

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

SENSOR ÓPTICO ATIVO COMO FERRAMENTA PARA APLICAÇÃO
DE NITROGÊNIO NA CULTURA DO TRIGO

Clever Variani
Engenheiro Agrônomo/UFRGS

Dissertação apresentada como um dos requisitos
à obtenção do Grau de Mestre em Fitotecnia
Ênfase Fisiologia e Manejo Vegetal

Porto Alegre (RS), Brasil
Julho de 2011

CIP - Catalogação na Publicação

Variani, Clever

Sensor óptico ativo como ferramenta para aplicação de nitrogênio na cultura do trigo / Clever Variani. - 2011. 110 f.

Orientador: Christian Bredemeier.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, BR-RS, 2011.

1. Agricultura de precisão. 2. Sensor. 3. Nitrogênio. 4. Trigo. I. Bredemeier, Christian, orient. II. Título.

CLEVER VARIANI
Engenheiro Agrônomo - UFRGS

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM FITOTECNIA

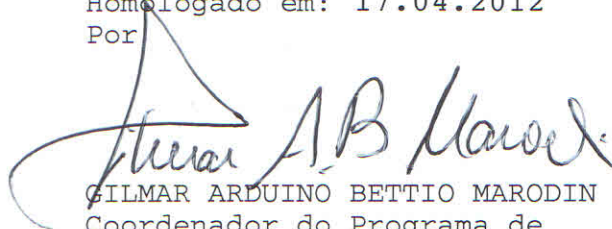
Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 28.07.2011
Pela Banca Examinadora

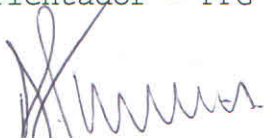
Homologado em: 17.04.2012
Por



CHRISTIAN BREDEMEIER
Orientador - PPG Fitotecnia



GILMAR ARDUINO BETTIO MARODIN
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia



ANDRÉ LUIS THOMAS
PPG Fitotecnia



PAULO REGIS FERREIRA DA SILVA
PPG Fitotecnia



TELMO JORGE CARNEIRO AMADO
UFSM



PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade de
Agronomia

**Quem tem “por que” e “por quem” viver,
é capaz de suportar qualquer “como”.**

Friedrich Nietzsche

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me conduzido aos melhores caminhos e realizado meus sonhos.

Aos meus pais, Gentil e Iole, pelo apoio em todos os momentos da vida, pela educação e formação do meu caráter.

Ao Prof. Christian Bredemeier, orientador incansável e amigo, por minha formação científica nesses dois anos de orientação e condução para a vida profissional.

À Zilda, pela paciência, compreensão e apoio em todos os momentos.

Aos meus irmãos, César, Veridiana e Luana, que sempre me apoiaram e que, mesmo a distância, sempre foram grandes motivadores nesta caminhada.

Aos professores André Luis Thomas, Paulo Regis Ferreira da Silva e Telmo Amado, pela participação na banca examinadora desta dissertação.

Aos professores do Departamento de Plantas de Lavoura, pela minha formação e disposição em todos os momentos que tive dúvidas, fazendo com que meu trabalho fosse facilitado.

Aos meus amigos, companheiros e grandes apoiadores, que nos momentos mais difíceis sempre estiveram presentes e fizeram com que tudo fosse mais facilmente realizado.

Aos amigos e colegas de trabalho, Danielle Almeida, Alexandre Rosa e Cléber Henrique L. de Souza, que contribuíram com a realização deste trabalho.

A todas as pessoas que contribuíram com minha formação profissional.

SENSOR ÓPTICO ATIVO COMO FERRAMENTA PARA APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO NA CULTURA DO TRIGO¹

Autor: Clever Variani

Orientador: Christian Bredemeier

RESUMO

A adubação nitrogenada na cultura do trigo é baseada em indicadores como a expectativa de rendimento da cultura, teor de matéria orgânica do solo e cultura antecessora. Estes indicadores são pouco precisos e sujeitos a erros, resultando em perdas do nitrogênio aplicado e redução do potencial produtivo. No caso do nitrogênio, é necessário quantificar o estado nutricional das plantas para determinação mais precisa das doses que devem ser aplicadas em cobertura. Avaliações a campo do estado nutricional das plantas podem ser agilizadas através da caracterização da reflectância do dossel, auxiliando na adoção de doses de N condizentes com a real demanda das plantas. Assim, os objetivos do presente trabalho foram analisar a variação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) medido por sensor óptico ativo ao longo do ciclo de quatro cultivares de trigo em função da disponibilidade de N na emergência e em cobertura (estádio de 5-6 folhas completamente expandidas) e sua relação com o rendimento de grãos. O experimento foi conduzido na Estação Experimental Agronômica da UFRGS (Eldorado do Sul, RS), em 2009. Foram avaliados o NDVI ao longo do ciclo, o rendimento de grãos e seus componentes. O NDVI medido por sensor óptico foi sensível e eficiente em detectar a variabilidade de desenvolvimento da cultura que foi gerada pela variação na disponibilidade de N e correlacionou-se positivamente com o rendimento de grãos das quatro cultivares de trigo utilizadas. Os maiores valores de NDVI foram observados no estágio de emborrachamento. Os resultados indicam que a medição do NDVI através de sensor óptico ativo é uma ferramenta eficiente para avaliar a variabilidade do estado nutricional das plantas em relação ao nitrogênio, podendo esta informação ser utilizada para a aplicação de N em cobertura em taxa variável, de acordo com a variação espacial verificada em cada talhão.

¹ Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (110p.) Julho, 2011.

ACTIVE SENSOR AS A TOOL FOR NITROGEN APPLICATION IN SPRING WHEAT¹

Author: Clever Variani

Adviser: Christian Bredemeier

ABSTRACT

Nitrogen fertilization in spring wheat in southern Brazil is based on yield potential, soil organic matter and previous crop. These variables are not precise and subjected to errors, resulting on N losses and yield potential reduction. For N fertilization, it is necessary to quantify plant N nutritional status to determine top dressing N rates to be applied. Such evaluation can be done by characterizing canopy reflectance signatures using an active sensor. As consequence, N rates applied will be closely related to actual N demand. In this sense, the objectives of the present work were to study the variation of normalized difference vegetation index (NDVI) during crop development in four wheat cultivars as affected by N availability at emergence and at 5-6 leaf stage and its relation to grain yield. The experiment was carried out at EEA/UFRGS (Eldorado do Sul, RS) in 2009. NDVI in different growth stages, grain yield and yield components were evaluated. NDVI measured by an active sensor was efficient to detect growth variability generated by N availability and correlated well with grain yield of four wheat cultivars. Highest values of NDVI were observed at booting. Our results indicated that NDVI measurement by an active sensor is an efficient tool to evaluate the N nutritional status. This information can be used for site-specific variable N fertilization, according to spatial variability within a field.

¹ Master of Science dissertation in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (110p.) July, 2011.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.1 Reflectância do dossel em quatro cultivares de trigo ao longo do ciclo em função da disponibilidade de N e sua relação com o rendimento de grãos.....	29
4.1.1 Variação da reflectância do dossel do trigo ao longo do ciclo.....	29
4.1.2 Relação do NDVI avaliado até o florescimento com o rendimento de grãos de trigo.....	43
4.1.2.1 Relação do NDVI com rendimento de grãos de trigo em função da adubação nitrogenada de base.....	43
4.1.2.2 Importância da relação entre NDVI e rendimento de grãos de trigo no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas.....	49
4.1.2.3 Relação do NDVI com rendimento de grãos de trigo em função das adubações nitrogenadas de base e de cobertura.....	54
4.1.2.4 Importância da relação entre NDVI e rendimento de grãos de trigo em estádios tardios.....	57
4.2 Resposta do rendimento de grãos e seus componentes em cultivares de trigo à disponibilidade de N na emergência e em cobertura.....	73
4.2.1 Resposta do rendimento de grãos de cultivares de trigo em função da disponibilidade de N na emergência e em cobertura.....	73
4.2.2 Resposta dos componentes do rendimento de grãos de cultivares de trigo em função da disponibilidade de N na emergência e em cobertura.....	82
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	91
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
7. APÊNDICES.....	102
8. VITA.....	110

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Características físicas e químicas das amostras de solo retiradas das áreas experimentais antes da instalação dos experimentos. EEA/UFRGS, 2009.....	21
2. Relação das avaliações do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), datas das avaliações e estádios de desenvolvimento da cultura. Eldorado do Sul, RS, 2009.....	25
3. Rendimento de grãos de quatro cultivares de trigo cultivadas após milho ou soja, em função da dose de nitrogênio aplicada na emergência e em cobertura, no estádio de 5-6 folhas completamente expandidas. Eldorado do Sul, RS, 2009.....	74
4. Coeficiente de correlação entre o rendimento de grãos de quatro cultivares de trigo cultivadas após milho ou soja e os componentes do rendimento de grãos. Eldorado do Sul, RS, 2009.....	82
5. Número de espigas m^{-2} e grãos espiga $^{-1}$ em quatro cultivares de trigo cultivadas após milho, em função da dose de nitrogênio aplicada na emergência e em cobertura, no estádio de 5-6 folhas expandidas. Eldorado do Sul, RS, 2009.....	84
6. Número de espigas m^{-2} e grãos espiga $^{-1}$ em quatro cultivares de trigo cultivadas após soja, em função da dose de nitrogênio aplicada na emergência e em cobertura, no estádio de 5-6 folhas expandidas. Eldorado do Sul, RS, 2009.....	85
7. Peso do grão em quatro cultivares de trigo cultivadas após milho ou soja, em função da dose de nitrogênio aplicada na emergência e em cobertura, no estádio de 5-6 folhas expandidas. Eldorado do Sul, RS, 2009.....	88

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Curva típica de reflectância da vegetação.....	11
2. Variação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento do trigo cultivado após milho, em função da disponibilidade de nitrogênio na emergência e em cobertura, na média de quatro cultivares. A seta indica o momento de aplicação de N em cobertura. Eldorado do Sul, RS, 2009.....	30
3. Variação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento do trigo cultivado após soja, em função da disponibilidade de nitrogênio na emergência e em cobertura, na média de quatro cultivares. A seta indica o momento de aplicação de N em cobertura. Eldorado do Sul, RS, 2009.....	31
4. Variação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento do trigo cultivado após milho (a) e soja (b), em função da disponibilidade de nitrogênio na base (emergência), na média de quatro cultivares. Eldorado do Sul, RS, 2009.....	38
5. Variação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento em quatro cultivares de trigo cultivadas após milho (a) e soja (b). Eldorado do Sul, RS, 2009....	40
6. Relação entre o rendimento de grãos e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento, para quatro cultivares de trigo após milho (símbolos cheios) e soja (símbolos vazados). Eldorado do Sul, RS, 2009.....	44
7. Rendimento de grãos e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado nos estádios de 5-6 folhas expandidas e florescimento em trigo cultivado após milho (a) e soja (b), na média de quatro cultivares. Eldorado do Sul, RS, 2009.....	47
8. Temperatura média do ar (A), precipitação pluvial (A) e radiação solar (B) no ano de 2009 e normal climática (1970-2000). Eldorado do Sul, RS, 2009.....	48
9. Termo constante (coeficiente “a”) (a) e termo linear (coeficiente “b”) (b) e seus intervalos de confiança (95% de confiança) dos modelos de regressão ajustados entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado em diferentes estádios de desenvolvimento e o rendimento de grãos para quatro cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2009.....	63

10. Termo quadrático (coeficiente “c”) e seu intervalo de confiança (95% de confiança) dos modelos de regressão quadrática ajustadas entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado em diferentes estádios de desenvolvimento e o rendimento de grãos para quatro cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2009..... 64
11. Relação entre rendimento relativo de grãos e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado nos estádios de 5-6 folhas expandidas (a) e emborrachamento (b) em quatro cultivares de trigo cultivadas após milho (símbolos cheios) e soja (símbolos vazados). Eldorado do Sul, RS, 2009..... 67
12. Termo constante “a” e termo linear “b” e seus intervalos de confiança a 95% de probabilidade dos modelos de regressão linear ajustados para a relação entre rendimento relativo e grãos e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado no estádio de 5-6 folhas expandidas de quatro cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2009..... 68
13. Termo constante, termo linear “b”, termo quadrático “c” e seus intervalos de confiança a 95% de probabilidade dos modelos de regressão quadrática ajustados para a relação entre rendimento relativo e grãos e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado no estádio de emborrachamento de quatro cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2009..... 69

1 INTRODUÇÃO

A prática da adubação em cobertura com nitrogênio (N) é amplamente adotada como forma de manutenção e maximização do potencial produtivo das culturas. Esta ferramenta é de extrema importância, sendo facilmente perceptível a ocorrência de erros na dose aplicada deste nutriente, tanto sub quanto superdoses, ou mesmo em casos em que há supressão da aplicação. Para os cereais de estação fria no estado do Rio Grande do Sul, a recomendação da quantidade de fertilizante nitrogenado a ser aplicado é baseada no teor de matéria orgânica do solo, na cultura antecessora e na expectativa de rendimento da cultura.

Estes indicadores são pouco precisos, porém vem sendo utilizados ao longo dos anos nas mais diversas culturas, devido à facilidade da recomendação por estes parâmetros e à ampla difusão entre os profissionais da área de assistência técnica e extensão rural. Apesar de existirem outras formas de se determinar as quantidades de N a serem aplicadas, pela análise de variáveis de solo e planta, estas muitas vezes não são adotadas, devido a outros fatores que são limitantes ao seu emprego para subsidiar a recomendação de adubação nitrogenada em cobertura.

A forma como vem sendo recomendada a adubação nitrogenada é simples e de fácil determinação, porém incompleta, já que a disponibilidade de N mineral no solo é função de fatores edafoclimáticos e não apenas do teor de matéria

orgânica médio encontrado em cada lavoura. Outro fator que é variável e não é controlável no manejo da cultura é a presença de resíduos da cultura antecessora, os quais, em muitas situações, estão distribuídos desuniformemente ao longo de uma área. Estes irão afetar diretamente a quantidade de N disponível e o desenvolvimento inicial das plantas da cultura em sucessão, no caso os cereais de estação fria, e, conseqüentemente, as doses de N necessárias para obtenção de elevadas produtividades.

Com base no exposto, a condição de desenvolvimento e nutrição das plantas não é levada em conta no momento da determinação das doses de N que serão aplicadas em cobertura. Desta forma, as doses recomendadas, na maioria das vezes, não são precisas, ou seja, as reais necessidades da planta não são supridas, levando à aplicação de doses acima ou abaixo da exigência real em cada situação específica. Desta maneira, sem a avaliação do estado nutricional e do "status de N" da cultura, a determinação de doses de N a serem aplicadas fica sujeita a erros sistemáticos e que podem variar entre os diferentes profissionais responsáveis por esta decisão, uma vez que critérios subjetivos são levados em consideração.

O resultado desta decisão, que é baseada na aplicação de uma quantidade fixa de N em toda a lavoura, é a aplicação em excesso ou em deficiência de nitrogênio. Em outras situações, na qual a dose média de N adotada seja correta, haverá a aplicação de super ou subdoses na área, pois é normal a ocorrência de variabilidade do desenvolvimento das plantas e da exigência de N dentro de uma mesma área. O resultado é a ocorrência de perdas do fertilizante aplicado e o não aproveitamento de todo o potencial produtivo da cultura. Este problema pode ser minimizado com a aplicação de N em taxa variável, ou seja, pela variação da dose de nitrogênio aplicada de acordo com a variabilidade espacial existente.

Com o advento da agricultura de precisão na prática da produção agrícola, passou-se a fazer estudos da variabilidade espacial da disponibilidade de nutrientes nos solos. A coleta de amostras georreferenciadas possibilita a correção localizada de cada nutriente, os quais são aplicados em taxa variável, de acordo com os níveis diagnosticados nas amostragens de solo e que possibilitem desenvolvimento adequado das plantas.

No caso do nitrogênio, é necessário quantificar o estado nutricional da planta para determinação mais precisa das doses que devem ser aplicadas em cobertura. Avaliações a campo do estado nutricional das plantas são possíveis de serem agilizadas pela caracterização das propriedades ópticas do dossel de plantas, que pode ser feita pela determinação da transmitância, absorvância, reflectância e da fluorescência.

A reflectância é uma técnica utilizada no sensoriamento remoto como forma de elaborar a curva de acúmulo de biomassa das culturas ao longo do ciclo. A partir do final da década de 90, sua medição foi adaptada para uso em nível terrestre, com o desenvolvimento de sensores ópticos proximais de reflectância, tais como “Greenseeker”, “N-Sensor” e “Crop Circle”. A relação entre a quantidade de radiação refletida pelo dossel e pelo solo e a radiação incidente determina a reflectância, a qual é associada à quantidade de biomassa e ao teor de clorofila presente nas plantas do dossel.

A principal vantagem do uso destes equipamentos é a possibilidade de realização de um grande número de amostragens não destrutivas e rápidas, permitindo a leitura em tempo real de diversos pontos da área cultivada. Estes sensores viabilizam o processo de adubação a taxas variáveis de aplicação de N, possibilitando o aumento na eficiência da adubação nitrogenada em cobertura na cultura do trigo.

A prática da adubação nitrogenada em taxa variável irá racionalizar a utilização do nitrogênio nas principais culturas de inverno no Estado do Rio Grande do Sul. Este nutriente, além de ter alto custo energético para sua obtenção e consequente emissão de CO₂ para a atmosfera (gás de maior parcela de contribuição do efeito estufa), quando presente em excesso no solo passa na maior parte para a forma de nitrato, que, por sua vez, pode ser lixiviado e tornar-se importante contaminante do lençol freático.

Assim, os objetivos do presente trabalho foram analisar a variação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) ao longo do ciclo de desenvolvimento de quatro cultivares de trigo em função da disponibilidade de nitrogênio na base e em cobertura e sua relação com o rendimento de grãos da cultura, bem como avaliar a resposta do rendimento de grãos e seus componentes à aplicação de diferentes doses de N na base e em cobertura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A cultura do trigo no Brasil atingiu área cultivada de 2.149,8 mil hectares na safra 2010, apresentando redução de 11,5% em comparação ao ano de 2009. A produtividade média no País, no ano de 2010, foi de 2.736 kg ha⁻¹, com acréscimo de 32,2%, quando comparada à safra anterior (CONAB, 2010). Esta variação ocorreu, principalmente, em função das condições meteorológicas favoráveis ao desenvolvimento da cultura do trigo na safra 2010. No ano de 2009, contudo, os rendimentos médios de grãos foram inferiores aos verificados em 2010. No estado do RS, a média de produtividade da cultura do trigo em 2009 foi de 2.100 kg ha⁻¹, a qual foi semelhante à média nacional nesta mesma safra (CONAB, 2011).

Apesar do rendimento de grãos mais elevado observado na safra passada (2010), os rendimentos médios da cultura do trigo no Brasil e no estado do Rio Grande do Sul são considerados baixos, quando analisada uma série histórica de produtividade.

No estado do RS, a média de produtividade situa-se em 1.841 kg ha⁻¹, quando considerados os dados dos anos de 2000 a 2010 (CONAB, 2011). Em áreas experimentais, porém, tem sido verificadas produtividades de trigo superiores a 5.000 kg ha⁻¹, como as encontradas em experimentos conduzidos por Grohs (2008) na Estação Experimental da UFRGS (Eldorado do Sul, RS). Uma série de fatores, como a melhoria do manejo da cultura no que se refere à

aplicação da adubação nitrogenada e controle de moléstias fúngicas, tem contribuído para o aumento das produtividades registradas nos experimentos conduzidos neste local.

A produtividade média obtida atualmente em lavouras comerciais de cereais de estação fria no Estado do RS está muito aquém do seu potencial, uma vez que não é tecnicamente possível, nem economicamente viável, remover todos os fatores limitantes ao desenvolvimento destas culturas, tais como o fornecimento de doses ótimas de fertilizantes, competição com plantas daninhas e danos causados pela ocorrência de pragas e moléstias (Povh *et al.*, 2008a). Consequentemente, a interação entre condições meteorológicas e manejo resulta em variações, de ano para ano, no potencial de produtividade de grãos e na necessidade de nitrogênio pelos cereais de estação fria (Cassman *et al.*, 2002).

Em trigo, a definição do potencial produtivo é dependente do correto emprego das práticas culturais. Entre estas, destacam-se a dose e a época de aplicação de nitrogênio, que já foi objeto de estudo de diversos trabalhos de pesquisa.

O nitrogênio constitui o macroelemento mais limitante na produtividade do trigo, visto que influencia fortemente o número de afilhos emitidos pela planta (Sala *et al.*, 2005) e, em consequência, o número de espigas produzidas por planta e por unidade de área. No Sul do Brasil, Bredemeier & Mundstock (2001), em trigo, Mundstock & Bredemeier (2001), em aveia, e Wamser & Mundstock (2007), em cevada, definiram o momento de emissão da sexta folha do colmo principal (planta com cinco folhas completamente expandidas) como sendo o momento ideal para aplicação de nitrogênio em cobertura nestas culturas.

O N aplicado neste momento possibilita maior sincronismo de desenvolvimento entre o colmo principal e os afilhos, reduzindo a mortalidade

destes e consolidando maior número de colmos e, conseqüentemente, maior número de espigas por área e maior número de grãos por espiga no momento da colheita (Bredemeier & Mundstock, 2001; Wamser, 2002).

As plantas de trigo ao final do afilhamento já absorveram aproximadamente um terço do N que será utilizado em todo o ciclo. Quando elevadas quantidades de N forem absorvidas até o final desta fase, as plantas pouco responderão à adição de adubo nitrogenado em cobertura (Lamothe, 1994). Dessa forma, a absorção de N durante o afilhamento pode estabelecer o nível de suprimento deste nutriente em que as plantas se encontram e pode subsidiar a tomada de decisão de fornecimento de quantidades mais condizentes com as reais necessidades das plantas, em cada situação específica (Poletto, 2004).

Estudos de variáveis de planta e de solo que indiquem a necessidade de N pela planta e possibilitem a predição das doses a serem aplicadas foram feitos por Bredemeier (1999), em trigo, e por Poletto (2004), em cevada. As variáveis de planta utilizadas foram teor de nitrogênio foliar, rendimento de massa seca da parte aérea e padrão de afilhamento (desenvolvimento foliar da comunidade de plantas e número de filhos por área). O potencial de mineralização de N e os teores de amônio, de nitrato e de matéria orgânica do solo foram as principais variáveis de solo avaliadas.

Atualmente, a recomendação de adubação nitrogenada para a cultura do trigo no estado do Rio Grande do Sul utiliza o teor de matéria orgânica do solo, a cultura antecessora (leguminosa ou poácea) e o rendimento esperado (expectativa de rendimento) para determinação da dose total de N a ser aplicada (Reunião..., 2010). No entanto, Poletto (2004) considerou insuficiente este método para estimar com precisão a quantidade de N suprida pelo solo. Muitos fatores estão envolvidos no processo de mineralização do nitrogênio orgânico, incluindo

umidade e pH do solo, temperatura, textura, estrutura, aeração, biomassa e atividade microbiana, além da constituição química do substrato (Ringuelet & Bachmeier, 2002; Drury *et al.*, 2003). Com a existência de variabilidade espacial e temporal destas variáveis em lavouras comerciais, geralmente opta-se por aplicar maiores doses de N para garantir elevados rendimentos (Poletto, 2004).

Vários métodos não destrutivos foram propostos para estimativa da necessidade de nitrogênio pela planta, como avaliação da coloração das folhas, medidores de clorofila ou de fluorescência da clorofila (Singh *et al.*, 2002). Singh *et al.* (2002) propuseram o uso do clorofilômetro SPAD (Minolta, Ramsey, NJ) para auxiliar nas recomendações de doses de nitrogênio das culturas do arroz e do trigo. Estes procedimentos, contudo, focam em folhas individuais e, portanto, têm dificuldade em refletir a situação da comunidade de plantas de uma área da lavoura (Feng *et al.*, 2008).

A utilização de outras variáveis na recomendação da quantidade de adubação nitrogenada, como a quantidade de nitrogênio acumulado no dossel e a produção de massa seca da parte aérea, apesar de serem indicadores eficientes da resposta à aplicação de fertilizantes nitrogenados, são metodologias pouco empregadas, em função da demora no procedimento de avaliação e por exigirem análise laboratorial (Bredemeier, 1999). Em contraste, o sensoriamento remoto da reflectância do dossel tem a capacidade de avaliar uma população de plantas ou comunidade, ao invés de plantas individuais, determinando rapidamente a variabilidade espacial de uma cultura a campo (Feng *et al.*, 2008).

Além do exposto, existe ainda a preocupação ambiental, que também é um assunto que vem sendo discutido frequentemente, uma vez que a eficiência do uso de N para produção de cereais no mundo é de apenas 33%, segundo estimativa realizada por Raun & Johnson (1999).

Um fator importante que contribui para a baixa eficiência de uso do N está relacionado à estratégia atual de aplicação de taxas uniformes de fertilizantes nitrogenados em áreas espacialmente variáveis, apesar de numerosos estudos de campo indicarem uma justificativa econômica e ambiental para aplicações em taxa variável de N em muitas situações, ou seja, aplicações de doses variáveis de acordo com a variabilidade espacial (Mamo *et al.*, 2003; Koch *et al.*, 2004; Scharf *et al.*, 2006; Shahandeh *et al.*, 2005; Lambert *et al.*, 2006; Hong *et al.*, 2007a).

Aplicações uniformes a campo, ou seja, aplicações de uma dose única em toda a área, não levam em consideração o suprimento de N pelo solo para as culturas, a absorção e a diferente resposta da cultura ao nitrogênio aplicado, as quais são espacialmente variáveis (Inman *et al.*, 2005). Sem as ferramentas para avaliar os parâmetros espacialmente variáveis, os agricultores tendem a aplicar N em quantidade suficiente, a taxas uniformes, para atender às necessidades da cultura nas áreas mais exigentes de N no campo, resultando em maior risco de perda de nitrogênio nas áreas que necessitam menores quantidades de fertilizante nitrogenado (Hong *et al.*, 2007a). Assim, o N aplicado de maneira uniforme ignora as diferenças espaciais e é um risco considerável ao meio ambiente, em função da lixiviação de nitrato para águas superficiais e subterrâneas (Shanahan *et al.*, 2008).

Já em relação a parâmetros de solo, o uso dos teores de N mineral no solo (amônio e nitrato) na pré-semeadura não foram adequados para estimar a necessidade de adubação nitrogenada na semeadura em cevada, pois o rendimento de grãos depende, em grande parte, das condições de desenvolvimento das plantas após o afilhamento (Poletto, 2004).

Desta maneira, o diagnóstico do estado nutricional da planta em relação ao nitrogênio deve ser baseado no monitoramento, em tempo real, das características de crescimento e níveis de nitrogênio nas plantas (Feng *et al.*, 2008).

A avaliação das propriedades ópticas das folhas e da comunidade, tais como transmitância, reflectância e fluorescência, constitui-se em formas indiretas de determinar o estado nutricional de uma cultura. Existem aplicações diretas para estas informações na agricultura de precisão, como, por exemplo, na avaliação do estado nutricional das plantas em relação ao nitrogênio (Jacquemoud & Ustin, 2001).

A reflectância (ρ) é definida como a razão entre as quantidades de radiação refletida e de radiação incidente. É uma técnica empregada no sensoriamento remoto para obtenção de informações sobre um objeto terrestre, sem que haja contato físico com o mesmo (Molin, 2001). Os objetos terrestres absorvem ou refletem a radiação incidente de modo diferente em cada uma das faixas do espectro eletromagnético. Na região do visível, a vegetação tem picos de absorção de radiação incidente decorrentes de sua absorção pelos pigmentos fotossintéticos, especialmente as clorofilas.

Existem duas bandas de absorção distintas, uma delas situada próxima a 480 nm, devido à presença de carotenos e clorofilas. A outra banda de absorção situa-se próxima a 680 nm e está relacionada à presença da clorofila e ao processo da fotossíntese. Entre estes dois pontos de absorção ocorre um pico de reflectância em torno de 500-550 nm, correspondente à região da cor verde do espectro visível, o que explica a coloração verde das plantas. Outra característica marcante do comportamento espectral da vegetação é a existência de uma região de alta reflectância, entre 700 nm e 1300 nm (infravermelho próximo, NIR), que

está associada à estrutura celular interna da folha (Figura 1). O sensoriamento remoto estuda determinadas porções deste espectro: visível (400-700 nm), infravermelho próximo (700-1300 nm) e infravermelho emissivo (8000-14000 nm) (Figueiredo, 2009).

