650 nm (vermelho) e 770 nm (infravermelho próximo). A fração da radiação refletida pelo dossel, nos dois comprimentos de onda é medida pelo sensor e utilizada para o cálculo do seu produto, o NDVI - índice de vegetação por diferença normalizada (Singh *et al.*, 2006). Este sensor vem sendo amplamente utilizado em agricultura de precisão e em estudos com adubação nitrogenada. Almeida *et al.* (2010) estimou o potencial de rendimento de quatro cultivares de trigo através do NDVI. Com os resultados concluíram que para o trigo o NDVI medido no estágio de seis folhas expandidas está relacionado com o rendimento de grãos.

Bredemeier *et al.* (2013) utilizou o sensor *Greenseeker* para avaliar a relação entre o NDVI em diferente estádios do desenvolvimento e o rendimento de grãos de quatro cultivares de trigo. Concluiu que as medições de NDVI com o *Greenseeker* foram eficientes em identificar variações de produtividade da cultura do trigo promovidas por variações na adubação nitrogenada.

Holzapfel, *et al.* (2009), utilizou sensor óptico ativo (*Greenseeker*) para determinar a relação do NDVI com o rendimento de grãos de canola no Canadá, para a utilização destes sensores no manejo da adubação nitrogenada em cobertura. Em geral, os resultados mostraram que os sensores ópticos podem ser utilizados para estimar o potencial de rendimento durante a estação de crescimento. Conforme a cultura se desenvolve, até o período de florescimento, aumenta a precisão do rendimento potencial de grãos da canola, estimado, sendo que o estágio mais adequado para a utilização deste sensor para manejo da adubação nitrogenada na canola é de seis folhas até o início do florescimento.

2.8 Índices de vegetação

Os índices de vegetação (IV) são amplamente empregados como indicadores da presença e condição da vegetação. A maior parte destes índices relaciona a reflectância nas faixas de comprimento de onda do visível e infravermelho próximo na forma de razões para minimizar a variabilidade causada por elementos externos (ângulo solar, atmosfera e solo) (Ponzoni *et al.*, 2001).

A proposição destes índices é fundamentada na resposta antagônica da reflectância da vegetação nas regiões espectrais do visível e infravermelho próximo (Jensen, 2009). Quanto maior for a densidade da cobertura vegetal em uma área, menor será a reflectância no visível, em razão da maior oferta de pigmentos fotossintetizantes para a absorção da radiação solar. Em contraponto, maior será a reflectância no infravermelho próximo, devido ao efeito do espalhamento múltiplo (Ponzoni *et al.*, 2012).

Diversos índices de vegetação têm sido propostos na literatura com o objetivo de explorar as propriedades espectrais da vegetação, especialmente nas regiões do visível e do infravermelho próximo. Os índices são relacionados a parâmetros biofísicos da vegetação como biomassa e índice de área foliar, além de minimizarem os efeitos de iluminação da

cena, declividade da superfície e geometria de aquisição, que influenciam os valores de reflectância da vegetação (Ponzoni *et al.*, 2012). Segundo Baret & Guyot (1991), a maioria dos índices de vegetação são dependentes de fatores externos, tais como a geometria do dossel (ângulo de inserção das folhas, orientação das linhas de cultivo e espaçamento), propriedades ópticas do solo e das folhas, posição solar e nebulosidade.

Na literatura são encontrados diversos IV. Entre eles, pode-se destacar o índice de vegetação razão simples (*Simple Ratio* - SR), que foi o primeiro a ser proposto por Jordan (1969). É a razão entre o fluxo radiante no infravermelho próximo e o fluxo radiante no vermelho. Segundo Huete (2002), o SR é sensível em áreas com grande quantidade de biomassa; o índice de vegetação por diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI), proposto por Rouse *et al.*, (1973), que é uma normalização do SR. O NDVI possui alta correlação com o IAF, mas satura facilmente. Assim, em situações de máximo IAF esta correlação pode não ser tão forte (Wang, 2005); o índice de vegetação ajustado para o solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI), proposto por Huete (1988). Este índice possui um fator de ajuste para o substrato do dossel, para que o solo do fundo do dossel não interfira no valor do índice; o índice de vegetação realçado (EVI), este índice possui um fator de correção para solos e dois coeficientes que descrevem o uso da banda do azul para a correção da banda do vermelho quanto ao espalhamento atmosférico por aerossóis. Este índice também possui sensibilidade para altas biomassas (Jensen, 2009); e o índice de vegetação por diferença normalizada verde (GNDVI), proposto por Gitelson (1996), o qual substitui a banda do vermelho pela banda do verde.

A escolha do índice a ser empregado num determinado estudo depende basicamente dos objetivos e do tipo e estado da vegetação em estudo. De forma geral o NDVI é o índice mais utilizado, mas apresenta limitadores de uso em altos valores de IAF por causa da

saturação do índice. A partir disto diversos outros índices foram propostos tentando minimizar este limitador.

Como o índice de vegetação é resultante da combinação de valores de dois ou mais intervalos de comprimento de onda, há uma diminuição no volume de dados a serem analisados, visto que toda a informação fica resumida a somente um único valor numérico, permitindo a entrada desses dados em modelos agrometeorológicos-espectrais com maior facilidade (Rizzi, 2004). Além disto, os índices de vegetação são métodos não destrutivos de estimativa de biomassa, podendo substituir os métodos destrutivos quando não é possível o emprego dos métodos destrutivos, nos quais é necessária a coleta de plantas (Aparício, 2000).

Müller *et al.* (2009) testaram índices de vegetação, obtidos a partir de dados hiperespectrais, medidos em dossel de canola adubado com diferentes doses de nitrogênio, para a predição dos parâmetros índice de área verde e matéria seca. Foram testadas combinações de 61 bandas para os índices vegetação SR e NDI e os índices mais comumente utilizados NDVI, SAVI, REIP, IR/R, IR/G entre outros. Os resultados mostraram que os índices foram capazes de estimar os parâmetros propostos. Além disto, os índices testados com as bandas combinadas (SR e NDI) geraram melhores resultados em relação aos índices comumente utilizados.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudos

Os experimentos foram conduzidos nas safras de 2013 e 2014, na área experimental da EMBRAPA TRIGO, situada no município de Coxilha, Rio Grande do Sul (Figura 5), nas coordenadas geográficas 28° 11' 40"S e 52° 10' 20"O, a 689 m de altitude.



FIGURA 5. Área experimental da Embrapa Trigo. O polígono um corresponde ao experimento da safra de 2013, o polígono dois corresponde ao experimento da safra de 2014 e o polígono três corresponde a localização da estação meteorológica. Coxilha, RS.

O clima da região é classificado como Cfa, o tipo predominante no Estado, segundo a classificação climática de Köppen (Köppen, 1948). A letra “C” indica clima subtropical

ou temperado; a letra “f” indica que a precipitação pluvial em nenhum mês é inferior a 60 mm, sem estação seca; e a letra “a” indica verão quente, com temperatura do ar do mês mais quente superior a 22°C.

Segundo a normal climatológica padrão 1961-1990 (INMET, 2015), em Passo Fundo a precipitação pluvial média anual é de 1.787 mm, a temperatura média do ar é de 17,5 °C sendo que no mês mais frio (junho) a temperatura média do ar é 12,7 °C.

O solo predominante na região é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico húmico, caracterizado por possuir boa drenagem, ser profundo a muito profundo e possuir aptidão para cultivos anuais (Streck *et al.*, 2008).

3.2 Delineamento experimental

O genótipo de canola cultivado foi o híbrido Hyola 61, semeado em parcelas com delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos constaram de cinco doses de nitrogênio em cobertura: 10, 20, 40, 80, 160 kg ha⁻¹. Na safra de 2013, a área das parcelas foi de 127,5 m² resultando em uma área total do experimento de 2.550 m² enquanto na safra de 2014 a área das parcelas foi de 60 m² e a área total do experimento foi de 1.200 m².

No período de verão, anterior ao cultivo da canola, a cultura antecessora da safra da safra de 2013 foi soja e da safra de 2014 foi feijão.

A semeadura da safra de 2013 ocorreu no dia 22 de abril e foi realizada com semeadora de parcelas, com espaçamento de 0,34 m entrelinhas e densidade de semeadura mínima de 40 plantas por m². Na adubação de base foi aplicado 125 kg por hectare da formulação NPK 8, 20, 20, visando rendimento de grãos de 1.500 kg ha⁻¹. A adubação de cobertura foi realizada com ureia e seguiu os tratamentos com as doses de nitrogênio, sendo que nos tratamentos de 80 e 160 kg ha⁻¹ as doses foram parceladas em duas e três

aplicações, respectivamente. As aplicações de nitrogênio em cobertura ocorreram nos dias 18/06, (plantas em estádio B5), 28/06 (plantas em estádio C1) e 08/07 (plantas em estádio C2). Os tratos fitossanitários foram realizados de acordo com as indicações para a cultura e quando da presença do agente causal.

Na safra de 2014 a semeadura ocorreu no dia 29 de abril e a implantação do experimento foi semelhante a da safra de 2013, exceto pela adubação de base que foi aplicado 250 kg da formulação NPK 4, 20, 20. Também a adubação de cobertura foi diferenciada nesta safra, tendo sido realizada com sulfato de amônio e ureia. Os tratamentos de 40 e 80 kg de N ha⁻¹ foram parcelados em duas aplicações e o tratamento de 160 kg ha⁻¹ foi parcelado em três aplicações. As aplicações de nitrogênio em cobertura ocorreram nos dias 29/05, (plantas em estádio B4), 10/06 (plantas em estádio C1) e 02/07 (plantas em estádio D1).

3.3 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados para a caracterização das condições meteorológicas ocorridas durante o período experimental foram coletados da estação meteorológica automática localizada na área experimental (nas coordenadas geográficas 28°15'43" Sul; 52°24'24" Oeste e altitude de 684 m). Foram coletados dados diários das temperaturas do ar máximas, mínimas e média (°C), precipitação pluvial (mm), radiação solar global (MJ m⁻²) e velocidade do vento (m/s). Os dados referentes à umidade relativa do ar foram coletados da estação convencional, situada na sede da EMBRAPA-Trigo, Passo Fundo nas coordenadas 28° 22' Sul e 52° 4' Oeste, situada a aproximadamente 8 km da área experimental situada no município de Coxilha.

Foram calculadas as temperaturas médias mensais e a precipitação pluvial e radiação solar global, acumuladas mensalmente. Estes resultados foram comparados com a normal climatológica 1961-1990 de Passo Fundo (INMET, 2014).

A partir dos dados meteorológicos originais, foram determinadas variáveis derivadas, referentes aos excessos e deficiências hídricas obtidos pelo balanço hídrico sequencial e a soma de graus-dia.

3.4 Balanço hídrico sequencial

Utilizando a mesma base de dados citada no item anterior, foi calculado o balanço hídrico meteorológico sequencial, pelo método de Thornthwaite & Mather (1955), para o período de desenvolvimento da canola (abril a outubro). Para o cálculo do balanço hídrico foi considerada a capacidade de água disponível - CAD de 75 mm.

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada utilizando o método de Penman Monteith conforme a equação:

$$ET_o = \frac{0,408S(Rn) + \frac{\gamma 900u_2(es - e)}{T + 273}}{S + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

Sendo que s corresponde à tangente a curva que relaciona a pressão de saturação do vapor d'água e temperatura do ar em kPa °C⁻¹; γ é o coeficiente psicrométrico em kPa K⁻¹; Rn é o saldo de radiação em MJ m⁻² dia⁻¹; $(es-e)$ é o déficit de saturação do ar em kPa; u_2 é a velocidade do vento medida a dois metros de altura em m s⁻¹; T é a temperatura média do ar.

A tangente a curva que relaciona a pressão de saturação do vapor d'água e temperatura do ar foi estimada através da equação:

$$S = \frac{2503}{(T + 237,3)^2} \exp\left[\frac{17,27T}{T + 237,3}\right] \quad (2)$$

sendo T é a temperatura média do ar em °C.

O saldo de radiação foi estimado através da equação (Bergamaschi *et al.*, 2003):

$$Rn = -18,81 + 0,69Rg \quad (3)$$

sendo Rg a radiação global em $\text{cal m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Os termos do déficit de saturação ($e-es$) foram estimados através das equações:

$$e = (es * UR) / 100 \quad (4)$$

$$es = 0,6108 * 10^{[(7,5Tmed)/(237,3+Tmed)]} \quad (5)$$

sendo UR a umidade relativa do ar (%) e $Tmed$ a temperatura média do ar (°C).

3.5 Cálculo da soma térmica pelo método de graus-dia

As necessidades térmicas da canola foram estimadas pelo método de graus-dia (Ometo, 1981). Este método é a representação da temperatura do ar no tempo, entre as temperaturas basais inferior e superior das culturas. Para o cálculo foram utilizados dados diários de temperaturas mínima e máxima do ar, e temperatura basal inferior e superior da canola. As temperaturas basais inferior e superior da canola são 5 e 30 °C, respectivamente (Dalmago *et al.*, 2009).

Existem cinco diferentes casos para o cálculo, que são dependentes da combinação das temperaturas basais inferior (Tb) e superior da cultura (TB) e as temperaturas mínimas (Tm) e máximas (TM) do ar ocorridas no dia, utilizados foram:

Caso 1: as temperaturas do ar mínimas e máximas se mantêm entre as temperaturas basais inferior (5°C) e superior (30°C) da cultura, durante as 24 horas do dia. Então a soma térmica para este dia se dá pela equação 6.

$$GD = (TM - Tm) / 2 + (Tm - Tb) \quad (6)$$

Caso 2: a temperatura mínima do ar é inferior à temperatura basal inferior da cultura (5°C) e a temperatura máxima do ar fica abaixo da temperatura basal superior da cultura (30°C). Então a soma térmica para este dia se dá pela equação 7.

$$GD = (TM - Tb)^2 / 2(TM - Tm) \quad (7)$$

Caso 3: as temperaturas mínima e máxima do ar se mantêm abaixo da temperatura basal inferior ou acima da temperatura basal superior da cultura. Então a soma térmica para este dia é zero.

$$GD = 0$$

Caso 4: a temperatura máxima do ar ultrapassa a temperatura basal superior da cultura e a temperatura mínima do ar se situa acima da temperatura basal inferior da cultura. Então a soma térmica para este dia é dada pela equação 8.

$$GD = (Tm - Tb) + [(TM - Tm)/2] - [(TM - TB)^2 / 2(TM - Tm)] \quad (8)$$

Caso 5: a temperatura mínima do ar é menor que a temperatura base inferior e a temperatura máxima do ar é superior a temperatura base superior.

$$GD = (TM - Tb)^2 - (TM - TB)^2 / 2(TM - Tm) \quad (9)$$

Sendo TM a temperatura máxima do ar; Tm a temperatura mínima do ar, TB a temperatura basal superior da cultura; Tb a temperatura basal inferior da cultura.

3.6 Determinações das variáveis de planta

3.6.1 Determinações fenológicas

A caracterização dos eventos fenológicos da cultura foi realizada a partir da observação das datas em que ocorreram os principais estádios de desenvolvimento das plantas, segundo os critérios descritos na Tabela 1. As observações ocorreram a cada sete

dias, aproximadamente. Foi considerada mudança de estágio fenológico quando 50% das plantas da parcela apresentavam a condição fenológica na haste principal.

Com as datas de ocorrência de cada estágio foram definidos os sub-períodos de plântula, roseta, alongamento, florescimento e maturação.

3.6.2 Determinações de matéria seca da parte aérea

A partir da emergência das plântulas, para a determinação da matéria seca das plantas foram coletadas duas plantas pareadas representativas da parcela (quando escolhida a planta a ser coletada também era coletada a planta imediatamente ao lado). Após a coleta, as plantas foram separadas no laboratório em: folhas, ramos, flores e síliquas e, posteriormente, colocadas em estufa com circulação de ar forçada, com temperatura em torno de 70° C, até atingirem massa constante. Passadas 72 horas as amostras foram pesadas. As coletas de plantas para a determinação da matéria seca ocorriam a cada 15 dias aproximadamente (Tabela 2).

TABELA 2 Datas das avaliações de biomassa, nas duas safras de 2013 e 2014, com os respectivos estádios fenológicos em que as plantas estavam na data da coleta. Coxilha, RS.

| Datas das determinações de matéria seca | | | |
|---|--------|---------|--------|
| 2013 | | 2014 | |
| Estádio | Data | Estádio | Data |
| C2 | 10/jul | B4 | 29/mai |
| D2 | 26/jul | C1 | 10/jun |
| E | 09/ago | C1 | 25/jun |
| F2 | 22/ago | D1 | 09/jul |
| G1 | 05/set | G1 | 28/jul |
| G3 | 20/set | G3 | 12/ago |
| G4 | 02/out | G3 | 27/ago |
| - | - | G3 | 08/set |
| - | - | G5 | 22/set |

3.6.3 Determinações do índice de área foliar (IAF)

O índice de área foliar (IAF) foi estimado de forma indireta. Primeiramente foi estimada a área foliar específica (AFE), através de um modelo ajustado por Dalmago *et al.*, (2015)* representado na equação 10 para a safra de 2013 e na equação 11 para a safra de 2014. Através deste modelo a matéria seca das folhas coletadas quinzenalmente foi convertida em AFE. Após a área foliar específica foi convertida em IAF pela razão entre AFE e a área ocupada por cada planta do dossel.

$$AFE = MS[590,61454(17,955 + 154,4123MS)^{-0,20528}] \quad (10)$$

$$AFE = MS[1182,1594(17,955 + 154,4123MS)^{-0,28560}] \quad (11)$$

sendo *AFE* a área foliar específica; *MS* a matéria seca das folhas (g m^{-2}).

Em seguida foi ajustada uma função que relaciona o IAF em função do acúmulo de soma térmica pelas plantas.

3.6.4 Determinações do rendimento de grãos

O rendimento de grãos foi determinado através da colheita de uma área por parcela de 3 m^2 na safra de 2013 e 6 m^2 na safra de 2014. A colheita ocorreu manualmente nas duas safras avaliadas e o material foi trilhado com trilhadeira estacionária. Após a trilhagem os grãos foram acondicionados em embalagens de papel identificadas e colocados na estufa para a secagem até massa constante. Após a secagem, os grãos foram limpos por meio de peneiras e foi realizada pesagem para a determinação da matéria seca e do rendimento de grãos. O rendimento de grãos foi calculado com 8% de umidade.

*Comunicação pessoal de Genei Antônio Dalmago, EMBRAPA Trigo, Passo Fundo-RS. Janeiro, 2015.

3.7 Medições espectrais

Ao longo das safras de 2013 e 2014, aproximadamente a cada 15 dias, foram realizadas medições com espectrorradiômetro (sensor remoto passivo) e Greenseeker (sensor remoto ativo) para avaliar a resposta espectral do dossel de canola, sob os diferentes níveis de adubação nitrogenada.

3.7.1 Medições de NDVI com sensor ativo *Greenseeker*

As leituras com o sensor remoto ativo *Greenseeker* foram realizadas a cerca de 0,80 m acima do dossel, com o centro do sensor localizado sobre uma linha de plantas demarcada previamente. Foram realizadas medições de NDVI em 10 datas, em cada safra (Tabela 3). Com os dados obtidos com as medições foram traçados os perfis temporais de NDVI em função dos diferentes níveis de adubação nitrogenada.

TABELA 3. Datas das medições do dossel de canola realizadas com sensor ativo *Greenseeker*, nas duas safras avaliadas 2013 e 2014, com os respectivos estádios fenológicos em que as plantas estavam na data da medição. Coxilha, RS.

| Datas das medições com <i>Greenseeker</i> | | | |
|---|--------|---------|--------|
| 2013 | | 2014 | |
| Estádio | Data | Estádio | Data |
| C1 | 28/jun | B3 | 20/mai |
| C2 | 05/jul | B4 | 27/mai |
| C2 | 11/jul | C1 | 10/jun |
| D1 | 17/jul | C1 | 25/jun |
| D2 | 26/jul | F1 | 16/jul |
| E | 08/ago | G1 | 05/ago |
| F2 | 22/ago | G3 | 25/ago |
| G1 | 05/set | G3 | 03/set |
| G3 | 17/set | G4 | 17/set |
| G4 | 02/out | G5 | 07/out |

3.7.2 Medições de reflectância do dossel com sensor passivo espectrorradiômetro

O equipamento utilizado nas medições de reflectância foi um espectrorradiômetro da marca LI-COR, modelo LI-1800, com resolução espectral de dois nm, nos comprimentos de onda compreendidos entre 350 nm e 1.100 nm, pertencente a EMBRAPA - TRIGO.

Foi realizada uma medição por parcela, em sete datas, nas duas safras (Tabela 4). As medições foram realizadas com o telescópio do espectrorradiômetro, a uma distância de aproximadamente 1 m acima do topo do dossel. Foi utilizada também uma placa de sulfato de bário (BaSO_4) que simula uma superfície lambertiana de reflectância conhecida, como referência. A reflectância do dossel foi calculada a partir da razão entre a medida da radiância do dossel e da radiância da placa de referência.

TABELA 4. Datas das medições do dossel de canola realizadas com espectrorradiômetro, nas duas safras avaliadas 2013 e 2014, com os respectivos estádios fenológicos em que as plantas estavam na data da medição. Coxilha, RS.

| Datas das medições com espectrorradiômetro | | | |
|--|--------|---------|--------|
| 2013 | | 2014 | |
| Estádio | Data | Estádio | Data |
| D1 | 15/jul | B3 | 20/mai |
| D2 | 30/jul | B6 | 04/jun |
| F1 | 15/ago | D2 | 15/jul |
| G1 | 30/ago | G1 | 05/ago |
| G3 | 13/set | G3 | 19/ago |
| G4 | 26/set | G3 | 09/set |
| RESTEVA | 05/nov | G4 | 22/set |

Os dias das medições foram de céu claro e livre de nuvens, visando medições sob condições semelhantes de iluminação e observação. O horário das medições foi sempre por volta das 12 horas, procurando a máxima elevação solar.

Através dos dados obtidos com as medições, foram traçadas curvas de reflectância do dossel em função dos diferentes níveis de adubação nitrogenada e também calculados diferentes índices de vegetação.

3.7.3 Cálculo dos índices de vegetação

Os índices de vegetação listados a seguir foram determinados a partir dos valores de reflectância medidos nas faixas do espectro eletromagnético do vermelho (630-690 nm), do infravermelho próximo (760-900nm), do azul (459-479 nm) e do verde (545-565 nm) correspondentes as bandas um, dois, três e quatro do sensor MODIS. A escolha de compatibilizar com as bandas do sensor MODIS teve como objetivo gerar informações para serem utilizadas para fins de monitoramento da cultura em escala regional, o que é viável com esse sensor. Para tanto, foi aplicada uma função filtro gerada no *software* ENVI 5.0 para compatibilizar os dados medidos com o espectrorradiômetro com as diferentes sensibilidades do sensor MODIS nas suas diferentes bandas.

