

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

MANEJO DO NITROGÊNIO EM CULTIVARES DE TRIGO BASEADO NO ÍNDICE  
DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)

Marcos Alexandre Turra  
Engenheiro Agrônomo/UFSM

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

Porto Alegre (RS), Brasil  
Setembro de 2016

### CIP - Catalogação na Publicação

Turra, Marcos Alexandre  
MANEJO DO NITROGÊNIO EM CULTIVARES DE TRIGO  
BASEADO NO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA  
NORMALIZADA (NDVI) / Marcos Alexandre Turra. -- 2016.  
90 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,  
2016.

1. Sensoriamento remoto. 2. Sensor de vegetação.  
3. Taxa variável. 4. Nitrogênio. I. Bredemeier,  
Christian, orient. II. Título.

MARCOS ALEXANDRE TURRA  
Bacharel em Agronomia - UFSM

## **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: 17.08.2016  
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 31.10.2017  
Por

CHRISTIAN BREDEMEIER  
Orientador - PPG Fitotecnia

CHRISTIAN BREDEMEIER  
Coordenador do Programa de  
Pós-Graduação em Fitotecnia

PAULO REGIS FERREIRA DA SILVA  
PPG Fitotecnia/UFRGS

DENISE CYBIS FONTANA  
PPG Fitotecnia/UFRGS

ANTÔNIO LUIS SANTI  
UFSM

CARLOS ALBERTO BISSANI  
Diretor da Faculdade de  
Agronomia

*“Não é o mais forte que sobrevive,  
nem o mais inteligente, mas o  
que melhor se adapta às  
mudanças.”*

Charles Darwin

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradecer a Deus por ter me conduzido aos melhores caminhos, realizando meus sonhos e me iluminando, de tal modo que as escolhas sejam sempre as melhores.

Agradecer de coração aos meus pais, Jaime Turra e Fátima, que me deram a vida, o exemplo, e as forças necessárias para sempre seguir em frente superando as dificuldades encontradas ao longo da minha existência.

A minha namorada, Lutiane Spohr, companheira de todas as horas sempre ao meu lado, proferindo palavras sábias e reconfortantes nos momentos de tensão e de triunfo.

A família de Irineu Spohr, pela amizade, apoio e confiança, onde jamais esquecerei e serei eternamente grato.

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

A CNPq, pela concessão da bolsa de estudo.

À UFRGS e ao PPG Fitotecnia, pela oportunidade de frequentar o Mestrado, dispondo de sua estrutura intelectual e física a fim de possibilitar o desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa.

Aos Professores Antônio Luis Santi, Denise Cybis Fontana e Paulo Regis Ferreira da Silva, pela participação na banca examinadora e pelas contribuições para o presente trabalho.

Agradecer de modo todo especial às pessoas que viabilizaram a realização e concretização do projeto de pesquisa, que me receberam em seu grupo e se tornaram mais que colegas, são hoje amigos, André Vian, Cecilia Giordano, Daniela Almeida, Jhonantan Alves, Murilo de Jesus, João Vanin, Elizandro Fochesato, Debora Favero e Maicon Drum.

Em fim, gostaria de encarecidamente agradecer a todos que contribuíram de uma forma ou de outra, para que eu pudesse alcançar este objetivo traçado e por serem parte desta conquista.

***Muito Obrigado!***

# MANEJO DO NITROGÊNIO EM CULTIVARES DE TRIGO BASEADO NO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)<sup>1</sup>

Autor: Marcos Alexandre Turra  
Orientador: Christian Bredemeier

## RESUMO

O nitrogênio (N) é um dos elementos mais importante para o desenvolvimento da cultura do trigo. A adubação nitrogenada para esta cultura é baseada em indicadores como a expectativa de rendimento da cultura, teor de matéria orgânica do solo e cultura antecessora.