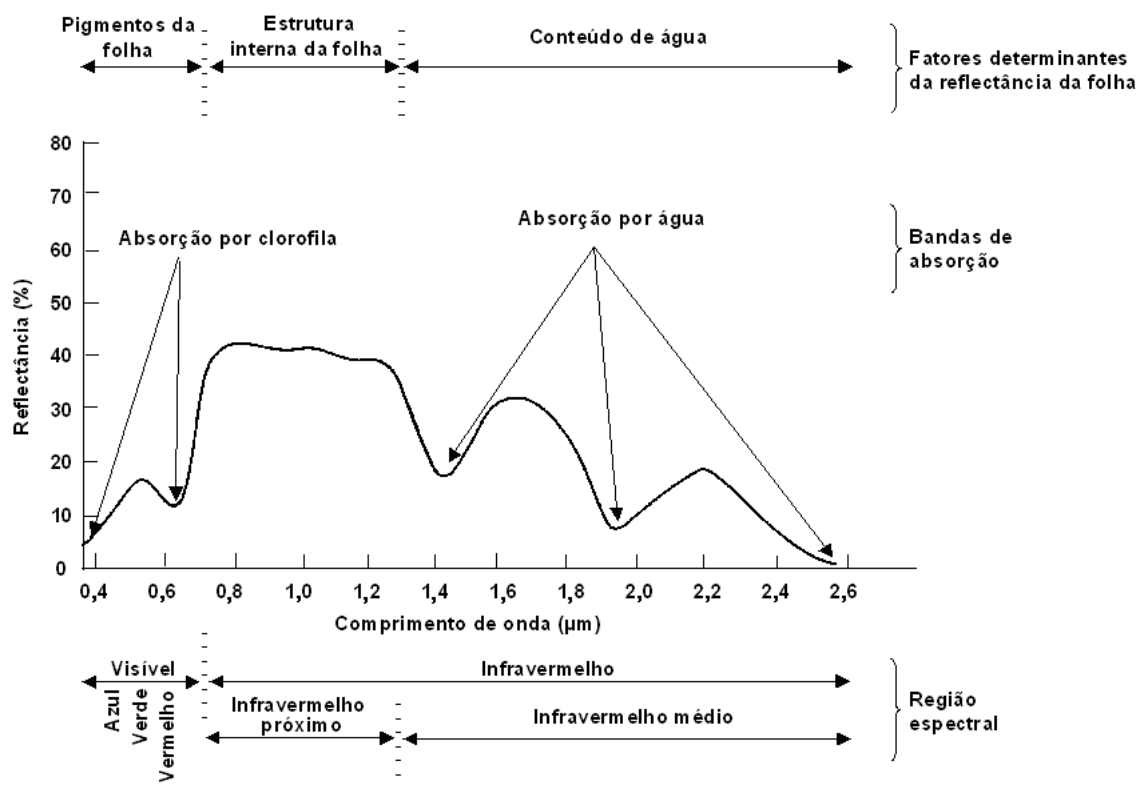


FIGURA 1. Curva típica de reflectância da vegetação. Fonte: Rizzi (2004).

As bases da utilização da reflectância de plantas como indicativo de estresses, nas faixas do espectro luminoso do vermelho (680-700 nm) e do infravermelho próximo (700-1300 nm), foram definidas por Gates *et al.* (1965), Carter & Knappa (2001) e Molin (2001). A correlação entre reflectância na faixa de 680-700 nm e teor de clorofila nas folhas é determinante na estimativa do estado nutricional de uma planta (Gitelson *et al.*, 1996). Estudos mostraram que, nesta faixa, ocorre o pico de máxima absorção da radiação fotossinteticamente ativa,

diminuindo a reflectância com o aumento dos teores de clorofilas *a* e *b* e de carotenóides (Carter & Knappa, 2001).

O teor de clorofila nas folhas influencia a reflectância do dossel nas regiões do azul, verde e vermelho do espectro eletromagnético (Gates *et al.*, 1965). Wood *et al.* (1992) mostraram haver alta correlação entre teor de clorofila e o “status” de N na cultura. Assim, o “status” do N na cultura pode ser determinado a partir da medição da reflectância espectral da folha ou do dossel. Este método não é destrutivo e pode ser realizado em tempo real. Diversos algoritmos têm sido propostos para relacionar teor de clorofila e teor de N das plantas com bandas de frequência selecionadas fornecidos pela tecnologia ótica do sensoriamento remoto (Walburg *et al.*, 1982; Filella *et al.*, 1995).

A quantidade de radiação refletida pela vegetação varia com o comprimento de onda. Na região do visível, a reflectância não ultrapassa 10% da radiação incidente, caracterizando-se pela absorção acentuada produzida pelos pigmentos presentes nos cloroplastos das folhas (Almeida & Fontana, 2009). A partir de 700 nm, nota-se um gradiente acentuado, que marca a transição para uma região de elevada reflectância no infravermelho próximo, a qual corresponde a, aproximadamente, 40 a 60% da radiação incidente (Figura 1), onde ocorrem múltiplas reflexões e refrações, associadas a descontinuidades de índices de refração.

A reflectância da planta na faixa do infravermelho próximo é uma estimativa indireta do acúmulo de biomassa e do estágio de desenvolvimento de uma cultura (Peñuelas & Filella, 1998). Esta radiação é pouco absorvida pela planta, porém é determinada pelas características das estruturas internas das folhas. Plantas jovens, plantas com menor quantidade de espaços do mesófilo foliar expostos ao ar intercelular e plantas com baixo espessamento de cutícula apresentam baixos

índices de refração da radiação no mesófilo e, portanto, menor reflectância nesta faixa do espectro eletromagnético (Slaton *et al.*, 2001).

Em geral, a vegetação absorve uma porção significativa de radiação na faixa do visível, como fonte de energia para o processo da fotossíntese. Por outro lado, esta mesma vegetação reflete muito a radiação na região do infravermelho próximo. A intensidade da absorção da radiação na região visível do espectro eletromagnético e da reflectância na região do infravermelho próximo é mais acentuada quanto maiores forem o desenvolvimento das plantas e a quantidade de clorofila por área.

O aumento na concentração de nitrogênio em plantas de trigo produz alterações de reflectância espectral que podem ser detectadas por instrumentos de sensoriamento remoto, como demonstrado por vários pesquisadores (Feng *et al.*, 2008; Povh *et al.*, 2008a; Grohs *et al.*, 2009). O teor e o acúmulo de N nos tecidos vegetais são dois indicadores importantes para caracterizar o estado nutricional das plantas em relação a este nutriente. A quantidade de nitrogênio acumulada pelo dossel, como produto do teor de N nas plantas e da biomassa vegetal, influencia a produtividade e a qualidade das plantas cultivadas (Wright *et al.*, 2004).

O índice de vegetação resulta da combinação dos valores de reflectância em dois ou mais intervalos de comprimento de onda e se correlaciona com a quantidade e o estado da vegetação em uma determinada área da superfície terrestre. Em função disto, uma característica inerente aos índices de vegetação é a redução no volume de dados a serem analisados, pois praticamente toda a informação referente à vegetação fica resumida a somente um valor numérico, ou seja, a informação registrada em algumas bandas (geralmente duas) passa a ser

contida em apenas um índice, facilitando sua inserção em modelos agrometeorológicos-espectrais (Rizzi, 2004).

Entre os diversos índices de vegetação existentes, um dos mais utilizados é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI – “Normalized Difference Vegetation Index”). Ele foi proposto por Rouse *et al.* (1973) e é dado pela relação:

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{nir}} - \rho_r) / (\rho_{\text{nir}} + \rho_r),$$

onde ρ_{nir} e ρ_r são as reflectâncias no infravermelho próximo e no vermelho, respectivamente.

O valor do NDVI varia numericamente entre -1 e +1 e será maior quanto maior for a diferença entre as reflectâncias no infravermelho e no vermelho. Raun *et al.* (2005) relataram que o NDVI foi eficiente em quantificar as quantidades de biomassa e de N absorvido pela cultura do trigo. Portanto, o índice de vegetação reflete o grau de desenvolvimento da cultura e, conseqüentemente, seu potencial produtivo (Molin, 2001; Figueiredo, 2009).

Oviedo & Rudorff (2000) utilizaram o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) como parâmetro indicativo de estresse hídrico na cultura do trigo. Os menores valores de NDVI observados foram relacionados com reduções no teor de clorofila e na biomassa da parte aérea e fechamento estomático desde os períodos iniciais de desenvolvimento da cultura, bem como com a senescência precoce das folhas no estágio de enchimento de grãos. Estas medições permitiram avaliar as condições de crescimento e estimar a produtividade da cultura com boa antecedência à colheita. O NDVI é considerado um preciso

estimador de biomassa, sendo o índice mais utilizado em pesquisas relacionadas à dinâmica da cobertura vegetal, tais como acompanhamento, previsão e avaliação de rendimento de culturas e agricultura de precisão (Pontes *et al.*, 2005).

A medição do NDVI é realizada por sensores ópticos desenvolvidos sob três linhas de pesquisa, segundo Fontana (1995): a) a básica, a qual compara o comportamento espectral das culturas com parâmetros biológicos, com uso de radiômetros de campo; b) a aplicada em nível orbital, para estimativa de áreas de cultivo e produtividade das culturas em grandes áreas, com uso de satélites geo-estacionários e c) a aplicada em nível aéreo e terrestre, para estimativa da variabilidade espacial do potencial produtivo em lavouras comerciais.

A pesquisa básica é a que tem apresentado o maior conjunto de resultados nos últimos anos. Utilizando espectrorradiometria de campo, Serrano *et al.* (2000) e Bredemeier *et al.* (2008) correlacionaram a quantidade de N acumulada na parte aérea em trigo com o NDVI sob diferentes doses de nitrogênio aplicadas. Rudorff *et al.* (2005) validaram modelos para estimativa da biomassa da parte aérea em cultivares de trigo, enquanto Grohs *et al.* (2009) propuseram modelo para estimativa do potencial produtivo de trigo e cevada em função de leituras de NDVI do dossel com sensor radiométrico ativo. Já Junges (2007) desenvolveu modelos baseados em indicadores agrometeorológicos e espectrais para previsão de safra de trigo utilizando imagens de satélite NDVI/MODIS.

Na pesquisa aplicada em nível aéreo, Wright *et al.* (2011), utilizando fotografia aérea digital, quantificaram áreas em lavouras de trigo com deficiência de N ao longo do desenvolvimento. Flowers *et al.* (2003) validaram modelos de estimativa de densidade de afilhos em trigo, a partir de fotos aéreas na região do infravermelho próximo, enquanto Araújo *et al.* (2005), utilizando videografia

multiespectral, determinaram zonas de manejo em lavouras de trigo a partir da comparação entre o mapa de isolinhas do rendimento de grãos e as leituras de NDVI da área.

Recentemente, alguns sensores remotos terrestres foram desenvolvidos, com menor custo e com possibilidade de utilização pelo próprio produtor (De Boer, 2009). O “Greenseeker” é um destes instrumentos, o qual foi desenvolvido pela Universidade de Oklahoma (EUA) ao longo da década de 90 e licenciado pela NTech Industries (Ukiah, CA, EUA), em 2001. Este aparelho utiliza diodos de emissão para gerar radiação visível (vermelha, 660 nm) e infravermelha próxima (NIR, 770 nm). A radiação gerada é refletida pela cultura e medida por um fotodiodo. Os dados são calculados por um microprocessador interno, fornecendo o valor do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) em um computador portátil adaptado ao sensor (NTech Industries, 2009). Outros sensores, como o “Yara N-Sensor/FieldScan” (Yara International ASA, Germany) e o “Crop Circle” (Holland Scientific, Lincoln, NE) têm sido utilizados para determinar a reflectância do dossel e estimar as doses de fertilizantes nitrogenados a serem aplicados em taxa variável.

A utilização do sensor Greenseeker como uma ferramenta no manejo das culturas tem sido destacada em uma série de estudos. Tremblay *et al.* (2009) reportaram que o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), medido pelo sensor GreenSeeker, foi efetivo na determinação de zonas de manejo em lavoura de algodão. Resultados obtidos por Raun *et al.* (2002) mostraram que a utilização deste sensor para recomendações de adubação nitrogenada para o trigo de inverno em Oklahoma resultou em mais de 15% de aumento na eficiência de uso do N. Wright *et al.* (2004) mostraram que os valores de NDVI medidos pelo sensor GreenSeeker apresentaram correlações similares com o rendimento de

grãos de trigo e teor de proteína do grão, quando comparados com os valores deste mesmo índice de vegetação medido por um espectrorradiômetro portátil (Analytical Spectral Devices, FieldSpecPro Inc., Boulder, Colorado).

A aplicação de doses uniformes de N não altera os padrões de desenvolvimento e variabilidade existentes nas culturas (Pena-Yewtukhiwa *et al.* 2006). Welsh *et al.* (2003a, 2003b) constataram que as estratégias mais eficientes de aplicação de N em taxa variável para cevada e trigo de inverno foram a aplicação de maiores doses de N nas áreas de baixa densidade de colmos e redução da dose de adubação nitrogenada em áreas de alta densidade de colmos.

Os resultados obtidos com o sensor Greenseeker são recentes e a sua utilização em lavouras ainda é pouco divulgada. Raun *et al.* (2005) e Povh *et al.* (2008b) determinaram algoritmos de predição de doses de N para trigo, baseados em experimentos realizados em lavouras comerciais, comparando faixas de N não-limitante com amostragens nas áreas da lavoura. Wright *et al.* (2011) compararam medições realizadas com espectrorradiômetros portáteis, imagem aérea e de satélite e com o sensor Greenseeker para quantificação do estado nutricional das plantas em relação à disponibilidade de nitrogênio.

Dados de experimentos conduzidos com base em modelos de recomendação de doses de nitrogênio usando leituras do NDVI têm demonstrado redução em torno de 15% no uso de fertilizantes nitrogenados, comparativamente às áreas conduzidas com aplicação uniforme de N. Não foram encontradas diferenças significativas entre a produtividade em áreas manejadas com aplicação uniforme e com aplicação de N em taxa variável (Raun *et al.*, 2005; Povh *et al.*, 2008b).

Em milho, o NDVI correlacionou-se com o peso seco da parte aérea nos estádios V6-V7 ($r=0,79$), V8-V9 ($r=0,63$) e no estágio de florescimento ($r=0,81$) (Hong *et al.*, 2007b). Thomason *et al.* (2007) afirmam que deve-se basear as decisões de manejo em leituras de NDVI realizadas nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura, devido a restrições meteorológicas e de equipamentos de aplicação de fertilizantes. Eles relatam que as medições de NDVI nos estádios iniciais de desenvolvimento do milho (estádio de cinco a nove folhas completamente expandidas) foram as mais úteis e apropriadas para a tomada de decisões de manejo, resultados estes que corroboram com os encontrados por Tremblay *et al.* (2009).

A medição de variáveis do dossel durante o desenvolvimento da cultura, como o NDVI, é uma oportunidade para aumentar o rendimento e a qualidade de grãos, pela aplicação localizada e variável de fertilizantes nitrogenados. Variáveis importantes neste contexto são a área foliar, a biomassa total e os teores de clorofila e nitrogênio na planta, as quais são indicadores da necessidade de nitrogênio pelas culturas. As variações espaciais e temporais destas variáveis devem ser determinadas para que a quantidade de N aplicada corresponda às exigências da cultura tanto quanto possível (Hansen & Schjoerring, 2003). Em trigo, esta variação pode ser determinada pela densidade de plantas na área (Phillips *et al.*, 2004) e pelo estágio de desenvolvimento das plantas (Sembiring *et al.*, 2000).

A utilização do sensor Greenseeker na estimativa da condição nutricional das culturas é influenciada pelas diferentes interações solo-planta. Em condições de lavoura, existe variabilidade espacial das variáveis de planta e de solo, resultando em diferentes respostas na reflectância, que podem não estar associadas apenas ao estado nutricional da planta, mas também ser decorrentes

de outros estresses bióticos e/ou abióticos. Além disso, o comportamento espectral dos solos é dependente de suas características químicas, físicas e biológicas, principalmente do teor de matéria orgânica (teor e decomposição dos resíduos), óxidos de ferro, umidade, minerais da fração argila, distribuição do tamanho de partículas e dos resíduos culturais da cultura antecessora (Dalmolin *et al.*, 2005; Grohs *et al.*, 2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os trabalhos experimentais foram conduzidos no ano de 2009 na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), em Eldorado do Sul (RS).

A EEA/UFRGS situa-se em uma altitude média de 46 m acima do nível do mar. O solo da área experimental pertence à unidade de mapeamento São Jerônimo, classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2008). A área experimental está sendo cultivada em sistema de plantio direto há 18 anos. No verão, é feita rotação entre as culturas da soja e do milho. No inverno, são cultivados nabo forrageiro, ervilhaca, trigo ou aveia branca como culturas antecessoras aos cultivos de verão. Conforme a classificação climática de Köppen, o clima na região é subtropical, de verão úmido quente, do tipo Cfa (Ipagro, 1979). A precipitação pluvial média anual em Eldorado do Sul (RS) é de 1445 mm e a temperatura média mensal varia entre 13,5°C e 24,6°C, entre os meses mais frio (Junho) e mais quente do ano (Janeiro) (Bergamaschi *et al.*, 2003). Os dados meteorológicos do ano de 2009 para a EEA/UFRGS foram obtidos na estação meteorológica automática da UFRGS na Estação Experimental, distante cerca de 2 km da área experimental. Os dados coletados foram temperatura média do ar (°C), radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e precipitação pluvial (mm) durante a estação de crescimento da cultura. Estes

dados meteorológicos foram comparados aos dados meteorológicos da série histórica dos anos de 1970 a 2000 (Bergamaschi *et al.*, 2003).

Antes da instalação dos experimentos, foram retiradas amostras de solo na área de estudo, na camada entre as profundidades de 0-20 cm. Elas foram analisadas pelo Laboratório de Análises de Solos da UFRGS e os resultados são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Características físicas e químicas das amostras de solo retiradas das áreas experimentais antes da instalação dos experimentos. EEA/UFRGS, 2009.

Cultura	Argila	pH	P	K	MO¹	Al³⁺	Ca²⁺	Mg²⁺	V²
antecessora	%	H ₂ O	---- mg dm ⁻³ ----		g kg ⁻¹	----- cmol _c dm ⁻³ -----			%
Soja	25	5,2	42	202	15	0	3,4	1,6	64
Milho	27	5,6	20	165	16	0	4,3	1,9	71

¹ MO=matéria orgânica

² V=saturação de bases

Os experimentos foram delineados tomando duas linhas de estudo como base:

1ª) Variação da reflectância do dossel em quatro cultivares de trigo ao longo do ciclo de desenvolvimento em função da disponibilidade de nitrogênio e sua relação com o rendimento de grãos.

2ª) Avaliação da resposta do rendimento de grãos e seus componentes em quatro cultivares de trigo à disponibilidade de N na emergência e em cobertura.

1ª Linha de estudo:**Variação da reflectância do dossel em quatro cultivares de trigo ao longo do ciclo de desenvolvimento em função da disponibilidade de nitrogênio e sua relação com o rendimento de grãos.**

Dois experimentos foram instalados sobre resteva (resíduos) de lavouras de milho e soja no ano de 2009. A dessecação das áreas foi realizada com herbicida de ação total a base de glifosato (3 L ha⁻¹ do produto comercial).

Em sucessão às culturas de milho e soja, foi instalado um experimento com os seguintes tratamentos: a) quatro cultivares de trigo (Abalone, Marfim, Quartzo e Fundacep Raízes); b) quatro níveis de nitrogênio aplicados na emergência das plantas (base): sem N, 20, 40 e 60 kg ha⁻¹ de N, na forma de uréia; e c) cinco níveis de nitrogênio aplicados em cobertura (sem N, 20, 40, 60 e 80 kg ha⁻¹ de N), na forma de uréia, no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas no colmo principal (Haun, 1973).

Os tratamentos foram selecionados com o objetivo de simular a maior diversidade de condições de variabilidade espacial existentes em lavouras comerciais. O estágio de desenvolvimento foliar do colmo principal foi determinado utilizando-se a escala proposta por Haun (1973) para o colmo principal. De acordo com esta escala, as folhas são numeradas em ordem acrópeta e o valor dado pela escala para cada estágio fenológico reflete o número de folhas completamente expandidas da planta, mais as unidades decimais da última folha (em expansão) relativas à anterior. Por exemplo, uma planta no estágio Haun 4.5 tem a quarta folha completamente expandida e a quinta folha possuindo cinco décimos do comprimento da quarta. A escala Haun permite o acompanhamento do desenvolvimento foliar do colmo principal, sendo um método simples, direto, sem medições e não destrutivo.

O experimento foi conduzido no delineamento experimental em parcelas sub-divididas, com quatro repetições, onde os fatores cultivar e as diferentes doses de N na emergência e em cobertura foram locados na parcela principal e sub-parcela, respectivamente. Cada unidade experimental foi composta por uma área de 7,02 m². Nela, foram semeadas 13 linhas espaçadas de 0,18 m com 3,0 m de comprimento. A densidade de semeadura foi de 300 sementes aptas m⁻².

A área experimental recebeu, uniformemente, adubação com fósforo e potássio seis dias antes da semeadura, sendo os fertilizantes aplicados em linha. A adubação correspondeu à aplicação de 300 kg ha⁻¹ da formulação 0-22-30 (NPK), sendo o P₂O₅ e o K₂O aplicados na forma de superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente. A semeadura foi realizada no dia primeiro de julho de 2009, utilizando-se semeadora em linha. As sementes foram tratadas com fungicida à base de triadimenol (270 ml/100 kg de sementes) e inseticida à base de imidacloprido (100 ml/100 kg de sementes).

No dia 17 de julho de 2009, por ocasião da emergência das plantas, realizou-se a aplicação de uréia (45% de N) para os tratamentos que receberam a adubação nitrogenada de base (emergência das plantas), de acordo com as doses definidas para cada tratamento. No estágio de 5-6 folhas completamente expandidas das plantas (20 de agosto de 2009), foi efetuada a aplicação do nitrogênio em cobertura nas doses e nos tratamentos estabelecidos.

A ocorrência de doenças, como manchas foliares e ferrugem, foi controlada com a aplicação de fungicida à base de epoxiconazol + piraclostrobina (0,6 L ha⁻¹ do produto comercial), que se repetiu a cada 22 dias, totalizando três aplicações.

A primeira aplicação foi realizada no dia 15 de setembro de 2009, quando as plantas estavam no estágio de emborrachamento. Não houve necessidade de controle de plantas daninhas em pós-emergência nem de controle de insetos-praga durante o ciclo da cultura.

As determinações efetuadas no experimento foram:

Leitura da reflectância do dossel: a reflectância do dossel foi avaliada pelo radiômetro Greenseeker. Este equipamento fornece duas medidas: o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e a razão entre as reflectâncias no vermelho (R) e no infravermelho próximo (NIR), ou seja, R/NIR. O aparelho foi posicionado paralelamente às linhas da cultura, em uma altura entre 0,8 e 1,0 m acima do topo do dossel. As leituras foram realizadas por ocasião do deslocamento linear do equipamento sobre a unidade experimental, com largura útil captada pelo sensor de 0,7 a 0,8 m. Após o acionamento do sensor, ocorre a leitura de um ponto sobre o dossel a cada 0,1 segundo, totalizando cerca de 40 pontos medidos em cada unidade experimental. As leituras foram realizadas entre os estádios de quatro folhas completamente expandidas e o florescimento da cultura (Tabela 2), em todo o comprimento da parcela (3,0 m).

TABELA 2. Relação das avaliações do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), datas das avaliações e estádios de desenvolvimento da cultura. EEA/UFRGS, 2009.

Avaliação	Data	Estádio de desenvolvimento ¹
1	07/08/2009	4
2	14/08/2009	4–5
3	20/08/2009	5–6
4	26/08/2009	6–7
5	04/09/2009	8
6	16/09/2009	Emborrachamento ²
7	25/09/2009	Espigamento ³
8	05/10/2009	Florescimento ⁴

¹ Estádio de desenvolvimento segundo a escala Haun (1973), o qual relaciona o número de folhas completamente expandidas no colmo principal da planta

² Estádio no qual a espiga encontra-se envolta pela bainha da folha bandeira

³ Primeiras espigas visíveis externamente

⁴ Com no mínimo 50% das plantas florescidas (visualização das anteras)

Rendimento de grãos: foi realizada a colheita de uma área de 4,05 m² em cada unidade experimental, o que corresponde às oito linhas centrais, descontando-se cinco linhas laterais das bordaduras e mais uma área (0,27 m²) onde foram coletadas as espigas em 1,5 metro de linha para determinação do número de espigas m⁻². A colheita foi realizada com colhedora automotriz de parcelas. Após a colheita, foi determinado o peso de grãos por unidade experimental e extrapolado para rendimento de grãos (em kg ha⁻¹), na umidade de 130 g kg⁻¹.

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F. Quando houve significância (P<0,05), as médias dos tratamentos foram comparadas com base no valor da diferença mínima significativa (DMS), calculada pelo teste t, ao nível de 5% de significância, utilizando-se o aplicativo ASSISTAT versão 7.6.

Os valores de NDVI nos diferentes tratamentos e estádios de desenvolvimento foram relacionados ao rendimento de grãos da cultura no final do ciclo. Para cada cultivar de trigo em estudo, modelou-se o rendimento de grãos em função do NDVI medido nos diferentes estádios de desenvolvimento pelo

ajuste de modelos linear ($y=a+bx$), quadrático ($y=a+bx+cx^2$) ou exponencial ($y=ab^x$), com auxílio dos aplicativos Sigma Plot 8.0 e ASSISTAT versão 7.6. Para estes ajustes, foram considerados conjuntamente os resultados obtidos nos experimentos conduzidos após as culturas do milho e da soja.

Os critérios utilizados para escolher o modelo que melhor estimou o rendimento de grãos em função do NDVI foram a significância do modelo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade, o maior coeficiente de determinação (r^2) e a menor dispersão dos pontos em relação ao modelo ajustado (soma de quadrado dos resíduos), conforme metodologia utilizada por Toebe *et al.* (2010).

Para comparação entre as regressões (modelos) ajustadas para cada cultivar, em um mesmo estágio de avaliação, foi calculado o erro padrão para cada coeficiente das regressões e o intervalo de confiança (95% de probabilidade) destes coeficientes, conforme metodologia descrita por Gomes (1990), utilizando-se o aplicativo ASSISTAT versão 7.6.

Assim, quando dois ou mais coeficientes de diferentes modelos ajustados são comparados, se os intervalos de confiança não se sobrepõem, tem-se, no mínimo, 95% de confiança de que os coeficientes são significativamente diferentes. De forma análoga, se os intervalos de confiança apresentam sobreposição, tem-se 95% de confiança de que os coeficientes são significativamente semelhantes.

Esta análise visou comparar os modelos ajustados para a relação entre NDVI (medido em diferentes estádios de desenvolvimento) e rendimento de grãos entre as diferentes cultivares, com objetivo de avaliar se existem diferenças significativas entre as cultivares de trigo para esta relação.

2ª Linha de estudo: Avaliação da resposta do rendimento de grãos e seus componentes em quatro cultivares de trigo à disponibilidade de N na emergência e em cobertura.

Baseado no experimento descrito na primeira linha de estudo, foi efetuada a avaliação dos componentes do rendimento da cultura (número de espigas m^{-2} , número de grãos espiga $^{-1}$ e peso do grão) e do rendimento de grãos. O número de espigas m^{-2} foi determinado por ocasião da colheita pela contagem do número de espigas existentes em 1,5 metro de linha, o que corresponde a 0,27 m^2 , e extrapolado para número de espigas m^{-2} . O peso individual do grão foi determinado pela pesagem de três amostras de 100 grãos de cada unidade experimental. O número de grãos espiga $^{-1}$ foi estimado pela divisão do número de grãos m^{-2} pelo número de espigas m^{-2} .

A determinação do rendimento de grãos foi realizada com a colheita de uma área de 4,05 m^2 em cada unidade experimental. Após a colheita, foi determinado o peso de grãos por unidade experimental e extrapolado para rendimento de grãos (em $kg\ ha^{-1}$), na unidade de 130 $g\ kg^{-1}$.

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F. Quando houve significância, as médias dos tratamentos foram comparadas com base no valor da diferença mínima significativa (DMS), calculada pelo teste t, ao nível de 5% de significância, utilizando-se o aplicativo ASSISTAT versão 7.6. Além disso, foram determinados os coeficientes de correlação de Pearson entre o rendimento de grãos e seus componentes.

A partir da resposta do rendimento de grãos à aplicação de N na base (emergência das planas) e em cobertura (estádio de 5-6 folhas expandidas), em cada cultivar, foram analisadas as doses de maior resposta para rendimento de grãos. Com esta relação, foram estimadas as doses mínimas necessárias para

que o potencial das cultivares seja mantido até o momento da adubação nitrogenada em cobertura, para cada cultivar em sucessão aos dois tipos de resteva (milho e soja). A resposta do rendimento de grãos às doses de N aplicadas em cobertura em cada cultivar também foi analisada.

Com isto, se busca o correto suprimento de nitrogênio com doses de fertilizante nitrogenado capazes de manter o potencial produtivo nas diferentes fases de desenvolvimento, evitando excessos ou deficiências, tanto nas fases iniciais do ciclo quanto no momento da suplementação nitrogenada em cobertura, no estágio de cinco a seis folhas completamente expandidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação e discussão dos resultados serão realizadas seguindo-se a mesma divisão de linhas de estudo proposta no Capítulo 3 (Material e Métodos) da presente dissertação.

4.1 Reflectância do dossel em quatro cultivares de trigo ao longo do ciclo em função da disponibilidade de N e sua relação com o rendimento de grãos

4.1.1 Variação da reflectância do dossel do trigo ao longo do ciclo

A reflectância do dossel foi avaliada pelo radiômetro óptico ativo Greenseeker. Este equipamento fornece o valor do “Índice de Vegetação por Diferença Normalizada” (NDVI). As leituras com o sensor Greenseeker foram realizadas entre os estádios de quatro folhas completamente expandidas e o florescimento da cultura, conforme mostrado na Tabela 2.