Índice de vegetação da razão simples - SR (Jordan, 1969), equação 12:

$$SR = \rho_{ivp} / \rho_v \quad (12)$$

Índice de vegetação por diferença normalizada - NDVI (Rouse *et al.*, 1973), equação 13:

$$NDVI = (\rho_{IVP} - \rho_v) / (\rho_{IVP} + \rho_v) \quad (13)$$

Índice de vegetação ajustado para o solo - SAVI (Huete *et al.*, 1988), equação 14:

$$SAVI = \left[(\rho_{ivp} - \rho_v) / (\rho_{ivp} + \rho_v + L) \right] (1 + L) \quad (14)$$

Índice de vegetação melhorado - EVI (Justice *et al.*, 1998), equação 15:

$$EVI = \frac{G(\rho_{ivp} - \rho_v)}{(L + \rho_{ivp} + C1\rho_v + C2\rho_a)} \quad (15)$$

Índice de vegetação por diferença normalizada verde – GNDVI (), equação 16:

$$GNDVI = \frac{(\rho_{ivp} - \rho_g)}{(\rho_{ivp} + \rho_g)} \quad (16)$$

Sendo: ρ_{ivp} a reflectância no infravermelho próximo; ρ_v a reflectância no vermelho; ρ_a a reflectância no azul; ρ_g a reflectância no verde; L é a constante que minimiza o efeito do solo ($L=1$); G é o fator de ganho ($G=2,5$); $C1$ e $C2$ são os fatores de ajuste para minimização do efeito dos aerossóis da atmosfera ($C1=6,5$ e $C2=7,5$).

3.8 Análises estatísticas

Foi realizada análise de variância para os dados de matéria seca total, IAF, rendimento de grãos e índices de vegetação, entre os níveis de adubação nitrogenada, considerando 5% de significância. Quando detectadas diferenças entre os níveis de adubação nitrogenada, as médias foram comparadas por teste de Tukey, com 5% de significância ($p \leq 0,05$).

Foram estabelecidas correlações entre as variáveis acúmulo de biomassa e rendimento de grãos com os dados as reflectâncias nas bandas azul, verde, vermelho e infravermelho próximo e os índices de vegetação. As correlações foram testadas com teste *t*-Student com 10% de significância. Também foram feitos diagramas de dispersão para verificar a variabilidade dos dados de biomassa seca e índices de vegetação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das condições meteorológicas

Nas duas safras (2013 e 2014), a dinâmica da temperatura média do ar seguiu o padrão esperado para a época do ano, com temperaturas mais altas nos meses de outono e primavera e mais baixas nos meses de inverno.

Na safra de 2013, a temperatura média do ar variou de 12,5 a 17,9°C, sendo superior a temperatura da normal climatológica somente em junho. No restante do período, a temperatura média do ar foi inferior à normal climatológica, especialmente nos meses de julho e agosto (Figura 6).

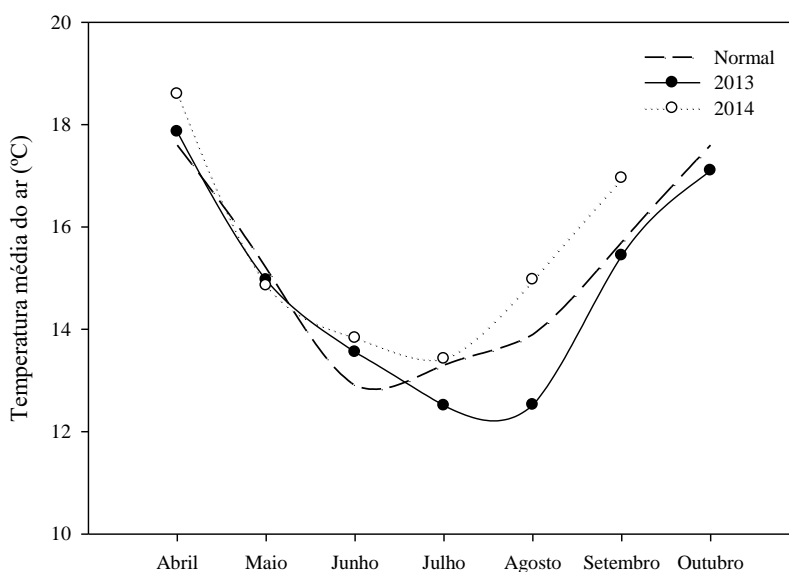


FIGURA 6. Temperatura média do ar ocorrida nas safras de 2013 e 2014 e a normal climatológica 1961-1990 de Passo Fundo (INMET, 2015). Coxilha, RS.

Na safra de 2014, a temperatura média do ar variou de 13,4 a 18,6 °C. Em todos os meses a partir do mês de junho, a temperatura do ar foi superior a temperatura do ar climatológica (Figura 6). Comparando a temperatura das duas safras, o ano de 2013 apresentou temperaturas inferiores às temperaturas do ano de 2014 durante os meses de junho, julho, agosto e setembro. Estas temperaturas mais baixas no ano de 2013 proporcionaram um melhor desenvolvimento da canola. As temperaturas altas diminuem a produção de matéria seca total, o número de siliques por planta, o número de grãos por síliqua e o peso dos grãos (Thomas, 2003).

Quanto à precipitação pluvial, foram observadas diferenças entre as duas safras e também em relação à normal climatológica de Passo Fundo, o que era esperado dada a conhecida variabilidade interanual deste elemento no Rio Grande do Sul (Berlato, 1992). A safra de 2013 foi mais chuvosa no final do período, com precipitação pluvial superior à normal climatológica especialmente no mês de agosto (Figura 7) e um acumulado total (abril a setembro) de 1.036 mm. Já na safra de 2014 a precipitação pluvial foi superior a climatológica principalmente nos meses de abril, maio e junho, com um acumulado total de 1.144 mm.

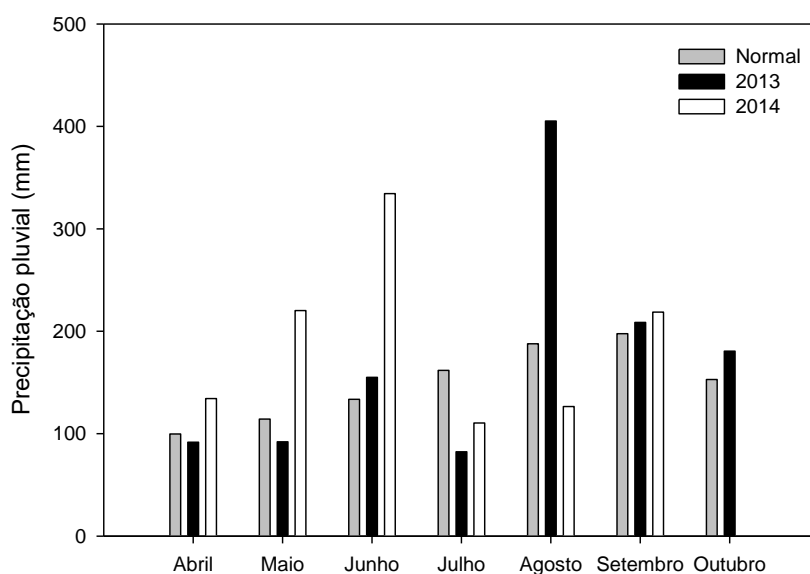


FIGURA 7. Precipitação pluvial mensal das safras de 2013 e 2014 e a normal climatológica 1961-1990 de Passo Fundo. Coxilha, RS.

O balanço hídrico meteorológico calculado indicou que em ambas as safras. Na safra de 2013 o maior déficit hídrico ocorreu em abril (13,8 mm) e maio (12,1 mm). Enquanto que na safra de 2014 o maior déficit hídrico ocorreu em abril (8 mm) (Figura 8). No Rio Grande do Sul o período de outono e inverno é caracterizado por excessos hídricos. Em 2013, os excessos hídricos foram maiores nos meses de agosto e setembro, enquanto que na safra de 2014 os excessos hídricos foram maiores no período inicial, especialmente nos meses abril, maio e junho. A ocorrência de excesso hídrico pode prejudicar o crescimento das plantas. O excesso de água ocupa parcialmente ou totalmente o espaço poroso do solo, diminuindo a quantidade de gases no interior do mesmo. Com esta menor quantidade de gases no sistema, diminuem as trocas gasosas pelas raízes das plantas, alterando a dinâmica dos nutrientes no solo e prejudicando o crescimento das plantas (Horne & Sojka, 2006).

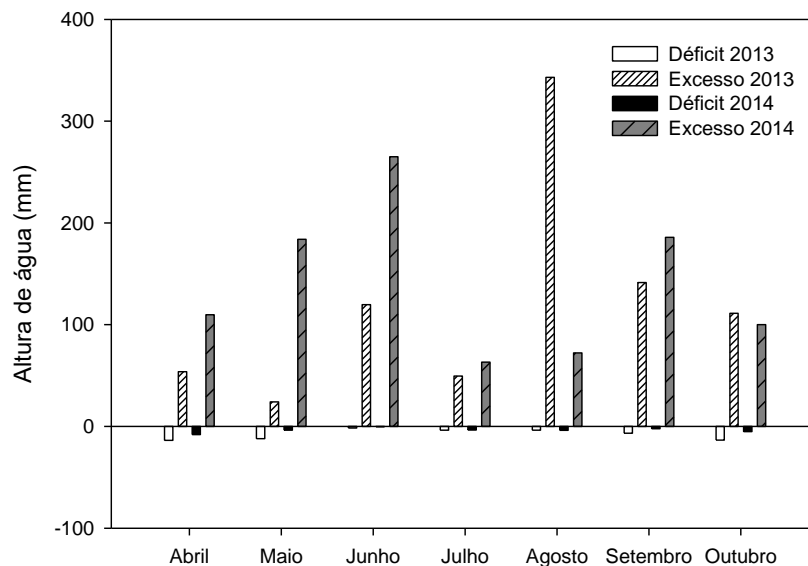


FIGURA 8. Déficits e excessos hídricos ocorridos no período de abril a outubro nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS.

A densidade de fluxo de radiação solar global (R_g) da normal climatológica foi menor no mês de junho (Figura 9). Isto ocorreu devido à ocorrência do solstício de inverno que marca a entrada do inverno no hemisfério sul. No solstício de inverno é o momento do

ano que o sol está mais distante do trópico de capricórnio, aumentando a inclinação dos raios solares em relação ao hemisfério sul, diminuindo assim a quantidade Rg que chega no mesmo.

Apesar da menor quantidade de Rg que ocorre normalmente no mês de junho, a Rg ocorrida neste mês, em 2013 e 2014 foi inferior a normal climatológica (Figura 9). Isto provavelmente ocorreu devido ao aumento de nebulosidade, em função do aumento da precipitação pluvial neste mês, nos dois anos, que foi superior a precipitação pluvial da normal climatológica. Além disto, a Rg ocorrida em junho de 2014 foi menor do que aquela ocorrida em junho de 2013; em junho de 2014 choveu 334 mm, ou seja, mais que o dobro da quantidade de chuva ocorrida em junho de 2013.

No mês de agosto, a Rg foi superior a normal climatológica, em 2014, com precipitação pluvial ocorrida inferior à normal climatológica. No mesmo mês em 2013 choveu acima da média resultando em menor quantidade de Rg (Figura 9).

A baixa radiação solar pode afetar o crescimento das plantas, pois a radiação solar é utilizada pelas plantas para a realização dos processos fotossintéticos.

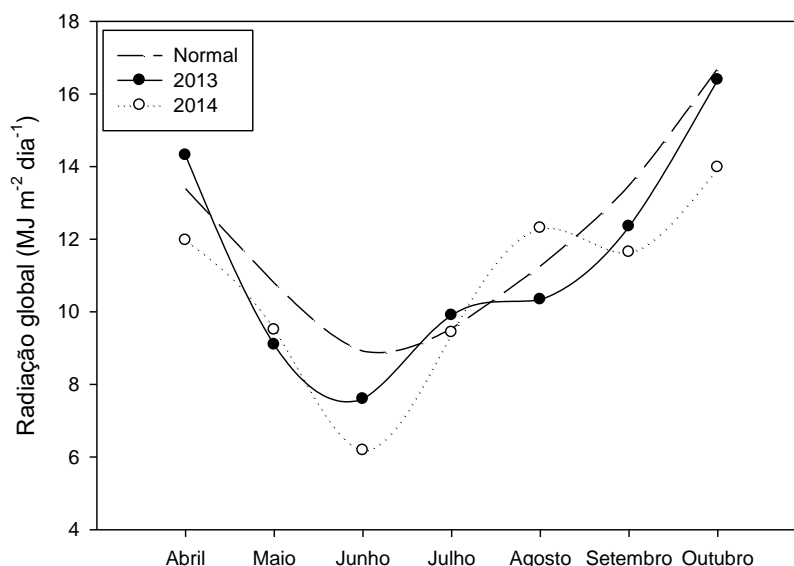


FIGURA 9. Radiação solar global ocorrida nas safras de 2013 e 2014 e normal climatológica 1961-1990. Passo Fundo, RS.

4.2 Necessidades térmicas da canola

A necessidade térmica da canola para o cumprimento do ciclo, emergência a G5, foi de 1.267 GD na safra de 2013 e 1.561 GD na safra de 2014, distribuídos em 141 e 150 dias na safra de 2013 e 2014, respectivamente. As necessidades térmicas e o número de dias para completar o ciclo mostraram, portanto, variação entre as safras (Tabela 5).

TABELA 5. Soma térmica necessária para a ocorrência das fases fenológicas da canola e para completar o ciclo de desenvolvimento, nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS.

| Subperíodo | 2013 | | | | 2014 | | | |
|----------------------------|------------|------------|---------|--------------|------------|------------|---------|--------------|
| | Início | Fim | Nº dias | Soma térmica | Início | Fim | Nº dias | Soma térmica |
| Período vegetativo | | | | | | | | |
| Plântula | 18/05/13 | 17/06/13 | 31 | 293 | 06/05/14 | 19/05/14 | 14 | 177 |
| Roseta | 18/06/13 | 03/07/13 | 16 | 128 | 20/05/14 | 25/06/14 | 37 | 322 |
| Alongamento | 04/07/13 | 11/08/13 | 39 | 347 | 26/06/14 | 15/07/14 | 20 | 197 |
| Total | 18/05/13 | 11/08/13 | 86 | 768 | 06/05/14 | 15/07/14 | 71 | 696 |
| Período reprodutivo | | | | | | | | |
| Florescimento | 12/08/13 | 09/09/13 | 29 | 254 | 16/07/2014 | 11/08/2014 | 27 | 256 |
| Maturação | 10/09/13 | 05/10/13 | 26 | 279 | 12/08/2014 | 02/10/2014 | 52 | 609 |
| Total | 12/08/13 | 05/10/13 | 55 | 533 | | | 79 | 865 |
| Ciclo completo | 18/05/2013 | 05/10/2013 | 141 | 1267 | 06/05/2014 | 02/10/2014 | 150 | 1561 |

O período vegetativo (plântula, roseta e alongamento) foi maior na safra de 2013 em número de dias e também em soma térmica. O período reprodutivo (florescimento e maturação dos grãos) foi maior em 2014, tanto em número de dias quanto em soma térmica. O florescimento foi semelhante em número de dias e soma térmica, nas duas safras, diferindo apenas que 2014 foi dois dias maior em duração e dois graus Celsius na soma térmica. A duração de ciclo foi aproximadamente a mesma.

Os valores encontrados são próximos aos valores médios encontrados por Nied (2013), que avaliou o híbrido Hyola 61 na cidade de Passo Fundo, 1.199 GD em 127 dias na safra de 2009, 1.263 GD em 143 dias na safra de 2010 e 1.475 GD em 132 dias na safra

de 2011 para completar o ciclo. No período vegetativo o mesmo autor, encontrou 429 GD em 60 dias (2009), 526 GD em 63 dias (2010) e 629 GD em 69 dias (2011). Enquanto que no período reprodutivo encontrou 771 GD em 67 dias, 823 GD em 79 dias e 846 GD em 63 dias.

Os resultados encontrados são respaldados por Luz *et al.* (2012), que também encontrou valores próximos para o híbrido Hyola 61, de 149 dias para completar o ciclo. O período vegetativo teve duração de 76 dias e o período reprodutivo teve duração de 79 dias. Os mesmos autores também encontraram relação linear negativa entre a temperatura do ar e a duração dos períodos fenológicos. Isso explica o fato do período vegetativo e o período de florescimento terem sido maiores na safra de 2013.

4.3 Resultados de planta

4.3.1 Acúmulo de matéria seca da parte aérea

Em 2013 (Figura 10A), o acúmulo de matéria seca da parte aérea aumentou em todos os tratamentos de doses de adubação nitrogenada, até o início do florescimento quando apresentou queda, seguida por novo incremento de biomassa, até atingir o valor máximo 2.460 g m² nas parcelas tratadas com 40 kg de N ha⁻¹, por ocasião do enchimento de grãos. Já em 2014 (Figura 10B) o acúmulo de matéria seca da parte aérea não apresentou a queda no florescimento, aumentando do início do ciclo da cultura até atingir o valor máximo, 1.198 g m⁻² nas parcelas tratadas com 160 kg de N ha⁻¹, no enchimento de grãos.

As diferenças entre safras podem ser explicadas pelas diferenças meteorológicas ocorridas. O ano de 2013 possibilitou maior crescimento vegetativo das plantas pelas temperaturas mais frias em relação ao ano de 2014. As temperaturas mais altas no ano de

2014 aceleraram o ciclo das plantas, fazendo com que se desenvolvessem menos vegetativamente, resultando em plantas menores. Associado à elevada temperatura do ar, é esperada diminuição da produção total de matéria seca, do número de siliques por planta, do número de grãos por síliqua e do peso de grãos, resultando em diminuição do rendimento de grãos (Thomas, 2003).

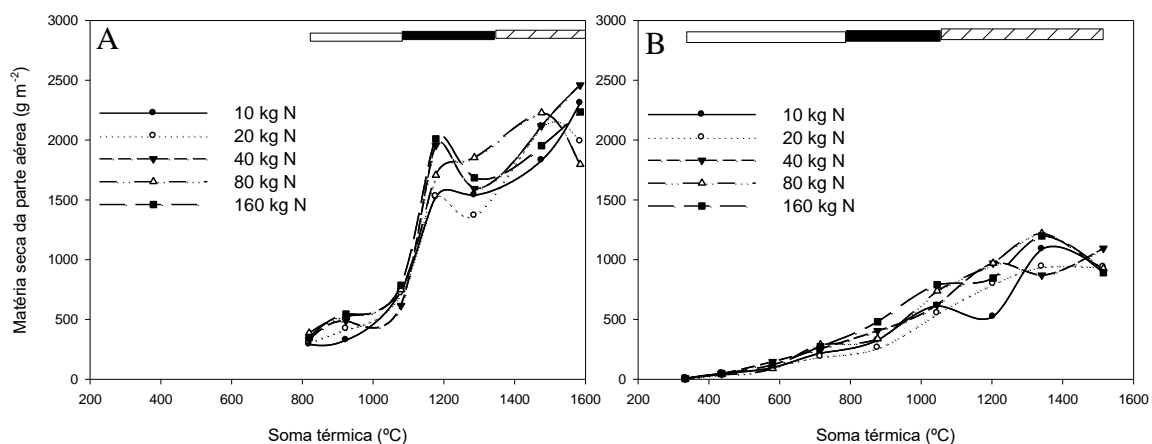


FIGURA 10. Acúmulo de matéria seca da parte aérea pela canola, em função de doses de nitrogênio aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg de N ha⁻¹, nas safras de 2013 (A) e 2014 (B). As barras acima no gráfico indicam os períodos: vegetativo (em branco); florescimento (em preto) e enchimento de grãos (hachurado). Coxilha, RS.

O acúmulo de matéria seca da parte aérea pela canola, nas duas safras estudadas (Tabela 6), não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos de doses de adubação nitrogenada em cobertura, em todas as datas de medição, nas duas safras. Este efeito pode ter sido causado pela disponibilização de nitrogênio pela cultura antecessora, que na safra de 2013 foi soja e na safra de 2014 foi feijão. Além disto, na área experimental da safra de 2013, foram aplicados calcário e gesso agrícola o que melhorou a fertilidade do solo, diminuindo assim o efeito das doses de nitrogênio. Também Sanches *et al.* (2014), ao aplicar doses crescentes de nitrogênio em cobertura (30, 60 e 90 kg ha⁻¹) no híbrido de canola Hyola 61 não observaram efeito da adubação nitrogenada sobre o acúmulo de matéria seca da parte aérea.

TABELA 6. Matéria seca da parte aérea acumulada pela canola (g m^{-2}), em função de cinco doses de nitrogênio aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha^{-1} , nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS.

| Data | Estádio | Dose de nitrogênio | | | | | |
|------|------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------|
| | | 10 kg ha^{-1} | 20 kg ha^{-1} | 40 kg ha^{-1} | 80 kg ha^{-1} | 160 kg ha^{-1} | |
| 2013 | 09/08/2013 | Veg. (E) | 739,4 A | 720,3 A | 616,6 A | 747,6 A | 785,6 A |
| | 22/08/2013 | Flor. (F2) | 1523,6 A | 1530,2 A | 1955,9 A | 1704,8 A | 2009,6 A |
| | 02/10/2013 | Mat. (G4) | 2308,6 A | 1989,7 A | 2460,0 A | 1795,5 A | 2235,4 A |
| 2014 | 09/07/2014 | Veg. (D1) | 217,9 A | 188,8 A | 254,2 A | 288,1 A | 273,2 A |
| | 28/07/2014 | Flor. (G1) | 325,8 A | 263,3 A | 406,2 A | 337,7 A | 480,6 A |
| | 22/09/2014 | Mat. (G4) | 921,6 A | 938,3 A | 1095,0 A | 924,6 A | 890,4 A |

OBS: Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

A matéria seca da parte aérea acumulada na safra de 2013 foi em média 195%, 381% e 126% superior à matéria seca da parte aérea acumulada na safra de 2014, nos períodos vegetativo, florescimento e maturação, respectivamente (Tabela 6). Em 2013, foi também observada maior variabilidade no acúmulo de matéria seca da parte aérea pela canola em relação à safra de 2014, o que pode ser observado no diagrama de caixas (Figura 11).