Para a adubação nitrogenada, variáveis como biomassa e quantidade de N acumulado são componentes importantes, que podem ser utilizados para a estimativa do potencial produtivo da cultura, que, por sua vez, pode ser utilizado na quantificação da dose necessária de nitrogênio a ser aplicada. O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso do NDVI, medido por sensor óptico de vegetação, como ferramenta para estimativa da biomassa da parte aérea e quantidade de N acumulada em diferentes cultivares de trigo submetidas a diferentes doses de N na base e cobertura, bem como avaliar o uso deste índice na determinação da dose de N a ser aplicada em cobertura na cultura do trigo. Os experimentos foram conduzidos na Estação Experimental Agronômica da UFRGS (Eldorado do Sul, RS), em 2014 e 2015. Foram avaliados o NDVI durante o ciclo, biomassa acumulada, nitrogênio acumulado e o rendimento de grãos. O NDVI medido por sensor óptico correlacionou-se positivamente com as doses de N aplicadas na base, biomassa da parte aérea e quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea. Além disso, o valor deste índice avaliado no estágio de emborrachamento correlacionou-se positivamente com o rendimento de grãos da cultura. Foram desenvolvidos modelos para as relações entre NDVI e biomassa da parte aérea e entre NDVI e quantidade de N acumulada na parte aérea. Os dois modelos propostos neste trabalho apresentaram resultados satisfatórios, permitindo assim a utilização destes para a estimativa em tempo real da quantidade de biomassa e nitrogênio acumulado para as diferentes cultivares de trigo. A dose de máxima eficiência técnica de N em cobertura relacionou-se negativamente com o valor de NDVI avaliado no momento de aplicação.

---

<sup>1</sup>Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (90f.) Setembro, 2016.

# **NITROGEN MANAGEMENT IN WHEAT CULTIVARS BASED ON NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI)<sup>1</sup>**

Author: Marcos Alexandre Turra  
Adviser: Christian Bredemeier

## **ABSTRACT**

Nitrogen is one of the most important nutrients required for wheat development. Nitrogen rate determination is based on expected grain yield, soil organic matter content and previous crop. For nitrogen management, shoot biomass and N uptake are important components and should be used for estimating grain yield potential and optimal topdressing nitrogen rates. The objective of this work was to evaluate the use of NDVI, measured by active canopy sensor, as a tool for estimating shoot dry biomass and N uptake in different wheat genotypes submitted to different N rates at plant emergence and at 5-6 fully developed leaves growth stage, as well as to evaluate the use of NDVI for determining optimum topdressing N rates. Field experiments were carried out in 2014 and 2015. NDVI, shoot biomass, N uptake and grain yield were evaluated. NDVI measured by optical sensor was positively correlated to N rates applied at plant emergence, shoot biomass and N uptake. Furthermore, this index at booting growth stage was positively related to grain yield. Models for the relationship between NDVI, shoot biomass and N uptake were developed. Both models proposed in this work presented good results, allowing its use for real-time estimation of shoot biomass and N uptake in different wheat genotypes. The N rate of maximum technical efficiency was negatively correlated with NDVI values measured at the moment of N topdressing.

---

<sup>1</sup>Master of Science dissertation in Plant Science, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (90p.) September, 2016.

## SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Aspectos gerais da cultura do trigo.....	6
2.2 Importância do nitrogênio na cultura do trigo.....	8
2.3 Sensoriamento remoto.....	11
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1 Caracterizações da área experimental, tratamentos e delineamento experimental.....	18
3.2 Avaliações realizadas.....	21
3.3 Análise dos dados.....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1 Efeito da dose de nitrogênio aplicada na base e em cobertura sobre o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), produção de biomassa e rendimento de grãos.....	25
4.1.1 Relação da dose de nitrogênio aplicada na base (emergência) sobre o valor do NDVI, produção de massa seca e quantidade de N acumulada na parte aérea na cultura do trigo no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas.....	25
4.1.2 Resposta do rendimento de grãos de três cultivares de trigo à disponibilidade de N na emergência (base) e em cobertura.....	30
4.1.3 Relação entre NDVI avaliado no estágio de emborrachamento da cultura do trigo e rendimento de grãos.....	35
4.2 Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado por sensor óptico ativo de vegetação para a estimativa da produção de biomassa e quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea, em diferentes cultivares de trigo.....	39
4.2.1 Relação entre NDVI avaliado no estágio de 5-6 folhas expandidas com biomassa acumulada na parte aérea e nitrogênio acumulado na parte aérea.....	39
4.2.2 Validações dos modelo desenvolvidos nos experimentos do ano de 2014utilizando avaliações realizadas nos experimentos conduzidos nos anos de 2015 .....	53

4.3 Determinações da dose de máxima eficiência técnica de nitrogênio em cobertura, em função do valor do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado por sensor ativo de reflectância.....	58
5. CONCLUSÕES.....	68
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

## RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Características físicas e químicas das amostras de solo retiradas das áreas experimentais antes da instalação dos experimentos. EEA/UFRGS, 2016.....	19
2. Descrição das cultivares utilizada nos experimentos conduzidos a campo nos anos de 2014 e 2015. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul (RS).....	20
3. Rendimento de grãos de três cultivares de trigo, em função da dose de nitrogênio aplicada na emergência e em cobertura, no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas. Eldorado do Sul, RS, 2014.....	31

## RELAÇÃO DE FIGURAS

Página

1.	Curva típica de reflectância da vegetação.....	12
2.	Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), avaliado no estágio de 5-6 folhas expandidas, em função de doses de nitrogênio aplicadas na base (emergência), para três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014. Barras indicam o desvio padrão da média.....	26
3.	Biomassa acumulada na parte aérea no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, em função de doses de nitrogênio aplicadas na base (emergência), para três cultivares de trigo Eldorado do Sul, RS, 2014. Barras indicam o desvio padrão da média.....	28
4.	Nitrogênio acumulado na parte aérea no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, em função de doses de nitrogênio aplicadas na base (emergência), para três cultivares de trigo Eldorado do Sul, RS, 2014. Barras indicam o desvio padrão da média.....	30
5.	Relação entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), avaliado no estágio de emborrachamento, e o rendimento de grãos, em três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.....	36
6.	Relação entre índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), avaliado no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, e quantidade de biomassa acumulada na parte aérea, em três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.....	40
7.	Relação entre índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), avaliado no estágio de 5-6 folhas expandidas, e quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea, em três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.....	44
8.	Modelos de regressão e seus intervalos de confiança (95% de confiança) entre índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e biomassa da parte aérea no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, em três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.....	46

9.	Modelos de regressão e seus intervalos de confiança (95% de confiança) entre índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea no estágio 5-6 folhas completamente expandidas, em três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.....	49
10.	Modelo de regressão única ajustada entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e a quantidade de biomassa acumulada na parte aérea no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, para três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.....	50
11.	Modelo de regressão ajustada entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e a quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, para três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.....	52
12.	Relação entre biomassa observada na parte aérea, avaliada no estágio de 5-6 folhas expandidas no experimento de 2015, e a biomassa estimada na parte aérea, utilizando modelo desenvolvido no experimento de 2014. Eldorado do Sul, RS, 2015.....	55
13.	Relação entre a quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea, avaliada no estágio de 5-6 folhas expandidas no experimento de 2015, e a quantidade de nitrogênio acumulada estimada na parte aérea, utilizando modelo desenvolvido no experimento de 2014. Eldorado do Sul, RS, 2015. □.....	57
14.	Resposta do rendimento de grãos na cultivar Quartzo à aplicação de doses de N em cobertura, para diferentes doses de N aplicadas por ocasião da emergência das plantas (base). Eldorado do Sul, RS, 2014.....	59
15.	Resposta do rendimento de grãos na cultivar TBIO Sintonia à aplicação de doses de N em cobertura, para diferentes doses de N aplicadas por ocasião da emergência das plantas (base). Eldorado do Sul, RS, 2014.....	61
16.	Resposta do rendimento de grãos na cultivar Iguaçu à aplicação de doses de N em cobertura, para diferentes doses de N aplicadas por ocasião da emergência das plantas (base). Eldorado do Sul, RS, 2014.....	62
17.	Relação entre a dose de máxima eficiência técnica (DMET) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) no estágio de 5-6 folhas expandidas, em três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.....	64

## 1 INTRODUÇÃO

O trigo é uma poácea do gênero *Triticum*, com cerca de 30 tipos geneticamente diferenciados. O *Triticum aestivum* é responsável por mais de 75% da produção mundial do trigo, por ser adequado à panificação. Esta espécie apresenta grande importância mundial, ocupando a segunda posição em termos de produção de grãos, sendo superado apenas pela cultura do milho. Apesar de o Brasil apresentar condições climáticas para a produção de trigo, há necessidade de importação desse produto para suprir parte da demanda interna.

O Brasil possui um consumo anual de trigo de aproximadamente 60 kg por habitante, correspondendo a, aproximadamente, uma demanda de 10 milhões de toneladas, o que faz do país um grande importador do cereal (EMBRAPA, 2014).

Segundo Mundstock (1999), a falta de incentivo à produção, a redução na área cultivada e as baixas produtividades são fatores decisivos para o déficit anual da produção brasileira de trigo. O grande desafio para a triticultura nacional é tirar o país da posição de grande importador e levá-lo à autossuficiência no abastecimento desse cereal, sendo importante observar igualmente o enfoque qualitativo.