A variação nos valores do NDVI ao longo do ciclo de desenvolvimento em trigo cultivado em sucessão à cultura do milho, na média de quatro cultivares, é mostrada na Figura 2.

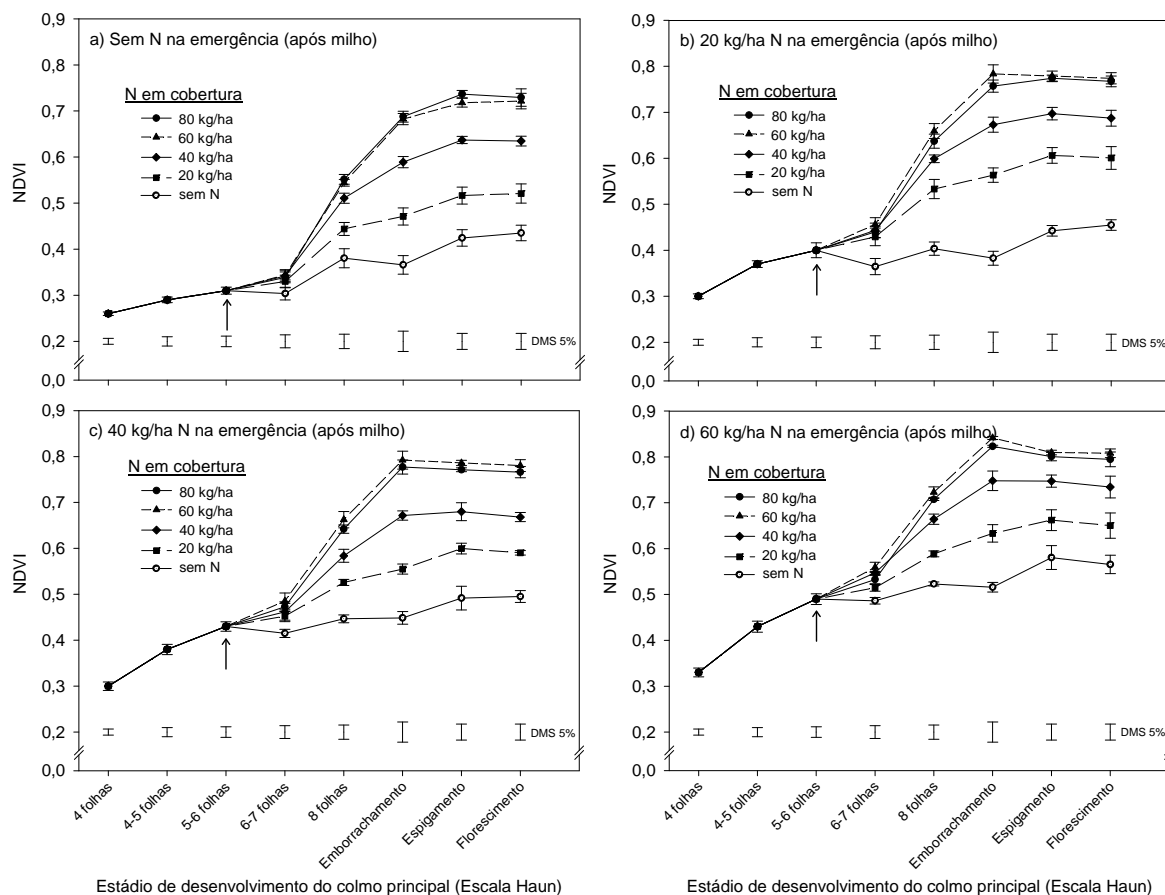


FIGURA 2. Variação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento do trigo cultivado após milho, em função da disponibilidade de nitrogênio na emergência e em cobertura, na média de quatro cultivares. A seta indica o momento de aplicação de N em cobertura. DMS=diferença mínima significativa. Eldorado do Sul, RS, 2009.

A variação nos valores do NDVI ao longo do ciclo de desenvolvimento em trigo cultivado em sucessão à cultura da soja, na média de quatro cultivares, é mostrada na Figura 3.

As variações do NDVI durante o ciclo ocorrem em função do acúmulo de biomassa na parte aérea durante o período vegetativo (Grohs, 2008) e do maior acúmulo de N nos tecidos com aplicação de doses crescentes de fertilizante nitrogenado (Wright, 2004). A maior disponibilidade de nitrogênio aumenta o acúmulo de biomassa e a quantidade de moléculas de clorofila nas folhas. Quanto maior o acúmulo de biomassa fotossinteticamente ativa, maior é a reflectância da

energia incidente na porção do infravermelho próximo (IVP) e menor é a reflectância no intervalo de comprimento de onda correspondente ao vermelho (V), havendo aumento da razão IVP/V (Rizzi, 2004) e, em consequência, aumento do valor do NDVI.

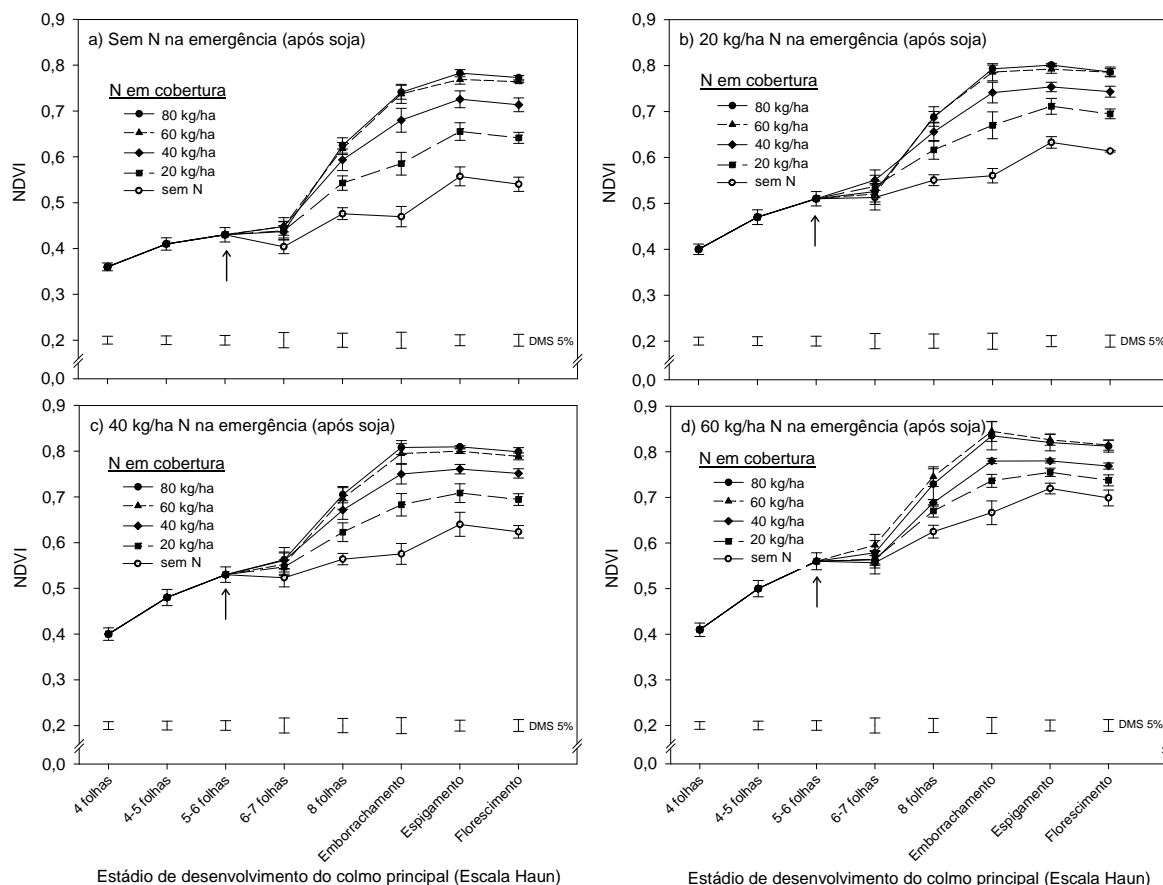


FIGURA 3. Variação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento do trigo cultivado após soja, em função da disponibilidade de nitrogênio na emergência e em cobertura, na média de quatro cultivares. A seta indica o momento de aplicação de N em cobertura. DMS=diferença mínima significativa. Eldorado do Sul, RS, 2009.

Os valores de NDVI mostrados tanto na Figura 2 (após milho) como na Figura 3 (após soja) são valores médios das quatro cultivares de trigo utilizadas no experimento, uma vez que, em nenhum dos estádios de desenvolvimento avaliados, o resultado da análise estatística mostrou interação significativa entre os fatores “cultivar” e “nitrogênio” (Apêndices 1 e 2).

Aumentos nos teores de clorofila diminuem a reflectância da radiação nos comprimentos de onda do vermelho, medidos pelo sensor Greenseeker na faixa de 660 nm, que estão ligados à atividade fotossintética da planta. O aumento da biomassa aumenta a reflectância no comprimento de onda de 770 nm, o qual se relaciona à estrutura celular das folhas (Figueiredo, 2009), que é o outro comprimento de onda medido pelo sensor. O aumento da diferença de reflectância entre o infravermelho próximo e o vermelho, ao serem normalizados, levam ao aumento do valor do NDVI. Portanto, quanto maiores as quantidades de clorofila, que absorve a radiação eletromagnética no comprimento de onda do vermelho, e de estruturas celulares (tecidos), que refletem o infravermelho próximo, maiores serão os valores do NDVI.

A escolha das doses de N utilizadas neste experimento, tanto por ocasião da emergência quanto em cobertura, objetivou criar elevada variabilidade de valores de NDVI ao longo do ciclo da cultura, desde valores baixos, nos tratamentos sem aplicação de N, até valores máximos de NDVI, nos tratamentos que combinaram a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N na emergência e 60 kg ha⁻¹ de N em cobertura, no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas (Figuras 2 e 3).

Os valores de NDVI em todos os tratamentos aumentaram, de maneira geral, desde o estágio de quatro folhas expandidas até o emborrachamento da cultura. Após este estágio, os valores de NDVI pouco se alteraram até o florescimento da cultura (Figuras 2 e 3). Os menores acréscimos nos valores de NDVI ao longo do ciclo foram observados nos tratamentos que não receberam N na emergência das plantas (base), especialmente no caso do trigo cultivado em sucessão ao milho (Figura 2). Esta condição se deve à imobilização temporária do N pelos resíduos da cultura antecessora (milho), que, por terem alta relação

carbono/nitrogênio (C/N), diminuem a disponibilização de nitrogênio para o trigo cultivado em sucessão.

Tal fato é comprovado pelo pequeno acréscimo dos valores de NDVI no trigo cultivado após milho, entre os estádios de quatro folhas expandidas (primeira leitura realizada) e o momento de aplicação do N em cobertura (estádio de 5-6 folhas expandidas), no tratamento que não recebeu aplicação de N na emergência (Figura 2.a). Nesta condição, os valores de NDVI variaram de 0,26 a 0,31 entre estes dois estádios. Por outro lado, na condição de maior oferta de N na emergência das plantas (aplicação de 60 kg ha⁻¹), os valores variaram de 0,33 a 0,49 entre estes estádios (Figura 2.d e Apêndice 3).

As diferenças de NDVI observadas a partir da quarta leitura (estádio de 6-7 folhas) são resultantes das diferentes doses de N aplicadas em cobertura no estádio de 5-6 folhas expandidas (Figuras 2 e 3). Estas diferenças são determinadas em função da maior ou menor oferta de nitrogênio, as quais determinam as quantidades absorvidas e utilizadas de N pela planta. O N aplicado em cobertura no estádio de 5-6 folhas expandidas foi rapidamente absorvido e utilizado pelas plantas, uma vez que em apenas seis dias (estádio de 6-7 folhas) após a aplicação de N em cobertura (realizada no estádio de 5-6 folhas), os valores de NDVI foram superiores nos tratamentos que receberam N em cobertura comparativamente àqueles que não receberam a aplicação neste momento. Esta rápida resposta foi observada tanto na condição de cultivo após milho (Figura 2 e Apêndice 3) quanto após soja (Figura 3 e Apêndice 4), em que os valores de NDVI dos tratamentos que não receberam N em cobertura se mantiveram praticamente estáveis e os que receberam N em cobertura aumentaram os valores do NDVI nesta leitura (estádio de 6-7 folhas).

A síntese de maior quantidade de clorofila por unidade de área se reflete em menor reflectância do dossel na faixa do vermelho, que é uma das faixas do espectro que compõem o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). A outra faixa espectral deste índice de vegetação, o infravermelho próximo, tem sua reflectância aumentada pela presença de maior quantidade de biomassa por unidade de área. Assim, o aumento de NDVI verificado nas leituras subseqüentes à aplicação de nitrogênio em cobertura é resultado da maior eficiência fotossintética das plantas, proporcionada pela presença de maior teor de clorofila, e pelo incremento da biomassa da parte aérea, que é resultante da maior taxa de assimilação de CO₂ pelas plantas (Figuras 2 e 3).

As diferenças de NDVI entre os tratamentos continuaram a aumentar até o estágio de emborrachamento da cultura (16 de setembro de 2009). Após esta leitura, de maneira geral, os valores do NDVI se mantiveram praticamente estáveis até o florescimento, tanto no cultivo após milho (Figura 2) quanto após soja (Figura 3).

Observou-se que, quanto maior a dose de N aplicada em cobertura, maiores foram os valores de NDVI detectados nas leituras posteriores à aplicação do fertilizante nitrogenado. Após a aplicação do N em cobertura, ou seja, após o estágio de 5-6 folhas expandidas, as plantas de trigo entram em fase de rápida absorção de nitrogênio e de acúmulo de biomassa na parte aérea. Neste momento, o N é utilizado para manutenção da sincronia de desenvolvimento entre afilhos e colmo principal, fato este que é fundamental para a sobrevivência dos afilhos formados e para aumentar a quantidade de espigas produzidas por área. Ao término do afilhamento e início da alongação dos entrenós, próximo ao estágio de oito folhas expandidas, o N aplicado irá contribuir para a sobrevivência dos afilhos, para o aumento dos níveis de clorofila nas folhas e para desenvolvimento

dos órgãos vegetativos (biomassa da parte aérea), o que foi detectado pelas leituras do NDVI realizadas até o florescimento da cultura.

Os tratamentos que propiciaram os valores máximos de NDVI foram aqueles que combinaram a aplicação de 60 kg ha^{-1} de N na emergência e a suplementação com 60 kg ha^{-1} de N em cobertura, no estágio de 5-6 folhas. Nestes tratamentos, os valores máximos do NDVI observados foram de 0,84, tanto após milho (Figura 2) como após soja (Figura 3). Nas duas situações, estes valores máximos foram observados no estágio de emborrachamento da cultura.

O comportamento esperado dos valores de NDVI seria que estes atingissem os maiores valores no florescimento da cultura, pois é o momento onde a biomassa da parte aérea é máxima e o NDVI medido pelo sensor Greenseeker é efetivo em quantificar a quantidade de biomassa da parte aérea (Grohs *et al.*, 2009). Um fator que pode ter influenciado os valores de NDVI é a saturação de seu valor. Grohs *et al.* (2009) encontraram valores de saturação do NDVI de 0,87 para cevada, enquanto Liu (2006) reportou valores de NDVI máximos de 0,84, valores estes similares ao encontrados no presente trabalho.

De maneira geral, leituras de NDVI posteriores ao estágio de emborrachamento apresentaram redução nos valores do índice, devido ao início da senescência das folhas. Além disso, outro fator que determina a redução dos valores de NDVI após a extrusão das espigas é a coloração mais clara (tom de verde mais claro) das glumas e aristas, aumentando a reflectância no comprimento de onda do vermelho, e a exteriorização das anteras por ocasião do florescimento da cultura. Solari *et al.* (2008), avaliando o NDVI em milho, além de encontrarem influência da superfície de fundo sobre os valores de NDVI nas fases iniciais de desenvolvimento da cultura, também verificaram interferência do pendão em leituras de NDVI realizadas após o estágio de pendramento. Esta

interferência, entretanto, não teria efeito sobre o uso do NDVI no manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho, uma vez que esta é realizada antes deste estágio.

No presente trabalho, a redução dos valores de NDVI verificada em algumas situações após o emborrachamento pode ter sido causada pela ocorrência de manchas foliares, as quais foram observadas desde o período de emborrachamento da cultura e que levaram à senescência prematura das folhas, principalmente as do extrato inferior do dossel. Neste ano, as condições meteorológicas foram favoráveis ao aparecimento de manchas foliares, em função do elevado volume de precipitação pluvial. Isto é visto pelos volumes pluviométricos registrados no período de maior aumento da severidade das manchas foliares no mês de setembro, no qual se registrou um volume de chuvas de 361 mm. Além disso, no mês de novembro a precipitação foi elevada (406 mm), contribuindo para a rápida senescência foliar nas plantas de trigo.

Assim, os valores de NDVI mais elevados na fase do emborrachamento e não no florescimento podem ser justificados pela extrusão de espigas e anteras e incidência de manchas foliares, aumentando a reflectância na faixa do vermelho e reduzindo a reflectância na região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Portanto, a ocorrência destes fatores conjuntamente promoveu redução no valor do NDVI, uma vez que este diminui com a redução da diferença entre as reflectâncias nestes dois comprimentos de onda.

Os incrementos nos valores do NDVI nos tratamentos que não receberam suplementação de N em cobertura no estágio de 5-6 folhas expandidas foram pequenos a partir deste estágio (Figuras 2 e 3). Este comportamento pode ser explicado pelo lento acúmulo de biomassa na parte aérea, em função da baixa disponibilidade de N para síntese de moléculas de clorofila, que tem papel

fundamental no aumento da síntese de carboidratos para o desenvolvimento vegetativo da cultura, reduzindo a fonte (folhas) para fixação de carbono. A diluição do teor de N nos tecidos foliares reduz a coloração verde das folhas e aumenta a reflectância da radiação na região do vermelho. A redução no teor de clorofila leva à redução da biomassa da parte aérea, o que reduz a reflectância na faixa do infravermelho próximo.

Na Figura 4, são mostrados os valores de NDVI em trigo cultivado após milho (Figura 4.a) e após soja (Figura 4.b) nos estádios de 4, 4-5 e 5-6 folhas completamente expandidas, em função de doses de N aplicadas na emergência das plantas.

Os valores de NDVI, na condição após milho (Figura 4.a), apresentaram diferenças significativas entre as doses aplicadas na emergência desde a primeira leitura (estádio de quatro folhas expandidas), não ocorrendo diferenças significativas entre os tratamentos de 20 e 40 kg N ha⁻¹ na primeira (quatro folhas) e segunda (4-5 folhas) leituras. Contudo, na terceira leitura (estádio de 5-6 folhas) foram observadas diferenças significativas entre todos os tratamentos de N na emergência (Figura 4.a e Apêndice 3).

Com o cultivo de trigo após soja, os valores de NDVI não diferiram significativamente entre as doses de 20, 40 e 60 kg ha⁻¹ de N nos estádios de quatro e 4-5 folhas expandidas (Figura 4.b). No estágio de 5-6 folhas, as diferenças foram significativas entre os tratamentos sem N e os tratamentos com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N, que não diferiram entre si. Estes, ainda, apresentaram significativamente valores mais baixos de NDVI em comparação ao tratamento que recebeu 60 kg ha⁻¹ de N na emergência (Figura 4.b e Apêndice 4).

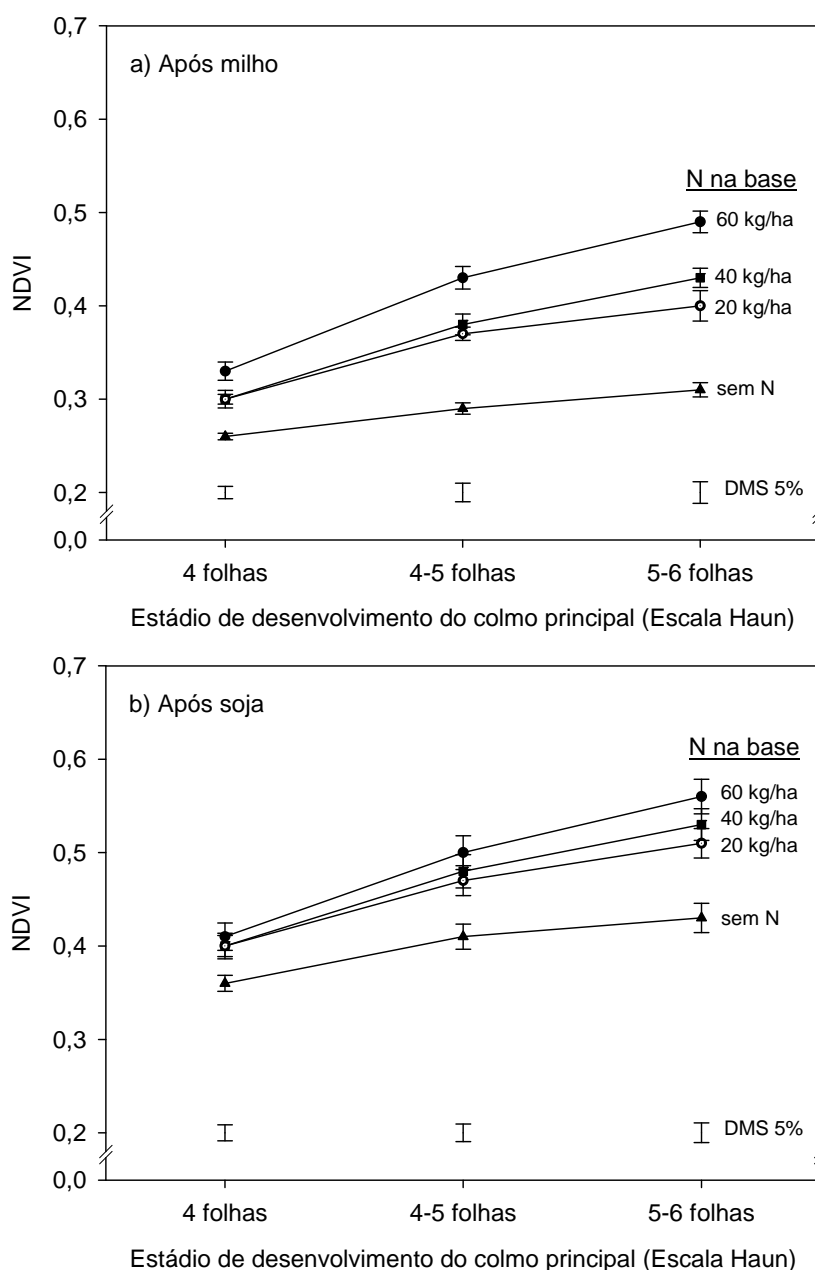


FIGURA 4. Variação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento de trigo cultivado após milho (a) e soja (b), em função da disponibilidade de nitrogênio na base (emergência), na média de quatro cultivares. DMS=diferença mínima significativa. Eldorado do Sul, RS, 2009.

Após soja, os valores de NDVI do trigo variaram entre 0,36 e 0,43 nos estádios de desenvolvimento de quatro folhas até o momento de aplicação do N em cobertura (5-6 folhas), na condição de menor oferta de N (tratamento sem N na emergência), enquanto que, na condição de maior oferta de N (60 kg ha⁻¹ na base), os valores variaram de 0,41 a 0,56 (Figura 4.b). Estes valores foram

numericamente superiores aos valores observados no trigo cultivado em sucessão ao milho (Figura 4.a).

Estes resultados mostram que a avaliação do NDVI utilizando um sensor óptico ativo é um método preciso para diferenciar, no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, diferentes condições de desenvolvimento da cultura proporcionadas pela variação na disponibilidade de N por ocasião da emergência.

Além do efeito da disponibilidade de N, também foi estudada a variação dos valores do NDVI ao longo do ciclo em diferentes cultivares de trigo (Figura 5). Assim, são apresentados os efeitos principais do fator cultivar, uma vez que a interação entre os fatores “cultivar” e “dose de N” não foi significativa em nenhum dos estádios avaliados (Apêndices 1 e 2).

Na condição após milho, a variação do NDVI entre as quatro cultivares de trigo testadas foi pequena (Figura 5.a). Mesmo assim, foram verificadas diferenças significativas entre as cultivares em quatro dos oito estádios avaliados. Estas diferenças, porém, são de pequena magnitude, se comparadas com as diferenças nos valores de NDVI proporcionadas pela variação na disponibilidade de N. Na leitura realizada no florescimento, pequenas diferenças de ciclo, maior ou menor presença de anteras, coloração dos órgãos reprodutivos e diferenças de suscetibilidade a doenças podem ter ocasionado as diferenças observadas em relação aos valores do NDVI. Na condição de cultivo após soja, os valores de NDVI das diferentes cultivares não diferiram significativamente entre si em cinco das oito leituras realizadas até o florescimento (Figura 5.b).

As pequenas diferenças no valor do NDVI apresentadas entre cultivares estão provavelmente relacionadas ao seu hábito de crescimento e arquitetura foliar. A presença de folhas mais decumbentes, que cobrem o solo com maior eficiência, reduz o efeito da superfície de fundo nas leituras do NDVI, especialmente nos estádios iniciais de desenvolvimento, onde a biomassa é ainda pequena e a cobertura do solo proporcionada pela cultura é baixa.

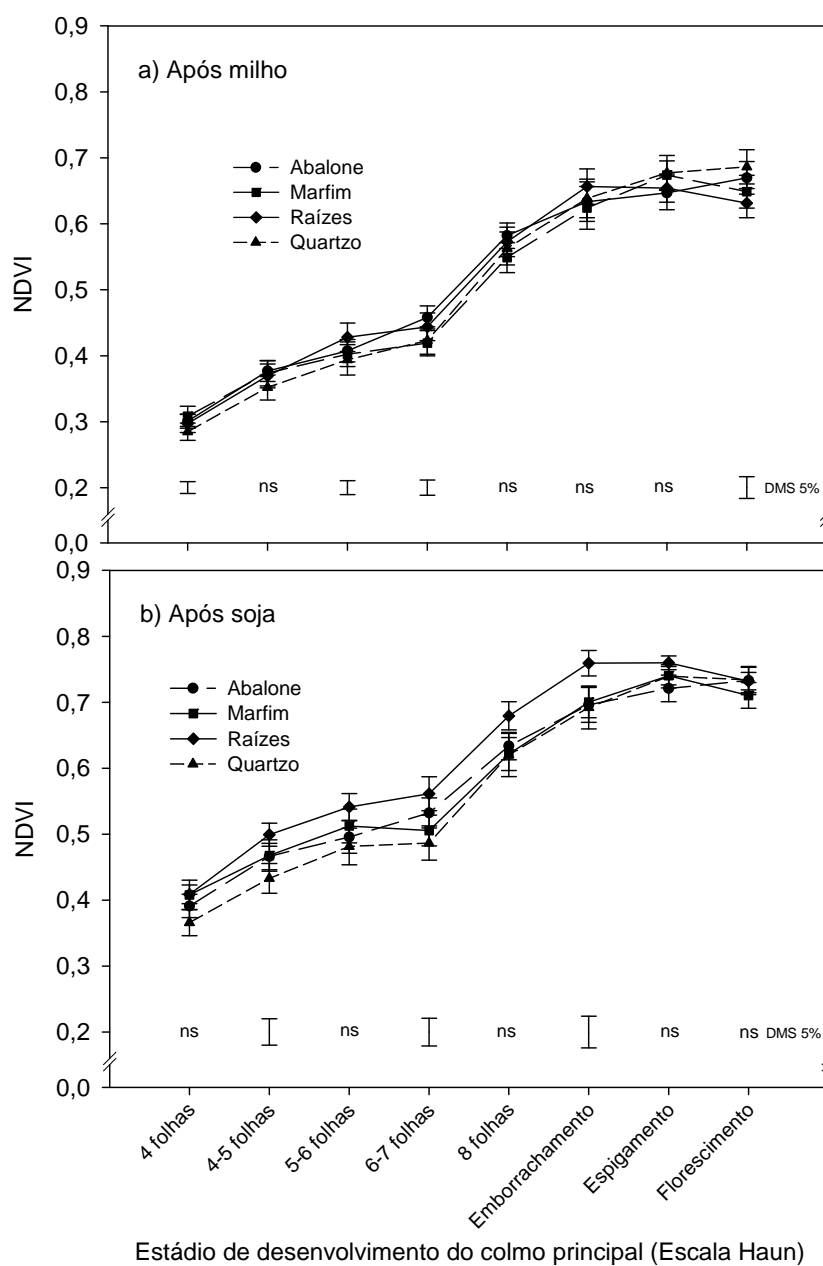


FIGURA 5. Variação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento em quatro cultivares de trigo cultivadas após milho (a) e soja (b). DMS=diferença mínima significativa. Eldorado do Sul, RS, 2009.