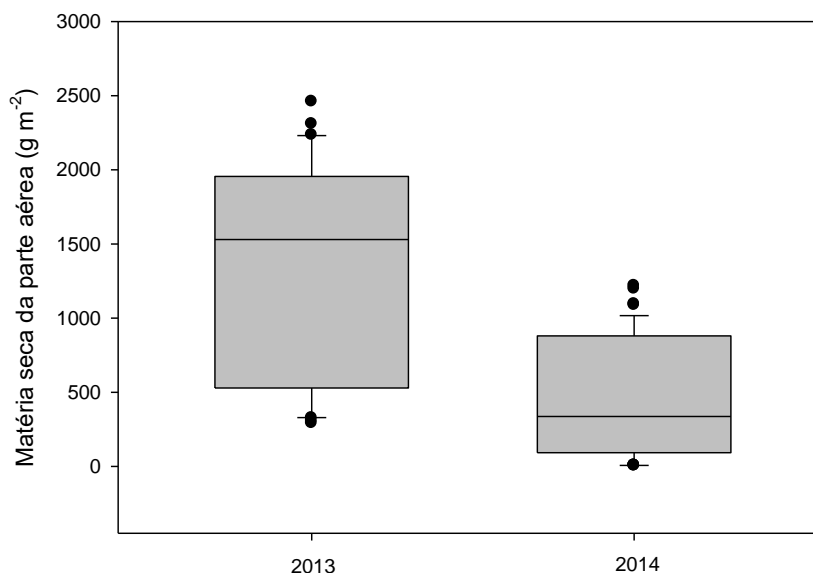


FIGURA 11. Diagramas de caixa da matéria seca da parte aérea acumulada pela canola, nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS.

Com relação à partição da matéria seca da parte aérea acumulada pela canola (Figura 12), a mesma apresentou padrão semelhante nas duas safras. No período vegetativo (plântula, roseta e alongamento), a biomassa foi composta, basicamente, por hastes e folhas. Quando iniciou o florescimento, a biomassa de haste aumentou, também pelo surgimento de novas hastes florais. Segundo Thomas (2003), a partir da elongação da haste floral principal surgem novas hastes secundárias nas gemas situadas nas axilas das folhas.

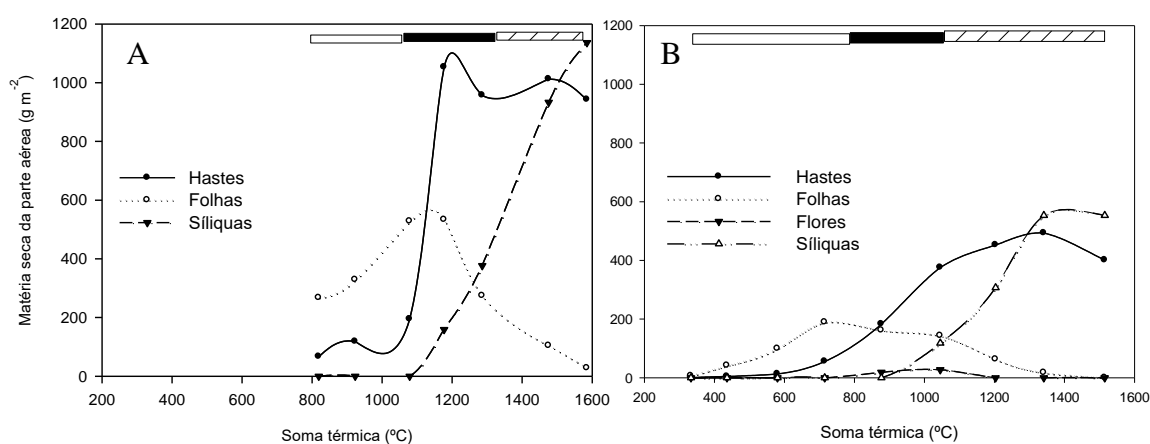


FIGURA 12. Partição da matéria seca da parte aérea em estruturas vegetativas (hastes e folhas) e reprodutivas (siliquas e flores) da canola, nas safras de 2013 (A) e 2014 (B). As barras acima no gráfico indicam os períodos: vegetativo (em branco); florescimento (em preto) e enchimento de grãos (hachurado). Coxilha, RS.

As folhas atingiram o valor máximo de biomassa 533 g m⁻² e 189 g m⁻² nas safras de 2013 e 2014 respectivamente, no início do florescimento. Então a mesma começou a decrescer por ocasião do período de florescimento. O mesmo foi observado por Thomas (2003), que afirmou que o IAF máximo da canola é atingido próximo ao início do período de florescimento, quando inicia o decréscimo do IAF, a partir deste momento, primeiramente com a queda das folhas basais. Durante o enchimento de grãos, junto ao decréscimo da matéria seca das folhas, iniciou o incremento de matéria seca pelas siliquas. Durante o período de maturação, as hastes e as siliquas são as maiores responsáveis pela

formação dos grãos, pois nesta fase a planta já tem um reduzido número de folhas (Thomas, 2003).

Como a matéria seca da parte aérea acumulada, em cada safra, não diferiu significativamente entre os tratamentos de N aplicados (Tabela 6), não foi necessário o ajuste de uma função de modelização do acúmulo de matéria seca da parte aérea para cada um dos tratamentos separadamente. Sendo assim, foram ajustadas duas funções, uma que descreveu o acúmulo de matéria seca da parte aérea em função da soma térmica, para a safra de 2013 (Figura 13A) e outra para a safra de 2014 (Figura 13B). O modelo que melhor se ajustou aos dados de acúmulo de biomassa foi o polinomial de terceira ordem, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,93 e 0,99 para a safra de 2013 e 2014, respectivamente.

O incremento de biomassa, em função do acúmulo de graus dia na safra de 2013 foi caracterizado por três diferentes momentos principais. O primeiro ocorreu, de forma lenta, até, aproximadamente, 930 graus dia. A partir deste ponto, o acúmulo de biomassa apresentou um crescimento rápido até, aproximadamente, 1400 graus dia, quando a taxa de incremento de biomassa diminuiu novamente (Figura 13).

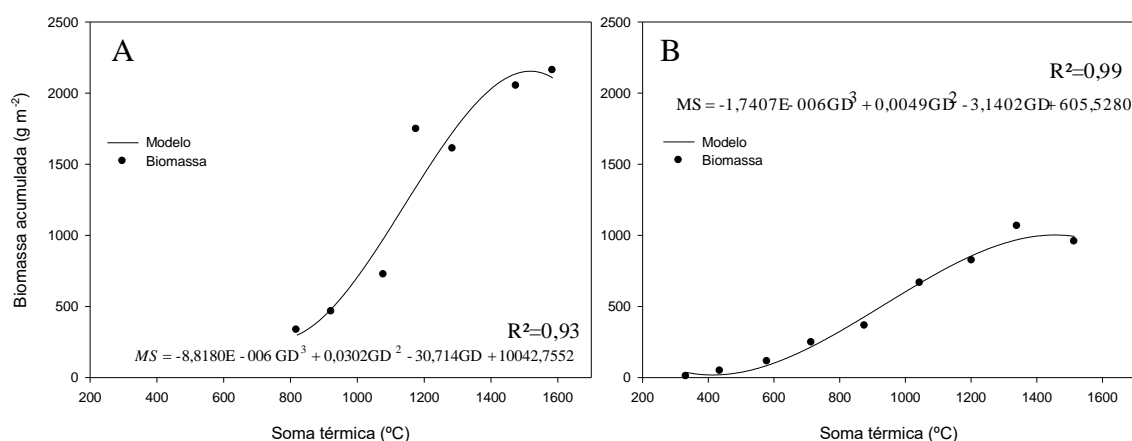


FIGURA 13. Modelos de ajuste do incremento de biomassa da canola, em função do acúmulo da soma térmica, para as safras de 2013 (A) e 2014 (B). Coxilha, RS.

Na safra de 2014 o incremento de biomassa foi lento até próximo de 600 graus dias, seguido por um rápido incremento de biomassa, até a nova inflexão da curva de resposta, que ocorreu, aproximadamente, em 1200 graus dias. A partir deste ponto, a velocidade de incremento de biomassa diminuiu, tendendo a estabilização (Figura 13).

4.3.2 Índice de área foliar

Na safra de 2013, o IAF máximo da canola variou de 5,4 a 6,3 (Tabela 7). Apesar de altos, estes valores de IAF se situam dentro da faixa de variação do mesmo para a canola, que é de 3 a 6 (Edwards & Hertel, 2011). Houve diferença significativa entre os tratamentos de doses de N, na data 26 de julho de 2013, em que o IAF das plantas com 80 e 160 kg de N ha⁻¹ foi superior ao IAF da canola com 10 kg de N ha⁻¹.

TABELA 7. Índice de área foliar (IAF) estimado da canola, em função de cinco doses de nitrogênio aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹, nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS.

| Data | Estádio | Dose de nitrogênio (kg ha ⁻¹) | | | | | |
|------|------------|---|--------|----------|---------|---------|--------|
| | | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 | |
| 2013 | 26/07/2013 | Veg. (D2) | 3,39 C | 4,09 ABC | 3,64 BC | 5,86 A | 5,09 A |
| | 09/08/2013 | Veg. (E) | 5,42 A | 6,33 A | 5,52 A | 5,85 A | 6,25 A |
| | 22/08/2013 | Flor. (F2) | 4,40 A | 4,94 A | 6,19 A | 6,23 A | 5,68 A |
| | 02/10/2013 | Mat. (G4) | 0,19 A | 0,27 A | 0,32 A | 0,29 A | 0,45 A |
| 2014 | 09/07/2014 | Veg. (D1) | 2,95 A | 2,53 A | 3,19 A | 3,41 A | 3,29 A |
| | 28/07/2014 | Flor. (G1) | 2,73 A | 2,14 A | 2,79 A | 2,57 A | 3,51 A |
| | 12/08/2014 | Mat. (G3) | 1,78 B | 2,17 B | 2,05 AB | 2,54 AB | 3,24 A |
| | 08/09/2014 | Mat. (G4) | 0,33 A | 0,35 A | 0,44 A | 0,52 A | 0,77 A |

OBS: Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

Já na safra de 2014 o IAF máximo foi inferior, variando de 2,5 a 3,5, semelhante aos valores de IAF encontrados por Nied, (2013) para a canola, em experimento conduzido em 2011. Na data 12 de agosto, também houve diferença significativa no IAF da canola,

em que, para o tratamento 160 kg ha⁻¹ de N, o mesmo foi superior àquele das plantas com aplicação de 10 e 40 kg ha⁻¹ de N (Tabela 7).

Assim como o incremento de biomassa, o IAF também foi superior, 43,6% e 99,6% nos períodos vegetativo e florescimento, respectivamente, na safra de 2013 em relação à safra de 2014 (Tabela 7). Isso, conforme já mencionado, pode ser explicado principalmente pelas diferenças meteorológicas ocorridas entre as duas safras. No ano de 2013, a temperatura do ar foi mais baixa, do que em 2014, o que proporcionou a aclimação das plantas às baixas temperaturas, possibilitando maior crescimento vegetativo, se comparado a 2014. A aclimação das plantas de canola às baixas temperaturas consiste numa série de mudanças fisiológicas, moleculares e bioquímicas que acontecem nas plantas submetidas a temperaturas baixas. Uma das modificações que ocorre com a aclimação das plantas é o aumento da espessura das folhas (Rapacz, 1999). Isto explica a superioridade do IAF da safra de 2013 em relação ao IAF da safra de 2014, já que o IAF foi obtido através de modelos baseados na matéria seca das folhas. Como temperaturas do ar foram mais elevadas em 2014, o ciclo de desenvolvimento foi acelerado. Por causa disso, as plantas de canola, em 2014, apresentaram menor desenvolvimento, resultando em menor acúmulo de biomassa e menor IAF, em relação a 2013.

De forma distinta ao verificado para biomassa, como foram houve diferenças significativas entre os tratamentos de doses de adubação nitrogenada, foi ajustado um modelo de crescimento do IAF em função do acúmulo térmico para cada tratamento de doses de adubação nitrogenada, em cada safra. O modelo matemático que melhor se ajustou aos dados de IAF, nas duas safras, foi o polinomial de 2ª ordem (Figuras 14 e 15). A evolução temporal do IAF, em função do acúmulo térmico foi caracterizada por dois momentos. O primeiro da emergência até o máximo IAF, coincidindo com o início do

florescimento. O segundo pelo decréscimo do IAF após atingir o máximo valor, até o valor mínimo por ocasião da colheita.

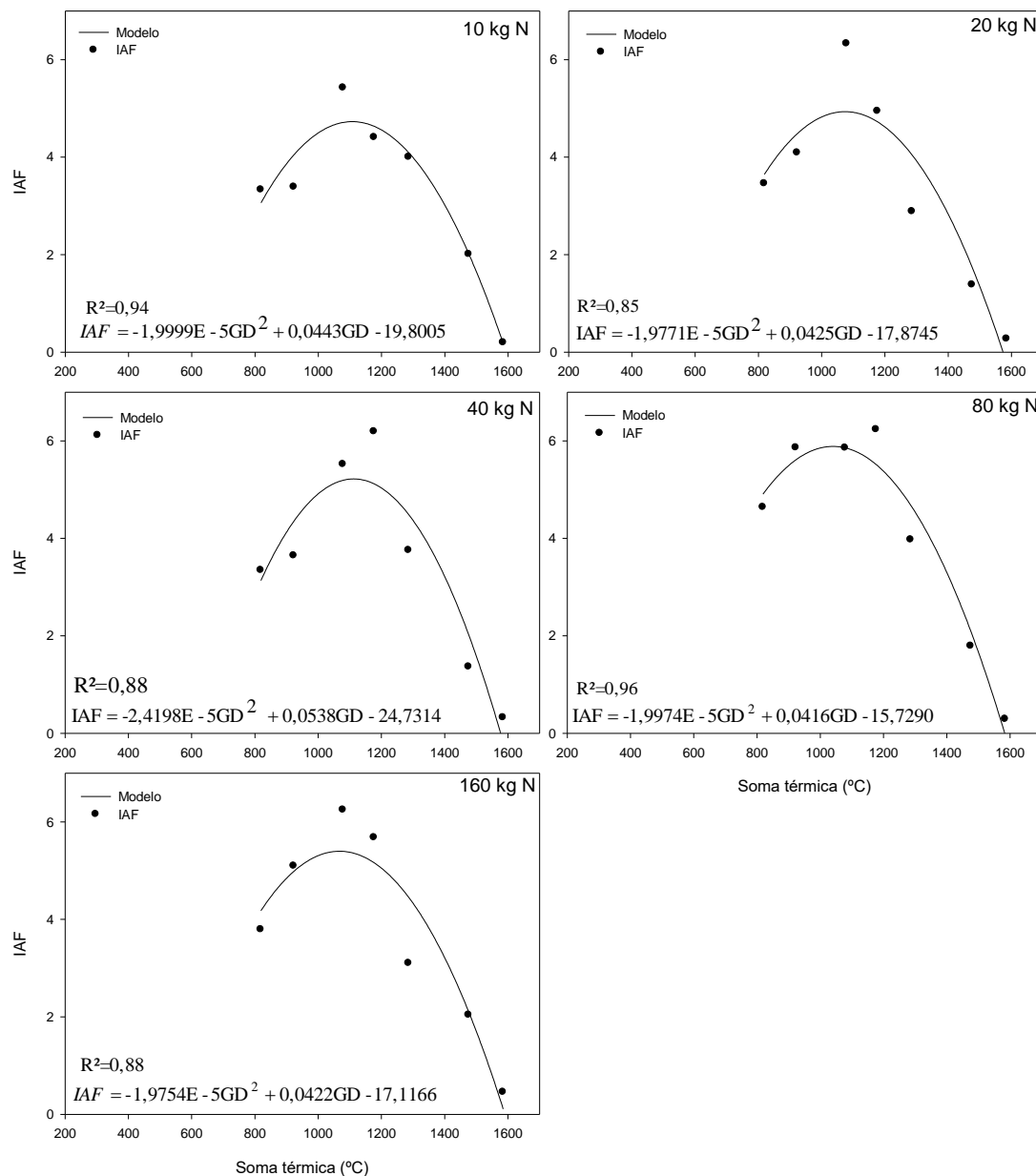


FIGURA 14. Modelos de ajuste do índice de área foliar (IAF) da canola, em função do acúmulo da soma térmica, para cinco doses de nitrogênio aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg de N ha⁻¹, na safra de 2013. Coxilha, RS.

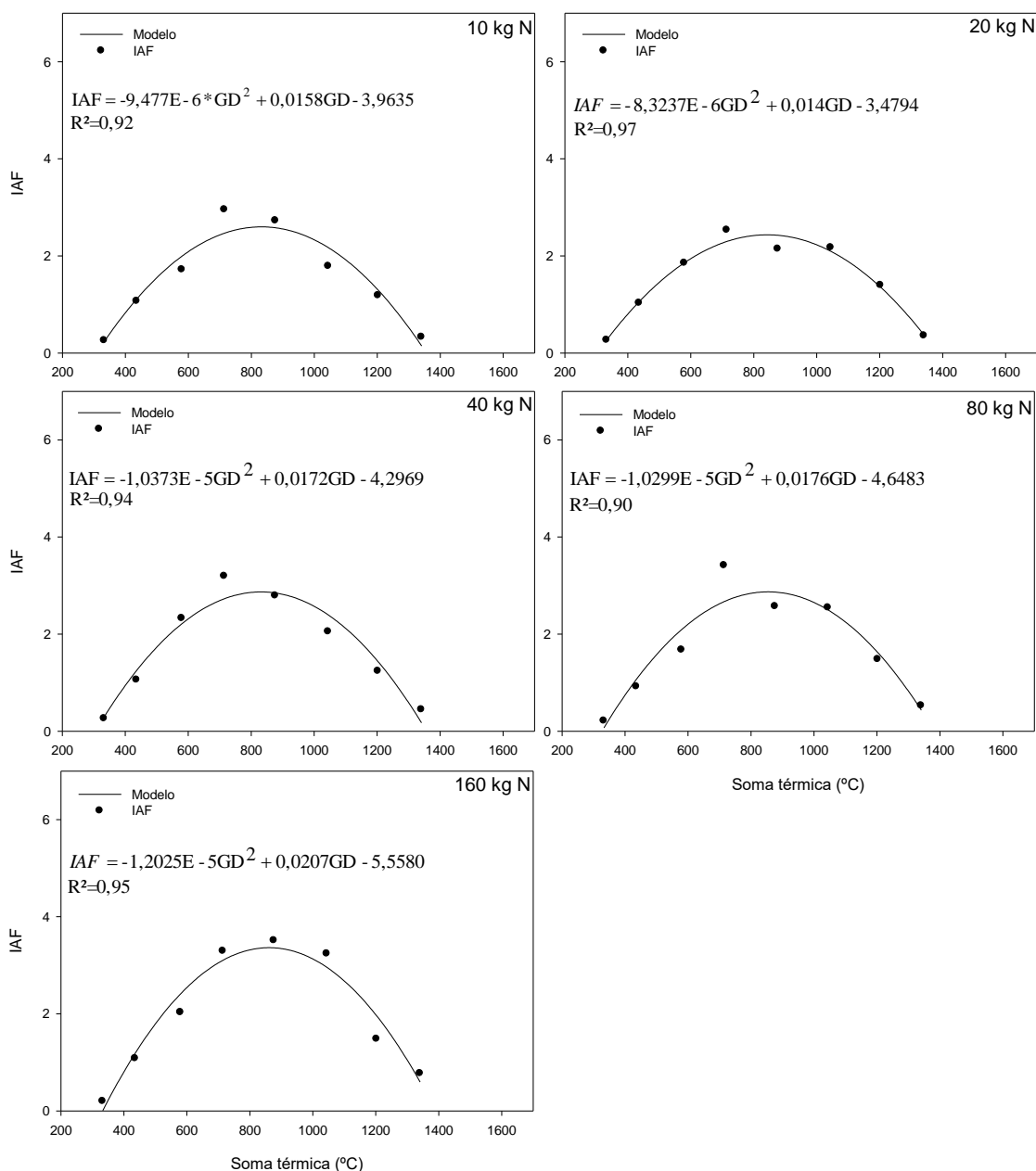


FIGURA 15. Modelos de ajuste do índice de área foliar (IAF) da canola em função do acúmulo da soma térmica, para cinco doses de nitrogênio aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg de N ha⁻¹, na safra de 2014. Coxilha, RS.

Na safra de 2013, o IAF máximo, na maior parte dos tratamentos, ocorreu, aproximadamente, em 1070 graus dia, exceto os tratamentos de 40 e 80 kg de N ha⁻¹, em que o IAF máximo ocorreu próximo de 1170 graus dia (Figura 14). Em contraponto, os valores máximos de IAF na safra de 2014, ocorrerem, em torno de 700 graus dia. Exceção foi o tratamento com 160 kg de N ha⁻¹, em que o IAF máximo ocorreu próximo a 880

graus dia (Figura 15). Esta diferença de soma térmica para atingir o IAF máximo entre as safras é um novamente um indicativo de que, em 2014, o ciclo de desenvolvimento das plantas foi acelerado devido às temperaturas do ar superiores, em relação ao ano de 2013. Isto está de acordo com resultados encontrados por Morales (2006), que submeteu variedades de canola a diferentes datas de semeadura e observou que as temperaturas mais amenas (primeiras datas de semeadura) aumentaram a duração do ciclo na etapa reprodutiva em 22 dias em relação às datas de semeadura mais tardias.

4.3.3 Rendimento de grãos

Em 2013, o rendimento de grãos de canola variou de 1.737 (tratamento com 10 kg de N ha⁻¹) a 1.990 kg ha⁻¹ (tratamento com 80 kg de N ha⁻¹) entre os tratamentos de doses de adubação nitrogenada em cobertura (Figura 16A). Os valores observados foram próximos aos apresentados por Kaefer *et al.* (2014), cujo máximo rendimento de grãos foi de 1.815 kg ha⁻¹, quando aplicada a dose de 100 kg de N ha⁻¹ na safra de 2010. O rendimento de grãos de canola verificado neste trabalho, na safra de 2013, foi superior à média geral do Estado do Rio Grande do Sul, que foi de 1.330 kg ha⁻¹ (CONAB, 2015).

Na safra de 2014 o rendimento de grãos variou de 1.122 (tratamento com 10 kg de N ha⁻¹) a 1.508 kg ha⁻¹ (tratamento com 80 kg de N ha⁻¹) (Figura 16B), valores mais baixos quando comparados aos obtidos em 2013. A superioridade no rendimento de grãos da safra de 2013 era esperada, devido as diferenças ocorridas na matéria seca da parte aérea e no IAF da canola entre as duas safras. No entanto, também nesta safra os rendimentos das parcelas experimentais foram superiores aos obtidos na média estadual desta safra, que foi de 812 kg ha⁻¹ e condizentes com a média dos últimos anos (2009 a 2014), que foi de 1.280 kg ha⁻¹ (CONAB, 2015).