Em relação à adubação nitrogenada, esta é considerada um dos principais fatores para a obtenção de elevadas produtividades de grãos, pois a cultura do trigo é altamente exigente em nitrogênio (N), o qual constitui o

macroelemento mais limitante na cultura, pois influencia o número de afixos emitidos e sobreviventes, o número de grãos por espiga e o peso e teor de proteína dos grãos. Plantas deficientes em nitrogênio apresentam-se amareladas e com crescimento reduzido, enquanto que o excesso de N pode causar acamamento de plantas.

Na planta, o nitrogênio é integrante de inúmeras moléculas orgânicas, entre as quais a clorofila, pigmento receptor da energia luminosa incidente, utilizada como propulsor da fotossíntese e vital ao desenvolvimento vegetativo e reprodutivo das plantas. Em função de sua importância, a quantidade de nitrogênio acumulada no tecido foliar, bem como a quantidade de clorofila nas folhas, são formas precisas de expressar o potencial produtivo da cultura e, conseqüentemente, a possível resposta da planta ao N.

A prática de adubação em cobertura com N é amplamente adotada como forma de maximização do potencial produtivo da cultura. Esta ferramenta é de extrema importância, sendo facilmente perceptível a ocorrência de erros na dose deste nutriente, tanto sub quanto super doses, ou em casos em que há a supressão da mesma. Para os cereais de estação fria no estado do Rio Grande do Sul, a recomendação da adubação nitrogenada é baseada no teor de matéria orgânica do solo, na cultura antecessora (poácea ou leguminosa) e expectativa de rendimento de grãos.

A forma como vem sendo utilizada a recomendação de adubação nitrogenada é simples e de fácil determinação, porém incompleta, já que o nitrogênio é um elemento muito dinâmico no solo, pois sofre diversos processos que modificam sua forma, entre os quais estão os processos microbianos de mineralização, imobilização e desnitrificação.

A absorção de nitrogênio pela cultura é variável entre safras e entre locais dentro de um mesmo talhão, mesmo quando o fornecimento de N, tanto do solo quanto aplicações de fertilizantes, são abundantes (Gastal & Lemaire, 2002). O fornecimento de nitrogênio do solo para a cultura varia de acordo com a heterogeneidade da área, conseqüentemente a demanda de nitrogênio pela cultura também apresenta variabilidade espacial. Portanto, o estado nutricional da cultura é um bom indicador para adaptar a dose de N a ser aplicada (Schächtl *et al.*, 2005).

A obtenção de informações adicionais no momento da recomendação da adubação nitrogenada é um grande diferencial, sendo que técnicas de sensoriamento remoto podem gerar esta informação através da leitura do dossel da cultura, e estes valores obtidos podem ser utilizados como indicadores indiretos do status nutricional da cultura, bem como de seu potencial produtivo.

As ferramentas de agricultura de precisão consideram a variabilidade espacial da cultura e as condições do solo. Em contraste, a agricultura convencional considera as áreas como homogêneas e utiliza, como recomendação doses uniformes de fertilizante, esperando produtividade semelhante para toda a área produtiva. Como os produtores não desejam que a produtividade seja limitada pela falta de nutrientes, doses excessivas podem ser aplicadas em áreas de baixo potencial produtivo. Sendo assim, a aplicação em taxa variável de N pode responder à variabilidade espacial da cultura e às características de solo, resultando em uso mais eficiente dos fertilizantes nitrogenados pela planta (Harmell *et al.*, 2004).

No caso do nitrogênio, é indispensável 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 realizadas pela caracterização das propriedades ópticas do dossel, que pode ser feita pela avaliação da reflectância.

Com os avanços tecnológicos na agricultura, sensores de reflectância (sensores de vegetação) estão se tornando mais presentes nas propriedades agrícolas. Com a presença dos equipamentos de aplicação em taxa variável, existe a necessidade de se detectar rapidamente a variabilidade das culturas e tomar decisões a campo. Alguns sensores estão mudando as práticas agrícolas, detectando a variabilidade e respondendo a essa variabilidade com decisões em tempo real (Inman *et al.*, 2005).