Assim, a cultivar Quartzo apresentou menores valores de NDVI no período inicial, devido ao seu menor afilhamento e ao seu hábito de crescimento com folhas mais eretas, que reduziram os valores das leituras de NDVI. Já a cultivar Raízes, que em quase todo o ciclo mostrou valores de NDVI superiores, principalmente na condição após soja (Figura 5.b), apresenta alta capacidade de afilhamento e folhas mais decumbentes. Este comportamento de maiores valores de NDVI da cultivar Raízes foi mais visível na condição de cultivo após soja, na qual a maior oferta de N proporcionada pelo resíduo de baixa relação carbono/nitrogênio pode ter possibilitado maior afilhamento, em comparação à condição após milho. Após a quarta leitura de NDVI (estádio de 6-7 folhas) na condição após soja, as cultivares Abalone, Marfim e Quartzo mostraram comportamento semelhante em relação aos valores do índice de vegetação,

Os maiores valores de NDVI observados na condição após soja, em comparação à condição após milho, são resultantes do maior desenvolvimento do trigo cultivado em sucessão à soja, em função da maior liberação de N pela resteva de baixa relação carbono/nitrogênio.

Quando da emissão da quarta folha do colmo principal, os afilhos começam a se tornar visíveis e passam a contribuir para o aumento do índice de vegetação. Em casos de menor oferta de N, esses afilhos podem não ser emitidos ou emitidos mais tardiamente (após a emissão da quarta folha) e apresentam menor chance de sobrevivência, por não se desenvolverem em sincronia com o colmo principal. A maior disponibilidade de N, em função do benefício da decomposição mais rápida dos resíduos de soja e conseqüente liberação de N, permite que ocorra maior afilhamento da cultura. Isto, juntamente com o desenvolvimento do colmo principal, se reflete no aumento da biomassa da parte aérea, levando ao

aumento dos valores de NDVI nesta condição (Figura 5.b), em comparação ao cultivo após milho (Figura 5.a).

Além deste efeito, diferenças de reflectância foram encontradas por Grohs *et al.* (2009), os quais avaliaram o efeito da superfície de fundo (resíduos culturais + solo) sobre os valores do NDVI. Foram observadas pequenas diferenças neste índice medido em condições de cultivo após milho e após soja, para uma mesma quantidade de biomassa de trigo, sendo que a resteva da soja apresentou maiores valores de NDVI, comparativamente aos valores encontrados em resteva de milho. Esta influência da superfície de fundo pode ser especialmente importante no período inicial de desenvolvimento da cultura, no qual a quantidade de biomassa da cultura é baixa e o efeito da superfície de fundo torna-se, assim, mais pronunciado, em função da maior quantidade de solo exposto. Grohs (2008) reportou valores de NDVI de 0,25 para resteva de milho e 0,30 para resteva de soja, na ausência de plantas.

As diferenças de reflectância entre os resíduos culturais de milho e soja são devido a sua constituição vegetal, como teor de celulose (Nagler *et al.*, 2000). A soja apresenta tecidos celulares com menor dimensão e menor teor de celulose, comparativamente ao milho. Assim, maiores valores de NDVI registrados nas leituras sobre resteva de soja são atribuídos a maior transmitância da radiação incidente, principalmente no vermelho, e menor no infravermelho próximo, levando ao aumento do NDVI (Nagler *et al.*, 2000). Além do efeito da resteva sobre os valores de NDVI, outros fatores, como ocorrência de vento, tipo de solo (Dalmolin *et al.*, 2005) e teor de matéria orgânica do solo (Gao *et al.*, 2000) podem alterar os valores de NDVI.

4.1.2 Relação do NDVI avaliado até o florescimento com o rendimento de grãos de trigo

4.1.2.1 Relação do NDVI com rendimento de grãos de trigo em função da adubação nitrogenada de base

Em todos os estádios de desenvolvimento nos quais foram realizadas leituras de NDVI, correlacionou-se os valores deste índice com o rendimento final de grãos da cultura do trigo. Na Figura 6 é apresentada a relação entre estas duas variáveis (NDVI e rendimento de grãos) para cada cultivar estudada. Cada ponto nos gráficos representa a média de quatro repetições referentes a cada combinação de doses de N na emergência e em cobertura utilizadas no presente trabalho. Os resultados são apresentados conjuntamente para as restevas de soja e milho.

Assim, na Figura 6, as regressões ajustadas para cada cultivar, em cada estágio de desenvolvimento, foram lineares para os estádios de quatro até o estágio de oito folhas expandidas (Figura 6.a, 6.b, 6.c, 6.d e 6.e). Já para os estádios de emborrachamento, espigamento e florescimento, as regressões ajustadas foram quadráticas (Figura 6.f, 6.g e 6.h). Estas regressões foram escolhidas por apresentarem o melhor ajuste na relação entre NDVI e rendimento de grãos (Apêndice 5). Além da apresentação de uma regressão para cada uma das cultivares, ajustou-se uma regressão única para as quatro cultivares. O resumo da análise estatística referente aos modelos ajustados para cada cultivar, em cada estágio de desenvolvimento, é apresentado no Apêndice 5.

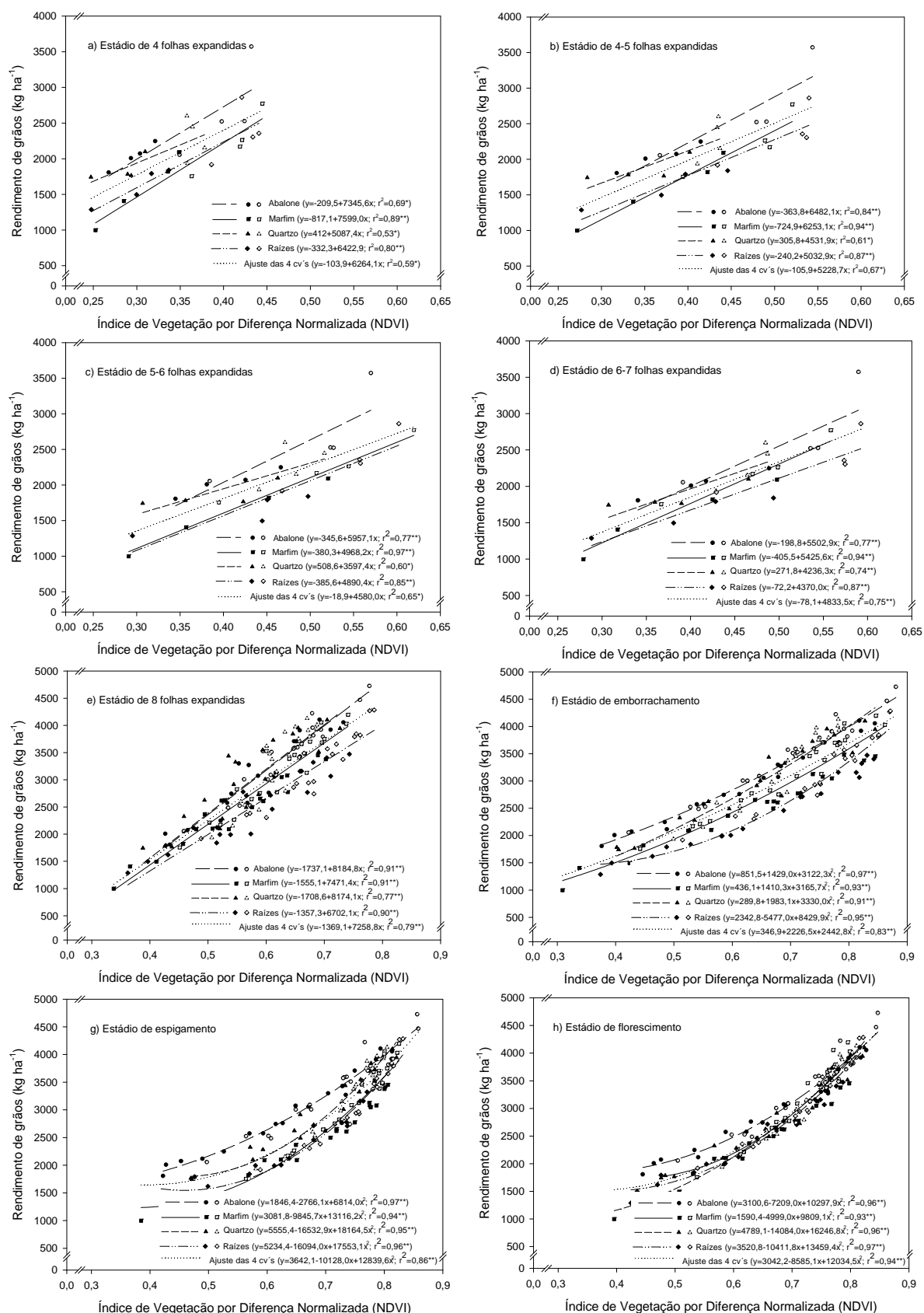


FIGURA 6. Relação entre rendimento de grãos e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado em diferentes estádios de desenvolvimento, para quatro cultivares de trigo após milho (símbolos cheios) e após soja (símbolos vazados). Eldorado do Sul, RS, 2009.

Os pontos utilizados na Figura 6.a (estádio de 4 folhas) até Figura 6.d (estádio de 6-7 folhas) são referentes aos tratamentos que receberam ou não N na emergência (sem N, 20, 40 e 60 kg ha⁻¹ de N) e que não receberam suplementação com N em cobertura (sem N em cobertura). Já na Figura 6.e (estádio de 8 folhas expandidas) até Figura 6.h (florescimento), os pontos utilizados representam as médias de todos os tratamentos do experimento.

Os coeficientes de determinação (r^2) observados na primeira avaliação (Figura 6.a) para a relação entre NDVI e rendimento de grãos, na qual as plantas apresentavam quatro folhas expandidas no colmo principal, foram significativos para todas as cultivares e variaram entre $r^2=0,53$, para a cultivar Quartzo, e $r^2=0,89$, para a cultivar Marfim (Figura 6.a).

Apesar de ser ainda bastante cedo (estádio de 4 folhas expandidas) para estimar o potencial produtivo em uma determinada área, o NDVI foi bastante eficiente em quantificar diferenças entre o desenvolvimento das plantas frente às diferentes disponibilidades de N, tanto em função das diferentes doses de N aplicadas quanto pelas diferentes restevas.

À medida que ocorreu o desenvolvimento da cultura, as correlações entre rendimento de grãos e NDVI foram aumentando, pois a superfície de fundo passa a ter menor efeito sobre as leituras do NDVI e a biomassa passa a ser o fator preponderante que determina a magnitude deste índice. As correlações observadas na segunda leitura (estádio de 4-5 folhas) (Figura 6.b) foram superiores às encontradas na primeira leitura (Figura 6.a), mostrando que, com o desenvolvimento da cultura, melhora a capacidade do NDVI em predizer o rendimento de grãos da cultura. Na terceira leitura (Figura 6.c), realizada no estágio de 5-6 folhas expandidas, os valores das correlações foram semelhantes aos valores da segunda leitura (Figura 6.b).

No estágio de 5-6 folhas, é fundamental a estimativa do potencial produtivo da lavoura, uma vez que este é o momento recomendado para aplicação de N em cobertura nas culturas de cereais de estação fria no Sul do Brasil (Bredemeier & Mundstock, 2001; Mundstock & Bredemeier, 2001; Wamser & Mundstock 2007). Assim, o NDVI medido por sensor óptico ativo poderia ser empregado para estimar o potencial produtivo de diferentes áreas dentro de uma lavoura neste estágio de desenvolvimento e, com esta informação, se poderia realizar a adubação nitrogenada em taxa variável.

Os valores de NDVI observados no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, em função da disponibilidade de N na emergência, estão representados graficamente, na média das quatro cultivares de trigo, na Figura 7.a (após milho) e Figura 7.b (após soja).

Estes valores representam a condição de desenvolvimento atingida pela cultura até este estágio, sendo estes valores de NDVI intermediários aos encontrados por Grohs (2008) no mesmo local, porém em anos de condições climáticas distintas (2006 e 2007). Os valores de NDVI que foram encontrados neste estágio são função da disponibilidade inicial de N, seja pelos diferentes resíduos culturais em que o experimento foi conduzido ou ainda pelas distintas doses de N utilizadas.

Contudo, o fator meteorológico característico no ano de 2009, com temperaturas do ar abaixo das registradas historicamente no local (Figura 8.a) no período inicial foram determinantes em restringir o desenvolvimento da cultura. As baixas temperaturas iniciais (Figura 8.a), associadas à menor radiação solar (Figura 8.b) no segundo decêndio de julho, fizeram com que o N aplicado no momento da emergência da cultura fosse mais lentamente absorvido e a síntese de metabólitos para o crescimento fosse mais lenta. Já no terceiro decêndio de

julho, ocorreu um aumento considerável na radiação solar, porém houve uma redução nas temperaturas médias em 5°C, diminuindo drasticamente o metabolismo e o desenvolvimento da cultura.

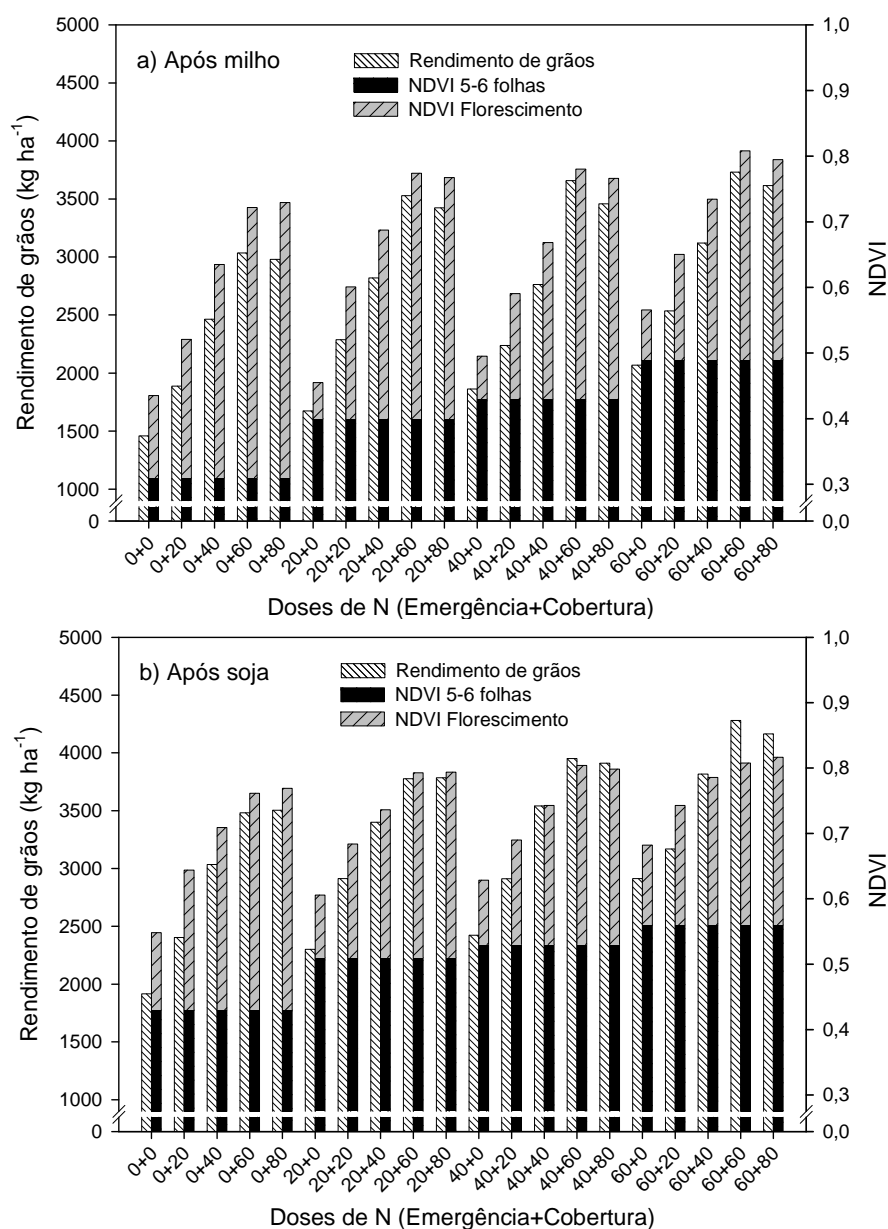


FIGURA 7. Rendimento de grãos e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado nos estádios de 5-6 folhas expandidas e florescimento em trigo cultivado após milho (a) e soja (b), na média de quatro cultivares. Eldorado do Sul, RS, 2009.

Durante o primeiro decêndio de agosto, além das menores temperaturas e radiação solar mais baixa, registrou-se grande volume de chuvas, fato que pode

ter promovido maior lixiviação do N proveniente da adubação de base da cultura, que teve sua absorção limitada pelas condições climáticas registradas naquele período inicial.

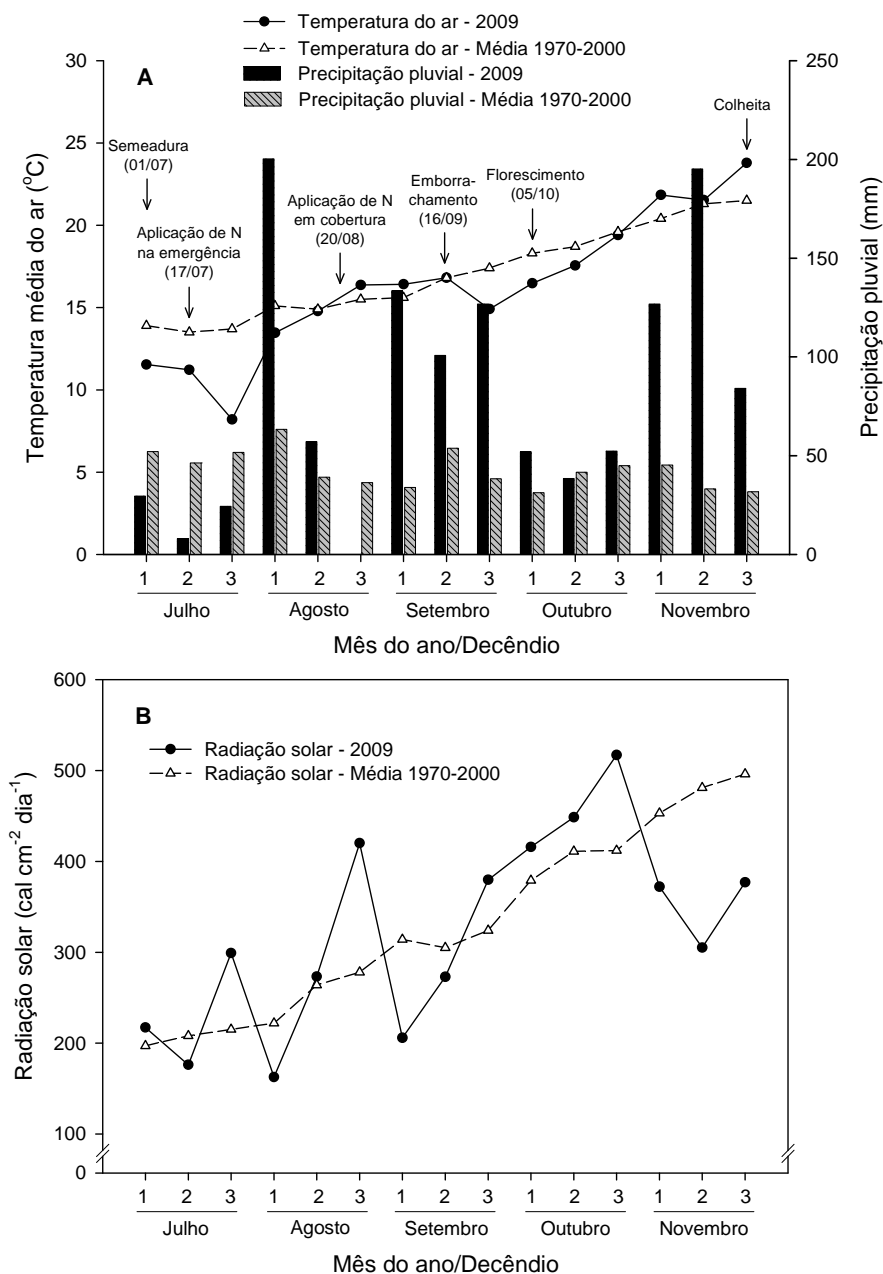


FIGURA 8. Temperatura média do ar e precipitação pluvial (A) e radiação solar (B) no ano de 2009 e normal climática (1970-2000). Eldorado do Sul, RS, 2009.

4.1.2.2 Importância da relação entre NDVI e rendimento de grãos de trigo no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas.

Nesta fase de desenvolvimento, os componentes do rendimento de grãos da cultura do trigo ainda não foram definidos. Assim, o número de espigas por unidade de área e o número de grãos por espiga podem ser fortemente influenciados pela aplicação de N em cobertura no estágio de 5-6 folhas, tendo em vista que, neste momento, as plantas ainda estão emitindo afilhos e iniciando a diferenciação das estruturas reprodutivas na inflorescência. Com a aplicação de doses condizentes com as reais necessidades da cultura, pode-se permitir que haja maior sobrevivência destes afilhos, bem como maior número de grãos na espiga, definido através da diferenciação das espiguetas a partir deste período.

As recomendações de doses de adubação nitrogenada são tradicionalmente realizadas ainda na pré-semeadura da cultura (Reunião..., 2010), onde se considera critérios como o teor de matéria orgânica do solo e o rendimento de grãos esperado, não se levando em consideração outros fatores que influenciam a disponibilidade deste nutriente no solo, nem as condições meteorológicas ocorridas durante o período inicial de desenvolvimento das plantas.

Alguns autores têm citado situações que fazem com que ocorram diferenças na disponibilidade de nitrato no solo, como, por exemplo, a redução deste à medida que aumenta a precipitação (Jaynes *et al.*, 2001; Kitchen *et al.*, 2010). Também podem ocorrer mudanças na disponibilidade de N para as culturas em função das diferentes culturas antecessoras (Kitchen *et al.*, 2010). Poletto (2004) encontrou baixo acúmulo de N foliar quando, no período inicial de desenvolvimento da cultura, os teores de N mineral no solo eram baixos. Portanto, a ocorrência de fatores pós-semeadura faz com que haja um padrão de

desenvolvimento que leva a diferentes acúmulos de biomassa e absorção de N pelas plantas. Este fato é confirmado por Grohs (2008), que encontrou diferentes acúmulos de biomassa em diferentes anos de desenvolvimento da cultura do trigo para um mesmo estágio de desenvolvimento e atribuiu estas diferenças às condições meteorológicas mais favoráveis no ano onde o acúmulo de biomassa foi maior.

A definição da dose de nitrogênio a ser aplicada na cultura do trigo em função da produtividade esperada é complexa, pois o potencial de rendimento de grãos varia em função das condições meteorológicas de cada ano específico e a probabilidade do “rendimento esperado” estimado não se concretizar é elevada.

A variabilidade espacial do rendimento de grãos em uma lavoura pode ser elevada, mesmo em áreas de alto potencial produtivo. Bredemeier *et al.* (2007) avaliaram a variabilidade espacial da quantidade de biomassa da parte aérea e do rendimento de grãos em lavoura comercial de cevada, na qual foram observadas variações de 400% na quantidade de biomassa no estágio de emissão da sexta folha do colmo principal (variação entre 1250 e 5000 kg ha⁻¹) e variações de 250% no rendimento de grãos (variação entre 2500 e 6300 kg ha⁻¹). O rendimento médio de grãos na área estudada foi de 4,2 t ha⁻¹ (Bredemeier *et al.*, 2007).

Desta maneira, torna-se fundamental o uso de ferramentas que possam estimar o potencial produtivo de uma lavoura *in situ* de maneira precisa, eficiente e rápida, em tempo real, visando otimizar a aplicação de N em cobertura e permitir a aplicação deste nutriente em taxa variável, inclusive em lavouras com alto potencial produtivo. Segundo Milani *et al.* (2006), a estimativa do potencial produtivo das culturas em um determinado estágio fenológico viabiliza o manejo sítio-específico em lavouras, como adubações em taxa variável. Neste sentido, sensores remotos para avaliação da reflectância e de índices de vegetação, como

o NDVI, surgem como importantes ferramentas para detectar a variabilidade espacial do potencial produtivo de maneira precisa e em tempo real.

O que determina diferentes potenciais produtivos no momento de aplicação de nitrogênio em cobertura, no estágio de 5-6 folhas expandidas, é o menor ou maior desenvolvimento da cultura, dependentes da nutrição nitrogenada inicial. Assim, quanto melhor for o estado nutricional da cultura neste momento, menor será a resposta à aplicação de N em cobertura.

Segundo Poletto (2004), a precisão no manejo do N, além de considerar a disponibilidade deste nutriente pelo solo, deve prever as reais necessidades de N pela planta, sendo necessária, para isso, a análise conjunta de indicadores de solo e de características de planta para recomendações mais precisas e que permitam a obtenção de rendimentos satisfatórios para o produtor, com o mínimo de investimento em adubos nitrogenados.

Para auxiliar nesta quantificação do desenvolvimento da cultura e do potencial produtivo, a utilização de sensores como o Greenseeker, que faz avaliações em tempo real e estimativas precisas do potencial produtivo através do NDVI, pode ser importante ferramenta na determinação de doses de fertilizante nitrogenado mais condizentes com a real necessidade de N pelas plantas. Estas quantidades de fertilizantes serão determinadas em função da absorção inicial de N pela cultura até o momento da prática da adubação nitrogenada de cobertura, em cada local dentro de uma lavoura. Schmidt *et al.* (2011) encontraram boa eficiência para o sensor de NDVI na quantificação da necessidade de fertilizantes nitrogenados na cultura do milho. O NDVI correlacionou-se melhor com a quantidade de biomassa na parte aérea do que a quantidade de nitrato presente no solo no período de pré-semeadura, que seria outra forma de se prever as quantidades de N a serem aplicadas durante o desenvolvimento da cultura.

Grohs *et al.* (2007), trabalhando com o sensor Greenseeker na cultura da cevada, correlacionaram o NDVI avaliado no estágio de seis folhas expandidas com o número de colmos por área, biomassa da parte aérea e rendimento de grãos, encontrando altas correlações entre as variáveis. Isto mostra a forte relação existente entre a biomassa e o número de colmos com o NDVI. Estas variáveis estão correlacionadas com a disponibilidade inicial de N, aumentando à medida que a oferta deste nutriente é mais abundante, ou seja, a maior disponibilidade de N aumenta o número de afilhos por unidade de área e, conseqüentemente, a biomassa total. O maior NDVI, que está correlacionado com maior biomassa e maior número de afilhos por área, também levou ao maior rendimento de grãos.

O emprego deste tipo de tecnologia pode levar à redução de custos com a adubação nitrogenada, pela redução de doses aplicadas em locais da lavoura em que as plantas estejam mais bem nutridas no momento da aplicação. Esta prática reduziria perdas de nitrato e contribuiria para a redução da contaminação do lençol freático, uma vez que o N não absorvido fica passível de ser lixiviado. Ainda, seria possível manejar as áreas em que as plantas estejam com menor desenvolvimento, aumentando-se as doses de N aplicadas, pois estas áreas dentro de um talhão apresentarão maior resposta ao N aplicado em cobertura.

Uma vez quantificados os valores de NDVI da cultura do trigo no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, se poderia passar a utilizar a adubação em taxa variável de acordo com o potencial produtivo de cada local dentro de uma lavoura. A diferenciação de desenvolvimento da cultura dentro de um talhão, pelo índice de vegetação, poderia contemplar, por exemplo, três diferentes faixas de NDVI, que representariam diferentes potenciais de rendimento (baixo, médio e alto). A partir destas três faixas, se determinariam diferentes doses de N a serem

aplicadas em cada local da lavoura, em função de seu potencial produtivo estimado pelos valores de NDVI.

Esta forma de se manejar o N leva à redução na aplicação de insumos em locais onde o potencial produtivo é alto, onde as plantas estão bem supridas e não haveria resposta a altas doses de N aplicadas, porém sem comprometer a produtividade, e reduzindo a lixiviação de nitrato no solo. Segundo Lamothe (1994), quando elevadas quantidades de N forem absorvidas até o final do afilhamento, as plantas pouco responderão à adição de adubo nitrogenado em cobertura. Já em locais no talhão onde os valores de NDVI são intermediários, se utilizaria doses maiores de N, com o objetivo de elevar o potencial produtivo destes locais, uma vez que pode ter ocorrido menor desenvolvimento da cultura pela menor disponibilização do N pelo solo, o que poderia ser corrigido no momento de aplicação de N em cobertura.

Comparativamente à forma tradicional de aplicação de doses uniformes em toda a lavoura, na qual geralmente se adotam doses maiores para se atingir máximos rendimentos, este método levaria à redução do custo com este insumo, sem reduções de produtividade e, ainda, contribuindo para que não ocorram danos ao ambiente. É possível, ainda, que se consigam incrementos de produtividade em situações onde as doses empregadas são inferiores às que a cultura poderia responder em produtividade, quando esta for manejada para atingir altas produtividades.

4.1.2.3 Relação do NDVI com rendimento de grãos de trigo em função das adubações nitrogenadas de base e de cobertura

No estágio de desenvolvimento de 6-7 folhas (Figura 6.d), quando já havia sido realizada a adubação em cobertura, ainda foram considerados, no ajuste das regressões entre NDVI e rendimento de grãos, apenas os pontos referentes aos tratamentos que não receberam N durante todo o desenvolvimento da cultura ou receberam apenas na adubação de base, sem suplementação de N em cobertura. A opção em não incluir os pontos referentes aos tratamentos que receberam adubação em cobertura nesta figura foi em função do pequeno intervalo de tempo (seis dias) entre a aplicação do N em cobertura e a realização da leitura de NDVI.