Na safra de 2013, não houve diferença significativa no rendimento de grãos entre os tratamentos (Figura 16A). Já na safra de 2014, o rendimento de grãos das plantas de canola submetidas ao tratamento com 80 kg de N ha⁻¹ foi superior ao rendimento de grãos das plantas em que foram aplicados 10 kg de N ha⁻¹ (Figura 16B). Os resultados encontrados na safra de 2013 não eram esperados e discordam daqueles encontrados por Ramsay & Callinan (1994) e Kaefer *et al.* (2014) que ao submeterem plantas de canola a diferentes doses de adubação nitrogenada obtiveram incrementos no rendimento de grãos.

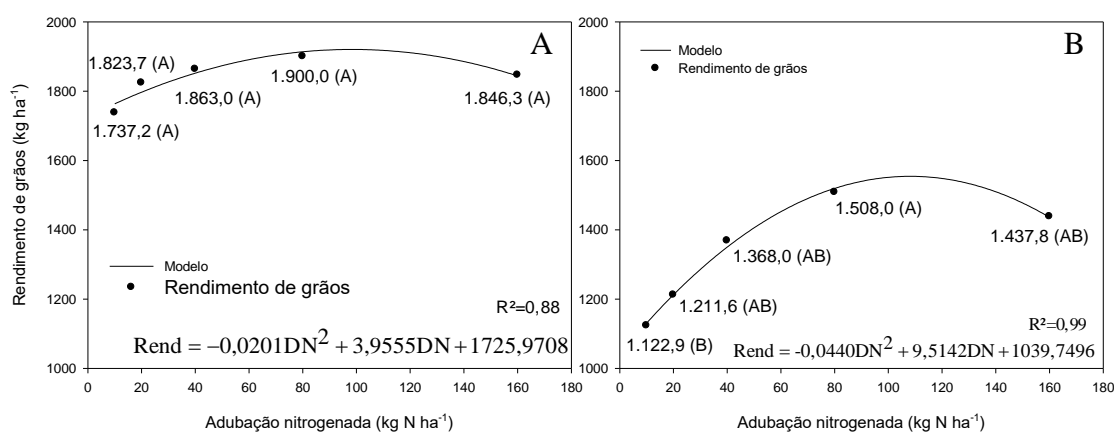


FIGURA 16. Modelos de ajuste do rendimento de grãos da canola em função da dose de adubação nitrogenada aplicada em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg de N ha⁻¹, na safra de 2013 (A) e 2014 (B). Coxilha, RS.

Na safra de 2013, o rendimento de grãos médio foi 38 % superior ao rendimento de grãos da safra de 2014. Para as duas safras, o modelo que melhor se ajustou aos dados de rendimento de grãos, em função da dose de N aplicada, foi o polinomial de segunda ordem (Figura 16). Entre as doses de adubação nitrogenada aplicadas no experimento, a que resultou nos maiores rendimentos de grãos foi a de 80 kg de N ha⁻¹. Já, segundo os modelos ajustados para as duas safras, o rendimento de grãos máximo ocorre com 100 kg de N ha⁻¹.

4.4 Resultados espectrais

4.4.1 Reflectância do dossel medida com espectrorradiômetro

As curvas de reflectância do dossel de canola, por tratamento, medidas em sete datas, nas safras de 2013 e 2014 (Figura 17 e 18) apresentaram padrão típico de vegetação, descrito por Jensen (2009), seguidamente referenciado como “assinatura espectral da vegetação”. Os valores de reflectância da radiação eletromagnética (REM) foram baixos na região do visível (400 a 700 nm), com fortes bandas de absorção no azul (450 nm) (2 a 5% de reflectância da REM) e vermelho (650 nm), (reflectância variando de 2 a 10 %) e um pico de reflectância no verde (550 nm) (reflectância variando de 4 a 15%). No infravermelho próximo (700 a 1.100 nm), os valores de reflectância da REM foram mais altos em relação ao visível, variando de 26 a 57%. Observou-se, no entanto, que ao longo do ciclo da cultura nas safras de 2013 e 2014, a reflectância mostrou variação na magnitude destes valores.

Na safra de 2013, as medições iniciaram com as plantas no estágio D1 (estádio vegetativo dentro do período de alongação em que as inflorescências já estão visíveis). Neste estágio fenológico, as plantas apresentavam, em média, 330 g m^{-2} de matéria seca da parte aérea (Tabela 6) e IAF médio de 3,7 (Tabela 7).

Nas duas primeiras medições (15/07 e 30/07), representadas pelas linhas magenta e azul (Figura 17), os valores de reflectância estiveram entre os mais baixos na banda do visível, e entre os mais altos no infravermelho próximo, considerando todo o ciclo. Nestas datas, as plantas estavam em estágio fenológico D1 e D2, em pleno desenvolvimento vegetativo, sem flores abertas e com grande número de folhas expostas.

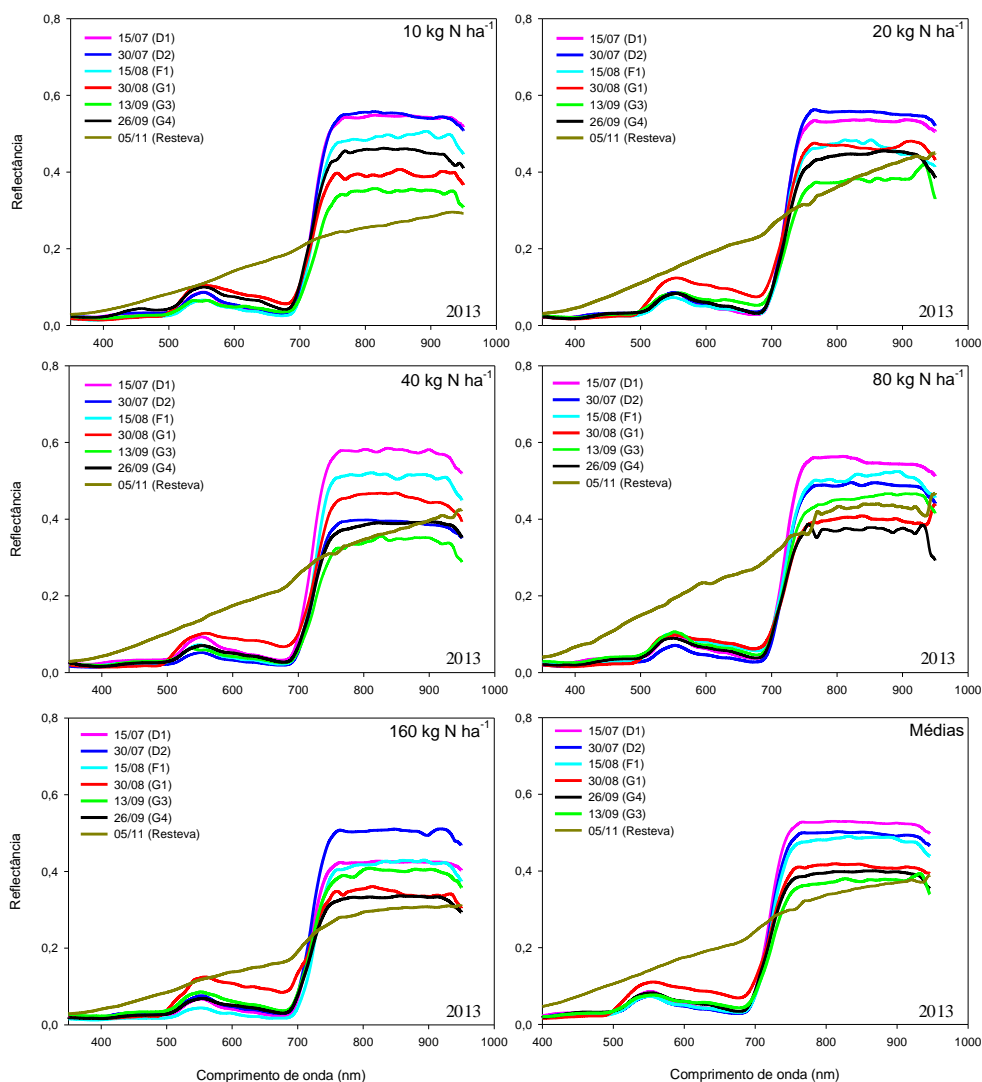


FIGURA 17. Reflectância espectral da canola, em função de cinco doses de adubação nitrogenada aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹, e a média dos tratamentos, em cada data de medição, na safra DE 2013. COXILHA, RS.

Este padrão observado decorre da preferência dos pigmentos fotossintetizantes por absorver os comprimentos de onda da região do visível, os quais utilizam esta energia para os processos fotossintéticos (Jensen, 2009). No infravermelho próximo, uma pequena parte da radiação é absorvida internamente pelas folhas, de 40 a 60% é refletida e o restante é transmitido para as camadas inferiores do dossel (Knipling, 1970).

Nas medições subsequentes, a reflectância da REM, na região do infravermelho próximo, diminuiu sucessivamente ao longo dos dias de medição, associada à diminuição

do IAF (Figura 14). Os maiores valores de reflectância e o máximo IAF ocorreram em 09/08 e 22/08, enquanto que as menores reflectâncias e IAF foram observadas nos dias 13/09 e 26/09.

A reflectância no infravermelho próximo é determinada pelas características estruturais internas das folhas, a organização estrutural do mesófilo esponjoso e a relação quantidade de células/quantidade de espaços aéreos neste mesmo tecido. Quando a folha é jovem, a quantidade de espaços preenchidos com ar é maior, favorecendo a reflectância no infravermelho próximo. Conforme a folha envelhece a quantidade de espaços aéreos diminui, devido à presença de células maiores, reduzindo a reflectância no infravermelho próximo (Gates *et al.*, 1965). Com a diminuição do IAF, diminui a quantidade deste tecido (mesófilo esponjoso) no dossel para interagir com a REM nos comprimentos de onda do infravermelho próximo. Assim, era esperado que a reflectância diminuísse.

A reflectância da REM na região do visível, ao contrário da reflectância no infravermelho próximo, mostrou incremento desde o início das medições até atingir o valor máximo em 30 de agosto. Neste momento (Figura 17), as plantas estavam em pleno florescimento (G1) e o dossel apresentava uma grande quantidade de flores, de coloração amarela, refletindo parte da REM incidente nos comprimentos de onda do visível. Thomas (2008) verificou que, no pico do florescimento, a canola produz uma camada de flores com espessura em torno de 30 cm, a qual é capaz de refletir a radiação eletromagnética no visível, reduzindo a quantidade de radiação solar que poderia ser utilizada por estruturas fotossinteticamente ativas da planta.

Após o período de florescimento, nas medições ocorridas nos dias 13/09 e 26/09, verificou-se que a reflectância do dossel na região do visível diminuiu, voltando a valores semelhante à reflectância medida no período vegetativo (Figura 17). Isso se deve à queda das flores, como também pela interceptação e absorção da radiação fotossinteticamente

ativa pelas síliquas e hastes. Segundo Nied (2013), a interceptação da radiação fotossinteticamente ativa pelas estruturas reprodutivas e hastes no dossel de canola pode chegar a 80% do total de interceptação do dossel. Também, a fotossíntese realizada, pelas mesmas estruturas pode representar até 80% do total realizado pela planta no período de maturação dos grãos.

A curva de reflectância do dia 05/11 apresentou resposta distinta das demais, com relativa alta reflectância no visível e baixa no infravermelho (Figura 17). O padrão observado foi decorrente da senescência das plantas, cujo aparato fotossintético desintegrado já não realizava mais fotossíntese. Assim, em consequência da não absorção de REM na região do visível, aumentou a reflectância nesta faixa. Por outro lado, foi a ausência de folhas e síliquas verdes que acarretou em menor reflectância da REM no infravermelho próximo.

Quanto ao padrão de reflectância em relação aos tratamentos de doses de adubação nitrogenada, esperava-se que, conforme aumentasse a dose de nitrogênio aplicada em cobertura diminuísse a reflectância no visível e aumentasse no infravermelho próximo (Figura 17). Isso não foi observado, o que é coerente com os resultados referentes à quantidade de matéria seca da parte aérea, que não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 6).

Na safra de 2014, as medições começaram no início ciclo da cultura, com as plantas em estágio B3 (estádio vegetativo dentro do período de roseta com três folhas verdadeiras desenvolvidas). A primeira medição apresentou curva de reflectância distinta das demais medições, com maior reflectância na região do visível e menor reflectância no infravermelho próximo, semelhante à curva de reflectância da última medição de 2013, associada à senescência (Figura 18). Mas neste ano, este padrão de curva de reflectância esteve associado à contribuição do solo, que reflete mais no visível comparado com a

vegetação (Figura 4), visto que as plantas apresentavam porte pequeno e poucas folhas (Figuras 10 e 15), além da entrelinha de semeadura ainda não estar fechada, apresentando restos culturais e solo exposto.

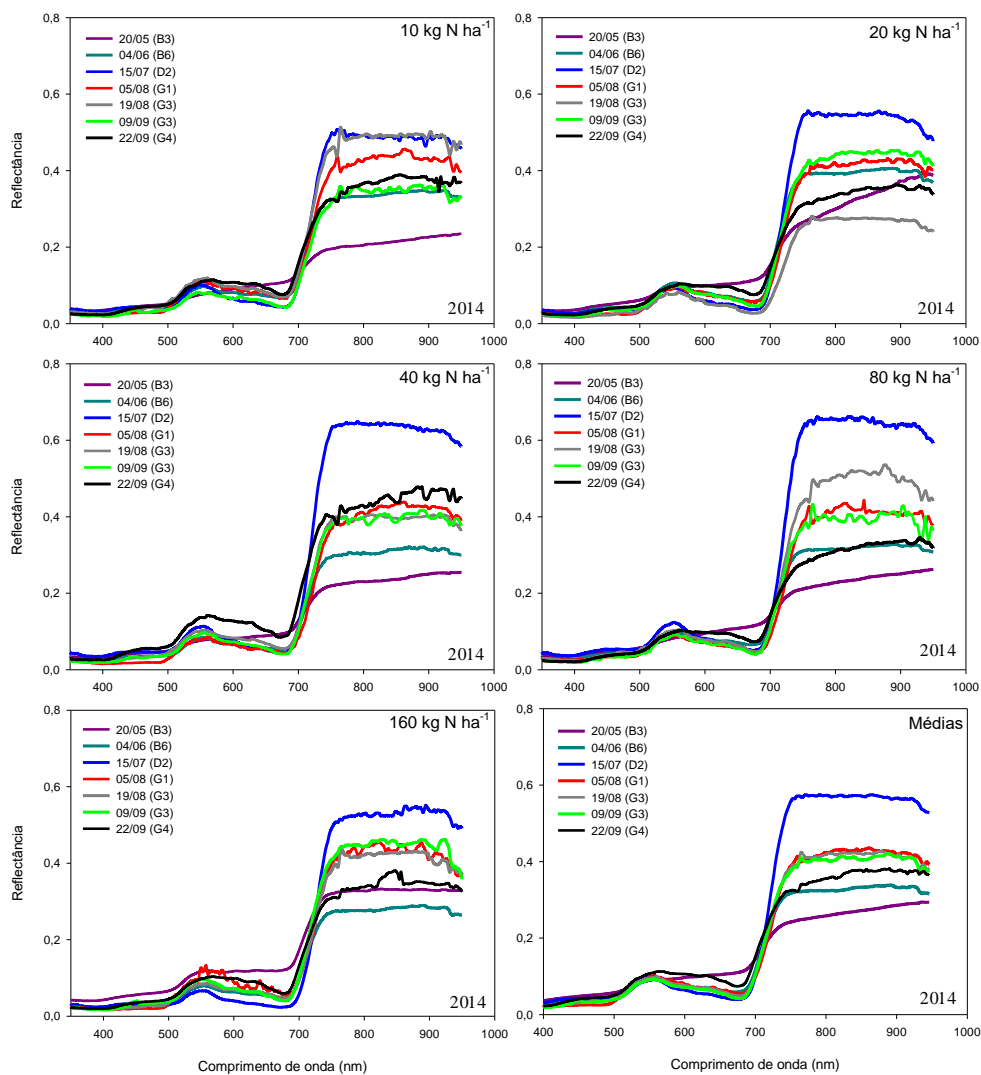


FIGURA 18. Curvas de reflectância da canola, em função de cinco doses de adubação nitrogenada aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹, e a média dos tratamentos, em data de medição, da safra de 2014. Coxilha, RS.

Ao longo das medições subsequentes, a reflectância da REM no visível e no infravermelho próximo seguiu o padrão similar ao observado na safra 2013. Houve diminuição da reflectância no visível e aumento da reflectância no infravermelho próximo ao longo do período de medições. Não foi observado algum tipo de padrão para a data em

que ocorreu a mínima reflectância, na banda do visível, entre os tratamentos de doses de nitrogênio. Já a máxima reflectância no infravermelho ocorreu, em todos os tratamentos, em 15/07, quando as plantas estavam em estágio fenológico D2. A partir deste momento, como na safra de 2013, a reflectância no visível aumentou e no infravermelho diminuiu (Figura 18).

Em relação aos tratamentos de doses de nitrogênio, foi observado que, na data de 15/07, houve um gradiente de aumento da reflectância no infravermelho próximo, que seguiu o aumento da dose de nitrogênio até o tratamento de 80 kg de N ha⁻¹. Isto ocorreu devido ao maior incremento de biomassa em função das doses de adubação nitrogenada observado nesta data. Também foi observado que a menor reflectância espectral no visível, durante o ciclo, ocorreu no tratamento de 160 kg de nitrogênio por hectare, na data 15/07. Porém, considerando os dois anos experimentais, a máxima reflectância no infravermelho próximo ocorreu durante o período fenológico alongação, mais especificamente nos estádios fenológicos D1 e D2, e a máxima reflectância no visível, coincidiu com o florescimento, no estágio G1, em ambos os experimentos (Figura 18).

Na Figura 19 está representada graficamente a variação ao longo do tempo da reflectância espectral nas bandas do visível (azul, verde, amarelo e vermelho) e infravermelho próximo, da média de todos os tratamentos. Foram escolhidas três datas para cada uma das safras. Na safra de 2013 foram escolhidas as datas 15/07 representando o período vegetativo, 30/08 representando o período de florescimento e 26/09 representando o período de enchimento de grãos. Na safra de 2014 foram escolhidas as datas 15/07 representando o período vegetativo, 05/08 representando o período de florescimento e 09/09 representando o período de enchimento de grãos.

Similar ao observado anteriormente (Figuras 17 e 18), em ambos os anos experimentais a reflectância aumentou do período vegetativo até o florescimento, nas

bandas do vermelho, amarelo e verde, diminuindo novamente no período de enchimento, de grãos. Na banda do azul aconteceu o oposto, a reflectância espectral diminuiu do período vegetativo para o período do florescimento e aumentou no período de enchimento de grãos. Já no infravermelho próximo, a reflectância diminuiu constantemente do período vegetativo até o final do ciclo.

Apesar dos padrões similares das duas safras (Figura 19), no ano de 2014 a reflectância, nas bandas do vermelho e amarelo foi menor em relação à reflectância no ano de 2013 no período de florescimento e maior nos períodos vegetativo e enchimento de grãos. No período vegetativo e enchimento de grãos, no ano de 2013 (Figura 10) a canola produziu maior quantidade de biomassa, esta absorveu maior quantidade de radiação nas bandas do vermelho e amarelo para os processos de fotossíntese em relação à safra de 2014. No período de florescimento, o fato da reflectância ter aumentado menos, na safra de 2014 em relação à safra de 2013, indica que houve menor quantidade de flores no dossel refletindo radiação nas bandas do visível.

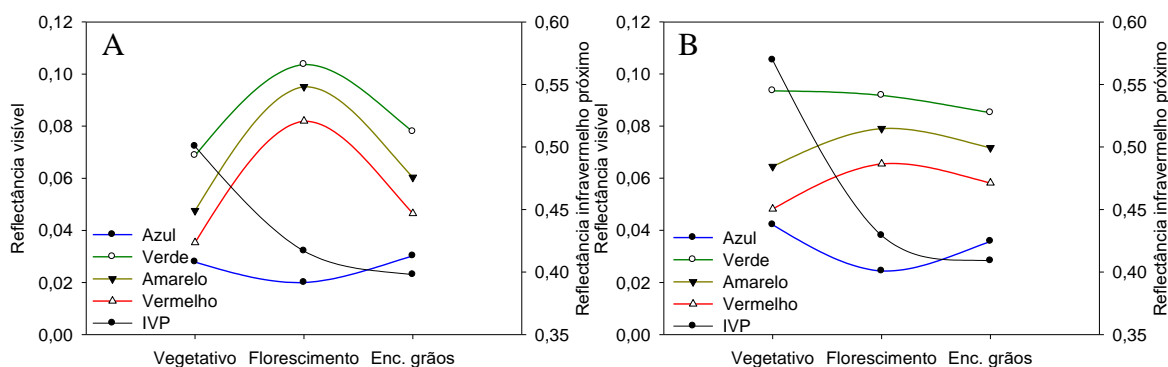


FIGURA 19. Variação da reflectância espectral nas bandas do azul, do verde do amarelo, do vermelho e do infravermelho próximo, em três fases distintas do ciclo de desenvolvimento da canola, no ano de 2013 (A) e 2014 (B). Coxilha, RS.

Na Figura 20 é apresentada a relação inversa que existe entre as reflectâncias espectrais nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo, ao longo do ciclo de crescimento e desenvolvimento da canola.

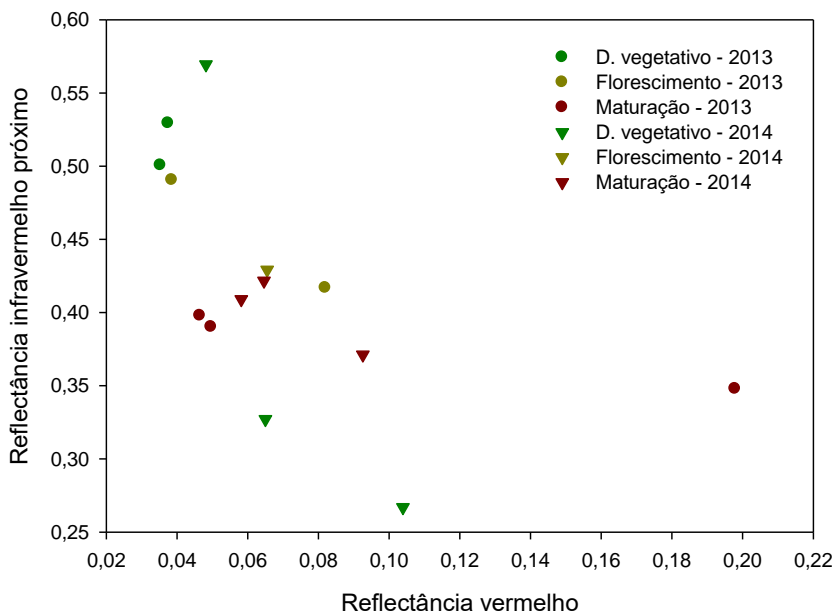


FIGURA 20. Relação entre reflectância na banda do vermelho e do infravermelho próximo, para a canola, nos anos de 2013 e 2014, Coxilha, RS.