A partir do final da década de 90, a medição da reflectância foi adaptada para uso em nível terrestre, com o desenvolvimento de sensores ópticos proximais de reflectância montados em máquinas agrícolas, tais como Greenseeker<sup>R</sup>, N-Sensor<sup>R</sup> e Crop Circle<sup>R</sup>. A principal vantagem do uso destes equipamentos é a possibilidade de realização de um grande número de leituras em tempo real e com elevada resolução espacial. No presente trabalho, foi empregado o sensor óptico Greenseeker, que se baseia na avaliação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) sendo empregado para caracterizar diversos estresses nas plantas, incluindo a deficiência de N.

O presente trabalho teve, como objetivo geral, fornecer um modelo preliminar para manejo da adubação nitrogenada, empregando sensor ativo de reflectância, pelo ajuste de doses de N em cobertura em função do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

Como objetivo específico do trabalho, buscou-se:

- Desenvolver um modelo agronômico para estimativa da quantidade de biomassa e nitrogênio acumulado na parte aérea em trigo no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas do colmo principal, baseado na avaliação do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), em diferentes cultivares de trigo.
- Verificar a relação entre a reflectância do dossel e o rendimento de grãos no estágio de emborrachamento, para estimativa do potencial produtivo das plantas neste estágio.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aspectos gerais da cultura do trigo

A cultura do trigo é considerada uma das principais alternativas de cultivo de inverno no sul do Brasil (Schuch *et al.*, 2000). Colle (1998) estima que o cultivo de culturas de inverno possa reduzir em até 20% os custos das culturas de verão, através de seus benefícios ao sistema em relação à fertilidade do solo e ciclagem de nutrientes. O incremento de quantidade de palha no sistema de produção agrícola tem importante papel na redução da erosão do solo, bem como promove o sucesso do sistema de plantio direto na palha.

A cultura do trigo no Brasil atingiu área cultivada de 2,44 milhões de hectares na safra 2015, apresentando redução de 11% em comparação ao ano anterior, o qual apresentou área cultivada de trigo de 2,75 milhões de hectares. A produção nacional de trigo, em 2015, atingiu 5,53 milhões de toneladas, apresentando diminuição de 7,3% em relação à safra anterior, fruto da redução da área semeada (CONAB, 2016a).

Ao observarmos os rendimentos médios de grãos da cultura do trigo no Brasil e no estado do Rio Grande do Sul, estes podem ser considerados baixos, quando analisada a série histórica de produtividade. No estado do RS, a média de produtividade situa-se em  $1.955 \text{ kg ha}^{-1}$ , quando considerados os dados dos anos de 2000 a 2015. Entre os estados da Região Sul, Santa

Catarina possui a melhor média de produtividade ( $2.276 \text{ kg ha}^{-1}$ ), no período considerado (CONAB, 2016b). Em condições experimentais, obtiveram-se produtividades de trigo superiores a  $5.000 \text{ kg ha}^{-1}$ , 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, controle de moléstias fúngicas e utilização de cultivares de maior potencial produtivo tem contribuído para o aumento das produtividades nos últimos 30 anos. Em anos nos quais as condições meteorológicas são desfavoráveis para a cultura, tais como invernos e/ou primaveras com alta precipitação pluvial e/ou ocorrência de elevadas temperaturas do ar nos estádios iniciais de desenvolvimento, observa-se redução da média de produtividade.

Em relação à média de produtividade obtida atualmente em lavouras comerciais de trigo no estado do RS, esta está abaixo 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.*, 2008). Por conseguinte, a interação entre condições meteorológicas e manejo da cultura resulta em variações, de ano para ano, no potencial de produtividade de grãos e na necessidade de nitrogênio (N) pela cultura (Cassman *et al.*, 2002). Além disso, os programas de melhoramento genético da cultura vem buscando lançar cultivares com elevado potencial produtivo, surgindo a necessidade de utilização de maiores quantidades de insumos.

## 2.2 Importância do nitrogênio na cultura do trigo

Entre os elementos componentes da adubação, o nitrogênio é o que mais tem limitado a obtenção de elevados patamares produtivos na cultura do trigo.

Na natureza, o N é um dos elementos mais abundantes, no entanto na forma gasosa de  $N_2$ , o qual não está prontamente disponível para as plantas. Grande parte do reservatório de N no solo (cerca de 95%) está ligado à cadeia carbônica da matéria orgânica e menos de 5% do N total está em formas inorgânicas, como os íons amônio ( $NH_4^+$ ) e nitrato ( $NO_3^-$ ) (Sá, 1996).