A partir deste estágio, todas as regressões ajustadas passam a apresentar significância do coeficiente de determinação ao nível de 1% de probabilidade (Apêndice 5). O coeficiente de determinação (r^2) de 0,75 observado para o ajuste das quatro cultivares (Figura 6.d) é função do aumento da biomassa acumulada na parte aérea e maior cobertura do solo. Assim, a superfície de fundo não exerce, a partir deste estágio, influência sobre o NDVI. Teal *et al.* (2006), avaliando o NDVI em milho, encontraram valores de r^2 de 0,77 entre NDVI e rendimento de grãos no estágio V6-V7, sendo ainda possível o manejo da adubação nitrogenada para aumento do potencial produtivo. Em avaliações mais tardias (estádio V9), foi observada menor correlação, devido à saturação deste índice, porém possibilita auxiliar na tomada de decisão no manejo da adubação nitrogenada em um maior espaço de tempo.

No estágio de emborrachamento (Figura 6.f), os coeficientes de correlação individuais para as cultivares e para o ajuste das quatro cultivares foram todos significativos ao nível de significância de 1%. A partir desta fase de desenvolvimento, onde se atingiram os máximos valores de NDVI, os modelos

ajustados foram quadráticos (Apêndice 5), pois nesta fase provavelmente tenha ocorrido a saturação do NDVI.

Em sensoriamento remoto, o uso de funções exponenciais ou quadráticas é comum para expressar a relação da variável indicadora com o NDVI (Liu, 2006). Quando se utiliza o ajuste exponencial ou quadrático, encontra-se mais facilmente o patamar de máximos valores onde ocorre a saturação do NDVI, especialmente em situações com elevada variabilidade de valores do índice (Braga, 1995). No entanto, quando o número de pontos amostrados com altos valores de NDVI for baixo, esse tipo de ajuste tende a não detectar o patamar, levando à linearidade (Braga, 1995). Teal *et al.* (2006), trabalhando com NDVI em milho, utilizaram o sensor Greenseeker e ajustaram equações exponenciais para correlacionar esta variável com o rendimento de grãos, relatando que o fechamento do dossel em estádios nos quais a quantidade de biomassa é elevada levou à saturação deste índice de vegetação.

Na Figura 6.g, durante a fase de espigamento da cultura, as correlações foram ainda maiores entre NDVI e rendimento de grãos. À medida que a cultura atinge sua máxima biomassa, as correlações chegam aos máximos valores, demonstrando a estreita relação existente entre NDVI e rendimento de grãos. Já a relação existente entre biomassa da parte aérea e NDVI foi objeto de estudo de diversos autores, entre eles Moges *et al.* (2004) e Grohs *et al.* (2009), que observaram correlações significativas entre estas duas variáveis. Outro estudo em milho, no qual o valor do NDVI foi relacionado ao rendimento de grãos, foram reportados valores de $r^2=0,85$ durante o período vegetativo da cultura (Solari *et al.*, 2008).

No florescimento, que é o momento de maior acúmulo de biomassa, o valor do coeficiente de correlação, para o ajuste das quatro cultivares, alcançou um

valor máximo de $r^2=0,94$ (Figura 6.h). Portanto, as leituras de NDVI realizadas neste momento foram as que mais se correlacionaram com o rendimento de grãos, sendo este um estágio recomendado para se determinar o potencial de produtividade de uma área através deste índice de vegetação.

Tanto os valores de NDVI quanto os do rendimento de grãos quase sempre foram menores na condição de cultivo após milho, comparativamente à condição em que o experimento foi conduzido após soja, apesar de não ter sido realizada análise estatística conjunta entre os dois experimentos (Figuras 2 e 3). Isto é explicado pela disponibilidade de N no solo em função das características de maior relação C:N da palhada do milho, o qual libera o N imobilizado em seu tecido em decomposição mais lentamente que os resíduos da soja, mostrando que esta diferença tem influência sobre o desenvolvimento da cultura em sucessão.

De maneira geral, os maiores valores de NDVI se relacionaram a maiores produtividades por ocasião da colheita, tanto após milho quanto após soja (Figura 6). Esta relação também foi encontrada por Povh *et al.* (2008b), que, trabalhando com adubação em taxa variável em trigo, encontraram valores de NDVI mais elevados em áreas que tinham recebido maior dose de N e apresentaram maior potencial produtivo. Neste caso, o potencial produtivo foi proporcionado pela maior disponibilidade de nitrogênio, refletida pelo maior acúmulo de biomassa ao longo de toda a fase vegetativa da cultura e pela maior sobrevivência de afilhos.

Outro fator de grande influência no desenvolvimento das culturas de inverno no sul do Brasil são as condições meteorológicas. Alguns fatores que limitam a eficiência de uso do nitrogênio é a ausência de chuvas após a aplicação deste nutriente em cobertura. Isto foi observado no ano de 2009, no qual, após a aplicação de N em cobertura (20 de agosto, estágio de 5-6 folhas completamente

expandidas), registrou-se um período de 10 dias sem chuvas no terceiro decêndio de agosto, além de temperaturas do ar muito próximas às normais para este período do ano (Figura 8.a) e alta radiação solar (Figura 8.b).

No primeiro decêndio de setembro, quando as plantas se encontravam no estágio de oito folhas expandidas e iniciando o alongamento dos entrenós, que coincidiu com o momento de início das taxas máximas de absorção de N pelas plantas, registrou-se redução na radiação solar (Figura 8.b), fundamental para a geração de fluxo energético às plantas, e um volume de chuvas que atingiu 133 mm neste período (Figura 8.a).

Estes fatores, conjuntamente, diminuíram a eficiência na absorção do N aplicado em cobertura, pois, no segundo decêndio de setembro, também se registrou níveis de radiação solar mais baixos, além de um considerável volume de chuvas (100 mm). Já no terceiro decêndio de setembro, possivelmente ocorreram perdas de N por lixiviação, pois se registrou mais 127 mm de precipitação neste período, totalizando 361 mm neste mês. No mês de outubro, foram registrados níveis de precipitação pluvial pouco acima da normal para o período, temperaturas semelhantes às normais e a radiação solar em níveis acima da normal histórica para o período (Figura 8). Estes fatores permitiram bom desenvolvimento da cultura no período de florescimento e enchimento de grãos, que levaram a elevada produtividade.

4.1.2.4 Importância da relação entre NDVI e rendimento de grãos de trigo em estádios tardios.

A determinação do NDVI em estádios de desenvolvimento mais tardios (após emissão da oitava folha do colmo principal) pode não ter mais funcionalidade sobre estratégias de manejo da adubação nitrogenada para o

aumento da produtividade de grãos. Neste momento, o potencial de rendimento já está praticamente estabelecido, especialmente o componente número de espigas por m², restando os componentes número de grãos por espiga e peso do grão a serem definidos, este último com pequeno efeito sobre o rendimento final da cultura, por ser uma característica influenciada principalmente pelo genótipo.

No entanto, vislumbra-se outros usos potenciais das leituras de NDVI utilizando sensor óptico ativo realizadas a partir do emborrachamento até o florescimento da cultura do trigo.

No sul do Brasil, é comum a entrada na lavoura para realização de aplicações de fungicidas a partir do estágio de emborrachamento. Portanto, com o auxílio de um sistema de posicionamento global, a entrada na lavoura neste momento para aplicação de fungicidas seria um bom momento para se fazer leituras de NDVI de uma área agrícola, para posterior utilização destes dados para se confeccionar mapas da variabilidade espacial da área, sem necessidade de se fazer uma operação extra para realização destas leituras com sensor óptico ativo.

Assim, a medição do NDVI entre emborrachamento e florescimento da cultura possibilitaria a quantificação da biomassa da parte aérea. A biomassa, por sua vez, tem grande influência sobre as condições de microclima para o aparecimento de doenças no dossel da cultura. Desta maneira, se poderia direcionar maiores doses de fungicidas para as áreas nas quais as quantidades de biomassa são maiores, uma vez que as leituras de NDVI são positivamente correlacionadas com as quantidades de matéria seca (Grohs *et al.*, 2009).

Além disso, quando não há disponibilidade de monitores de produtividade, a medição georreferenciada do NDVI na fase de florescimento da cultura pode ser útil para confeccionar mapas de variabilidade espacial do potencial produtivo da

cultura em uma determinada lavoura ou talhão, em função da elevada correlação observada entre os valores de NDVI neste estágio e o rendimento de grãos de trigo (Figura 6.h). Junges (2007), trabalhando com NDVI obtido a partir de sensores orbitais (satélites), utilizou os valores de NDVI no florescimento para estimar produtividade de trigo no estado do Rio Grande do Sul.

Esses mapas também podem ser úteis na realização de amostragens de solo direcionadas (“*smart sampling*”) aos locais onde se detectam diferenças de desenvolvimento da cultura e produtividade, para que se faça a investigação das causas e, se possível, se proceda a correção necessária para elevar o potencial produtivo em locais de baixo potencial, detectados por baixos valores de NDVI. A partir destes mapas, é possível igualmente a identificação de locais dentro do talhão com maior remoção de nutrientes pelos grãos, através dos mapas de potencial produtivo estimado pelos valores de NDVI.

Outro uso potencial para as leituras de NDVI feitas entre os estágios de emborrachamento e florescimento da cultura é a predição do teor de proteína nos grãos de trigo, pois estas leituras seriam correlacionadas à quantidade de biomassa na área. O teor de proteína apresenta, de maneira geral, uma relação indireta com o NDVI, isto é, quanto maior for o rendimento de grãos (estimado pelo NDVI), menor será o teor de proteína no grão. Aplicações tardias de N para melhoria da qualidade de grãos foram objeto de trabalhos experimentais, como o de Fuertes-Mendizábal *et al.* (2010), que estudaram a qualidade de grãos de trigo em função de aplicações de doses de nitrogênio parceladas no afilhamento, alongação dos entrenós e surgimento da folha bandeira. Estes autores concluíram que o manejo da adubação nitrogenada tem significativo efeito em todos os parâmetros de qualidade, devido ao aumento no teor de proteína nos grãos. Dupont *et al.* (2006) relataram que aplicações de N na antese da cultura

melhoraram a qualidade de panificação de trigo, comparativamente aos tratamentos que não receberam aplicação deste nutriente neste estágio.

Desta forma, a utilização do NDVI medido por um sensor óptico ativo para quantificação do potencial produtivo da cultura no florescimento pode direcionar a aplicação de diferentes doses de N (adubação em taxa variável) para a melhoria da qualidade de grãos. Portanto, para os locais de menor potencial produtivo, as quantidades de N a serem aplicadas seriam menores do que para locais de alto potencial produtivo, pois nestes locais a elevada produtividade dilui os teores de N nos grãos, reduzindo seu teor de proteína e, conseqüentemente, sua qualidade para panificação. Assim, aplicações tardias de nitrogênio no florescimento da cultura, baseadas em leituras de NDVI, poderiam aumentar o teor de proteína nos grãos e elevar sua qualidade, agregando valor aos grãos no momento de sua comercialização.

Outra ferramenta que poderia ser utilizada para medição do NDVI de uma área seria o uso de imagens de sensores remotos orbitais (satélites) ou de imagens aéreas. A partir destas imagens, se poderia dividir a área em zonas de manejo ou faixas de maior ou menor potencial produtivo e, com base nesta divisão, direcionar as práticas de manejo, como a aplicação de fungicidas, fertilizantes nitrogenados ou amostragens direcionadas de solo, de acordo com a variabilidade espacial detectada pelo índice de vegetação.

Medições de NDVI apresentaram alta correlação com rendimento de grãos da cultura do trigo (Figura 6) e poderiam ser empregadas como uma ferramenta para definição de “zonas de manejo”, visando a aplicação de fertilizantes em taxa variável. Esse método consiste na definição e na demarcação a campo de divisas para setores do talhão onde serão aplicadas doses diferenciadas de algum

insumo. Este conceito subentende, além disso, que o tratamento seja feito uniformemente dentro de cada zona.

Conforme os resultados apresentados no presente estudo, o NDVI apresenta potencial para ser utilizado na detecção da variabilidade espacial causada por diferenças no suprimento de nitrogênio e para manejo deste fertilizante em cobertura. Em lavouras comerciais, estas diferenças são ocasionadas, entre outros fatores, pelas diferentes manchas de solo e textura encontradas numa área, que levam a diferentes níveis de suprimento de N durante o desenvolvimento da cultura, pois a adubação de base tradicionalmente é aplicada de forma uniforme no momento da semeadura. Portanto, as diferenças de desenvolvimento encontradas dentro de uma lavoura se devem à variação do potencial do solo em suprir N para a cultura.

Fatores que determinam diferentes ofertas de N são, por exemplo, locais onde a cultura anterior acumulou menor ou maior quantidade de resíduos culturais, bem como os locais onde a colhedora se deslocou ao longo da lavoura durante o momento da colheita e onde se acumulou maior volume de resíduos, levando a diferentes níveis de disponibilidade de N para a cultura implantada em sucessão. Este fato se torna cada vez mais perceptível à medida que se adotam automotrizes com maior largura útil da plataforma de colheita, em que a deposição da palha na lavoura se concentra em faixas menores.

Uma série de trabalhos de pesquisa tem estudado a aplicação do NDVI em diversas culturas. Dellinger *et al.* (2008) sugerem que este índice tem potencial para ser utilizado na recomendação de N em cobertura na cultura do milho. Já Schmidt *et al.* (2009) concluíram que leituras de reflectância em milho podem ser utilizadas para recomendações de adubação nitrogenada. A maior probabilidade de detectar variabilidades espacial e temporal com o uso do NDVI torna esta

possibilidade atraente para aumento da eficiência de utilização do N na produção de milho (Schmidt *et al.*, 2009).

Portanto, as diferenças de biomassa da parte aérea e a disponibilidade de N detectadas pelo NDVI deveriam ser levadas em consideração quando da adubação com N em cobertura em trigo. Isto evitaria a aplicação de uma dose única em áreas de uma lavoura onde há variabilidade espacial, o que pode levar a problemas relacionados à sub ou superfertilização em determinadas partes da lavoura, ou seja, doses menores ou maiores que a demanda real das plantas.

No entanto, para se utilizar algoritmos na determinação de doses de N em cobertura a partir de valores de NDVI é conveniente estabelecer um modelo padrão que possa ser empregado nas mais diversas cultivares de trigo disponíveis no mercado e para as diferentes restevas sob as quais será conduzida a cultura.

Para tanto, além da análise da correlação entre NDVI e rendimento de grãos das diferentes cultivares de trigo (Figura 6), analisou-se a significância dos modelos ajustados (Apêndice 5). Com base nesta análise, calculou-se o intervalo de confiança (IC) para cada um dos termos das regressões ajustadas para cada cultivar, considerando o modelo linear $y=a+bx$ ou o modelo quadrático $y=a+bx+cx^2$, para cada cultivar.

Os intervalos de confiança estão graficamente mostrados na FiguraS 9 e 10 para os termos “a” (Figura 9.a), “b” (Figura 9.b) e “c” (Figura 10) dos modelos ajustados para as diferentes cultivares para a relação entre NDVI e rendimento de grãos em diferentes estádios de desenvolvimento.

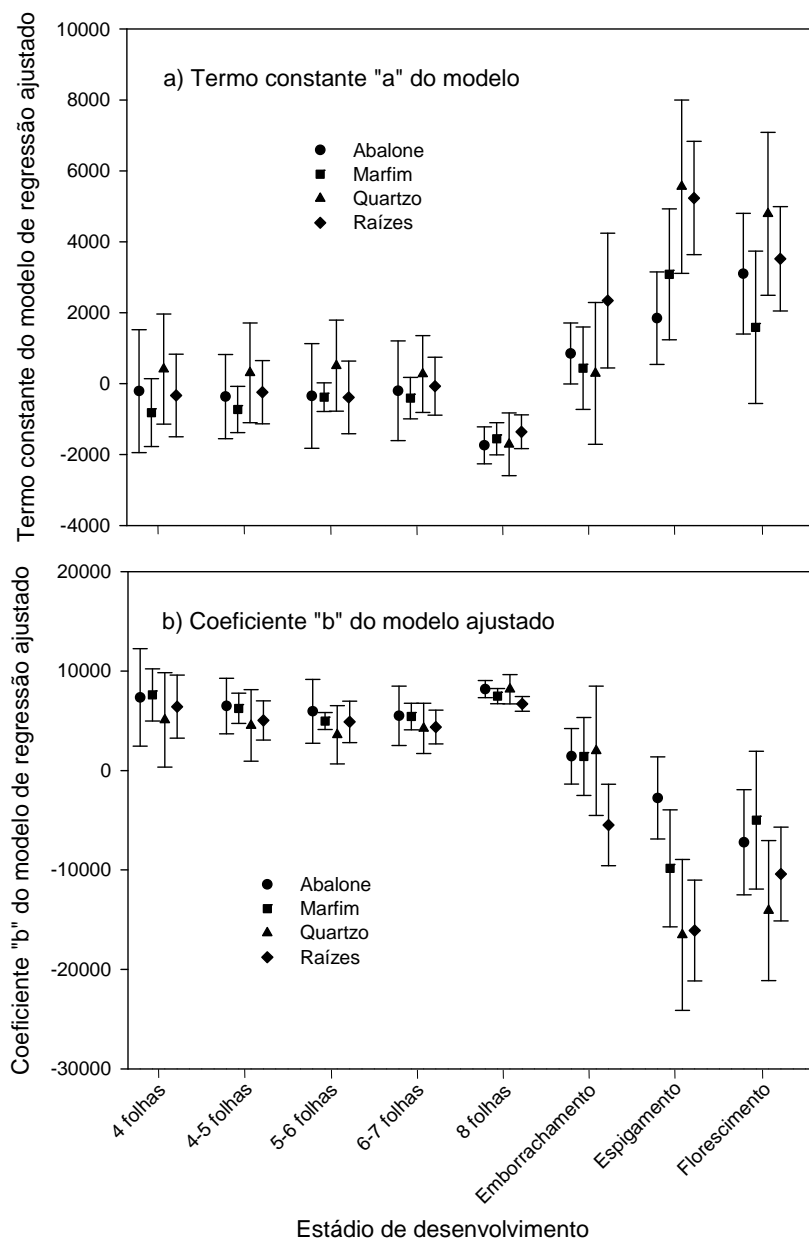


FIGURA 9. Termo constante (coeficiente “a”) (a) e termo linear (coeficiente “b”) (b) e seus intervalos de confiança (95% de confiança) dos modelos de regressão ajustados entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado em diferentes estádios de desenvolvimento e o rendimento de grãos para quatro cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2009.

Nas avaliações realizadas entre os estádios de quatro e oito folhas expandidas (Figura 6.a a Figura 6.e), os IC's foram calculados para os coeficientes das regressões lineares ajustadas, segundo o modelo $y=a+bx$, no qual “a” é o termo constante do modelo e “b” o coeficiente linear (Apêndice 5). Por outro lado, nas leituras de NDVI realizadas nos estádios de emborrachamento,

espigamento e florescimento, os coeficientes e seus intervalos de confiança correspondem aos ajustes quadráticos entre NDVI e rendimento de grãos, segundo o modelo $y=a+bx+cx^2$, onde “a” é o termo constante do modelo, “b” é o termo linear e “c” é o termo quadrático do ajuste.

A Figura 9 apresenta os intervalos de confiança do termo constante “a” (Figura 9.a) e do coeficiente “b” (Figura 9.b) para as regressões lineares ou quadráticas, conforme descrito acima para cada estágio de desenvolvimento. Na Figura 10, são apresentados os intervalos de confiança do coeficiente “c” do ajuste quadrático, ajuste este realizado somente nos estádios de emborrachamento, espigamento e florescimento.

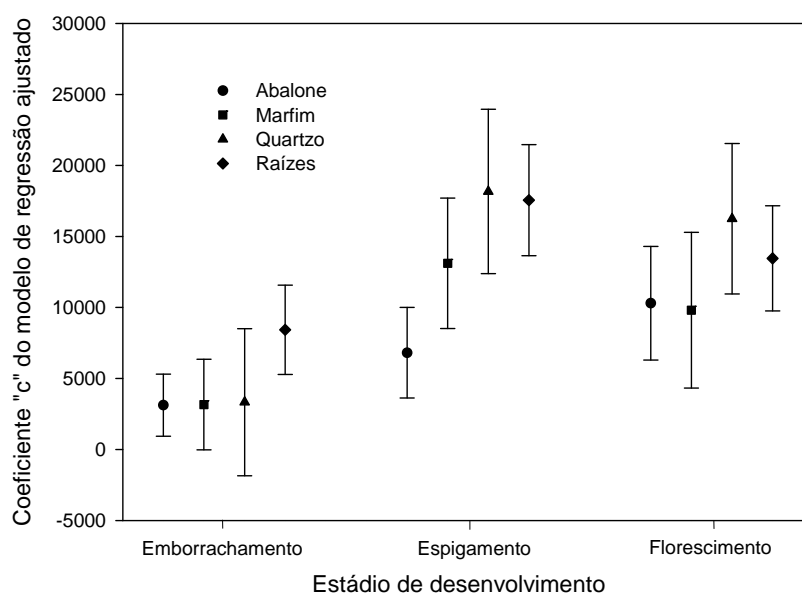


FIGURA 10. Termo quadrático (coeficiente “c”) e seu intervalo de confiança (95% de confiança) dos modelos de regressão quadrática ajustadas entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado em diferentes estádios de desenvolvimento e o rendimento de grãos para quatro cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2009.

O objetivo da análise e da comparação dos coeficientes dos modelos ajustados e seus intervalos de confiança foi avaliar se os modelos ajustados para as diferentes cultivares diferiam entre si ou não, ou seja, se um único modelo

válido para as quatro cultivares testadas poderia ser adotado para a relação entre NDVI e rendimento de grãos.

De maneira geral, as sobreposições dos intervalos de confiança dos coeficientes dos modelos ajustados em todos os estádios de desenvolvimento (Figuras 9 e 10) mostram o quanto o comportamento das cultivares de trigo foi similar em cada estágio de desenvolvimento para a relação entre NDVI e rendimento de grãos.

No estágio de espigamento, para o termo constante (Figura 9.a), não ocorreu sobreposição dos IC's entre as cultivares Abalone e Raízes. Para o coeficiente "b" das equações (Figura 9.b), houve sobreposição dos IC's entre as cultivares Marfim, Quartzo e Raízes. Para o coeficiente "c" (Figura 10), foi verificado comportamento semelhante ao verificado para o coeficiente "b", ocorrendo sobreposição dos IC's das cultivares Marfim, Quartzo e Raízes. Já no florescimento, houve sobreposição de todos os IC's para as quatro cultivares e para todos os termos dos modelos quadráticos ajustados, ou seja, constante "a" (Figura 9.a), coeficiente "b" (Figura 9.b) e coeficiente "c" (Figura 10).

Assim, a análise dos modelos ajustados para a relação entre NDVI e rendimento de grãos para as diferentes cultivares utilizadas mostrou que seria possível adotar um modelo único para descrever a relação entre estas duas variáveis, sem a necessidade de se adotar modelos individuais para cada cultivar utilizada no presente trabalho. Do ponto de vista de aplicação prática, este comportamento é desejável, uma vez que seria complexo o desenvolvimento de modelos específicos para cada cultivar, devido ao número de cultivares de trigo recomendadas e utilizadas pelos produtores.

Outra forma utilizada no presente trabalho visando comparar os modelos ajustados para as diferentes cultivares na relação entre NDVI e rendimento de grãos foi proceder-se a relativização da produtividade. Este procedimento foi adotado por Schmidt *et al.* (2011), que, trabalhando com sensor de reflectância em milho, relativizaram a quantidade de biomassa produzida, ao correlacionar esta variável com o NDVI e com os teores de nitrato no solo.

A relativização da produtividade foi feita tomando-se como base o maior rendimento médio de grãos observado no experimento para cada cultivar, ao qual foi atribuído o valor 1 (um). A partir deste, o rendimento médio dos demais tratamentos foi transformado em percentual relativo a este rendimento máximo. Esta análise foi realizada para dois estádios de desenvolvimento, ou seja, no estádio de 5-6 folhas expandidas (Figura 11.a), que é o estádio recomendado para a aplicação de nitrogênio em cobertura em cereais de estação fria, e no estádio de emborrachamento, estádio no qual foram observados os valores máximos de NDVI no presente trabalho (Figura 11.b).

Com a relativização da produtividade, foi possível “aproximar” as regressões para a relação entre NDVI e rendimento de grãos para cada uma das cultivares, especialmente para as cultivares Abalone, Marfim e Raízes no estádio de 5-6 folhas (Figura 11.a). Apesar da cultivar Quartzo apresentar uma regressão deslocada comparativamente às outras cultivares (Figura 11.a), os intervalos de confiança dos termos constante “a” e termo linear “b” da regressão linear (modelo $y=a+bx$) das quatro cultivares se sobrepõem (Figura 12), indicando que, ao nível de confiança de 95%, as regressões ajustadas não diferem significativamente entre si.

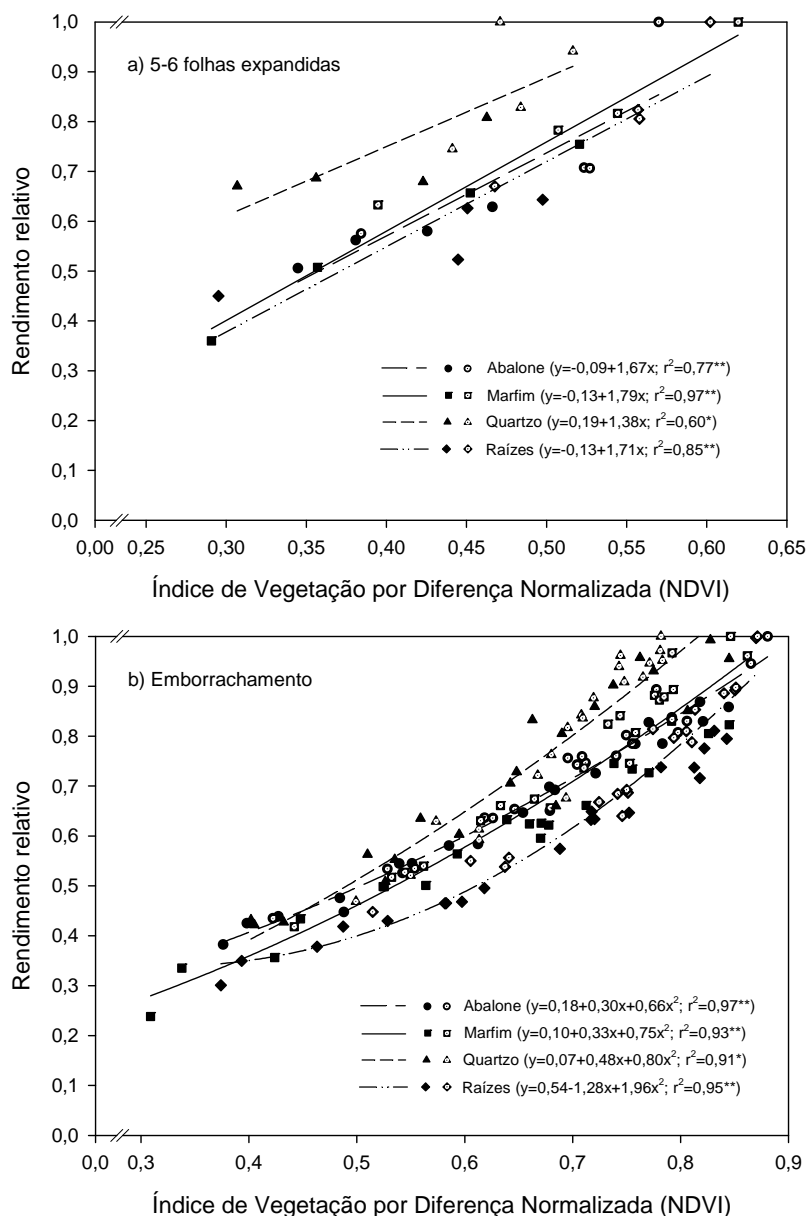


FIGURA 11. Relação entre rendimento relativo de grãos e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado nos estádios de 5-6 folhas expandidas (a) e emborrachamento (b) em quatro cultivares de trigo cultivadas após milho (símbolos cheios) e soja (símbolos vazados). Eldorado do Sul, RS, 2009.