No início do crescimento e desenvolvimento da canola, em função da reflectância do solo descoberto e dos restos culturais, na entre linha de cultivo, a reflectância espectral no vermelho foi alta e no infravermelho próximo foi baixa, fazendo com que os pontos fiquem situados no quadrante inferior esquerdo do gráfico. Conforme a cultura cresce e se desenvolve, ocorreu diminuição da reflectância espectral no vermelho, pela absorção neste comprimento de onda pelos pigmentos fotossintetizantes, e aumentou no infravermelho próximo, em função dos fenômenos de transmissão e reflexão da REM nestes comprimentos de onda. Os pontos migraram do quadrante inferior esquerdo do gráfico para o quadrante superior esquerdo. Após o máximo desenvolvimento vegetativo, houve diminuição da absorção da REM pelas plantas, nas bandas do visível e diminuição da reflexão no infravermelho próximo, com os pontos se situando no quadrante inferior direito do gráfico, com alta reflectância nas bandas do visível e baixa no infravermelho próximo. O padrão observado nas lavouras de canola é coerente com o esperado e descreve a trajetória de um pixel de uma cultura anual no espaço espectral, durante o ciclo

fenológico (Jensen, 2009) e expressa os fundamentos do uso destas faixas de comprimento de ondas para o cálculo de índices de vegetação.

4.4.2 Índices de vegetação calculados a partir dos dados hiperespectrais

Nas figuras 21 e 22 estão apresentados a dinâmica temporal dos índices de vegetação razão simples (SR), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação melhorado (EVI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e índice de vegetação por diferença normalizada verde (GNDVI), obtidos nos anos de 2013 e 2014, calculados com os dados hiperespectrais (espectrorradiômetro).

Como pode ser observado (Figura 21), todos os índices de vegetação apresentaram uma dinâmica temporal similar, com aumento dos valores durante o desenvolvimento vegetativo das plantas (indicado pelas barras brancas acima do gráfico) até atingirem o valor máximo, antes do início do florescimento. Em seguida, houve queda nos valores dos índices de vegetação, devido ao período de florescimento da canola (indicado pelas barras pretas acima do gráfico). Conforme já foi discutido anteriormente, as flores amarelas refletem quase igualmente a REM no verde e vermelho que incide no dossel. Como na maior parte dos índices de vegetação é usado o contraste entre o infravermelho e o vermelho, a floração acaba causando diminuição nos valores dos índices de vegetação. Em seguida, os índices de vegetação voltaram a aumentar, por ocasião da queda das flores bem como, pela grande quantidade de siliquis verdes presentes no dossel, as quais absorvem a radiação visível para o processo fotossintético.

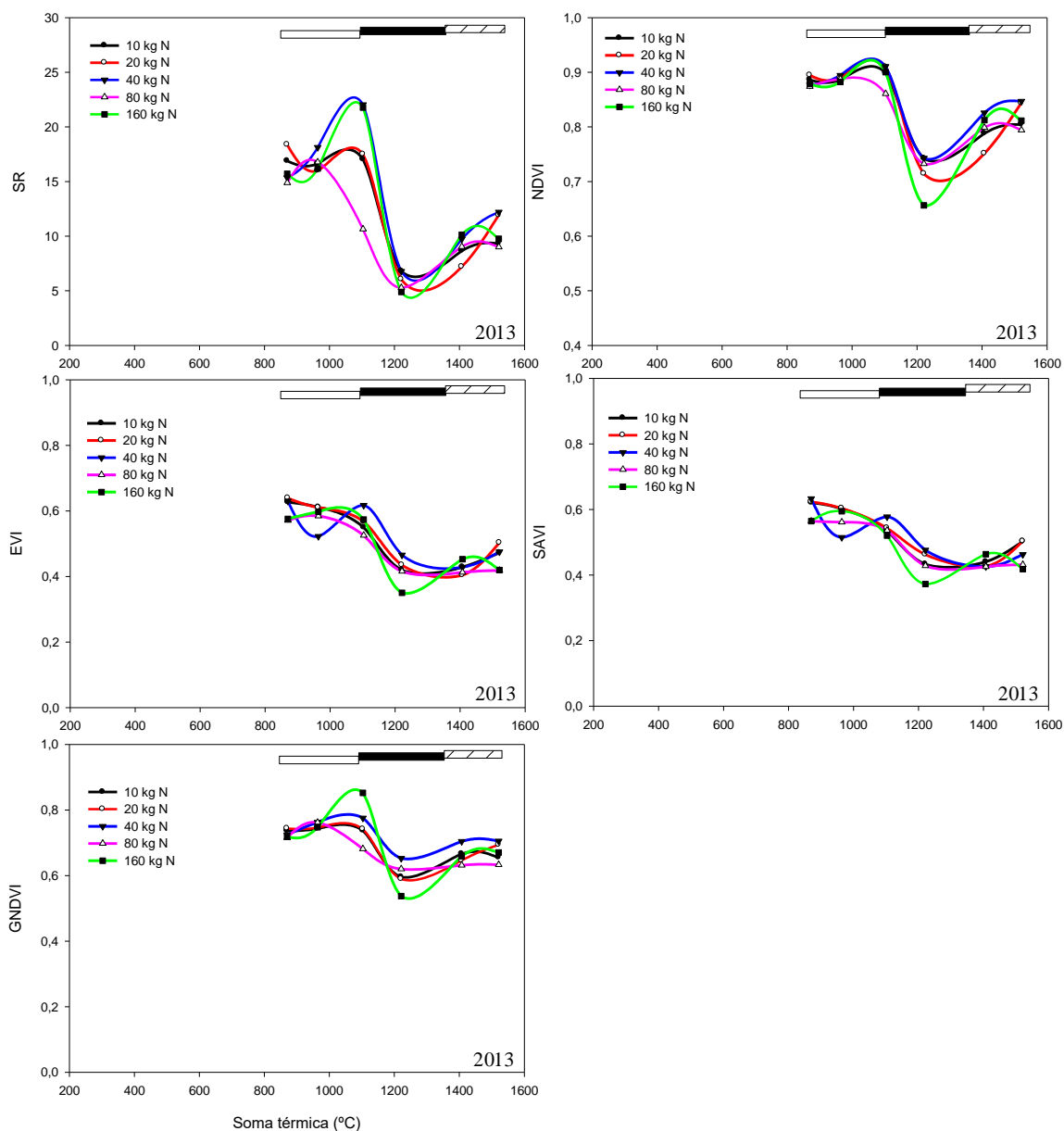


FIGURA 21. Dinâmica temporal dos índices de vegetação da canola: razão simples (SR), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação realçado (EVI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e índice de vegetação por diferença normalizada verde (GNDVI), em função de cinco doses de adubação nitrogenada, aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹, no ano de 2013. As barras acima no gráfico indicam os períodos: vegetativo (em branco); florescimento (em preto) e enchimento de grãos (hachurado). Coxilha, RS.

Este padrão temporal dos índices de vegetação da canola (Figura 21), de apresentar dois picos, é distinto do observado em diversas culturas agrícolas cultivadas no Rio

Grande do Sul. As culturas do arroz (Klering, 2012), do trigo (Junges, 2011) e da soja (Pinto & Fontana, 2011) são caracterizadas por aumento contínuo dos índices de vegetação, do início do ciclo até o máximo valor do índice, que ocorre antes da floração, e então decrescem durante o enchimento de grãos até atingirem o valor mínimo na colheita. Esta informação é útil, na medida em que pode ser utilizada na diferenciação do cultivo de canola, em estudos com imagens orbitais para fins de mapeamento, como os apresentados por Vicari (2015), que realizou estudos no âmbito de mapeamento da área cultivada com canola na região nordeste e noroeste do Rio Grande do Sul.

Apesar de apresentarem padrão de variação temporal semelhantes, houve diferenças entre os índices de vegetação avaliados (Figura 21). O SR e o NDVI foram semelhantes na dinâmica temporal, mas o SR apresentou maior variação nos valores entre os tratamentos de doses de nitrogênio em relação ao NDVI, onde as curvas espectrais dos tratamentos apresentaram menor variação. O GNDVI apresentou, em relação aos demais índices, um primeiro pico (máximo) e a depressão (mínimo) do perfil do tratamento de 160 kg N ha^{-1} mais pronunciados do que os demais índices. O SAVI e EVI apresentam dinâmica semelhante entre si, diferindo dos demais, observando-se, que após o período de florescimento, no enchimento de grãos quando os valores voltam a ser altos devido à absorção no visível pelas hastes e síliquas, o aumento nos valores foi menos expressivo.

No ano de 2014 (Figura 22) a dinâmica temporal foi semelhante ao ano anterior, porém as medições começaram no início do ciclo da cultura. Então, foi possível observar o padrão inicial da cultura de aumento nos índices associado ao crescimento das plantas. Quando comparados os resultados dos dois anos experimentais, percebe-se que, em 2014, também houve queda nos valores dos índices de vegetação no período de florescimento, mas esta foi mais suave em relação a 2013. Também após o final do florescimento o incremento nos valores dos índices de vegetação não foi acentuado, como no ano de 2013.

Isto, possivelmente, esteja associado a menor carga de flores no dossel na safra de 2014 em relação à safra de 2013, causando menor redução na reflectância no período de florescimento, em relação a 2013. Com uma menor quantidade de flores viáveis, o número de siliquis também foi menor.

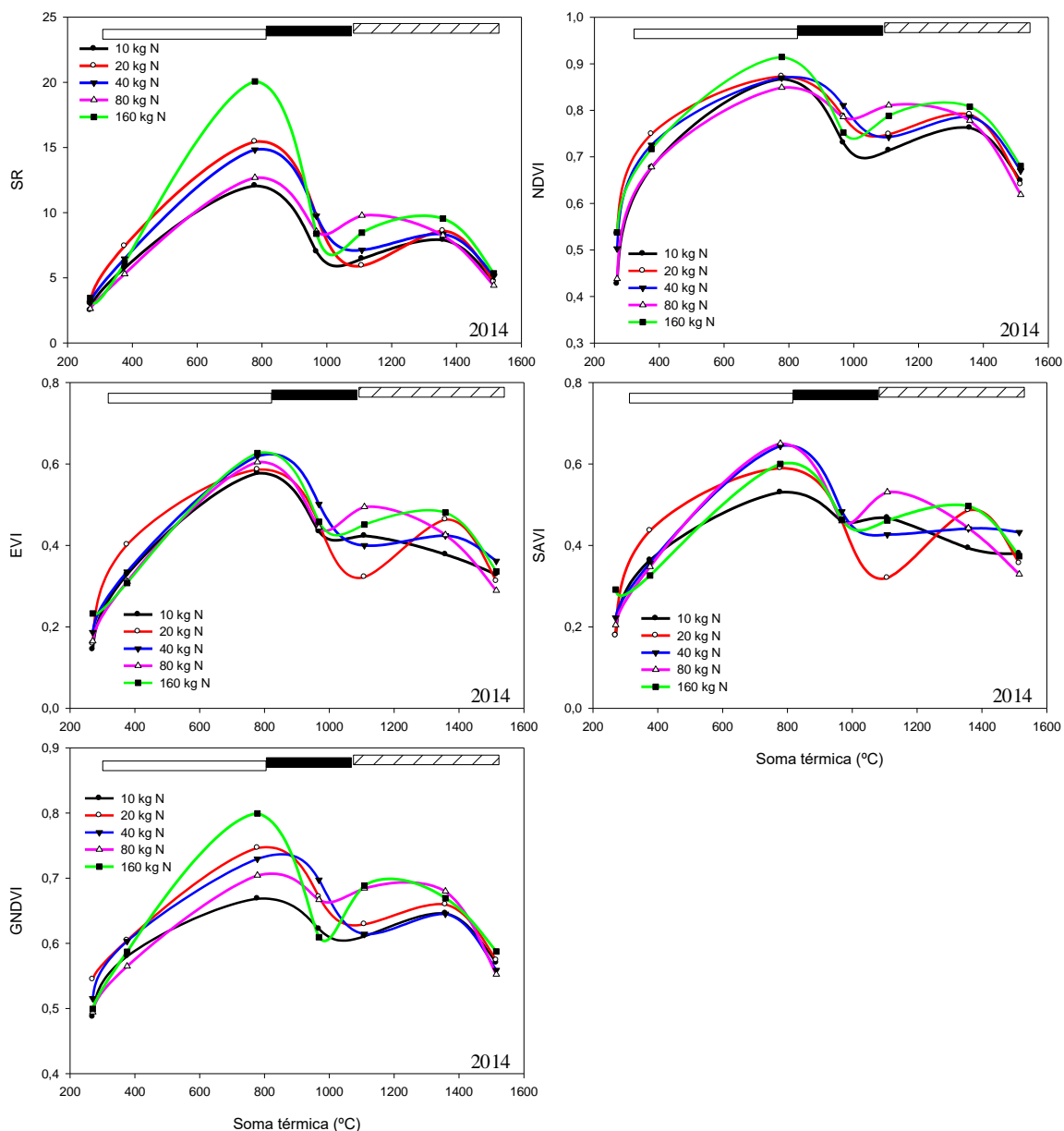


FIGURA 22. Dinâmica temporal dos índices de vegetação da canola: razão simples (SR), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação realçado (EVI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e índice de vegetação por diferença normalizada verde (GNDVI), em função de cinco doses de adubação nitrogenada, aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹, no ano de 2014. As barras acima no gráfico indicam os períodos: vegetativo (em branco); florescimento (em preto) e enchimento de grãos (hachurado). Coxilha, RS.

As siliques e hastes são as estruturas que absorvem a REM no visível para a realização da fotossíntese neste período, fazendo com que os valores dos índices de vegetação aumentem no período do enchimento de grãos (Figuras 21 e 22). Com uma menor quantidade de siliques no dossel, os valores dos índices não aumentaram na mesma escala na safra de 2014 em comparação com a safra de 2013. Concordando com isto o peso de matéria seca de siliques máximo da safra de 2013 foi 1.268 g m^{-2} , enquanto que na safra de 2014 foi 633 g m^{-2} (Figura 12). Estes resultados estão também de acordo com o rendimento de grãos médio atingido em 2014, que foi em torno de 500 kg ha^{-1} inferior ao obtido em 2013.

Nos diagramas de caixa dos índices de vegetação SR, NDVI, EVI, SAVI e GNDVI (Figura 23) observa-se que os índices de vegetação obtidos na safra de 2013 foram superiores aos obtidos na safra de 2014, resultado coerente com os obtidos no acúmulo de biomassa da canola, em que a safra de 2013 foi superior a safra de 2014. Segundo Jensen (2009), os índices de vegetação indicam a atividade da vegetação verde, englobados nesta atividade da vegetação estão o IAF a cobertura verde, o teor de clorofila, a biomassa verde e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida.

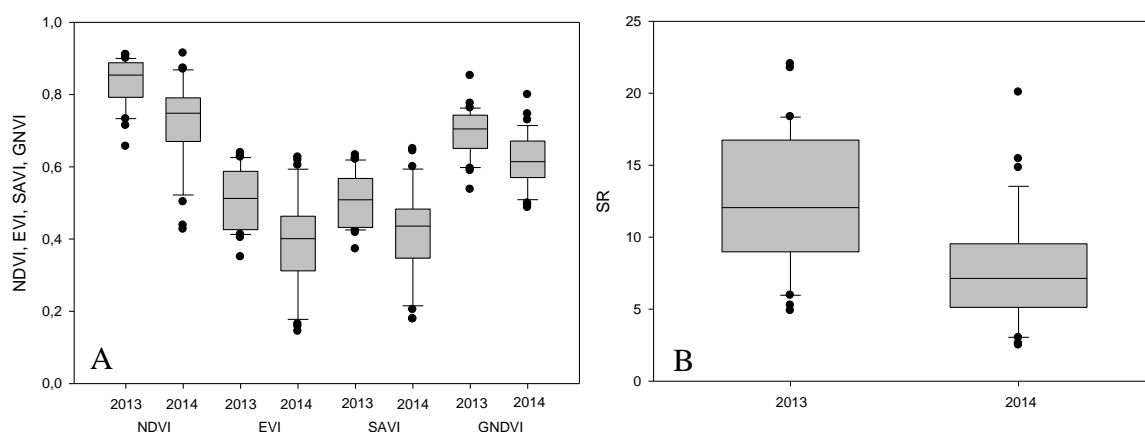


FIGURA 23. Diagramas de caixa do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação realçado (EVI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e índice de vegetação por diferença normalizada verde (GNDVI) da canola (A) e razão simples (SR) (B), da safra de 2013 e 2014. Coxilha, RS.

Entre os tratamentos de adubação nitrogenada, apesar de alguns índices de vegetação apresentarem diferenças significativas, não houve um padrão geral de variação em função desta (Tabela 8). Era esperado que as parcelas que receberam as maiores doses de adubação nitrogenada apresentassem valores mais altos nos índices de vegetação, antes do período de florescimento e após o período de florescimento (nos dois picos presentes nos perfis temporais).

Na safra de 2013, no período de floração, o índice de vegetação razão simples foi superior no tratamento de 10 kg ha⁻¹ de N, em relação ao tratamento de 160 kg ha⁻¹ de N. Isto pode ter ocorrido em decorrência da maior quantidade de flores no tratamento de 160 kg ha⁻¹ de N, que fez com que o valor do índice fosse reduzido pela maior reflectância nas bandas do visível. No período de enchimento de grãos da mesma safra o índice razão simples também foi maior no tratamento 40 kg ha⁻¹ de N, em relação ao tratamento 80 kg ha⁻¹ de N. Este resultado (falta de padrão de variação em função da dose de adubação nitrogenada) mostra concordância com os resultados encontrados na biomassa acumulada (Tabela 6), que também não variou significativamente entre os tratamentos de doses de adubação nitrogenada.

TABELA 8. Índices de vegetação da canola, razão simples (SR), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação realçado (EVI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e índice de vegetação por diferença normalizada verde (GNDVI), para as cinco doses de adubação nitrogenada aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹, em três etapas do ciclo fenológico: vegetativo (Veg.), florescimento (Flor.) e maturação (Mat.), nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS.

| Índice | Estádio | Dose de nitrogênio (kg ha ⁻¹) | | | | | |
|--------|---------|---|---------|----------|---------|---------|---------|
| | | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 | |
| 2013 | SR | Veg. | 16,63 A | 15,99 A | 23,46 A | 16,78 A | 16,19 A |
| | | Flor. | 6,80 A | 6,04 AB | 6,78 AB | 7,35 AB | 4,89 B |
| | | Mat. | 9,32 AB | 11,91 AB | 12,20 A | 9,00 B | 9,75 AB |
| | NDVI | Veg. | 0,89 A | 0,89 A | 0,89 A | 0,89 A | 0,88 A |
| | | Flor. | 0,74 A | 0,71 A | 0,74 A | 0,73 A | 0,66 A |
| | | Mat. | 0,80 A | 0,84 A | 0,85 A | 0,79 A | 0,81 A |
| | EVI | Veg. | 0,61 A | 0,61 A | 0,52 A | 0,58 A | 0,60 A |
| | | Flor. | 0,42 A | 0,43 A | 0,47 A | 0,42 A | 0,35 A |
| | | Mat. | 0,47 A | 0,50 A | 0,48 A | 0,42 A | 0,42 A |
| SAVI | Veg. | 0,60 A | 0,60 A | 0,48 A | 0,56 A | 0,59 A | |
| | Flor. | 0,43 A | 0,46 A | 0,48 A | 0,43 A | 0,37 A | |
| | Mat. | 0,50 A | 0,50 A | 0,46 A | 0,43 A | 0,42 A | |
| GNDVI | Veg. | 0,74 A | 0,75 A | 0,79 A | 0,76 A | 0,75 A | |
| | Flor. | 0,60 A | 0,59 A | 0,65 A | 0,62 A | 0,54 A | |
| | Mat. | 0,65 A | 0,69 A | 0,71 A | 0,63 A | 0,67 A | |
| 2014 | SR | Veg. | 12,06 A | 15,44 A | 14,83 A | 12,67 A | 23,63 A |
| | | Flor. | 7,00 A | 9,75 A | 12,72 A | 8,54 A | 8,39 A |
| | | Mat. | 7,90 A | 8,59 A | 8,35 A | 8,24 A | 9,54 A |
| | NDVI | Veg. | 0,87 AB | 0,87 AB | 0,87 AB | 0,85 B | 0,91 A |
| | | Flor. | 0,73 A | 0,79 A | 0,81 A | 0,79 A | 0,75 A |
| | | Mat. | 0,76 A | 0,79 A | 0,79 A | 0,78 A | 0,81 A |
| | EVI | Veg. | 0,51 A | 0,59 A | 0,62 A | 0,60 A | 0,63 A |
| | | Flor. | 0,43 A | 0,45 A | 0,50 A | 0,44 A | 0,46 A |
| | | Mat. | 0,38 A | 0,46 A | 0,42 A | 0,43 A | 0,48 A |
| | SAVI | Veg. | 0,53 A | 0,59 A | 0,64 A | 0,65 A | 0,60 A |
| | | Flor. | 0,46 A | 0,46 A | 0,48 A | 0,46 A | 0,46 A |
| | | Mat. | 0,39 A | 0,49 A | 0,44 A | 0,44 A | 0,50 A |
| | GNDVI | Veg. | 0,67 B | 0,75 AB | 0,73 AB | 0,70 AB | 0,80 A |
| | | Flor. | 0,62 A | 0,67 A | 0,70 A | 0,67 A | 0,61 A |
| | | Mat. | 0,65 A | 0,66 A | 0,64 A | 0,65 A | 0,67 A |

OBS: Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

Outro aspecto importante de mencionar é a característica que alguns índices de vegetação mostram, como o NDVI, de saturação dos valores. Isso significa que chega um momento que incrementos de biomassa e IAF do dossel não acarretam em aumentos nos valores do índice (Ponzoni *et al.*, 2012). O NDVI é um índice muito suscetível à saturação, o que pode ser percebido na Figura 24 que mostra menor dispersão dos valores no eixo Y quando o dossel apresenta maiores quantidades de biomassa, o EVI e o SAVI foram os índices menos suscetíveis à saturação.

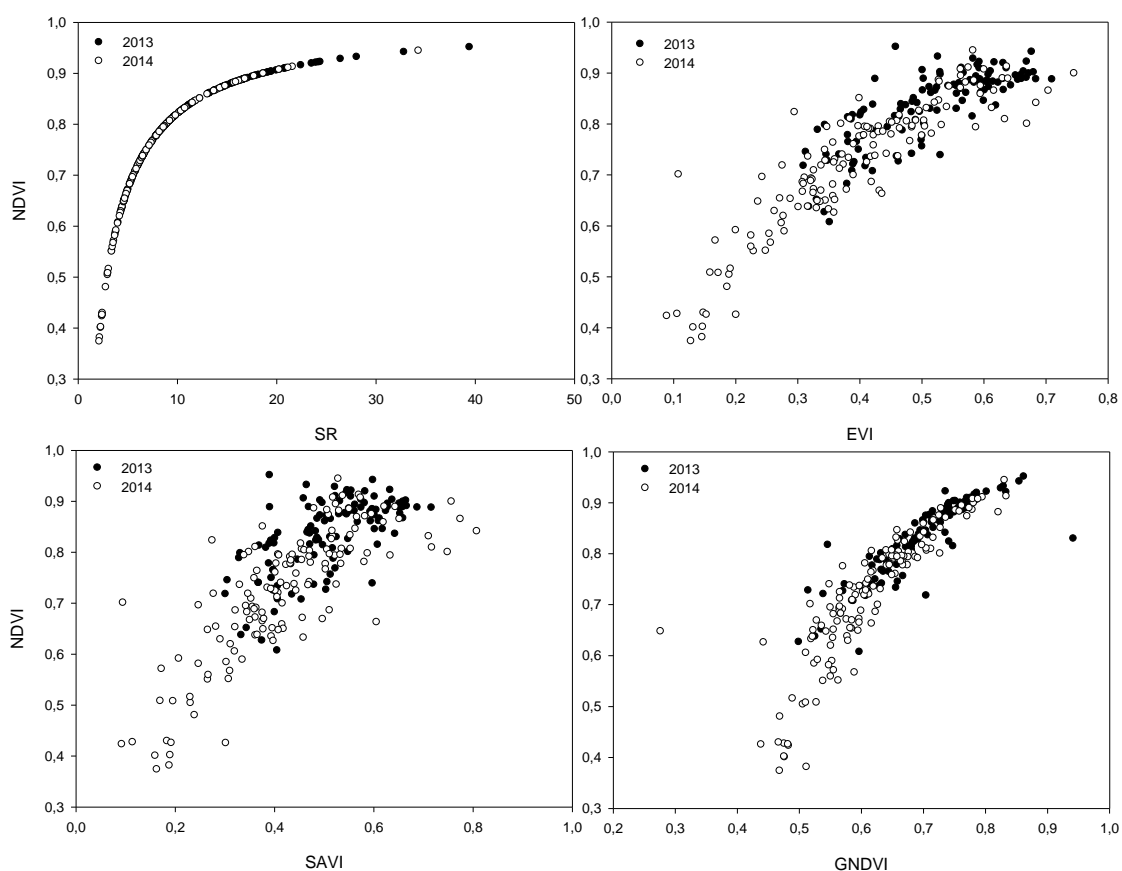


FIGURA 24. Relação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em função do índice de vegetação realçado (EVI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI), índice de vegetação por diferença normalizada verde (GNDVI) e razão simples (SR) nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS.

4.4.3 NDVI obtido com sensor óptico ativo *Greenseeker*

A dinâmica temporal do NDVI obtida com sensor remoto ativo, *Greenseeker*, (Figura 25) confirma a dinâmica temporal obtida com os dados hiperespectrais, com presença de dois picos, um antes do período de florescimento e outro após o período de florescimento.

As maiores diferenças de NDVI (obtido com *Greenseeker*) ocorreram entre os anos experimentais, mas também houve diferenças significativas entre os níveis de adubação nitrogenada em cobertura. Em 2013 (Figura 25 A), por ter sido um ano mais favorável, climaticamente, para o desenvolvimento das plantas de canola, não ocorrem diferenças significativas entre os tratamentos de doses de nitrogênio. Em 2014, no entanto, houve maior variação do NDVI, principalmente no primeiro valor máximo. O índice variou de 0,62, no tratamento de 10 kg de N por hectare a 0,80 no tratamento de 160 kg de nitrogênio por hectare. Outro aspecto é que, como na variação dos índices de vegetação hiperespectrais, a queda dos valores por ocasião do florescimento da canola em 2013 foi mais pronunciada, em relação à 2014. Em 2013 a queda foi de 0,80 para 0,50 no valor do NDVI, enquanto que, em 2014 a queda foi de 0,80 para 0,55, ambas no tratamento de 160 kg de nitrogênio por hectare. Possivelmente, isto seja decorrente da já mencionada menor quantidade de flores no dossel em 2014.

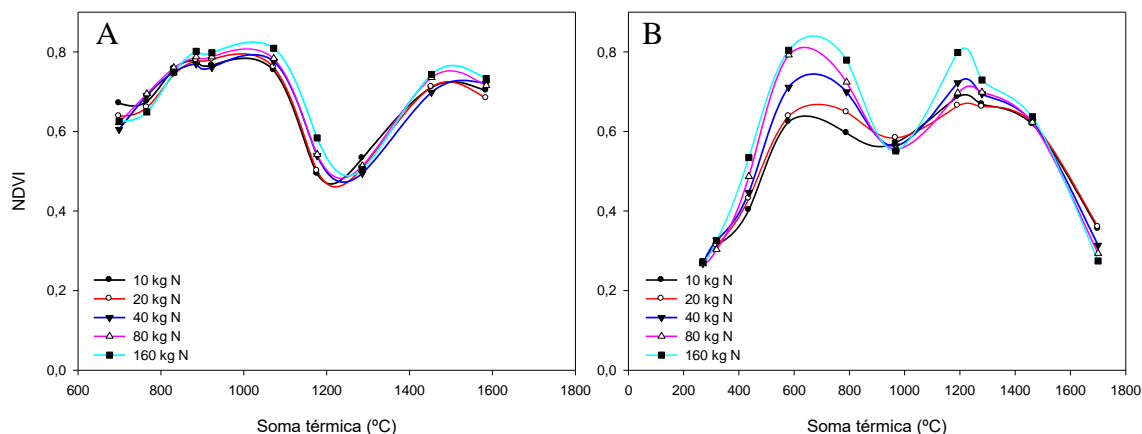


FIGURA 25. Dinâmica temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para a canola, obtido com sensor óptico ativo - Greenseeker, em função de cinco doses de adubação nitrogenada, aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹, no ano de 2013 (A) e 2014 (B). Coxilha, RS.

Em 2014, nas datas 10/06, 25/06, 16/07, 03/09 e 07/10 o NDVI medido apresentou diferenças significativas entre os tratamentos de doses de nitrogenada (Tabela 9). O mesmo apresentou o padrão de variação esperado entre as doses de nitrogênio, em que, nas doses mais alta os valores de NDVI foram mais elevados, em relação as doses de adubação nitrogenada menores.

Os valores de NDVI obtidos com o *Greenseeker* (Tabela 9) foram inferiores se comparados ao NDVI obtido a partir dos dados hiperespectrais (Tabela 8), tanto em 2013, quanto em 2014. Além disso, o *Greenseeker* mostrou maior sensibilidade para detectar as diferenças na biomassa, em função das doses de nitrogênio. Apesar da quantidade de biomassa acumulada nas parcelas não ter diferido significativamente entre os tratamentos (Tabela 6), o sensor foi capaz de detectar diferenças de NDVI. Esta maior sensibilidade pode estar associada à área do cone de amostragem do sensor, que no *Greenseeker*, tem uma largura em torno de 61 cm, enquanto que, no espectrorradiômetro, a largura do cone foi de 45 cm. As diferenças também podem ser explicadas pelas bandas utilizadas para o cálculo do NDVI. As bandas utilizadas no cálculo dos IV a partir dos dados hiperespectrais

foram compatibilizadas com as bandas do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). A banda do vermelho deste sensor corresponde aos comprimentos de onda 620 a 670 nm e a banda do infravermelho próximo corresponde aos comprimentos de onda 841 a 876 nm (NASA, 2015), enquanto que o *Greenseeker* obtém o NDVI pela razão dos comprimentos de onda 650 nm (vermelho) e 770 nm (infravermelho próximo) (Trimble, 2010).

TABELA 9. NDVI da canola, obtido com sensor óptico ativo, *Greenseeker*, para as cinco doses de adubação nitrogenada, aplicadas em cobertura: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹, nos períodos vegetativo (Veg), florescimento (Flor) e maturação (Mat), nas safras de 2013 e 2014. Coxilha, RS.

| Data | Estádio | Dose de nitrogênio | | | | | |
|----------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|--------|
| | | 10 kg ha ⁻¹ | 20 kg ha ⁻¹ | 40 kg ha ⁻¹ | 80 kg ha ⁻¹ | 160 kg ha ⁻¹ | |
| 2013 | 28/06/13 | Veg. (C1) | 0,67 A | 0,64 A | 0,61 A | 0,62 A | 0,63 A |
| | 05/07/13 | Veg. (C2) | 0,68 A | 0,66 A | 0,69 A | 0,69 A | 0,65 A |
| | 11/07/13 | Veg. (C2) | 0,76 A | 0,74 A | 0,75 A | 0,76 A | 0,75 A |
| | 17/07/13 | Veg. (D1) | 0,78 A | 0,78 A | 0,77 A | 0,79 A | 0,80 A |
| | 26/07/13 | Veg. (D2) | 0,77 A | 0,78 A | 0,76 A | 0,79 A | 0,80 A |
| | 08/08/13 | Veg. (E) | 0,75 A | 0,76 A | 0,78 A | 0,78 A | 0,81 A |
| | 22/08/13 | Flor. (F2) | 0,49 B | 0,50 B | 0,54 AB | 0,54 AB | 0,58 A |
| | 05/09/13 | Flor. (G1) | 0,53 A | 0,51 A | 0,50 A | 0,51 A | 0,50 A |
| | 17/09/13 | Mat. (G3) | 0,71 A | 0,71 A | 0,70 A | 0,74 A | 0,74 A |
| | 02/10/13 | Mat. (G4) | 0,70 A | 0,68 A | 0,72 A | 0,71 A | 0,73 A |
| 2014 | 20/05/14 | Veg. (B3) | 0,27 A | 0,27 A | 0,27 A | 0,27 A | 0,27 A |
| | 27/05/14 | Veg. (B4) | 0,31 A | 0,31 A | 0,33 A | 0,30 A | 0,33 A |
| | 10/06/14 | Veg. (C1) | 0,40 B | 0,43 B | 0,45 AB | 0,49 AB | 0,53 A |
| | 25/06/14 | Veg. (C1) | 0,62 B | 0,64 B | 0,71 AB | 0,79 A | 0,80 A |
| | 16/07/14 | Veg. (F1) | 0,60 B | 0,65 AB | 0,70 A | 0,72 A | 0,78 A |
| | 05/08/14 | Flor. (G1) | 0,57 A | 0,58 A | 0,56 A | 0,56 A | 0,55 A |
| | 25/08/14 | Mat. (G3) | 0,69 A | 0,66 A | 0,72 A | 0,70 A | 0,80 A |
| | 03/09/14 | Mat. (G3) | 0,67 B | 0,66 B | 0,69 AB | 0,70 AB | 0,73 A |
| | 17/09/14 | Mat. (G4) | 0,62 A | 0,62 A | 0,62 A | 0,62 A | 0,64 A |
| 07/10/14 | Mat. (G5) | 0,36 A | 0,36 A | 0,31 AB | 0,29 AB | 0,27 B | |

OBS: Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

O espectrorradiômetro é mais apropriado para estudos básicos de reconhecimento de padrões espectrais de determinado alvo, enquanto o *Greenseeker* é mais utilizado no contexto da agricultura de precisão principalmente no manejo da adubação nitrogenada das culturas. Além disto, a operacionalidade dos dois equipamentos é distinta. O espectrorradiômetro é mais difícil de ser manuseado pelas peças que o compõem e pelo peso delas, também pela fibra ótica que liga o telescópio no espectrorradiômetro, que é sensível e inspira muito cuidado no seu manuseio. O *Greenseeker* é um equipamento mais simples de ser manuseado. O custo dos dois equipamentos também é distinto, o espectrorradiômetro é mais oneroso em relação ao *Greenseeker*.

4.5 Correlações dos dados de planta com os dados espectrais

Os coeficientes de correlação de Person (r) entre a matéria seca total da parte aérea acumulada e as reflectâncias das bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo (compatibilizadas com o sensor MODIS) na safra de 2014 (Figura 25B), no período vegetativo, oscilaram de negativos na banda do azul para positivos na banda do verde, negativos novamente na banda do vermelho e mais uma vez positivos na banda do infravermelho próximo.

Este é o padrão esperado de interação entre a radiação solar e o dossel vegetal. Conforme já descrito, quanto maior a quantidade de biomassa no dossel (ao longo do ciclo), menor foi a reflectância da REM no azul e no vermelho, devido à absorção destes comprimentos de onda pelos pigmentos fotossintetizantes, resultando em coeficientes de correlação negativos. No verde e no infravermelho próximo ocorreu o contrário, ou seja, quanto maior a quantidade de biomassa no dossel maior a reflectância da REM, resultando em coeficientes de correlação positivos. No período vegetativo somente foram significativas as correlações com as bandas do vermelho e infravermelho próximo. O

maior “r” positivo para incremento de matéria seca da parte aérea foi no infravermelho próximo, de 0,94. Estes resultados concordam com resultado encontrados por Warren & Matternicht (2004), que também correlacionaram as bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo com o IAF e PAI (índice de pétalas) na cultura da canola, encontrando esta mesma oscilação nas correlações entre as bandas do espectro eletromagnético e IAF negativas no azul e vermelho e positivas no verde e infravermelho próximo.

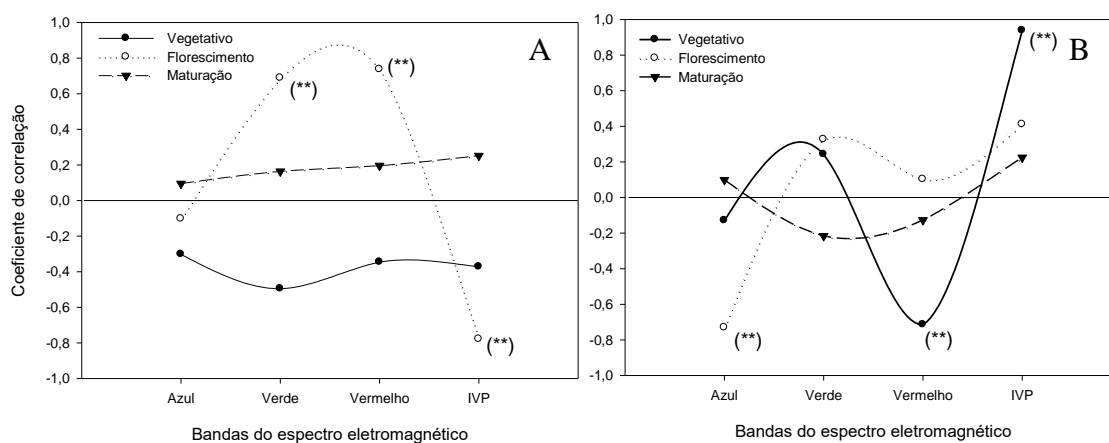


FIGURA 26. Coeficientes de correlação de Pearson entre a matéria seca da parte aérea da canola e a reflectância da REM nas bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético, nos períodos do ciclo: vegetativo, florescimento e maturação. **Significativo a 5%. Nas safras de 2013 (A) 2014 (B), Coxilha, RS.

Já no período de florescimento (safra de 2014), os coeficientes de correlação foram negativos na banda do azul e positivos nas demais bandas (Figura 25B). Coeficientes positivos indicam que ambas, a reflectância e a matéria seca da parte aérea da canola, aumentaram. No infravermelho próximo, os coeficientes, ainda que positivos, foram inferiores aos observados no período vegetativo, possivelmente em decorrência da reflectância diminuir, dado que as folhas que refletem grande parte da radiação nestes comprimentos de onda estão abaixo da camada de flores, interagindo menos com a REM.

Na maturação, não houve associação entre a reflectância e a biomassa, sendo que os coeficientes de correlação foram menores do que os anteriores e não apresentaram significância estatística (Figura 25B).

Estes resultados concordam com Monteiro *et al.* (2012) que correlacionaram IAF com dados hiperespectrais (bandas com comprimento de onda de 2,4 nm). Os resultados foram correlações negativas entre o IAF e as bandas nos comprimentos de onda do visível e positivas entre o IAF e os comprimentos de onda do infravermelho próximo.

Na safra de 2013, os resultados da análise de correlação (Figura 25A) não foram semelhantes aos observados na safra de 2014. As correlações no período vegetativo foram negativas em todas as bandas do espectro eletromagnético, porém sem significância estatística. No período de florescimento, na banda do azul, as correlações foram negativas, o que é coerente, pois os pigmentos estão absorvendo radiação nesta banda e a reflectância é baixa, no entanto, a biomassa da canola está aumentando. Nas bandas do verde e vermelho, as correlações foram positivas e significativas, também coerente, porque a reflectância nestas bandas aumenta pelas flores presentes no dossel e a biomassa também segue aumentando. No infravermelho próximo, a correlação foi negativa e significativa, sendo o contrário das correlações da safra de 2014 e o significado desta associação de difícil justificativa. No período de maturação as correlações não foram significativas.

Na análise utilizando os índices de vegetação, na safra de 2014, os coeficientes de correlação com a biomassa foram positivos para todos os índices avaliados no período vegetativo e na maturação (Figura 26B). Na floração, a correlação apresentou padrão distinto conforme o índice de vegetação. Com o NDVI e o GNDVI as correlações foram negativas e com o EVI e o SAVI foram positivas. Na safra de 2013 (Figura 26A), os coeficientes de correlação mostraram coerência entre si no florescimento e na maturação,

sendo todos negativos e positivos, respectivamente. No período vegetativo houve padrões discordantes, o que pode ter ocorrido pois as medições iniciaram tardiamente.

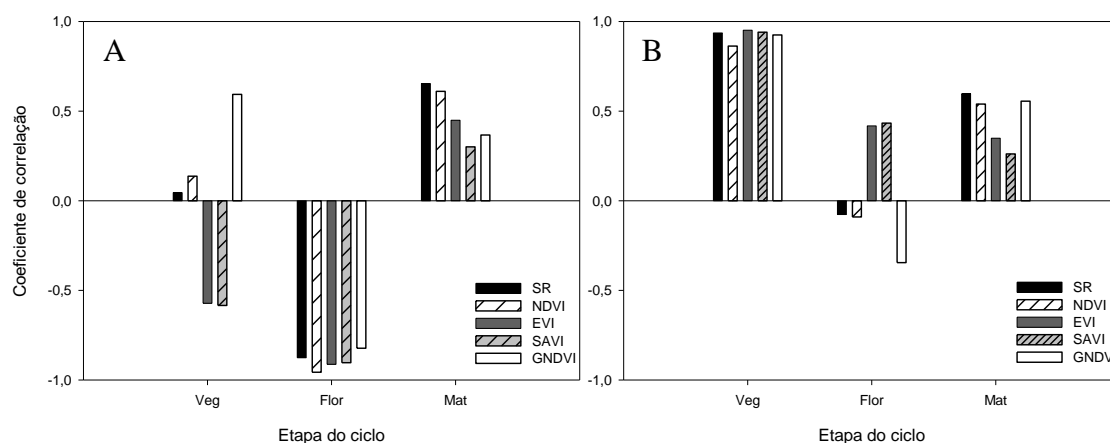


FIGURA 27. Coeficientes de correlação de Pearson entre a biomassa acumulada pela canola e os índices de vegetação NDVI, EVI, SAVI e GNDVI nos períodos do ciclo: vegetativo (Veg), florescimento (Flor) e maturação (Mat). As correlações acima de 0,30 são significativas a 5%. Safras de 2013 (A) e 2014 (B), Coxilha, RS.

O padrão esperado para as correlações, conforme discutido anteriormente, seria correlações positivas no período vegetativo, negativas no período de florescimento e positivas no período de maturação dos grãos. As discordâncias observadas podem ser decorrência de uma série de fatores, como conjunto de dados utilizados, problemas de amostragem, limitação dos índices.

Para as análises com o rendimento de grãos foram utilizados parâmetros derivados dos perfis temporais dos índices de vegetação relacionados ao máximo índice de vegetação (máximo valor obtido no ciclo) e a soma do índice de vegetação (todos os valores obtidos no ciclo foram somados) (Figura 27). As correlações utilizando a soma dos índices foram mais altas quando comparadas às correlações utilizando o máximo IV. Este padrão é esperado, visto que, enquanto a soma está relacionada com o histórico de desenvolvimento da biomassa, o valor máximo, apesar de estar relacionado em tese com o maior acúmulo de biomassa, apresenta o limitante da saturação do mesmo em altos valores, conforme

abordado anteriormente. Os índices que obtiveram as melhores correlações, na safra de 2014 foram o SAVI, o EVI e o GNDVI (Figura 27B). Na safra de 2013, as correlações entre o rendimento de grãos e IV não foram significativas (Figura 27A), o que possivelmente decorra do conjunto de dados usados na análise, iniciada tardiamente no ciclo.

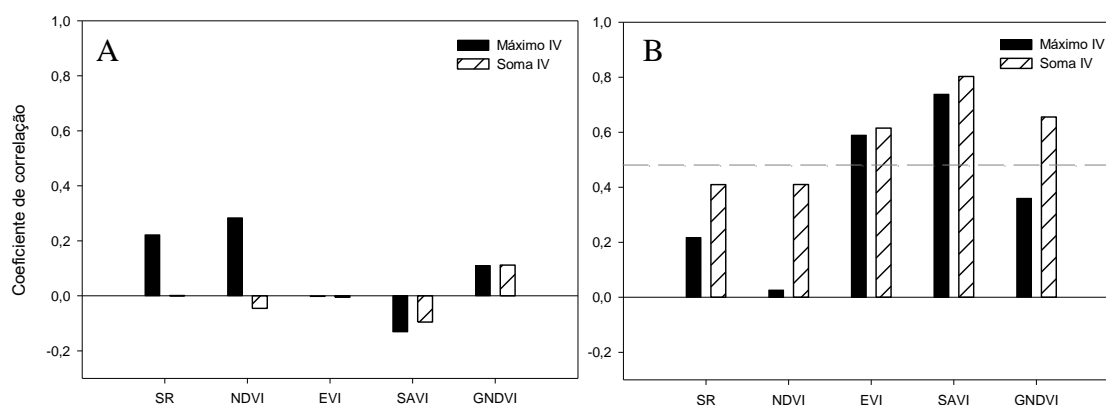


FIGURA 28. Coeficientes de correlação de Pearson entre o rendimento de grãos da canola e os índices de vegetação NDVI, EVI, SAVI e GNDVI. Na linha tracejada correlações significativas a 5%. Nas safras de 2013 (A) e 2014 (B), Coxilha, RS.