Este padrão, onde as cultivares se comportam de forma similar, permite que se utilize um único ajuste para estimar o potencial produtivo no estágio de 5-6 folhas expandidas. Todas as cultivares apresentaram significância em suas regressões ajustadas, sendo que as cultivares Abalone, Marfim e Raízes apresentaram significância da regressão ao nível de 1%, enquanto que a cultivar

Quartzo apresentou significância ao nível de 5% (Apêndice 6). O uso desta metodologia de relativização das produtividades neste estágio de desenvolvimento melhorou o ajuste entre as regressões das quatro cultivares

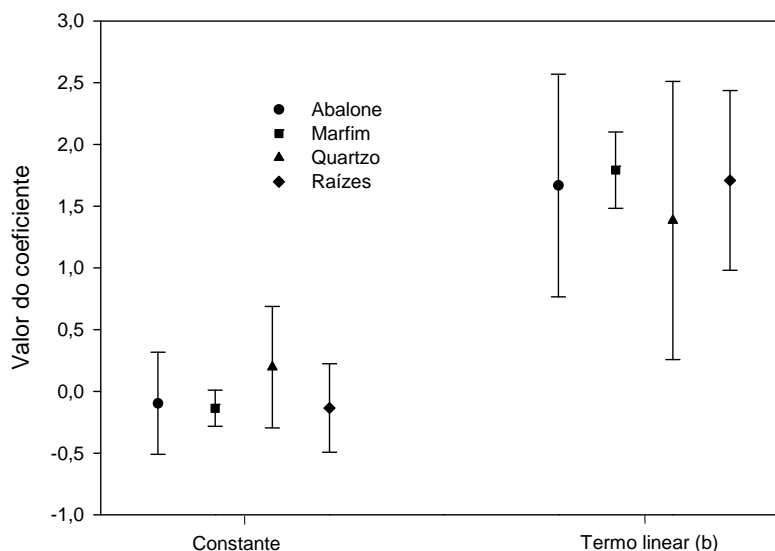


FIGURA 12. Termo constante “a” e termo linear “b” e seus intervalos de confiança a 95% de probabilidade dos modelos de regressão linear ajustados para a relação entre rendimento relativo de grãos e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado no estágio de 5-6 folhas expandidas de quatro cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2009.

No estágio de emborrachamento (Figura 11.b), no qual foram verificados os valores máximos de NDVI, também se relativizou o rendimento de grãos dos tratamentos em função do maior rendimento observado, ao qual foi atribuído o valor 1 (um). A análise estatística da relação entre NDVI avaliado neste estágio de desenvolvimento e rendimento relativo de grãos e os modelos ajustados para as diferentes cultivares são apresentados no Apêndice 6. Além disso, calculou-se o intervalo de confiança (IC) dos coeficientes “a”, “b” e “c” dos modelos quadráticos ajustados para cada cultivar. Estes intervalos estão mostrados graficamente na Figura 13.

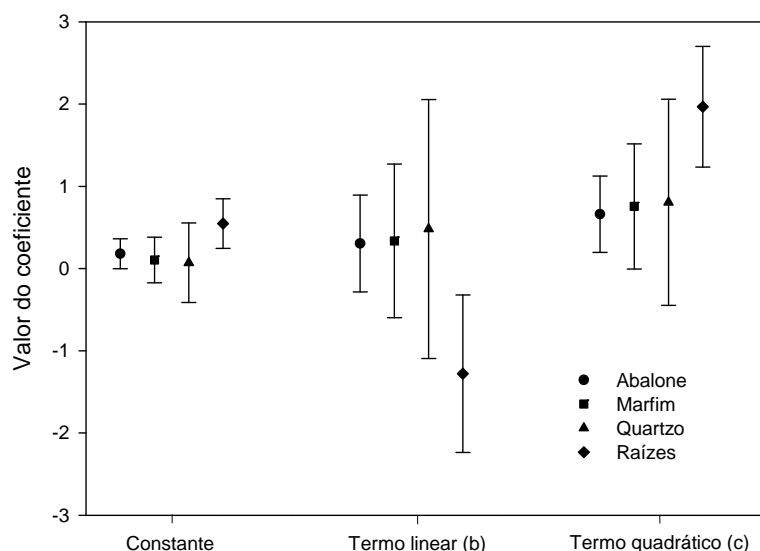


FIGURA 13. Termo constante “a”, termo linear “b”, termo quadrático “c” e seus intervalos de confiança a 95% de probabilidade dos modelos de regressão quadrática ajustados para a relação entre rendimento relativo de grãos e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado no estágio de emborrachamento de quatro cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2009.

A Figura 13 apresenta os IC’s do termo constante “a”, coeficiente “b” e coeficiente “c” para as regressões quadráticas (modelo $y=a+bx+cx^2$), pois este foi o modelo que melhor se ajustou para a relação entre leituras de NDVI realizadas neste estágio de desenvolvimento e rendimento de grãos da cultura. Os intervalos de confiança referentes a cada cultivar se sobrepõem para todas as cultivares no termo constante da regressão quadrática. Já para o coeficiente “b”, não houve sobreposição dos IC’s apenas entre as cultivares Abalone e Raízes.

O desafio para utilização do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) medido por sensor óptico ativo como ferramenta no manejo de nitrogênio em lavouras de trigo é o desenvolvimento e a aplicação de algoritmos que determinem/estimem a dose de fertilizante nitrogenado a ser aplicado em função dos valores deste índice de vegetação. Assim, uma alternativa seria trabalhar com intervalos/faixas de NDVI, para reduzir o efeito de cultivares. Desta maneira, as diferenças de NDVI entre cultivares seriam sobrepujadas pelas diferenças entre

as classes de potencial produtivo e as doses de N a serem aplicadas seriam fixas dentro de um determinado intervalo de valores de NDVI.

Este procedimento é sustentado por Grohs *et al.* (2009), que, trabalhando com classes de potencial produtivo, encontraram aumento do NDVI em função do incremento da biomassa ao longo dos valores críticos de cada classe de potencial produtivo. O aumento do NDVI foi mais importante que as diferenças de NDVI entre cultivares, tanto sobre resteva de milho quanto de soja. Isto indica que a diferença de valores de reflectância entre cultivares para a mesma classe de potencial produtivo não é relevante o suficiente para modificar a estimativa de seu potencial produtivo e, por isso, não há necessidade de realizar ajustes para cada grupo de cultivares.

Esse fato mostra que a utilização do sensor Greenseeker pode ser feita em diferentes cultivares, utilizando-se a mesma relação NDVI x potencial produtivo, mesmo que estas apresentem diferentes características agronômicas. A mesma conclusão foi obtida por Raun *et al.* (2005), que determinaram que o incremento do potencial produtivo, estimado a partir da leitura do NDVI no momento de aplicação de nitrogênio, era maior que a variabilidade entre os ensaios para a mesma leitura.

Outra estratégia possível de ser adotada para melhorar o manejo do N utilizando sensor óptico ativo, proposta por Dellinger *et al.* (2008), é a utilização de faixas de suficiência e faixas sem aplicação de N, onde se aplicam altas doses de N e ausência de adubação nitrogenada, respectivamente. A partir destas áreas, é possível avaliar o estado nutricional das plantas em relação ao N no restante da lavoura ou talhão, pela comparação entre os valores de NDVI medidos nestas áreas (suficiente em N e ausência de adubação nitrogenada) com os valores medidos no restante da área. Este tipo de comparação permitiria

detectar os máximos valores de NDVI que poderiam ser encontrados na lavoura e isto influenciaria as doses de N a serem aplicadas.

Os valores de NDVI observados no presente trabalho mostraram elevada sensibilidade em medir variações de biomassa da cultura. Isto é confirmado pelo fato das diferentes doses de N terem levado a diferentes valores de NDVI e estes terem sido correlacionados de maneira significativa com o rendimento de grãos, sendo a relação NDVI x biomassa bastante estreita, conforme Raun *et al.* (2005) e Grohs (2008). Alta correlação entre rendimento de grãos e NDVI foi encontrada para todas as cultivares que foram utilizadas neste estudo e para todos os estádios de desenvolvimento avaliados (Figura 6).

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a eficiência do sensor óptico ativo em detectar a variabilidade de desenvolvimento da cultura que, neste caso, foi gerada em função de diferentes doses de N aplicadas. Em lavouras comerciais, esta variabilidade é gerada pelas manchas de solo, posição no relevo, e erros na aplicação de fertilizantes, entre outros. Estas variações espaciais levam a diferentes necessidades de adubação nitrogenada em diferentes áreas da lavoura, que podem ser detectadas em tempo real no momento da realização da fertilização com N em cobertura. A partir do diagnóstico da condição de desenvolvimento das plantas e de estado nutricional, é possível a adoção de diferentes doses de N de acordo com a variabilidade existente.

Este tipo de prática pode levar à redução de doses de N aplicadas, como também à correção com aplicação de doses maiores de nitrogênio em cobertura em locais em que as plantas apresentam menor desenvolvimento, comparativamente ao que é esperado para aquelas condições de cultivo. Desta maneira, torna-se interessante a utilização de faixas de suficiência de N na área, para que seja possível detectar qual é a condição de desenvolvimento das plantas

que cada ano agrícola proporciona, com suas particularidades meteorológicas, para ser utilizado como referencial.

Os dados coletados neste estudo podem ser utilizados para outros fins que não apenas a adubação nitrogenada em cobertura no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas. Com a possibilidade de remuneração por qualidade de grãos na cultura do trigo, esta ferramenta passa a ser importante para quantificação de doses de N a serem aplicadas a partir do estágio de emborrachamento de acordo com o potencial produtivo de cada área dentro da lavoura, com o intuito de aumentar o teor de proteína nos grãos.

A otimização da eficiência de uso do nitrogênio aplicado é fundamental para se atingirem altas produtividades, para reduzir o impacto ambiental e aumentar a rentabilidade da atividade agrícola. O manejo racional do N se baseia em fornecer a quantidade necessária (adequada à demanda) em cada período em que são determinados e definidos os componentes do rendimento de grãos, para que o potencial destes possa ser concretizado. Por isto, existe a necessidade de se desenvolver metodologias mais precisas para quantificar a real necessidade das plantas e a quantidade de N a serem aplicadas em cobertura na cultura do trigo, com técnicas que permitam a aplicação de N em dose variável, como a técnica estudada no presente trabalho, a qual se baseia na avaliação da reflectância do dossel utilizando um sensor óptico ativo.

A principal vantagem deste equipamento é a possibilidade de realização de um grande número de amostragens não destrutivas e rápidas, permitindo a leitura em tempo real de diversos pontos da área produtiva. Ele viabiliza o processo de adubação a taxas variáveis de aplicação de N no momento em que as culturas estão no seu período de máxima exigência nutricional, possibilitando o aumento na eficiência da adubação nitrogenada em cobertura nos cereais de estação fria.

4.2 Resposta do rendimento de grãos e seus componentes em cultivares de trigo à disponibilidade de N na emergência e em cobertura

4.2.1 Resposta do rendimento de grãos de cultivares de trigo em função da disponibilidade de N na emergência e em cobertura

Para os cereais de estação fria, o nitrogênio é o nutriente com maior influência sobre o potencial produtivo. Diversos autores, como Bredemeier & Mundstock (2001), em trigo, Mundstock & Bredemeier (2001), em aveia, e Wamser & Mundstock (2007), em cevada, investigaram o efeito deste nutriente sobre o potencial produtivo e a melhor forma de manejá-lo para alcançar rendimentos máximos, estabelecendo o estágio de emissão da sexta folha do colmo principal como sendo o momento ideal para aplicação de N em cobertura.

Na Tabela 3, são apresentadas as médias do rendimento de grãos de cada tratamento, considerando o cultivo de trigo após milho e após soja. Como o resultado do teste F não foi significativo para a interação entre os fatores “dose de N” e “cultivar”, tanto após milho (Apêndice 7) quanto após soja (Apêndice 8), as médias são apresentadas em função do efeito principal de cada um destes dois fatores.

TABELA 3. Rendimento de grãos de quatro cultivares de trigo cultivadas após milho ou soja, em função da dose de nitrogênio aplicada na emergência e em cobertura no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas. Eldorado do Sul, RS, 2009.

Dose de N		Após milho				
Emerg.	Cobert.	Cultivar de trigo				Média
kg ha ⁻¹		Abalone	Marfim	Quartzo	Raízes	
0	0	1807	998	1742	1287	1459 m ¹
0	20	2115	1494	2324	1619	1888 l
0	40	2743	2366	2623	2123	2464 gh
0	60	3299	2624	3438	2778	3035 de
0	80	3270	2617	3323	2708	2980 def
20	0	2008	1406	1783	1497	1674 m
20	20	2575	2090	2490	1993	2287 hi
20	40	3056	2497	3008	2714	2819 ef
20	60	3706	3048	3953	3403	3528 abc
20	80	3909	3079	3548	3160	3424 c
40	0	2073	1820	1764	1792	1862 l
40	20	2573	2100	2282	1991	2237 i
40	40	3073	2607	2913	2460	2763 f
40	60	4104	3481	3727	3321	3658 ab
40	80	3708	3126	3842	3157	3458 bc
60	0	2247	2091	2098	1840	2069 ij
60	20	2759	2654	2726	2005	2536 g
60	40	3428	2773	3514	2769	3121 d
60	60	4055	3451	3945	3472	3731 a
60	80	3919	3377	4099	3066	3615 abc
Média		3021 a	2485 b	2957 a	2458 b	

Dose de N		Após soja				
Emerg.	Cobert.	Cultivar de trigo				Média
kg ha ⁻¹		Abalone	Marfim	Quartzo	Raízes	
0	0	2055	1754	1935	1918	1916 h
0	20	2484	2211	2533	2384	2403 g
0	40	3007	2826	3374	2931	3035 ef
0	60	3509	3527	3477	3411	3481 d
0	80	3526	3385	3620	3487	3505 d
20	0	2527	2169	2151	2356	2301 g
20	20	3089	2644	2979	2940	2913 f
20	40	3594	3087	3453	3469	3401 d
20	60	3708	3699	3908	3794	3777 c
20	80	3815	3658	4010	3654	3784 c
40	0	2523	2263	2599	2305	2423 g
40	20	3004	2753	3150	2741	2912 f
40	40	3586	3456	3752	3374	3542 d
40	60	3957	4055	3971	3820	3951 bc
40	80	3921	3748	4130	3844	3911 c
60	0	3572	2772	2445	2861	2913 f
60	20	3790	3127	2792	2966	3169 e
60	40	4222	3686	3791	3569	3817 c
60	60	4726	4194	3930	4270	4280 a
60	80	4467	4030	3879	4283	4165 ab
Média		3454 a	3152 a	3294 a	3219 a	

¹ Médias seguidas pela mesma letra na coluna ou linha não diferem significativamente entre si pelo teste t, ao nível de 5% de probabilidade.

Na condição após milho, na média de todos os tratamentos, as diferenças de produtividade entre as cultivares foram significativas (Tabela 3 e Apêndice 7). As cultivares Abalone e Quartzo não diferiram entre si e apresentaram média de produtividade superior às cultivares Marfim e Raízes, que também não diferiram significativamente entre si. Já na condição de cultivo após soja, as quatro cultivares não apresentaram diferenças significativas entre si para rendimento de grãos (Tabela 3 e Apêndice 8).

O menor rendimento de grãos foi registrado na condição de cultivo após milho, no tratamento sem aplicação de N, tanto na base como em cobertura, sendo igual a 1459 kg ha^{-1} , porém não diferindo significativamente do tratamento com aplicação de 20 kg ha^{-1} de N na base e sem aplicação de N em cobertura (1674 kg ha^{-1}) (Tabela 3). Na condição após soja, o rendimento de grãos mais baixo também foi registrado no tratamento que não recebeu aplicação de N, ou seja, 1916 kg ha^{-1} (Tabela 3).

O maior rendimento de grãos de trigo, no cultivo após milho, foi observado no tratamento com aplicação de 60 kg ha^{-1} de N na base (emergência das plantas) e 60 kg ha^{-1} de N em cobertura (estádio de 5-6 folhas), que, na média das quatro cultivares, atingiu 3731 kg ha^{-1} , não diferindo significativamente do tratamento com a mesma dose de N na base e 80 kg ha^{-1} de N em cobertura (3615 kg ha^{-1}). No cultivo após soja, o rendimento máximo, na média das quatro cultivares, também foi registrado para estas mesmas doses de N aplicadas, tanto na base quanto em cobertura ($60 \text{ kg ha}^{-1} + 60 \text{ kg ha}^{-1}$), atingindo rendimento de grãos de 4280 kg ha^{-1} (Tabela 3), também não diferindo significativamente do tratamento com aplicação da mesma dose de N na base e 80 kg ha^{-1} de N em cobertura (4165 kg ha^{-1}).

As maiores produtividades foram sempre observadas na condição de cultivo após soja, sendo que, para o mesmo tratamento com mesma dose de N na base e em cobertura, as produtividades registradas foram, na maioria das situações, cerca de 500 kg ha^{-1} superiores às encontradas na condição após milho. Estes resultados já eram esperados, em função da maior disponibilidade de N para o trigo cultivado em sucessão à cultura da soja. Incrementos de produtividade entre 300 e 600 kg ha^{-1} em trigo cultivado após soja, em comparação ao trigo cultivado após milho, também foram reportados por Poletto (2004) e Grohs (2008) no mesmo local de realização do experimento.

No cultivo de trigo após milho, a resposta ao N aplicado na base foi menor (Tabela 3). Isto pode ser função das condições meteorológicas no início do ciclo e da condição da resteva de milho em limitar a oferta de N à cultura do trigo implantada em sucessão. Na Figura 8.a, pode ser visualizada a ocorrência de 200 mm de precipitação no primeiro decêndio de agosto, pouco tempo após a aplicação do N na base, podendo ter ocorrido lixiviação do N. Logo, as maiores doses de N aplicadas na base pouco afetaram o rendimento de grãos.

Na condição de cultivo de trigo após soja, as diferentes doses de N aplicadas na base levaram a diferentes produtividades ao final do ciclo, onde a dose de base elevou a produtividade em cerca de 400 kg ha^{-1} no tratamento sem N na base e em cobertura, comparativamente ao tratamento que recebeu 20 kg ha^{-1} de N na base e sem aplicação de N em cobertura (Tabela 3). A diferença de produtividade não foi significativa para os tratamentos que receberam 20 ou 40 kg ha^{-1} de N na base e não receberam N em cobertura. Já para o tratamento com 60 kg ha^{-1} de N aplicados na base e sem aplicação de N em cobertura, comparativamente ao mesmo tratamento em cobertura (sem N) e 40 kg ha^{-1} de N

na base, apresentou produtividade significativamente superior em cerca de 500 kg ha⁻¹.

Ainda, na condição após soja, quando as plantas receberam N em cobertura na dose de 20 kg ha⁻¹, houve incremento significativo do rendimento de grãos entre o tratamento sem N e 20 kg ha⁻¹ de N aplicados na base, de aproximadamente 500 kg ha⁻¹ (Tabela 3). Já entre os tratamentos 20 e 40 kg ha⁻¹ de N aplicados na base e com a mesma dose de N em cobertura (20 kg ha⁻¹) não houve diferenças significativas de rendimento de grãos. No entanto, ao comparar as doses de 40 e 60 kg ha⁻¹ de N na base e mesma dose em cobertura de 20 kg ha⁻¹ de N, as diferenças foram significativas de aproximadamente 250 kg ha⁻¹ (Tabela 3).

Quando foram aplicados 60 kg ha⁻¹ de N em cobertura, os tratamentos de adubação de base sem N e 20 kg ha⁻¹ de N diferiram estatisticamente. Na comparação entre as doses de 20 e 40 kg ha⁻¹ de N na base, também não houve diferenças estatísticas. Já para os tratamentos de 40 e 60 kg ha⁻¹ de N na base, foram verificadas diferenças significativas na produtividade, sendo esta maior para o tratamento que recebeu 60 kg ha⁻¹ de N na base, conforme mostrado na Tabela 3.

Para os tratamentos que receberam 80 kg ha⁻¹ de N em cobertura, os tratamentos de base diferiram significativamente entre a dose de 20 kg ha⁻¹ de N na base e o tratamento sem N neste momento. Entre os tratamentos de base 20 e 40 kg ha⁻¹ de N, não houve diferença significativa, porém os tratamentos de 40 e 60 kg ha⁻¹ de N na base, diferiram estatisticamente entre si, sendo o maior rendimento para o tratamento de 60 kg ha⁻¹ de N aplicados na base. Para todas as doses de base (sem N, 20, 40 e 60 kg ha⁻¹ de N) em que se aplicou a mesma dose de 80 kg ha⁻¹ de N em cobertura, não foi encontrada diferença estatística de

produtividade comparativamente à dose de 60 kg ha⁻¹ de N em cobertura (Tabela 3). Já na condição após soja, foram observadas diferenças significativas para as doses maiores de N na base (Tabela 3).

Este comportamento diferenciado na condição de cultivo após soja, em que as doses de base foram capazes de contribuir mais significativamente com o rendimento de grãos, é produto de uma interação complexa entre as condições meteorológicas e os resíduos culturais de cada condição de cultivo com o N aplicado na base nestes tratamentos. A limitação na mineralização do N dos resíduos culturais do milho, que, em função da relação carbono/nitrogênio mais elevada, são mais lentamente degradados pelos microorganismos do solo, leva à imobilização temporária do N mineral aplicado no momento da adubação de base. Esta imobilização do N do solo, pelos microorganismos, pode limitar a disponibilidade deste nutriente para o desenvolvimento inicial das plantas no cultivo do trigo em sucessão ao milho.

Na condição de cultivo após soja, o N aplicado na base pode ter sido disponibilizado de forma mais rápida, comparativamente à condição após milho. Além disso, as quantidades iniciais de N já disponíveis para o desenvolvimento inicial do trigo, na condição após soja, fez com que as plantas se desenvolvessem de maneira mais rápida neste período inicial. Esta condição pode ter contribuído para que as plantas, na condição após soja, assimilassem níveis maiores do N aplicado na base, antes da ocorrência de grande volume de chuvas aos 20 dias após a aplicação do N por ocasião da emergência das plantas (Figura 8.a).

Após a aplicação do N na base, as temperaturas registradas (Figura 8.a) variaram entre 2,3°C (segundo decêndio de julho) e 5,5°C (terceiro decêndio de julho) abaixo das temperaturas médias históricas no período. Apesar da alta radiação solar (Figura 8.b) registrada no período final do mês de julho, este

momento coincidiu com as temperaturas mais baixas, quando o metabolismo das plantas e a atividade dos microorganismos do solo são baixos e a liberação de N proveniente da mineralização foi reduzida. No primeiro decêndio de agosto, as temperaturas médias registradas para o período foram de 1,6°C abaixo das médias históricas para o período, sendo um pouco mais favoráveis ao desenvolvimento das plantas, porém a radiação solar registrada foi reduzida (Figura 8.b). Temperaturas baixas no início do desenvolvimento das plantas determinam menor atividade fotossintética, resultando em menor acúmulo de fotossintatos (Throne & Wood, 1987).

A assimilação inicial do N pela planta de trigo foi limitada, por ser um processo metabólico de elevado custo energético, e a menor área foliar resultou em menor capacidade de interceptação da radiação incidente e geração de fluxo energético nas folhas. Assim, o potencial que as plantas chegaram no momento de aplicação do N em cobertura foi muito influenciado pelas condições meteorológicas registradas durante o período inicial de desenvolvimento da cultura.

Então, é provável que o grande volume de chuvas verificado no período posterior ao da aplicação do N na base da cultura de trigo (160 mm) tenha sido o fator determinante da menor resposta ao N aplicado no momento da emergência das plantas. Isto fica mais evidente na condição de cultivo após milho, onde se esperava que as maiores doses de N na base tivessem maior efeito em disponibilizar N para a cultura e levasse a maiores respostas em rendimento de grãos. Também a menor imobilização de N provavelmente tenha contribuído na diferenciação do desenvolvimento das plantas na condição de cultivo após soja, comparativamente à condição após milho, sendo que estas diferenças iniciais se mantiveram ao longo do ciclo.

Na comparação entre tratamentos com as mesmas doses totais de N aplicadas, verificou-se que as maiores doses aplicadas em cobertura sempre foram mais importantes em elevar o rendimento de grãos do que quando as doses maiores foram aplicadas na base, independente se após milho ou após soja (Tabela 3). Por exemplo, na condição após milho, a aplicação de 20 kg ha⁻¹ de N na base e 60 kg ha⁻¹ em cobertura produziu 3528 kg ha⁻¹ de grãos, enquanto que o tratamento com a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N na base e 20 kg ha⁻¹ em cobertura produziu 2536 kg ha⁻¹ de grãos. Isto demonstra a importância da adubação nitrogenada em cobertura no estágio de 5-6 folhas expandidas.

A ausência de resposta a doses maiores que 60 kg ha⁻¹ de N em cobertura se deu provavelmente em função da ocorrência de um período de 11 dias sem precipitação após a aplicação do N em cobertura (Figura 8.a). Apesar de ter ocorrido um período de boa disponibilidade de radiação solar (terceiro decêndio de agosto), a ausência de precipitação pode ter levado a perdas do N por volatilização e a não incorporação deste nutriente no perfil do solo. Além disso, ainda no período final de diferenciação das estruturas reprodutivas da cultura e momento de maior exigência com o início da alongação dos entrenós das plantas, houve a ocorrência de grande volume de precipitação pluvial (361 mm) no mês de setembro (Figura 8.a).

Considerando as informações técnicas da cultura do trigo (Reunião..., 2010), as doses totais de nitrogênio recomendadas para as condições de realização do experimento, considerando o cultivo de trigo após milho ou soja, seriam de 140 kg ha⁻¹ e 100 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, para expectativa de rendimento de 4,0 t ha⁻¹. Segundo Reunião... (2010), a dose de N a ser aplicada na semeadura varia entre 15 e 20 kg ha⁻¹ e o restante da dose deve ser aplicada em cobertura. No entanto, a cultura respondeu, no presente trabalho, até a dose

de 60 kg ha⁻¹ em cobertura (Tabela 4). Seguindo-se esta indicação, seria aplicada a dose em cobertura de 80 kg N ha⁻¹ na condição após soja e 120 kg ha⁻¹ após milho. Portanto, teriam sido aplicados 20 kg ha⁻¹ de N a mais do que a resposta máxima obtida para a condição após soja e 60 kg ha⁻¹ após milho. Este N aplicado não seria absorvido pela cultura e parte dele poderia ser lixiviado para águas subterrâneas, levando à contaminação do lençol freático, além de aumentar os custos de produção, uma vez que os fertilizantes nitrogenados representam elevado custo na cultura do trigo. Portanto, as doses de N recomendadas em cobertura pelas indicações técnicas da cultura (Reunião..., 2010), teriam sido superiores às máximas que se obteve resposta.

Considerando as indicações técnicas da cultura do trigo (Reunião..., 2010) e os resultados obtidos no presente trabalho, as doses de N na semeadura recomendadas segundo as indicações técnicas podem ser consideradas baixas, uma vez que as cultivares se mostraram responsivas a doses maiores de N na base, considerando as condições nas quais o experimento foi realizado.

Neste cenário, a utilização de ferramentas da agricultura de precisão, como o emprego de sensores ópticos ativos, teria sido eficiente em detectar os níveis de desenvolvimento e o estado nutricional da cultura em relação ao N. Desta forma, as doses aplicadas de N seriam mais condizentes com a real demanda das plantas, caso o potencial produtivo da cultura no momento de aplicação de N em cobertura fosse levado em consideração na determinação da dose de N a ser aplicada.

4.2.2 Resposta dos componentes do rendimento de grãos de cultivares de trigo em função da disponibilidade de N na emergência e em cobertura

Para a cultura do trigo, os componentes do rendimento têm grande importância na formação do rendimento final de grãos. A magnitude dos componentes está estreitamente relacionada à disponibilidade de nitrogênio para desenvolvimento da cultura e ao momento de sua aplicação. Desta forma, o rendimento de grãos de cada uma das cultivares foi correlacionado aos componentes do rendimento de grãos da cultura, ou seja, número de espigas por metro quadrado, número de grãos por espiga e peso do grão (Tabela 4).

Os coeficientes de correlação mais elevados foram observados entre rendimento de grãos e número de espigas m^{-2} para ambas as condições de cultivo (após milho e após soja), indicando que os níveis produtivos atingidos em cada tratamento e cultivar estiveram altamente correlacionados com o número de colmos produzidos por unidade de área.

TABELA 4. Coeficiente de correlação entre rendimento de grãos de quatro cultivares de trigo cultivadas após milho ou soja e os componentes do rendimento de grãos. Eldorado do Sul, RS, 2009.

Cultura antecessora	Cultivar	Rendimento de grãos vs.		
		Espigas m^{-2}	Peso do grão	Grãos espiga ⁻¹
Milho	Abalone	0,97**	0,73**	0,65**
	Marfim	0,89**	0,66**	0,73**
	Quartzo	0,95**	0,47*	0,65**
	Raízes	0,90**	0,76**	0,92**
Soja	Abalone	0,92**	0,63**	0,75**
	Marfim	0,95**	0,48*	0,49*
	Quartzo	0,94**	0,20 ^{ns}	0,72**
	Raízes	0,97**	0,68**	0,62**

*, **/ Significativo a 5% e 1%, respectivamente.

^{ns} não significativo

n=20

O número de espigas m^{-2} no momento da colheita é altamente dependente da sobrevivência dos afilhos emitidos no período inicial de desenvolvimento da cultura do trigo. Portanto, a oferta inicial de N na emergência das plantas tem grande importância em estimular o afilhamento da cultura, uma vez que o período de perfilhamento se estende, em média, da emissão da quarta até a oitava folha do colmo principal (Bredemeier & Mundstock, 2001).

A emissão de afilhos deve ocorrer a partir do estágio de três folhas completamente expandidas, pois, quanto mais cedo os afilhos forem emitidos, maior será sua chance de sobrevivência e produção de grãos (Longnecker *et al.*, 1993; Wobeto, 1994), contribuindo, desta maneira, para o rendimento final da lavoura. Seu desenvolvimento em sincronia com o colmo principal aumenta as chances destes sobreviverem (Masle, 1985; Mundstock & Bredemeier, 2002), ou seja, o período de tempo compreendido entre a emissão de duas folhas sucessivas (filocron) deve ser similar no colmo principal e nos afilhos. Logo, boas condições ambientais (radiação solar e temperatura do ar) e nutricionais, principalmente a disponibilidade de N no momento de emissão de afilhos, são fundamentais para que estes sejam emitidos mais cedo durante a ontogenia da planta e em maior número.

Assim, a prática da adubação nitrogenada em cobertura, que é recomendada no estágio de 5-6 folhas expandidas, apresenta pequeno efeito sobre o número total de afilhos emitidos, porém influencia a sobrevivência dos afilhos já emitidos até este momento (Shah *et al.*, 1994). Por outro lado, a adubação de base, por ocasião da semeadura ou da emergência da cultura, tem maior efeito sobre o número de afilhos emitidos (Longnecker *et al.*, 1993; Mundstock & Bredemeier, 2002).

A adubação nitrogenada em cobertura promoveu a sobrevivência de afilhos emitidos durante o período inicial de crescimento da cultura. O número de espigas m^{-2} aumentou significativamente com o aumento da dose de N aplicada em cobertura, no estágio de 5-6 folhas expandidas, tanto no cultivo após milho (Tabela 5) quanto após soja (Tabela 6).

TABELA 5. Número de espigas m^{-2} e grãos espiga $^{-1}$ em quatro cultivares de trigo cultivadas após milho, em função da dose de nitrogênio aplicada na emergência e em cobertura, no estágio de 5-6 folhas expandidas. Eldorado do Sul, RS, 2009.

Dose de N		Espigas m^{-2} (n°) / Cultivar				
Emerg.	Cobert.	Abalone	Marfim	Quartzo	Raízes	Média
0	0	329	319	291	402	335 l ¹
0	20	416	323	321	365	356 il
0	40	426	315	354	367	365 hij
0	60	475	418	387	467	437 def
0	80	506	422	429	446	451 de
20	0	366	293	295	332	322 l
20	20	434	360	334	403	383 hi
20	40	499	380	416	468	441 def
20	60	602	442	481	497	505 bc
20	80	592	473	487	456	502 bc
40	0	340	330	276	369	329 l
40	20	448	359	344	387	384 ghi
40	40	519	369	400	414	425 efg
40	60	634	490	479	485	522 ab
40	80	575	453	529	493	512 bc
60	0	435	391	281	347	364 hil
60	20	444	378	397	396	404 fgh
60	40	512	455	517	418	475 cd
60	60	638	559	494	551	561 a
60	80	598	502	494	473	517 bc
Média		489 a	401 b	400 b	427 b	
Dose de N		Grãos espiga $^{-1}$ (n°)				
Emerg.	Cobert.	Abalone	Marfim	Quartzo	Raízes	Média
0	0	18,0	9,9	18,0	12,6	14,6 h
0	20	16,6	14,4	20,8	16,7	17,1 g
0	40	21,0	22,6	21,4	21,5	21,6 ab
0	60	22,2	19,5	25,6	22,0	22,3 a
0	80	20,8	18,4	22,1	21,9	20,8 abc
20	0	18,2	14,1	17,1	17,4	16,7 g
20	20	18,8	16,4	21,1	17,9	18,5 defg
20	40	19,3	18,7	20,3	21,4	19,9 bcde
20	60	19,9	19,2	22,9	25,0	21,7 ab
20	80	20,7	18,3	20,2	25,2	21,1 ab
40	0	19,2	15,7	17,7	17,6	17,6 fg
40	20	18,3	16,2	19,2	18,6	18,1 efg
40	40	18,4	20,2	20,7	21,1	20,1 bcd
40	60	20,1	20,3	22,0	24,7	21,8 ab
40	80	20,0	19,7	20,1	22,9	20,7 abc
60	0	16,6	14,6	21,4	19,2	17,9 fg
60	20	19,7	19,3	19,0	18,4	19,1 cdef
60	40	20,7	16,7	18,9	23,5	19,9 bcde
60	60	19,8	16,7	21,9	22,1	20,1 bcd
60	80	20,0	19,2	23,9	23,2	21,6 ab
Média		19,4 b	17,5 c	20,7 a	20,6 a	

¹ Médias seguidas pela mesma letra na coluna ou linha não diferem significativamente entre si, pelo teste t, ao nível de 5% de probabilidade.

TABELA 6. Número de espigas m^{-2} e grãos espiga $^{-1}$ em quatro cultivares de trigo cultivadas após soja, em função da dose de nitrogênio aplicada na emergência e em cobertura, no estádio de 5-6 folhas expandidas. Eldorado do Sul, RS, 2009.

Dose de N		Espigas m^{-2} (n°) / Cultivar				
Emerg.	Cobert.	Abalone	Marfim	Quartzo	Raízes	Média
0	0	395	273	303	325	324 l
0	20	403	284	289	364	335 l
0	40	432	336	383	402	388 gh
0	60	526	440	380	491	459 cde
0	80	496	434	393	483	452 def
20	0	420	262	294	340	329 l
20	20	463	345	332	404	386 ghi
20	40	538	393	366	444	435 ef
20	60	562	389	406	521	470 cde
20	80	560	420	474	542	499 abc
40	0	425	276	336	355	348 il
40	20	441	344	366	394	386 ghi
40	40	482	408	415	448	438 ef
40	60	517	457	432	524	483 cd
40	80	504	444	494	536	495 bc
60	0	475	333	292	370	368 hij
60	20	538	388	320	429	419 fg
60	40	535	381	413	485	454 def
60	60	634	500	430	571	534 ab
60	80	643	494	449	569	539 a
Média		499 a	380 c	378 c	450 b	
Dose de N		Grãos espiga $^{-1}$ (n°)				
Emerg.	Cobert.	Abalone	Marfim	Quartzo	Raízes	Média
0	0	16,8	18,7	18,0	21,1	18,7 f
0	20	19,7	21,3	24,5	22,8	22,1 cde
0	40	22,2	23,4	23,7	25,0	23,6 abcd
0	60	20,0	22,2	25,7	23,9	23,0 abcde
0	80	21,9	21,8	25,1	24,8	23,4 abcd
20	0	18,2	22,7	20,4	24,0	21,3 de
20	20	20,0	21,3	24,3	24,7	22,5 abcde
20	40	20,4	21,8	25,5	26,9	23,7 abcd
20	60	20,1	26,6	26,2	25,2	24,5 ab
20	80	20,3	23,9	23,7	23,1	22,8 abcde
40	0	17,8	22,9	20,9	22,4	21,0 ef
40	20	20,9	21,9	24,1	23,7	22,7 abcde
40	40	22,5	22,7	24,6	26,4	24,0 abc
40	60	23,6	24,4	25,4	24,7	24,5 ab
40	80	24,0	23,1	23,4	24,9	23,8 abc
60	0	22,4	21,6	23,3	26,3	23,4 abcd
60	20	20,8	21,2	23,1	24,2	22,3 bcde
60	40	23,3	25,7	24,7	25,8	24,9 a
60	60	23,0	21,7	24,7	25,1	23,6 abcd
60	80	21,1	21,2	23,7	25,8	23,0 abcde
Média		19,4 b	20,9 c	22,5 b	23,7 a	24,5 a

¹ Médias seguidas pela mesma letra na coluna ou linha não diferem significativamente entre si, pelo teste t, ao nível de 5% de probabilidade.

O comportamento das quatro cultivares em relação ao número de espigas m^{-2} , na condição após milho e após soja, foi semelhante em função das doses de N, não ocorrendo interação significativa entre cultivares e doses de N (Apêndices 7 e 8). Porém, estas mostraram diferenças entre si no número de espigas, sendo que cultivar Abalone apresentou o maior número de espigas por m^2 do que as cultivares Marfim, Quartzo e Raízes, as quais não diferiram entre si no cultivo após milho (Tabela 5). Na condição após soja, a cultivar Abalone também

apresentou maior número de espigas m^{-2} por ocasião da colheita (Tabela 6). As cultivares Quartzo e Marfim apresentaram número de espigas por m^2 semelhante entre si, porém estatisticamente menores que o número de espigas m^{-2} da cultivar Raízes.

O número de grãos por espiga também foi correlacionado com o rendimento de grãos das diferentes cultivares de trigo, sendo observados coeficientes de correlação significativos em todas as situações (Tabela 4). Para a condição após milho, os valores do coeficiente de correlação variaram entre $r=0,65$, para as cultivares Abalone e Quartzo, e $r=0,92$, para a cultivar Raízes. Para a condição após soja, os valores variaram entre $r=0,49$, para a cultivar Marfim e $r=0,75$ para a cultivar Abalone (Tabela 4).

Esta alta correlação é dada em função do fato de que os tratamentos que tiveram maior rendimento de grãos terem sido aqueles que receberam maiores doses de N em cobertura. Assim, a aplicação de doses crescentes de N em cobertura influenciou a diferenciação de maior número de flores nas espiguetas (grãos potenciais), levando ao aumento no número de grãos por espiga. Isto é visualizado na Tabela 5, na condição após milho, que mostrou grande resposta às maiores doses de N aplicadas em cobertura, para cada dose de N aplicada na base.

Na condição após milho, o menor número de grãos por espiga (14,6) foi observado no tratamento que não recebeu N em nenhum momento do ciclo. Já o maior número de grãos por espiga foi registrado no tratamento sem N na base e 60 kg ha^{-1} de N em cobertura (22,3). A variação do número de grãos por espiga se deu, além da disponibilidade de N, em função da sobrevivência de afilhos, isto é, quanto menor foi o número de afilhos que sobreviveram e produziram espigas, maior foi o número de grãos por espiga, desde que as doses de N aplicadas

tenham sido suficientes para suprir a demanda das plantas para sobrevivência dos colmos e diferenciação de flores (Tabela 5). Na condição após soja, o maior número de grãos por espiga (24,9) foi registrado para o tratamento com aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N na base e 40 kg ha⁻¹ de N em cobertura (Tabela 6).

Para o componente do rendimento peso do grão, que é uma característica determinada geneticamente e apresenta menor variabilidade para uma mesma cultivar em função de fatores ambientais e nutricionais, foram observadas, de maneira geral, as correlações mais baixas com o rendimento de grãos, comparativamente ao número de espigas m⁻² e ao número de grãos por espiga. Para a condição de cultivo após milho, o coeficiente de correlação variou entre r=0,47, para a cultivar Quartzo, e r=0,76, para a cultivar Raízes (Tabela 4). Na condição após soja, as correlações das diferentes cultivares variaram entre r=0,20, para a cultivar Quartzo, e r=0,68, para a cultivar Raízes (Tabela 4).

As menores correlações deste componente com o rendimento de grãos ficam mais claras ao se analisar o peso do grão das diferentes cultivares (Tabela 7).

TABELA 7. Peso do grão em quatro cultivares de trigo cultivadas após milho ou soja, em função da dose de nitrogênio aplicada na emergência e em cobertura, no estádio de 5-6 folhas expandidas. Eldorado do Sul, RS, 2009.

Peso do grão (mg)						
Dose de N		Após milho				
Emerg.	Cobert.	Abalone	Marfim	Quartzo	Raízes	Média
0	0	30,2	32,1	33,8	25,5	30,4 i ¹
0	20	30,7	33,1	34,8	27,0	31,4 h
0	40	30,9	33,6	34,6	27,2	31,6 h
0	60	31,3	33,8	35,0	27,6	31,9 fgh
0	80	31,4	33,9	35,9	28,0	32,3 efg
20	0	30,8	34,1	35,3	26,4	31,6 gh
20	20	31,7	35,5	36,1	27,8	32,8 cde
20	40	31,6	35,2	35,6	27,8	32,6 def
20	60	31,8	35,9	36,1	28,1	32,9 bcd
20	80	32,2	35,7	36,9	27,7	33,1 bcd
40	0	32,1	35,4	36,1	27,6	32,8 cde
40	20	32,2	36,3	35,4	27,8	32,9 bcd
40	40	32,3	35,5	35,3	28,2	32,8 cde
40	60	32,4	36,3	35,4	27,9	33,0 bcd
40	80	32,4	35,3	36,1	28,2	33,0 bcd
60	0	31,3	36,6	35,6	27,6	32,8 cde
60	20	31,9	36,8	36,4	27,5	33,2 abcd
60	40	32,6	36,6	36,3	28,4	33,5 ab
60	60	32,7	37,3	36,5	28,5	33,8 a
60	80	33,2	36,5	35,6	28,4	33,4 abc
Média		31,8 b	35,3 a	35,6 a	27,7 c	
Após soja						
Emerg.	Cobert.	Abalone	Marfim	Quartzo	Raízes	Média
0	0	31,1 B d	35,8 A g	35,8 A f	28,0 C b	32,7
0	20	31,6 B d	36,7 A efg	36,8 A abcde	28,9 C ab	33,5
0	40	32,3 B cd	36,3 A fg	37,1 A abcde	29,2 C a	33,7
0	60	33,4 B abc	36,4 A fg	36,1 A def	29,2 C a	33,8
0	80	33,0 B abc	36,8 A defg	36,6 A bcdef	29,2 C a	33,9
20	0	33,0 B abc	36,6 A efg	36,0 A ef	29,1 C ab	33,7
20	20	33,6 B ab	36,6 A efg	37,0 A abcde	29,6 C a	34,2
20	40	32,8 B bc	36,1 A fg	37,1 A abcde	29,2 C a	33,8
20	60	33,0 B abc	36,1 A fg	37,0 A abcde	29,8 C a	34,0
20	80	33,6 B ab	36,6 A efg	36,0 A ef	29,6 C a	34,0
40	0	33,3 B abc	37,2 A cdef	37,4 A abc	29,1 C ab	34,2
40	20	33,2 B abc	37,1 A cdef	37,2 A abcd	29,4 C a	34,2
40	40	33,1 B abc	38,0 A bcd	37,2 A abcd	28,8 C ab	34,3
40	60	32,8 C bc	37,7 A bcde	36,3 B cdef	29,6 D a	34,1
40	80	33,6 B ab	37,1 A cdef	36,5 A bcdef	29,3 C a	34,1
60	0	33,8 C ab	38,6 A ab	36,2 B cdef	29,3 D a	34,5
60	20	33,9 B ab	38,2 A abc	37,7 A ab	29,6 C a	34,9
60	40	34,1 B a	38,0 A bcd	37,9 A a	29,2 C a	34,8
60	60	33,2 C abc	38,8 A ab	37,1 B abcde	29,9 D a	34,8
60	80	33,5 C ab	39,2 A a	36,7 B abcdef	29,8 D a	34,8
Média		33,1	37,2	36,8	29,3	

¹ Médias seguidas pela mesma letra minúscula (coluna) ou maiúscula (linha) não diferem significativamente entre si, pelo teste t, ao nível de 5% de probabilidade.

As cultivares Marfim e Quartzo apresentaram grãos com maior peso (Tabela 7), em ambas as condições de cultivo, indicando menor dependência deste componente do rendimento em determinar a produtividade da cultura (Tabela 4), uma vez que estas cultivares já apresentam, como característica genotípica, grãos de maior tamanho e peso.

Para a condição após milho, a análise estatística foi feita de forma conjunta para todas as cultivares, em função da não ocorrência de interação significativa entre cultivares e doses de N para a variável peso do grão (Apêndice 7).

Na média de todas as cultivares, o menor peso de grão foi registrado para o tratamento sem N na base e em cobertura (30,4 mg). Por outro lado, o maior peso de grão foi observado no tratamento que recebeu a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N na base (emergência) e 60 kg ha⁻¹ de N em cobertura, no estágio de 5-6 folhas expandidas (33,8 mg) (Tabela 7).

De maneira geral, para a condição após milho, este comportamento de maior peso de grão se deu em função da maior oferta de N, tanto na base quanto em cobertura. Este comportamento pode ser explicado pela presença de maior quantidade de clorofila por unidade de área foliar das plantas, isto é, quanto maior foi a dose de N aplicada, maior foi a capacidade das plantas em assimilarem carboidratos e alocá-los nos grãos, principalmente na forma de amido.

Para a condição de cultivo após soja, a análise de variância (teste F) para o componente peso do grão foi significativa para a interação entre doses de N e cultivares (Apêndice 8). Desta forma, a análise entre tratamentos e cultivares é apresentada de forma conjunta na Tabela 7.

O número de espigas por m² foi o principal componente do rendimento de grãos que determinou as maiores produtividades. Assim, a baixa disponibilidade de N, especialmente no período final do afilhamento, reduz a sobrevivência de afilhos e a quantidade final de espigas por área (Mundstock & Bredemeier, 2002). Além disso, aplicações de N no período inicial de desenvolvimento (base) são de extrema importância para promover o afilhamento inicial da cultura e possibilitar o início da diferenciação das estruturas reprodutivas até o momento da adubação de cobertura (Masle, 1985). Se faz necessário dar importância especial às doses

de N na base nas condições de cultivo após milho, pois esta condição imobiliza o N que estaria disponível ao desenvolvimento da cultura. Logo, a deficiência neste momento pode limitar o número de espigas m^{-2} e o número de grãos por espiga.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os valores do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) aumentaram ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo, sendo que os valores máximos deste índice foram observados, de maneira geral, no estágio de emborrachamento da cultura.

A variação dos valores do NDVI ao longo do ciclo foi afetada pela disponibilidade de nitrogênio, tanto na emergência das plantas quanto em cobertura. Quanto maior foi a dose de N aplicada na emergência das plantas, maior foi o valor do NDVI avaliado no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas. Além disso, os valores avaliados após o estágio de 5-6 folhas foram maiores quanto maior foi a dose de fertilizante nitrogenado aplicado em cobertura.

A avaliação do NDVI utilizando sensor óptico ativo foi um método preciso para diferenciar, ao longo do ciclo da cultura, diferentes condições de desenvolvimento proporcionadas pela variação na disponibilidade de nitrogênio.

As leituras do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) ao longo do ciclo utilizando sensor óptico ativo de reflectância se mostraram eficientes em identificar variações de produtividade na cultura do trigo. Assim, o potencial de produtividade pode ser estimado através de medições deste índice durante a ontogenia da planta.

A variação do NDVI entre cultivares em um mesmo estágio de desenvolvimento foi pequena, possibilitando o uso de um modelo comum que englobe as cultivares testadas no presente trabalho.

O uso desta tecnologia pode ser uma ferramenta eficiente para o produtor, auxiliando na tomada de decisão no manejo da cultura, de acordo com o potencial de rendimento estimado.

A informação fornecida pelo NDVI pode ser utilizada como base para a realização da adubação nitrogenada em taxa variável, ou seja, a variação da dose de acordo com a variabilidade espacial existente, permitindo o ajuste da fertilização nitrogenada em diferentes pontos da lavoura.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, T.S.; FONTANA, D.C. Desempenho dos índices de vegetação NDVI e PVI para a cultura da soja em diferentes condições hídricas e de sistema de manejo do solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p.17-22.

ARAÚJO, J.C.; VETTRAZZI, C.A.; MOLIN, J.P. Estimativa da produtividade e determinação de zonas de manejo, em culturas de grãos, por meio de videografia aérea. **Scientia Agricola**, Maringá, v.27, n.3, p.437-447, 2005.

BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M.R.; CARDOSO, L.S.; SILVA, M.I.G. **Clima da Estação Experimental da UFRGS e região de abrangência**. Porto Alegre: UFRGS, 2003, 78p.

BRAGA, H.J. **Previsão agrícola**: uma nova abordagem – uso de scanner aerotransportável e redes neurais. 1995. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

BREDEMEIER, C. **Predição da necessidade de nitrogênio em cobertura em trigo e aveia**. 1999. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BREDEMEIER, C.; GROHS, D.S.; POLETTO, N.; MUNDSTOCK, C.M. Variabilidade espacial de atributos de planta em lavouras de cevada e adubação nitrogenada em taxa variável. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA, 26., 2007, Passo Fundo, RS. **Anais...** Passo Fundo: EMBRAPA, 2007. p.129-138.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M. Estádios fenológicos do trigo para adubação nitrogenada em cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.2, p.317-323, 2001.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M.; GROHS, D.S.; MENEZES, G.B.; ARNS A.D.; COLLARES, F.C.; SOUZA, L.A.B. Variação do comportamento espectral em trigo ao longo do ciclo afetada pela disponibilidade de nitrogênio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO – CONBAP, 2008, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba, 2008. 1 CD-ROM,

CARTER, G.A.; KNAPPA, A.K. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. **American Journal of Botany**, West Oregon, v.88, n.4, p.677–684, 2001.

CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D.T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, Stockholm, v.31, n.2, p.132-140, 2002.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, quarto levantamento, janeiro/2011**. Brasília, 2011.

DALMOLIN, R.S.D.; GONÇALVES, C.N.; KLAMT, E.; DICK, D.P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.2, p.481-489, 2005.

DE BOER, J.L. **The management time economics of on-the-go sensing for nitrogen application**. Disponível em: <<http://www.agriculture.purdue.edu/>>. Acesso em: 15 set. 2009.

DELLINGER, A.E.; SCHMIDT, J.P.; BEEGLE, D.B. Developing nitrogen fertilizer recommendations for corn using an active sensor. **Agronomy Journal**, Madison, v.100, n.6, p.1546-1552, 2008.

DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004. 209p.

DRURY, C.F.; ZHANG, T.Q.; KAY, B.D. The non-limiting and least limiting water ranges for soil nitrogen mineralization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.67, n.5, p.1388-1404, 2003.

DUPONT, F.M.; HURKMAN, W.J.; VENSEL, W.H.; TANAKA, C.; KOTHARI, K.M.; CHUNG, O.K.; ALTENBACH, S.B. Protein accumulation and composition in wheat grains: Effects of mineral nutrients and high temperature. **European Journal of Agronomy**, Córdoba, v.25, n.2, p.96-107, 2006.

FENG, W.; YAO, X.; ZHU, Y.; TIAN, Y.C.; CAO, W.X. Monitoring leaf nitrogen status with hyperspectral reflectance in wheat. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.28, n.3, p.394-404, 2008.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos de sensoriamento remoto**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf>. Acesso em: 15 set. 2009.

FILELLA, I.; SERRANO, L.; SERRA, J.; PEÑUELAS, J. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. **Crop Science**, Madison, v.35, n.5, p.1400-1405, 1995.

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

FLOWERS, M.; WEISZ, R.; HEINIGER, R.; TARLETON, B.; MEIJER, A. Field validation of a remote sensing technique for early nitrogen application decisions in wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v.95, n.1, p.167–176, 2003.

FUERTES-MENDIZÁBAL, T.; AIZPURUA, A.; GONZÁLEZ-MORO, M.B.; ESTAVILLO J.M. Improving wheat breadmaking quality by splitting the N fertilizer rate. **European Journal of Agronomy**, Córdoba, v.33, n.1, p.52–61, 2010.

GAO, X.; HUETE, A.R.; NIF, W.; MIURA, T. Optical–biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.74, n.3, p.609-620, 2000.

GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C.; WEIDNER, V.R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, Washington, v.4, p.11–20, 1965.

GITELSON, A.A.; MERZLYAK, M.N.; LICHTENTHALER, H.K. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. **Journal of Plant Physiology**, Löbdergraben, v.148, p.501–508, 1996.

GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. Piracicaba: Livraria Nobel, 1990. 468p.

GROHS, D.S. **Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada pelo índice de vegetação por diferença normalizada**. 2008. 124 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

GROHS, D.S.; BREDEMEIER, C.; POLETTO, N.; MUNDSTOCK, C.M. Estimativa da biomassa e do potencial de rendimento de grãos em cevada através de medições de reflectância. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA, 26., 2007, Passo Fundo, RS. **Anais...** Passo Fundo: EMBRAPA, 2007. p.192-199.

GROHS, D.S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M.; POLETTO, N. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor Greenseeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.1, p.101-112, 2009.

HANSEN, P.M.; SCHJOERRING, J.K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.86, n.4, p.542-553, 2003.

HAUN, J.R. Visual quantification of wheat development. **Agronomy Journal**, Madison, v.65, n.1, p.116-119, 1973.

HONG, N.; SCHARF, P.C.; DAVIS, J.G.; KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A. Economically optimal nitrogen rate reduces soil residual nitrate. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.36, n.2, p.354-362, 2007.

HONG, S.D.; SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D.; SCHLEMMER, M.R. Comparison of ground-based remote sensors for evaluation of corn biomass affected by nitrogen stress. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Monticello, v.38, n.15-16, p.2209-2226, 2007.

INMAN, D.; KHOSLA, R.; WESTFALL, D.G.; REICH, R. Nitrogen uptake across site specific management zones in irrigated corn production systems. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, n.1, p.169-176, 2005.

IPAGRO. **Observações meteorológicas no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: IPAGRO, 1979. 272p. (Boletim Técnico, 3).

JACQUEMOUD, S.; USTIN, S.L. Leaf optical properties: a state of the art. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM PHYSICAL MEASUREMENTS & SIGNATURES IN REMOTE SENSING, 8., 2001, Aussois. **[Proceedings...]** Aussois, 2001. p.223-232

JAYNES, D.B.; COLVIN, T.S.; KARLEN, D.L.; CAMBARDELLA, C.A. ; MEEK, D.W. Nitrate loss in subsurface drainage as affected by nitrogen fertilizer rate. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.30, n.4, p.1305-1314, 2001.

JUNGES, A.H. **Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul**. 2007. 137f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S.T.; SCHARF, P.C.; PALM, H.L.; ROBERTS, D.F.; VORIES, E.D. Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v.102, n.1, p.71-84, 2010.

KOCH, B.; KHOSLA, R.; FRASIER, W.M.; WESTFALL, D.G.; INMAN, D. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones. **Agronomy Journal**, Madison, v.96, n.6, p.1572-1580, 2004.

LAMBERT, D.M.; DEBOER, J.L.; MALZER, G.L. Economic analysis of spatial-temporal patterns in corn and soybean response to nitrogen and phosphorus. **Agronomy Journal**, Madison, v.98, n.1, p.43-54, 2006.

LAMOTHE, A.G. **Manejo del nitrógeno para aumentar productividad en trigo**. Montevideo: INIA, 1994. 26 p. (Série Técnica, 54).

LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. 908p.

LONGNECKER, N.; KIRBY, E.J.M.; ROBSON, A. Leaf emergence, tiller growth, and apical development of nitrogen-deficient spring wheat. **Crop Science**, Madison, v.33, n.1, p.154-160, 1993.

MAMO, M.; MALZER, G.L.; MULLA, D.J.; HUGGINS, D.R.; STROCK, J. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.95, n.4, p.958-964, 2003.

MASLE, J. Competition among tillers in winter wheat: consequences for growth and development of the crop. In: DAY, W.; ATKIN, R.K. (Eds.). **Wheat growth and modeling**. New York: Plenum Press, 1985. p.33-54.

MILANI, L.; SOUZA, E.G.; URIBE-OPAZO, M.A.; GABRIEL FILHO, A.; JOHANN, J.A.; PEREIRA, J.O. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.28, n.4, p.591-598, 2006.

MOGES, S.M.; RAUN, W.R.; MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; JOHNSON, G.V.; SOLIE, J.B. Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.27, n.8, p.1431-1441, 2004.

MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão** - o gerenciamento da variabilidade. Piracicaba: ESALQ/USP, 2001. 83p.

MUNDSTOCK, C.M.; BREDEMEIER, C. Disponibilidade de nitrogênio e sua relação com o afilhamento e o rendimento de grãos de aveia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.31, n.2, p.205-211, 2001.

MUNDSTOCK, C.M.; BREDEMEIER, C. Dinâmica do afilhamento afetada pela disponibilidade de nitrogênio e sua influência na produção de espigas e grãos em trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.1, p.141-149, 2002.

NAGLER, P.L.; DAUGHTRY, C.S.T.; GOWARD, S.N. Plant litter and soil reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.71, n.2, p.207-215, 2000.

NTECH INDUSTRIES, UKIAH, CA, USA. **Greenseeker manuals downloads**. Disponível em: <<http://www.ntechindustries.com/greenseeker-manual.html>>. Acesso em: 15 set. 2009.

OVIEDO, A.F.P.; RUDORFF, B.F.T. Índice de área foliar e resposta espectral da cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.) submetida ao estresse hídrico. **Revista Biociências**, Taubaté, v.6, n.2, p.39-47, 2000.

PENA-YEWTUKHIW, E.M.; SCHWAB, G.J.; MURDOCK, L.W. Univariate distribution analysis to evaluate variable rate fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v.98, n.3, p.554-561, 2006.

PEÑUELAS, J.; FILELLA, I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. **Trends in Plant Science**, London, v.3, n.4, p.151-156, 1998.

PHILLIPS, S.B.; KEAHEY, D.A.; WARREN, J.G.; MULLINS, G.L. Estimating winter wheat tiller density using spectral reflectance sensors for early-spring, variable-rate nitrogen applications. **Agronomy Journal**, Madison, v.96, n.3, p.591-600, 2004.