Valores derivados das curvas de reflectância têm sido usados especialmente no contexto da modelagem de grãos. Junges (2011) encontrou correlações positivas entre o máximo NDVI e o NDVI integrado e o rendimento de grãos de trigo no Estado do Rio Grande do Sul. Abordagem similar foi usada também por Rodrigues *et al.* (2013), mas neste caso associando índices de vegetação e absorção de CO₂ atmosférico, o que é útil no contexto das discussões sobre mudanças climáticas.

Estas correlações permitem avaliar a possibilidade de usar os dados espectrais como dados de entrada em modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de acúmulo de biomassa ou rendimento da cultura da canola cultivada nas condições climáticas do Estado do Rio Grande do Sul.

5 CONCLUSÃO

As condições ambientais determinam condições diferenciadas de crescimento da canola. Dentre as variáveis meteorológicas a temperatura é o elemento que causa as maiores alterações no acúmulo e dinâmica temporal das variáveis fenométricas (IAF e matéria seca da parte aérea).

A adubação nitrogenada em cobertura causa variações no IAF e no rendimento de grãos de canola. Já o acúmulo de matéria seca da parte aérea, nas condições experimentais ocorridas, não variou em função das doses de adubação nitrogenada aplicadas em cobertura.

As curvas de reflectância da canola são modificadas em função, principalmente, das mudanças morfológicas ocorridas no dossel ao longo das fases fenológicas.

A canola apresenta perfil temporal dos índices de vegetação com dois picos máximos, um antes e outro após o período de florescimento, o que facilita a distinção da canola de outras plantas cultivadas no Rio Grande do Sul.

As diferentes doses de adubação nitrogenada em cobertura, aplicadas na canola, causam diferenças na reflectância do dossel, as quais podem ser percebidas nos índices de vegetação SR, GNDVI e NDVI obtido com sensor *Greenseeker*.

Entre as bandas do espectro eletromagnético estudadas, as que melhor se correlacionam com a quantidade de matéria seca da parte aérea da canola, são as bandas do

vermelho e infravermelho próximo, durante o período vegetativo do ciclo de produção. Os índices com melhores respostas são SR, EVI e SAVI também no período vegetativo. Enquanto que para estudos com rendimento de grãos os índices com melhores respostas são SAVI e GNDVI, utilizando o método de soma do índice ao longo do ciclo de produção.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D. et al. Estimativa do potencial de rendimento de grãos em trigo pelo índice de vegetação por diferença normalizada através de sensor óptico ativo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2010, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto, 2010.

ALMEIDA, T. S. **Respostas espectrais da soja sob diferentes condições hídricas e de preparo do solo**. 2008. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

AMINPANAH, H. Effect of nitrogen rate on seed yield, protein and oil content of two canola (*Brassica Napus L.*) cultivars. **Acta Agriculturae Slovenica**, Liubliana, v. 101, p. 183-190, 2013.

APARÍCIO, N. et al. Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, n.1, p. 83-91, 2000.

BARET, F; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, New York, 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. 77 p.

BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos da estiagem na produção agrícola. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. p.11-23.

BERLATO, M. A.; CORDEIRO, A. P. A. Variabilidade climática e agricultura do Rio Grande do Sul. In: AS ESTIAGENS e as perdas na agricultura: fenômeno natural ou Imprevidência? Esteio: FEDERACITE, 2005. p. 43-58.

BREDEMEIER, C. et al. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 07, p. 1147-1154, 2013.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFRS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400p.

CONAB. **Séries Históricas.** Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos>. Acesso em: 13 abr. 2015.

CUTTER, E. **Anatomia vegetal:** Parte I Células e tecidos. 2ª ed. São Paulo: Roca, 1986.

DALMAGO, G. A. et al. Zoneamento agroclimático para o cultivo de canola no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.16, n. 3, p.295-305, 2008.

DALMAGO, G. A. et al. Canola. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Coord.). **Agrometeorologia dos cultivos:** o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009. p. 131-150

DE FINA, A. L.; RAVELO, A. C. **Fenologia.** In: CLIMATOLOGIA y Fenologia Agrícolas. Buenos Aires: EUDEBA, 1973. p. 201-209

EDWARDS, J.; HERTEL, K. **Canola Growth and Development.** 2011. Disponível em: <http://www.dpi.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0007/448450/Canola-growth-and-development.pdf>. Acesso em: 25 maio 2015.

ESAU, K. **Anatomia das plantas com sementes.** 10. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1974.

FARABEE, M, J. **Photosynthesis.** Disponível em: <http://gened.emc.maricopa.edu/bio/bio181/BIOBK/BioBo-okPS.html>. Acesso em: mai. 2015.

FERNÁNDEZ, S. et al. Radiometric characteristics of Triticum aestivum cv. Astral under water and nitrogen stress. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 15, n. 9, p. 1867-1884, 1994.

FONSECA, E. L. et al. Caracterização espectral de Paspalum notatum em diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 3, p. 365-371, mar. 2002.

GATES, D. M. et al. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, New York, v.4, n.1, p.11-20, (1965).

GAUSMAN, H. W. **Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light.** Texas: Tech University, 1985. (Graduate Studies, no 29)

GOSSE, G. et al. Vers une modelisation de la production chez le colza de printemps. In: **Congrès International sur le Colza**, Paris, v. 1, p. 116-123, 1983.

GITELSON, A. A. et al. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.58, n.3, p.289-298, 1996.

GRANT, C. A.; BAILEY, L. D. Fertility management in canola production. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 73, p. 651-670, 1993.

HINZMAN, L. D.; BAUER, M. E.; DAUGHTRY, C. S. T. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.19, n.1, p.47-61, 1986.

HOFFER, R. M. **Fundamentals of remote sensing: spectral reflectance of characteristics of vegetation**. Indiana: Purdue University. 1976. 10 p.

HOLZAPFEL, C. B. et al. Estimating canola (*Brassica napus* L.) yield potential using an active optical sensor. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 89, p. 1149-1160, 2009.

HORNE, D. J.; SOJKA, R. E. Aeration tillage effects on. In: **ENCYCLOPEDIA of Soil Science**. New York: Dekker, 2006. p. 36-39

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

HUETE, A. R. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 83, p. 195-213, 2002.

INMET. **Normais Climatológicas**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em 14 dez. 2014.

IRIARTE, L. B.; VALETTI, O. E. **Cultivo de Colza**. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuária – INTA. 2008. 156p.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2^a ed. São José dos Campos: Ed. Parêntese, 2009. 598 p.

JOLY, A. B. **Botânica: introdução a taxonomia vegetal**. 11. ed. São Paulo: Ed. USP, 1993. 777 p.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, New York, v. 50, p. 663-666, 1969.

JUNGES, A. H. **Distribuição espacial e temporal do cultivo de trigo no Rio Grande do Sul e ajustes de modelos agrometeorológico-espectral para estimativa de rendimento de grãos**. 2011. 173 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

JUSTICE, C. O. et al. The moderate resolution imaging spectroradiometer (Modis): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 36, n. 4, p. 1228-1249, 1998.

KAEFER, J. E. et al. Produtividade de grãos e componentes de produção da canola de acordo com as fontes e doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, p. 273-280, 2014.

KLERING, E. V. **Mapeamento da area cultivada e estimativa do rendimento de grãos de arroz irrigado a partir de modelos agrometeorológicos-espectrais para o Rio Grande do Sul.** 2012. 163 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

KNIPLING, E. B.. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.1, n.2, p.155-159, 1970.

KÖPPEN, W. **Climatología.** México, DF : Fondo de Cultura Económica, 1948. 71 p.

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

LUZ, G. L. et al. Temperatura base inferior e ciclo de híbridos de canola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 9, p. 1549-1555, 2012.

MARIN, F. R. **Fenologia.** Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_68_22122006154840.html>. Acesso em: 05 set. 2013.

MENDHAM, N. J. et al. The effects of delayed sowing and weather on growth, development and yield of winter oilseed rape (*Brassica napus*). **Journal Agricultural Science**, Cambridge, v. 96, p. 389-416, 1981.

MENDHAM, N. J.; SALISBURY, P. A. Physiology: crop development, growth and yield. In: KIMBER, D.S., MC GREGOR, D.I. (Eds.) **Brassica Oilseed: Production and Utilization.** CAB, Cambridge, p. 11–64, 1995.

MÜLLER, K. et al. Analyses of vegetation indices derived from hyperspectral reflection measurements for estimating crop canopy parameters of oilseed rape (*Brassica napus* L.). **Biosystems Engineering**, [S.l.], v. 101, p. 172-182, 2008.

MONTEIRO, P. F. C. et al. Assessing biophysical variable parameters of bean crop with hyperspectral measurements. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 69, n. 2, p. 87-94, 2012.

MONTHEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystem. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 9, p. 747-766 1972.

MORAES, E. C. **Fundamentos de sensoriamento remoto.** 2002. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1_ECMoraes.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2015.

MORALES, A. S. O. et al. La temperatura en la etapa reproductiva del cultivo de canola (*Brassica napus* L.). **Agricultura Técnica en México**, [S.l.], v. 32, p. 259-265, 2006.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.** 2 ed. São José dos Campos: UFV, 2001. 250p.

NASA. **MODIS Moderation Resolution Imaging Spectroradiometer**. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>> Acesso em: 04 Jun. 2015.

NIED, A. H. **Parâmetros bioclimáticos e resposta da canola ao ambiente físico**. 2013. 135 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

OMETTO, A. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1981. 440 p.

ÖSTÜRK, O. Effects of source and rate of nitrogen fertilizer on yield, yield components and quality of winter rapessed (*Brassica napus* L.). **Chilean Journal of Agricultural Research**, Santiago de Chile, v. 70, p. 132-141, 2010.

PINTO, D. G.; FONTANA, D. C. Inferências sobre o calendário agrícola da soja a partir de perfis temporais de NDVI em imagens MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 148-153.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P. R.; NETTO, J. S. M. (Org.). **Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UNB, 2001. p. 157-199.

PONZONI, F. J. et al. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2ªEd. Cubatão: Oficina de Textos, 2012. 160 p.

RAMSEY, B. R.; CALLINAN, A. P. L. Effects of nitrogen fertilizer on canola production in north central Victoria. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 34, p. 789-796, 1994.

RAPACZ, M. Frost resistance and cold acclimatation abilities of spring-type oilseed rape. **Plant Science**, Limerick, v. 147, p. 55-64, 1999.

RAYMER, P. L. **CANOLA: An Emerging Oilseed Crop: Trends in new crop and new uses**. Alexandria, VA.: ASHS Press, 2002.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa de produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 212 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2004.

RODRIGUES, C.P. et al. NDVI e fluxo de CO₂ em lavouras de soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 28, p. 95-104, 2013.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring Vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTHRESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE - 1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings**. Washington, 1973. v.1, sec A, p. 309-317.

SANCHES, A. C. et al. Produtividade da canola sob irrigação e doses de adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. 688-693, 2014.

SINGH, I. et al. Crop sensors for efficient nitrogen management in sugarcane: potential and constraints. **Sugar Tech**, Lucknow, v. 8, p. 299-302, 2006.

SOUZA, E. G. et al. Índices de vegetação no milho em função da hora do dia e da taxa de nitrogênio aplicada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 865-872, 2009.

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

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2º Ed. Porto Alegre: EMATER/RS – ASCAR, 2008. 220 p.

THOMAS, P. **CANOLA: grower's manual**. Winnipeg: Canola Council of Canada, 2003. Disponível em: <<http://www.canolacouncil.org/crop-production/canola-grower's-manual-contents/chapter-2-canola-varieties/canola-varieties#brassica>>. Acesso em: 05 ago. 2013.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publication of Climatology**, New Jersey, v. 8, 104 p., 1955.

TOMM, G. O. **Indicativos tecnológicos para a produção de canola no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2007. 32 p. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/canola/p_sp03_2007.pdf> Acesso em: 13 set. 2013. (Embrapa Trigo. Sistema de produção, 4).

TRIMBLE. **User Guide: GreenSeeker RT 100 Data Collection and Mapping System**. 2010. 16 p.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. **OILSEEDS: World Markets and Trades**. 2013. (Circular Series Forp - 045 13/05/2013). Disponível em: <<http://usda01.library.cornell.edu/usda/fas/oilseed-trade//2010s/2013/oilseed-trade-05-10-2013.pdf>> Acesso em: 31 jul. 2013

VALERIANO, M. M. Reflectância espectral de culturas agrícolas anuais (I): Espectrorradiometria. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 6, n. 1, 2003.

VALETTI, O. E. **O Cultivo de Colza Canola**. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária - INTA, 2008. 156 p.

WARREN, G. M. R.; METTERNICHT, G. I. **High resolution remote sensing of western australian crops: factors affecting the relationship between LAI and spectral values**. Disponível em: <http://www.researchgate.net/profile/Graciela_Metternicht/publication/257367748_HIGH_RESOLUTION_REMOTE_SENSING_OF_WESTERN_AUSTRALIAN_CROPS_FACTORS_AFFECTING_THE_RELATIONSHIP_BETWEEN_LAI_AND_SPECTRAL_VALUES/links/54a5c8840cf267bdb9082a58.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2015

VARLET-GRANCHER, C. et al. Mise point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, Paris, v. 9, p. 419–439, 1989.

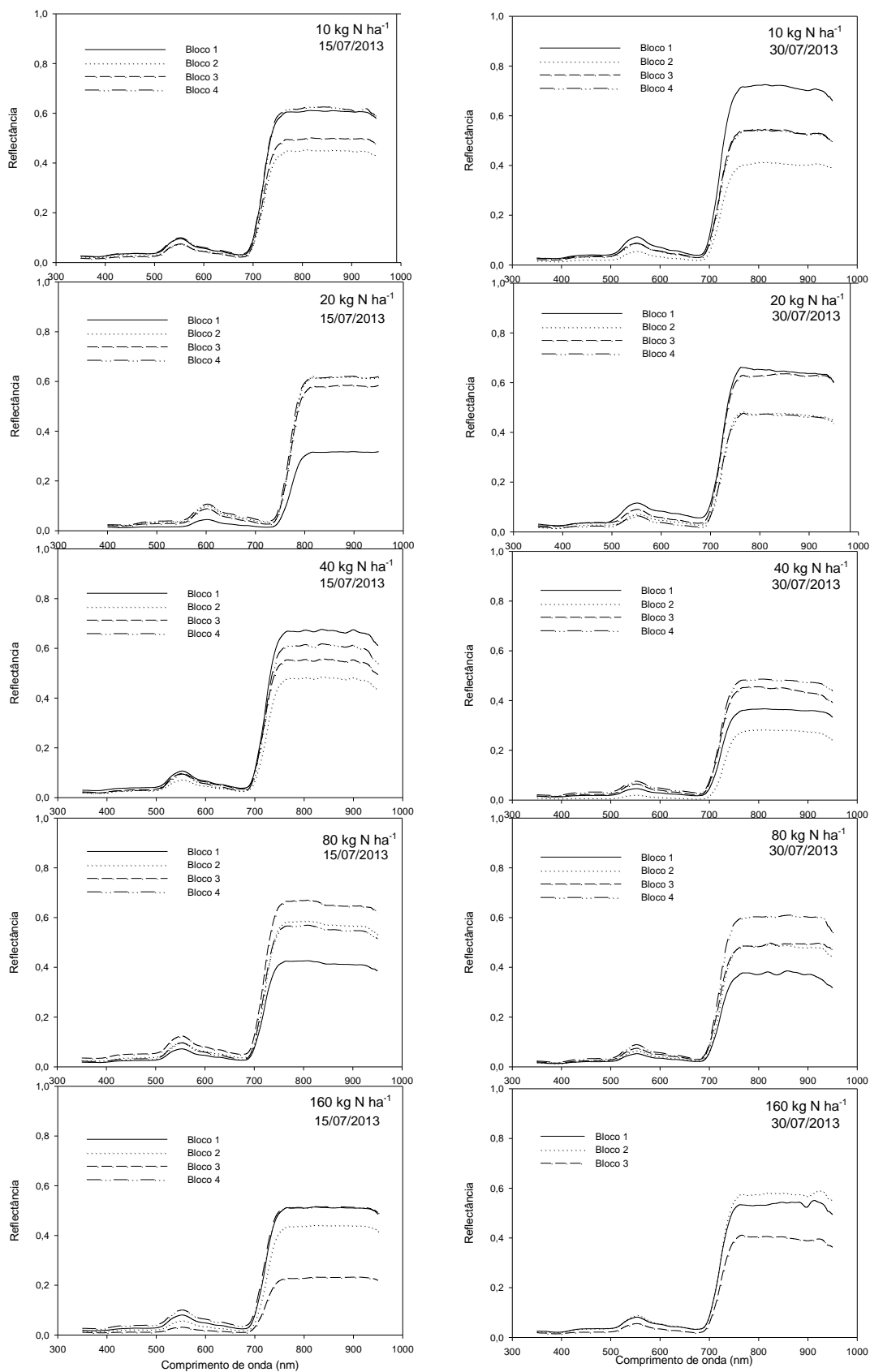
VICARI, M. B. **Estimativas de variáveis biofísicas da canola com dados espectrais multisensor**. 2015. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

WALTON, G. **Phenology, physiology and agronomy**. In: INTERNATIONAL RAPSEED CONGRESS, 10., 1999, Cambera. **Proceedings...** Cambera: The Regional InstituteLtd, 1999. Disponível em: <<http://www.regional.org.au/au/gcirc>>. Acesso em: 08Ago. 2013.

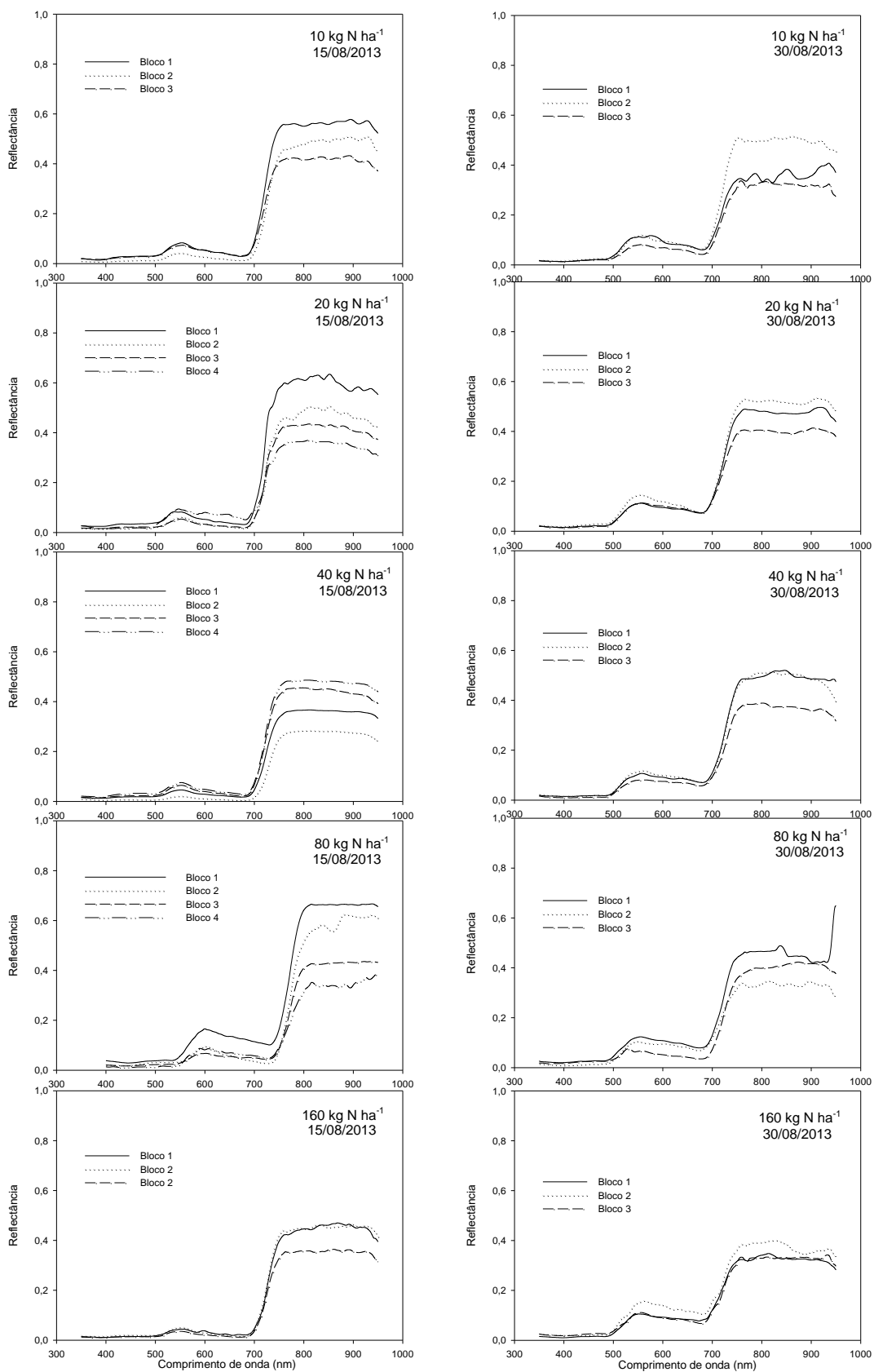
WANG, Q. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, p. 244-255, 2005.