POLETTI, N. **Disponibilidade de nitrogênio no solo e sua relação com o manejo da adubação nitrogenada**. 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PONTES, P.P.B.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C. Análise temporal de índices de vegetação como subsídio à previsão de safras de cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p.217-224.

POVH, F.P.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J.V. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.8, p.1075-1083, 2008a.

POVH, F.P.; GIMENEZ, L.M.; SALVI, J.V.; MOLIN, J.P. **Aplicação de nitrogênio em taxa variável em trigo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO – CONBAP, 2008, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba, 2008b. 1 CD-ROM

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; MARTIN, K.L.; FREEMAN, K.W.; MULLEN, R.W.; ZHANG, H.; SCHEPERS, J.S.; JOHNSON, G.V. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Monticello, v.36, n.19-20, p.2759-2781, 2005.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; THOMASON, W.E.; LUKINA, E.V. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agronomy Journal**, Madison, v.94, n.4, p.815-820, 2002.

RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, Madison, v.91, n.3, p.357-363, 1999.

REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE. **Informações técnicas para trigo e triticale – safra 2011**. Cascavel: Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola - COODETEC, 2010. 171p.

RINGUELET, A.; BACHMEIER, O.A. Kinetics of soil nitrogen mineralization from undisturbed and disturbed soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Monticello, v.33, n.19-20, p.3703-3721, 2002.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 214 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004.

ROUSE, J.W.; HASS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: THIRD Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington, D.C.: NASA, 1974. Volume I: Technical Presentations. p.309-317. (compiled and edited by Stanley C. Freden, Enrico P. Mercanti, and Margaret A. Becker)

RUDORFF, B.F.T.; MOREIRA, M.A.; FREITAS, J.G.; TARGA, M.S. Validade do modelo de eficiência do uso da radiação solar para estimativa de biomassa de cultivares de trigo sob estresse hídrico e nutricional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, Goiânia, 2005. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p.269-276.

SALA, V.M.R.; FREITAS, S.S.; DONZELI, V.P.; FREITAS, J.G.; GALLO, P.B.; SILVEIRA, A.P.D. Ocorrência e efeito de bactérias diazotróficas em genótipos de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.3, p.345-352, 2005.

SCHARF, P.C.; BROUDER, S.M.; HOEFT, R.G. Chlorophyll meter readings can predict nitrogen need and yield response of corn in the north-central USA. **Agronomy Journal**, Madison, v.98, n.3, p.655-665, 2006.

SCHMIDT, J.P.; DELLINGER, A.E.; BEEGLE, D.B. Nitrogen recommendations for corn: an on-the-go sensor compared with current recommendation methods. **Agronomy Journal**, Madison, v.101, n.4, p.916-924, 2009.

SCHMIDT, J.P.; BEEGLE, D.B.; ZHU, Q.; SRIPADA, R. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor. **Field Crops Research**, Warwick, v.120, n.1, p.94-101, 2011.

SEMBIRING, H.; LEES, H.L.; RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; DELEON, M.J.; LUKINA, E.V.; COSSEY, D.A.; LARUFFA, J.M.; WOOLFOLK, C.W.; PHILLIPS, S.B.; THOMASON, W.E. Effect of growth stage and variety on spectral radiance in winter wheat. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.23, n.1, p.141-149, 2000.

SERRANO, L.; FILELLA, I.; PEÑUELAS, J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. **Crop Science**, Madison, v.40, n.3, p.723-731, 2000.

SHAH, S.A.; HARRISON, S.A.; BOQUET, D.J.; COLYER, P.D.; MOORE, S.H. Management effects on yield and yield components of late-planted wheat. **Crop Science**, Madison, v.34, n.5, p.1298-1303, 1994.

SHAHANDEH, H.; WRIGHT, A.L.; HONS, F.M.; LASCANO, R.J. Spatial and temporal variation of soil nitrogen parameters related to soil texture and corn yield. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, n.3, p.772-782, 2005.

SHANAHAN, J.F.; KITCHEN, N.R.; RAUN, W.R.; SCHEPERS, J.S. Responsive in-season nitrogen management for cereals. **Computers and Electronics in Agriculture**, Lincoln, v.61, n.1, p.51-62, 2008.

SINGH, B.; SINGH, Y.; LADHA, J.K.; BRONSON, K.F.; BALASUBRAMANIAN, V.; SINGH, J.; KHIND, C.S. Chlorophyll meter-and leaf color chart-based nitrogen management for rice and wheat in northwestern India. **Agronomy Journal**, Madison, v.94, n.4, p.821-829, 2002.

SLATON, M.R.; HUNT Jr., E.R.; SMITH, W.K. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. **American Journal of Botany**, West Oregon, v.88, n.2, p.278-284, 2001.

SOLARI, F.; SHANAHAN, J.; FERGUSON, R.; SCHEPERS, J.; GITELSON, A. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, Madison, v.100, n.3, p.571-579, 2008.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222p.

TEAL, R.K.; TUBANA, B.; GIRMA, K.; FREEMAN, K.W.; ARNALL, D.B.; WALSH, O.; RAUN, W.R. In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. **Agronomy Journal**, Madison, v.98, n.6, p.1488-1494, 2006.

THOMASON, W.E.; PHILLIPS, S.B.; RAYMOND, F.D. Defining useful limits for spectral reflectance measures in corn. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.30, n.7-9, p.1263-1277, 2007.

THORNE, G.N.; WOOD, D.W. Effects of radiation and temperature on tiller survival, grain number and grain yield in winter wheat. **Annals of Botany**, London, v.59, n.4, p.413-426, 1987.

TOEBE, M.; BRUM, B.; LOPES, S.J.; FILHO, A.C.; SILVEIRA, T.R. Estimativa da área foliar de *Crambe abyssinica* por discos foliares e por fotos digitais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.2, p.475-478, 2010.

TREMBLAY, N.; WANG, Z.; MA, B.L.; BELEC, C.; VIGNEAULT, P. A Comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.10, n.2, p.145-161, 2009.

WALBURG, G.; BAUER, M.E.; DAUGHTRY, C.S.T.; HOUSLEY, T.L. Effects of nitrogen nutrition on the growth, yield, and reflectance characteristics of corn canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v.74, n.4, p.677-683, 1982.

WAMSER, A.F. **Estádios críticos para suplementação nitrogenada em cevada**. 2002. 117 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

WAMSER, A.F.; MUNDSTOCK, C.M. Adubação nitrogenada em estádios fenológicos em cevada, cultivar “MN 698”. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.4, p.942-948, 2007.

WELSH, J.P.; WOOD, G.A.; GODWIN, R.J.; TAYLOR, J.C.; EARL, R.; BLACKMORE, S.; KNIGHT, S.M. Developing strategies for spatially variable nitrogen application in cereals, part I: Winter barley. **Biosystems Engineering**, Herts, v.84, n.4, p.481-494, 2003a.

WELSH, J.P.; WOOD, G.A.; GODWIN, R.J.; TAYLOR, J.C.; EARL, R.; BLACKMORE, S.; KNIGHT, S.M. Developing strategies for spatially variable nitrogen application in cereals II: Wheat. **Biosystems Engineering**, Herts, v.84, n.4, p.495-511, 2003b.

WOBETO, C. **Padrão de afilhamento, sobrevivência de afilhos e suas relações com o rendimento de grãos em trigo**. 1994. 102 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

WOOD, C.W.; REEVES, D.W.; DUFFIELD, R.R.; EDMISTEN, K.L. Field chlorophyll measurements for evaluation of corn nitrogen status. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.15, n.4, p.487–500, 1992.

WRIGHT, D.L.; RASMUSSEN, V.P.; RAMSEY, R.D.; BAKER, D.J. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. **GIScience and Remote Sensing**, Columbia, v.41, n.4, p.287-300, 2004.

WRIGHT, D.L.; RAMSEY, R.D.; RASMUSSEN, V.P.; ELLSWORTH, J.W. **Midseason nitrogen application using remote sensing**. Disponível em: <http://www.gis.usu.edu/ArcWebpage/inside_table/2002Presentions/2002wright.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2011.

7 APÊNDICES

APÊNDICE 1. Quadrados médios obtidos na análise de variância dos valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento do trigo cultivado após milho.

Causas de variação	Graus de liberdade	Estádio de desenvolvimento		
		4 ²	4-5	5-6
Parcelas principais				
Blocos	3	0,0030*	0,0034 ^{ns}	0,0015 ^{ns}
Cultivar (C)	3	0,0015 ^{ns}	0,0019 ^{ns}	0,0035*
Resíduo (a)	9	0,0005	0,0011	0,0007
Subparcelas				
Dose de N (N)	3	0,0160**	0,0566**	0,0938**
CxN	9	0,0003 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	0,0011 ^{ns}
Resíduo (b)	36	0,0003	0,0007	0,0011
CV Cultivar (%) ¹		7,8	9,0	6,5
CV Dose de N (%) ¹		6,1	7,6	8,1

Causas de variação	Graus de liberdade	Estádio de desenvolvimento				
		6-7	8	Emborrachamento	Espigamento	Florescimento
Parcelas principais						
Blocos	3	0,0105 ^{ns}	0,0181 ^{ns}	0,0163 ^{ns}	0,0167 ^{ns}	0,0288 ^{ns}
Cultivar (C)	3	0,0273*	0,0169 ^{ns}	0,0173 ^{ns}	0,0162 ^{ns}	0,0411*
Resíduo (a)	9	0,0041	0,0052	0,0100	0,0085	0,0089
Subparcelas						
Dose de N (N)	19	0,0949**	0,1549**	0,3420**	0,2378**	0,222**
C x N	57	0,0014 ^{ns}	0,0017 ^{ns}	0,0027 ^{ns}	0,0027 ^{ns}	0,0021 ^{ns}
Resíduo (b)	228	0,0016	0,0020	0,0040	0,0026	0,0025
CV Cultivar (%) ¹		14,8	12,7	15,7	13,9	14,3
CV Dose de N (%) ¹		9,3	7,9	9,9	7,7	7,6

¹ Coeficiente de variação

² Número de folhas completamente expandidas no colmo principal (Escala Haun).

^{ns} Não significativo

* Significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade

** Significativo pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 2. Quadrados médios obtidos na análise de variância dos valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento do trigo cultivado após soja.

Causas de variação	Graus de liberdade	Estádio de desenvolvimento		
		4 ²	4-5	5-6
Parcelas principais				
Blocos	3	0,00352 ^{ns}	0,00293 ^{ns}	0,00174 ^{ns}
Cultivar (C)	3	0,00642 ^{ns}	0,01175*	0,01059 ^{ns}
Resíduo (a)	9	0,00281	0,00272	0,00444
Subparcelas				
Dose de N (N)	3	0,00887**	0,02743**	0,04910**
CxN	9	0,00059 ^{ns}	0,00082 ^{ns}	0,00135 ^{ns}
Resíduo (b)	36	0,00057	0,00075	0,00089
CV Cultivar (%) ¹		13,4	11,1	13,1
CV Dose de N (%) ¹		6,0	5,8	5,9

Causas de variação	Graus de liberdade	Estádio de desenvolvimento				
		6-7	8	Emborrachamento	Espigamento	Florescimento
Parcelas principais						
Blocos	3	0,0179 ^{ns}	0,0311 ^{ns}	0,0166 ^{ns}	0,0002*	0,0106 ^{ns}
Cultivar (C)	3	0,0854*	0,0618 ^{ns}	0,0798*	0,0194 ^{ns}	0,0103 ^{ns}
Resíduo (a)	9	0,0140	0,0184	0,0180	0,0056	0,0075
Subparcelas						
Dose de N (N)	19	0,0490**	0,0760**	0,1624**	0,0832**	0,089**
C x N	57	0,0029 ^{ns}	0,0025 ^{ns}	0,0033 ^{ns}	0,0022 ^{ns}	0,0015 ^{ns}
Resíduo (b)	228	0,0022	0,0020	0,0025	0,0023	0,0013
CV Cultivar (%) ¹		22,7	21,2	18,8	10,1	11,9
CV Dose de N (%) ¹		9,1	7,0	7,1	4,7	5,0

¹ Coeficiente de variação

² Número de folhas completamente expandidas no colmo principal (Escala Haun).

^{ns} Não significativo

* Significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade

** Significativo pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 3. Valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em trigo cultivado após milho em diferentes estádios de desenvolvimento, em função da dose de N aplicada na emergência e em cobertura, no estádio de 5-6 folhas completamente expandidas, na média de quatro cultivares.

Dose de N		Estádio de desenvolvimento do colmo principal (Escala Haun)							
Emerg.	Cobert.	4	4-5	5-6	6-7	8	Emborra- chamento	Espiga- mento	Floresci- mento
0	0	0,26 c	0,29 c	0,31 d	0,30 j	0,38 g	0,37 i	0,42 m	0,44 m
0	20	0,26 c	0,29 c	0,31 d	0,33 ij	0,44 f	0,47 h	0,52 l	0,52 j
0	40	0,26 c	0,29 c	0,31 d	0,34 hi	0,51 e	0,59 f	0,64 hi	0,63 gh
0	60	0,26 c	0,29 c	0,31 d	0,34 hi	0,54 d	0,68 e	0,72 ef	0,72 de
0	80	0,26 c	0,29 c	0,31 d	0,34 hi	0,55 d	0,69 e	0,74 de	0,73 d
20	0	0,30 b	0,37 b	0,40 c	0,36 h	0,40 g	0,38 i	0,44 m	0,45 m
20	20	0,30 b	0,37 b	0,40 c	0,43 fg	0,53 de	0,56 f	0,61 ij	0,60 hi
20	40	0,30 b	0,37 b	0,40 c	0,44 ef	0,60 c	0,67 e	0,70 fg	0,69 ef
20	60	0,30 b	0,37 b	0,40 c	0,46 def	0,66 b	0,78 bcd	0,78 abc	0,77 ab
20	80	0,30 b	0,37 b	0,40 c	0,44 efg	0,64 b	0,76 cd	0,77 abc	0,77 bc
40	0	0,30 b	0,38 b	0,43 b	0,41 g	0,45 f	0,45 h	0,49 l	0,49 l
40	20	0,30 b	0,38 b	0,43 b	0,45def	0,53 de	0,55 fg	0,60 j	0,59 i
40	40	0,30 b	0,38 b	0,43 b	0,46cde	0,58 c	0,67 e	0,68 g	0,67 fg
40	60	0,30 b	0,38 b	0,43 b	0,49 c	0,66 b	0,79 bc	0,79 ab	0,78 ab
40	80	0,30 b	0,38 b	0,43 b	0,47 cd	0,64 b	0,78 cd	0,77 bcd	0,77 bc
60	0	0,33 a	0,43 a	0,49 a	0,49 c	0,52 de	0,52 g	0,58 j	0,57 i
60	20	0,33 a	0,43 a	0,49 a	0,52 b	0,60 c	0,64 e	0,67 gh	0,66 fg
60	40	0,33 a	0,43 a	0,49 a	0,55 ab	0,66 b	0,75 d	0,75 cde	0,73 cd
60	60	0,33 a	0,43 a	0,49 a	0,56 a	0,72 a	0,84 a	0,81 a	0,81 a
60	80	0,33 a	0,43 a	0,49 a	0,53 ab	0,71 a	0,82 ab	0,80 ab	0,79 ab

¹ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste t, ao nível de 5% de probabilidade.

APÊNDICE 4. Valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em trigo cultivado após soja em diferentes estádios de desenvolvimento, em função da dose de N aplicada na emergência e em cobertura, no estádio de 5-6 folhas completamente expandidas, na média de quatro cultivares.

Dose de N		Estádio de desenvolvimento do colmo principal (Escala Haun)							
Emerg.	Cobert.	4	4-5	5-6	6-7	8	Emborra- chamento	Espiga- mento	Floresci- mento
0	0	0,36 b	0,41 c	0,43 c	0,40 h	0,48 l	0,47 h	0,56 h	0,54 n
0	20	0,36 b	0,41 c	0,43 c	0,44 g	0,54 j	0,59 g	0,66 g	0,64 l
0	40	0,36 b	0,41 c	0,43 c	0,45 g	0,59 hi	0,68 f	0,73 f	0,71 ij
0	60	0,36 b	0,41 c	0,43 c	0,45 g	0,62 gh	0,74 e	0,77 de	0,76 efg
0	80	0,36 b	0,41 c	0,43 c	0,44 gh	0,62 fg	0,74 e	0,78 cd	0,77 def
20	0	0,40 a	0,47 b	0,51 b	0,51 f	0,55 j	0,56 g	0,63 g	0,61 m
20	20	0,40 a	0,47 b	0,51 b	0,54 cde	0,62 gh	0,67 f	0,71 f	0,69 j
20	40	0,40 a	0,47 b	0,51 b	0,55 bcd	0,66 ef	0,74 e	0,75 e	0,74 gh
20	60	0,40 a	0,47 b	0,51 b	0,53 def	0,70 cd	0,79 c	0,80 bc	0,79 abcd
20	80	0,40 a	0,47 b	0,51 b	0,52 ef	0,69cde	0,79 c	0,80 bc	0,78 cde
40	0	0,40 a	0,48 b	0,53 b	0,52 ef	0,56 ij	0,58 g	0,64 g	0,62 m
40	20	0,40 a	0,48 b	0,53 b	0,55 bcd	0,62 gh	0,68 f	0,71 f	0,69 j
40	40	0,40 a	0,48 b	0,53 b	0,56 bcd	0,67 de	0,75 de	0,76 de	0,75 fgh
40	60	0,40 a	0,48 b	0,53 b	0,55 bcd	0,70 cd	0,79 c	0,80 bc	0,79 bcde
40	80	0,40 a	0,48 b	0,53 b	0,56 abc	0,70 bc	0,81 bc	0,81 ab	0,80 abc
60	0	0,41 a	0,50 a	0,56 a	0,56 bcd	0,63 fg	0,67 f	0,72 f	0,70 j
60	20	0,41 a	0,50 a	0,56 a	0,56 abc	0,67 de	0,74 e	0,76 e	0,74 hi
60	40	0,41 a	0,50 a	0,56 a	0,56 abc	0,69 cd	0,78 cd	0,78 cd	0,77 def
60	60	0,41 a	0,50 a	0,56 a	0,60 a	0,75 a	0,84 a	0,83 a	0,81 a
60	80	0,41 a	0,50 a	0,56 a	0,58 ab	0,73 ab	0,84 ab	0,82 ab	0,81 ab

¹ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste t, ao nível de 5% de probabilidade.

APÊNDICE 5. Modelos ajustados e resumo da análise estatística para a relação entre o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado em diferentes estádios de desenvolvimento e o rendimento de grãos em quatro cultivares de trigo.

a) Estádio de 4 folhas expandidas

Cultivar	Modelo ajustado	Coefficiente de determinação (R ²)	QM Regressão	Valor F	Significância
Abalone	y=-209,5+7345,6x	0,69	1483116,0	13,49	0,01
Marfim	y=-817,1+7599,0x	0,89	1862743,8	50,36	<0,01
Quartzo	y=412+5087,4x	0,53	390340,1	6,90	0,039
Raízes	y=-332,3+6422,9x	0,80	1442850,3	24,57	<0,01
Ajuste cv's^{1/}	y=-103,9+6264,1x	0,59	4561774,2	44,27	<0,01

^{1/} Ajuste considerando os valores das quatro cultivares.

b) Estádio de 4-5 folhas expandidas

Cultivar	Modelo ajustado	Coefficiente de determinação (R ²)	QM Regressão	Valor F	Significância
Abalone	y=-363,8+6482,1x	0,84	1807434,9	32,37	<0,01
Marfim	y=-724,9+6253,1x	0,94	1968071,4	101,27	<0,01
Quartzo	y=305,8+4531,9x	0,61	448249,5	9,56	0,021
Raízes	y=-240,2+5032,9x	0,87	1554454,5	38,75	<0,01
Ajuste cv's^{1/}	y=-105,9+5228,7x	0,67	5144432,9	61,52	<0,01

^{1/} Ajuste considerando os valores das quatro cultivares.

c) Estádio de 5-6 folhas expandidas

Cultivar	Modelo ajustado	Coefficiente de determinação (R ²)	QM Regressão	Valor F	Significância
Abalone	y=-345,6+5957,1x	0,77	1659221,3	20,60	<0,01
Marfim	y=-380,3+4968,2x	0,97	2024592,6	202,21	<0,01
Quartzo	y=508,6+3597,4x	0,60	438319,1	9,03	0,024
Raízes	y=-385,6+4890,4x	0,85	1519952,9	33,14	<0,01
Ajuste cv's^{1/}	y=-18,9+4580,0x	0,65	4973885,7	55,70	<0,01

^{1/} Ajuste considerando os valores das quatro cultivares.

d) Estádio de 6-7 folhas expandidas

Cultivar	Modelo ajustado	Coefficiente de determinação (R ²)	QM Regressão	Valor F	Significância
Abalone	y=-198,8+5502,9x	0,77	1656095,5	20,43	<0,01
Marfim	y=-405,5+5425,6x	0,94	1964773,5	98,32	<0,01
Quartzo	y=271,8+4236,3x	0,74	536988,0	16,75	<0,01
Raízes	y=-72,2+4370,0x	0,87	1559928,2	39,79	<0,01
Ajuste cv's^{1/}	y=-78,1+4833,5x	0,75	5776094,2	92,33	<0,01

^{1/} Ajuste considerando os valores das quatro cultivares.

continuação APÊNDICE 5. Modelos ajustados e resumo da análise estatística para a relação entre o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado em diferentes estádios de desenvolvimento e o rendimento de grãos em quatro cultivares de trigo.

e) Estádio de 8 folhas expandidas

Cultivar	Modelo ajustado	Coefficiente de determinação (R ²)	QM Regressão	Valor F	Significância
Abalone	$y = -1737,1 + 8184,8x$	0,91	1,96e7	378,98	<0,01
Marfim	$y = -1555,1 + 7471,4x$	0,91	2,10e7	392,40	<0,01
Quartzo	$y = -1708,6 + 8174,1x$	0,77	1,67e7	124,90	<0,01
Raízes	$y = -1357,3 + 6702,1x$	0,90	2,07e7	328,56	<0,01
Ajuste cv's^{1/}	$y = -1369,1 + 7258,8x$	0,79	7,48e7	593,70	<0,01

^{1/} Ajuste considerando os valores das quatro cultivares.

f) Estádio de emborrachamento

Cultivar	Modelo ajustado	Coefficiente de determinação (R ²)	QM Regressão	Valor F	Significância
Abalone	$y = 851,5 + 1429,0x + 3122,3x^2$	0,97	1,04e7	659,59	<0,01
Marfim	$y = 436,1 + 1410,3x + 3165,7x^2$	0,93	1,06e7	229,50	<0,01
Quartzo	$y = 289,8 + 1983,1x + 3330,0x^2$	0,91	9,93e6	190,17	<0,01
Raízes	$y = 2342,8 - 5477,0x + 8429,9x^2$	0,95	1,09e7	348,14	<0,01
Ajuste cv's^{1/}	$y = 346,9 + 2226,5x + 2442,8x^2$	0,83	3,91e7	372,84	<0,01

^{1/} Ajuste considerando os valores das quatro cultivares.

g) Estádio de espigamento

Cultivar	Modelo ajustado	Coefficiente de determinação (R ²)	QM Regressão	Valor F	Significância
Abalone	$y = 1846,4 - 2766,1x + 6814,0x^2$	0,97	1,04e7	522,57	<0,01
Marfim	$y = 3081,8 - 9845,7x + 13116,2x^2$	0,94	1,08e7	279,42	<0,01
Quartzo	$y = 5555,4 - 16532,9x + 18164,5x^2$	0,95	1,03e7	340,97	<0,01
Raízes	$y = 5234,4 - 16094,0x + 17553,1x^2$	0,96	1,11e7	484,25	<0,01
Ajuste cv's^{1/}	$y = 3642,1 - 10128,0x + 12839,6x^2$	0,86	4,05e7	463,89	<0,01

^{1/} Ajuste considerando os valores das quatro cultivares.

h) Estádio de florescimento

Cultivar	Modelo ajustado	Coefficiente de determinação (R ²)	QM Regressão	Valor F	Significância
Abalone	$y = 3100,6 - 7209,0x + 10297,9x^2$	0,96	1,03e7	465,17	<0,01
Marfim	$y = 1590,4 - 4999,0x + 9809,1x^2$	0,93	1,08e7	264,45	<0,01
Quartzo	$y = 4789,1 - 14084,0x + 16246,8x^2$	0,96	1,04e7	454,51	<0,01
Raízes	$y = 3520,8 - 10411,8x + 13459,4x^2$	0,97	1,12e7	607,97	<0,01
Ajuste cv's^{1/}	$y = 3042,2 - 8585,1x + 12034,5x^2$	0,94	4,44e7	1164,5	<0,01

^{1/} Ajuste considerando os valores das quatro cultivares.

APÊNDICE 6. Modelos ajustados e resumo da análise estatística para a relação entre o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas e no emborrachamento e o rendimento relativo de grãos em quatro cultivares de trigo.

a) Estádio de 5-6 folhas expandidas

Cultivar	Modelo ajustado	Coefficiente de determinação (R ²)	QM Regressão	Valor F	Significância
Abalone	$y=-0,09+1,67x$	0,77	0,130	20,57	<0,01
Marfim	$y=-0,13+1,79x$	0,97	0,264	201,95	<0,01
Quartzo	$y=0,19+1,38x$	0,60	0,065	9,05	0,024
Raízes	$y=-0,13+1,71x$	0,85	0,186	33,12	<0,01
Ajuste cv's^{1/}	$y=0,01+1,52x$	0,65	0,551	54,99	<0,01

^{1/} Ajuste considerando os valores das quatro cultivares.

b) Estádio de emborrachamento

Cultivar	Modelo ajustado	Coefficiente de determinação (R ²)	QM Regressão	Valor F	Significância
Abalone	$y=0,18+0,30x+0,66x^2$	0,97	0,470	659,84	<0,01
Marfim	$y=0,10+0,33x+0,75x^2$	0,93	0,608	229,55	<0,01
Quartzo	$y=0,07+0,48x+0,80x^2$	0,91	0,582	190,17	<0,01
Raízes	$y=0,54-1,28x+1,96x^2$	0,95	0,598	348,35	<0,01
Ajuste cv's^{1/}	$y=0,03+0,65x+0,45x^2$	0,83	2,099	393,89	<0,01

^{1/} Ajuste considerando os valores das quatro cultivares.

APÊNDICE 7. Quadrados médios obtidos na análise de variância do rendimento de grãos e componentes do rendimento de grãos de trigo cultivado após milho.

Causas de variação	Graus de liberdade	Rendimento de grãos	Espigas m ⁻²	Grãos espiga ⁻¹	Peso do grão
Parcelas principais					
Blocos	3	192761,6 ^{ns}	6938,8 ^{ns}	5,081 ^{ns}	6,144 ^{ns}
Cultivar (C)	3	7216023,8**	139441,2**	178,116**	1104,303**
Resíduo (a)	9	205727,6	6935,7	11,198	2,911
Subparcelas					
Dose de N (N)	19	8246071,6**	87144,7**	67,432**	10,839**
C x N	57	96524,9 ^{ns}	4028,2 ^{ns}	11,201 ^{ns}	1,181 ^{ns}
Resíduo (b)	228	102740,2	3737,8	7,934	0,867
CV Cultivar (%) ¹		16,6	19,3	17,1	5,2
CV Dose de N (%) ¹		11,7	14,2	14,3	2,8

¹ Coeficiente de variação

^{ns} Não significativo

* Significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade

** Significativo pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 8. Quadrados médios obtidos na análise de variância do rendimento de grãos e componentes do rendimento de grãos de trigo cultivado após soja.

Causas de variação	Graus de liberdade	Rendimento de grãos	Espigas m ⁻²	Grãos espiga ⁻¹	Peso do grão
Parcelas principais					
Blocos	3	703529,7 ^{ns}	16695,4 ^{ns}	26,054 ^{ns}	5,024*
Cultivar (C)	3	1350183,6 ^{ns}	275789,4**	196,395**	1089,320**
Resíduo (a)	9	543941,5	5561,8	7,961	1,300
Subparcelas					
Dose de N (N)	19	7071899,4**	71118,6**	32,683**	4,331**
C x N	57	152497,0 ^{ns}	3168,2 ^{ns}	6,177 ^{ns}	1,248**
Resíduo (b)	228	105576,4	3330,7	11,698	0,736
CV Cultivar (%) ¹		22,4	17,4	12,3	3,3
CV Dose de N (%) ¹		9,9	13,5	14,9	2,5

¹ Coeficiente de variação

^{ns} Não significativo

* Significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade

** Significativo pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade

8 VITA

Clever Variani é filho de Gentil Variani e Iole Faccio Variani. Nasceu em Casca-RS, em 25 de outubro de 1979. Coursou o primeiro grau no Colégio Estadual Padre Marcos Rampi, em Serafina Corrêa-RS, e no Colégio Estadual Ildo Meneguetti, em Casca-RS. O segundo grau cursou no Colégio Estadual Wilson Luiz Maccarini, em Casca-RS.

Em 2003, ingressou no Curso de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em Porto Alegre-RS, onde graduou-se Engenheiro Agrônomo no ano de 2008.

Em 2009, ingressou no curso de Mestrado em Fitotecnia do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Porto Alegre-RS.