7 APÊNDICES

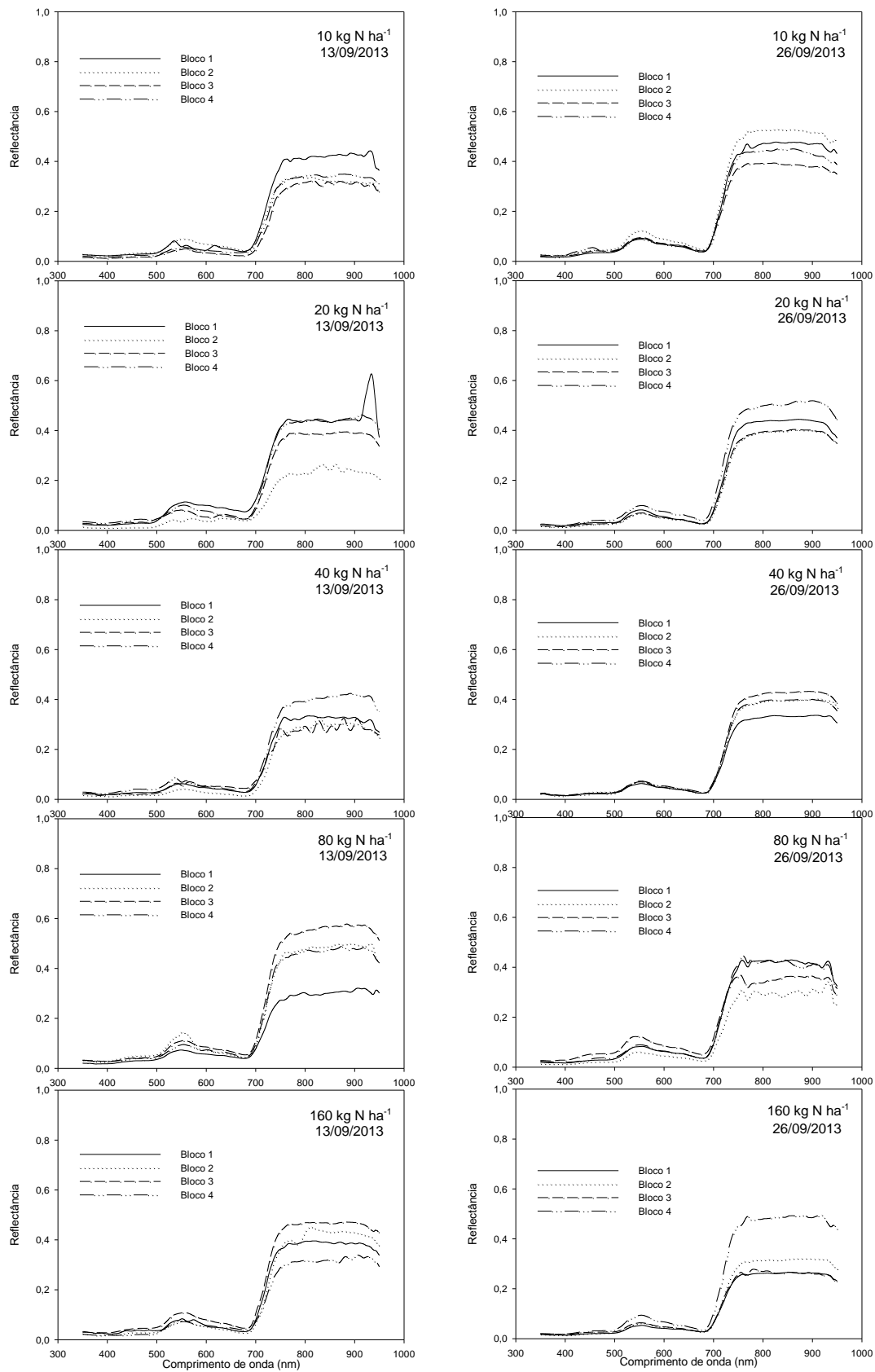
APÊNDICE 1. Curvas de reflectância da canola, das sete datas de medições, para cinco doses de adubação nitrogenada: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹ de N. Na safra de 2013. Coxilha, RS.



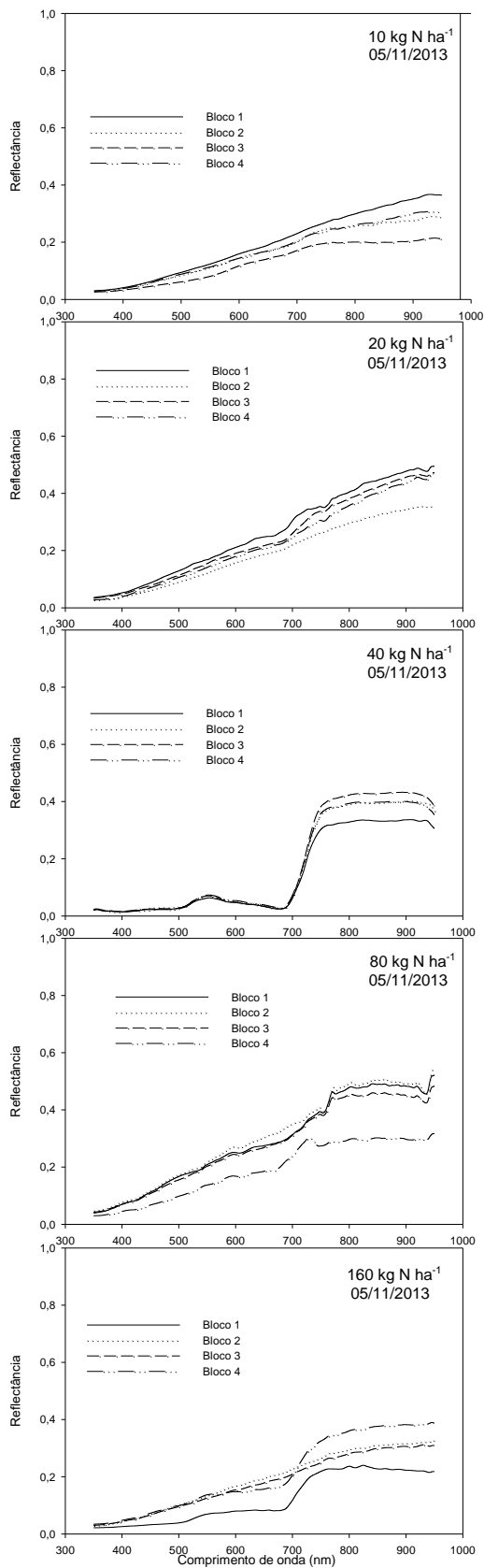
Continuação APÊNDICE 1. Curvas de reflectância da canola, das sete datas de medições, para cinco doses de adubação nitrogenada: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹ de N. Na safra de 2013. Coxilha, RS.



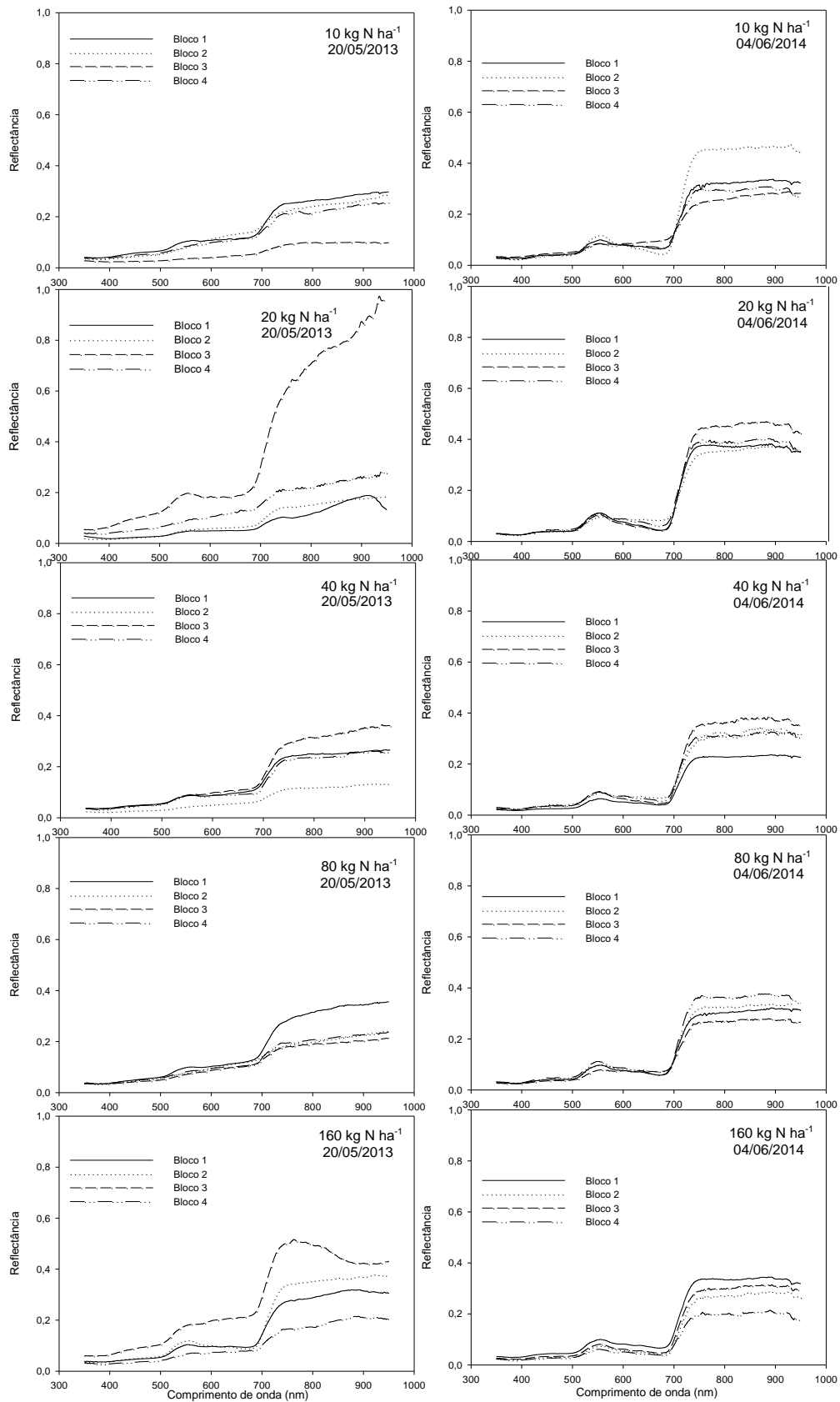
Continuação APÊNDICE 1. Curvas de reflectância da canola, das sete datas de medições, para cinco doses de adubação nitrogenada: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹ de N. Na safra de 2013. Coxilha, RS.



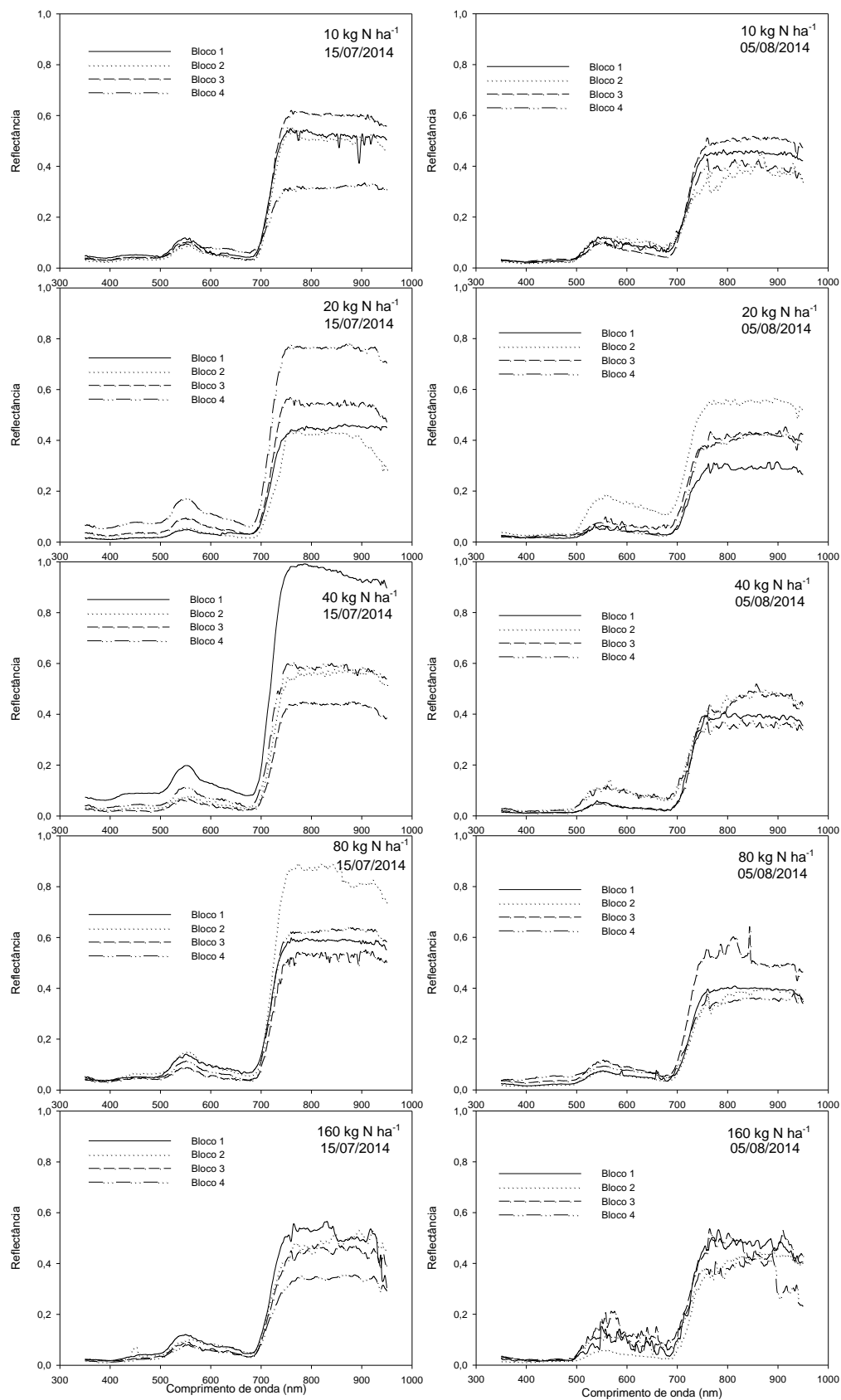
Continuação APÊNDICE 1. Curvas de reflectância da canola. das sete datas de medições, para cinco doses de adubação nitrogenada: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹ de N. Na safra de 2013. Coxilha, RS.



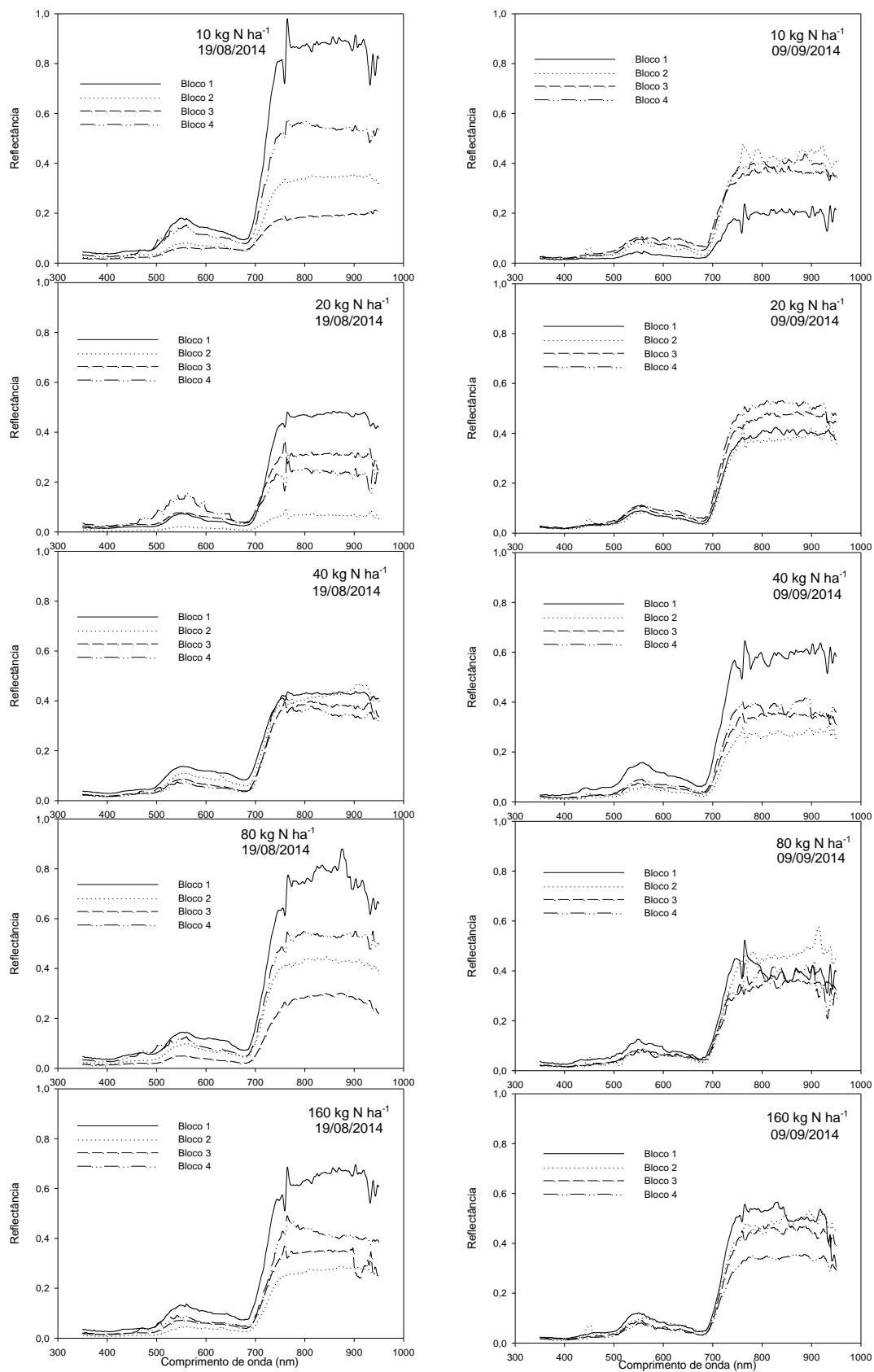
APÊNDICE 2. Curvas de reflectância da canola, das sete datas de medições, para cinco doses de adubação nitrogenada: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹ de N. Na safra de 2014. Coxilha, RS.



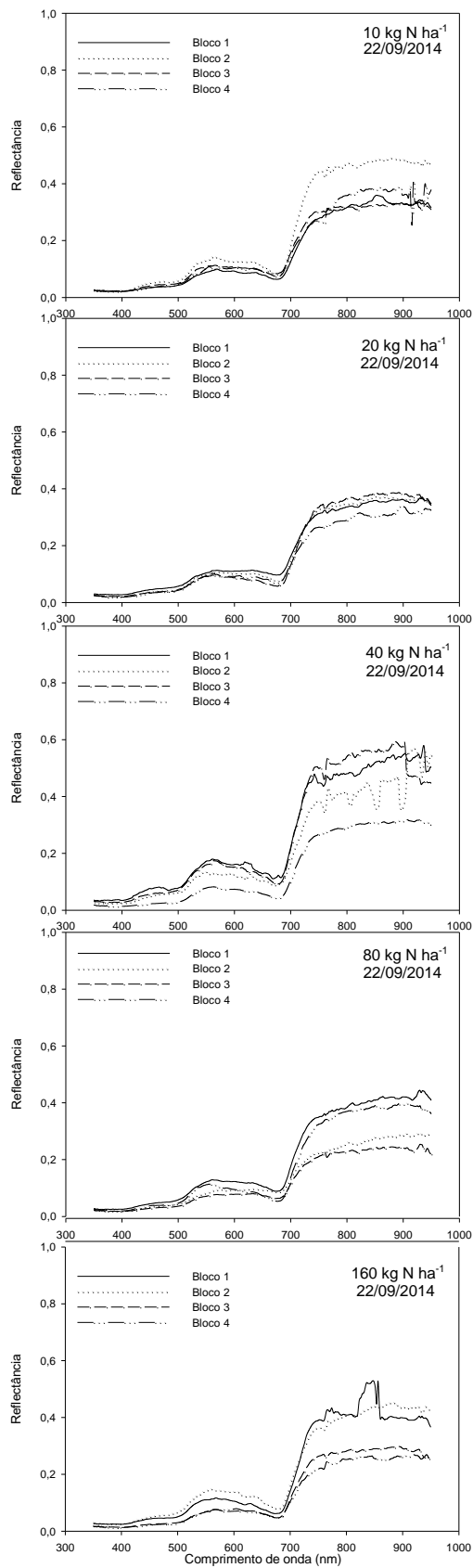
Continuação APÊNDICE 2. Curvas de reflectância da canola. das sete datas de medições, para cinco doses de adubação nitrogenada: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹ de N. Na safra de 2014. Coxilha, RS.



Continuação APÊNDICE 2. Curvas de reflectância da canola. das sete datas de medições, para cinco doses de adubação nitrogenada: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹ de N. Na safra de 2014. Coxilha, RS.



Continuação APÊNDICE 2. Curvas de reflectância da canola. das sete datas de medições, para cinco doses de adubação nitrogenada: 10, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹ de N. Na safra de 2014. Coxilha, RS.



APÊNDICE 3. Laudo de análise química do solo da área experimental da safra de 2013, Coxilha, RS.

| Laudo da análise química do solo | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------------------|------|------|---------|------|-----|----|----|------|------|
| Camada (cm) | Arg | Text | pH | Ind SMP | P | K | MO | Al | Ca | Mg |
| | g/dm ³ | | Água | | | | | | | |
| 0 – 10 | 670 | 1 | 6,9 | 6,6 | 17,3 | 296 | 23 | 0 | 50,7 | 25,8 |
| 10 – 20 | 700 | 1 | 7,0 | 6,7 | 10,0 | 188 | 22 | 0 | 53,2 | 27,6 |

| Laudo da análise química do solo | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------|-------|------|------|------|-----------------------|------|-----|------|------|
| Camada (cm) | mmol/dm ³ | | | | % | % de saturação da CTC | | | | % |
| | H+Al | CTC | CTCe | S | V | Ca | Mg | K | H+Al | Al |
| 0 – 10 | 34,7 | 132,6 | 98,0 | 98,0 | 73,9 | 41,2 | 28,3 | 4,4 | 26,1 | 0,0 |
| 10 – 20 | 69,0 | 119,6 | 60,4 | 50,6 | 42,3 | 23,9 | 16,3 | 2,1 | 57,7 | 16,2 |

APÊNDICE 4. Laudo de análise química do solo da área experimental da safra de 2014, Coxilha, RS.

| Laudo da análise química do solo | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------------------|------|------|---------|------|-----|----|-----|------|------|
| Camada (cm) | Arg | Text | pH | Ind SMP | P | K | MO | Al | Ca | Mg |
| | g/dm ³ | | Água | | | | | | | |
| 0 – 10 | 430 | 2 | 6,2 | 6,2 | 18,3 | 226 | 33 | 0 | 54,7 | 37,5 |
| 10 – 20 | 560 | 2 | 5,2 | 5,5 | 7,9 | 98 | 26 | 9,8 | 28,6 | 19,5 |

| Laudo da análise química do solo | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------|-------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|
| Camada (cm) | H+Al | CTC | CTCe | S | V | Ca | Mg | K | H+Al | Al |
| | mmol/dm ³ | | | | | | | | | |
| 0 – 10 | 21,9 | 106,0 | 84,1 | 84,1 | 79,3 | 47,8 | 24,3 | 7,1 | 20,7 | 0,0 |
| 10 – 20 | 19,5 | 105,1 | 85,6 | 85,6 | 81,4 | 50,6 | 26,3 | 4,6 | 18,6 | 0,0 |