Não obstante, são as formas inorgânicas de N que são absorvidas pelas plantas. Assim, transformações de formas de N no solo, denominadas de mineralização e imobilização, afetam diretamente a disponibilização deste nutriente às plantas. A mineralização consiste na transformação do N-orgânico em N-mineral e a imobilização na passagem de N-mineral para as formas orgânicas (Raij, 1991).

O nitrogênio na planta é constituinte de proteínas, enzimas, ácidos nucléicos e citocromos e, especialmente, integrante da molécula de clorofila (Bull, 1993), participando também de uma série de rotas metabólicas (Harper, 1994). Segundo Frank & Bauer (1996), a falta de nitrogênio em trigo no período de emergência das plântulas até a diferenciação do primórdio floral resulta na redução do número de espigas por área e do número de espiguetas por espiga.

Na planta, o sintoma de deficiência de nitrogênio caracteriza-se pelo surgimento de clorose generalizada das folhas, iniciando-se pelas folhas mais velhas (Carvalho *et al.*, 2003), podendo até mesmo promover queda prematura das folhas inferiores. A deficiência de nitrogênio é originada principalmente pela baixa disponibilidade de N pela matéria orgânica, perdas de N pela lixiviação,

volatilização, desnitrificação e erosão (IPNI, 2007). Harmell *et al.* (2004) mostraram quais as principais causas da baixa eficiência do uso do nitrogênio são a falta de sincronia entre o fornecimento de nitrogênio pelo solo e a demanda da cultura, a realização de aplicações a taxas uniformes de N em áreas com variabilidade espacial e a influência das condições meteorológicas adversas.

Na cultura do trigo, o nitrogênio é o nutriente mais limitante da produtividade, pois sua baixa oferta influencia fortemente o número de afilhos emitidos pela planta (Sala *et al.*, 2005), afetando negativamente 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 estágio de 5-6 folhas completamente expandidas no colmo principal como sendo o momento ideal para aplicação de N em cobertura nestas culturas.

Atualmente, a recomendação de doses de N 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..., 2015). Sabendo-se da existência de variabilidade espacial e temporal destes indicadores em áreas produtivas, opta-se pela aplicação de doses superiores de N, para garantir a suficiência deste nutriente (Poletto, 2004).

O emprego de outros indicadores para a recomendação da quantidade de fertilizante nitrogenado a ser aplicado, tais como a quantidade de nitrogênio acumulado no dossel e a biomassa acumulada da parte aérea, pode tornar o procedimento de recomendação mais preciso, uma vez que estes parâmetros

estão relacionados à resposta da planta à aplicação de fertilizantes nitrogenados. Entretanto, estas determinações são pouco utilizadas na prática, em virtude da demora no método de avaliação e por exigirem análise laboratorial (Bredemeier, 1999). Em contraste, a utilização do sensoriamento remoto tem a capacidade de avaliar grande número de indivíduos, avaliando a variabilidade espacial de uma cultura a campo (Feng *et al.*, 2008).

A baixa eficiência de uso do N está relacionada à estratégia atual de aplicação de taxas uniformes de fertilizantes nitrogenados em áreas espacialmente variáveis, apesar de numerosos estudos de campo indicar 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).

A utilização de aplicação de N à taxa uniforme a campo, ou seja, a aplicação de uma dose única em toda a área, não levando em consideração as diferenças espaciais no suprimento de N pelo solo, resulta em menor eficiência de uso do N (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, quando a aplicação de nitrogênio ocorre de maneira uniforme, sem observar as diferenças espaciais no desenvolvimento das plantas, ocorre aumento no risco de contaminação ambiental, em função da lixiviação de nitrato para águas superficiais e subterrâneas (Shanahan *et al.*, 2008).

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).

### **2.3 Sensoriamento remoto**

A técnica do sensoriamento remoto é definida como obtenção de informações e aplicações destas informações sobre um objeto sem nenhum contato físico com ele. A informação é adquirida pela detecção e medição das mudanças que o objeto impõe ao campo ao seu redor, e este sinal pode incluir um campo eletromagnético emitido e/ou refletido, ondas acústicas refletidas e/ou perturbadas pelo objeto ou as perturbações do campo de gravidade ou potencial magnético com a presença do objeto.

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

A reflectância ( $\rho$ ) é definida como a razão entre as quantidades de radiação refletida e de radiação incidente. É uma técnica utilizada 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 da radiação incidente decorrentes de sua absorção pelos pigmentos fotossintéticos, especialmente as clorofilas.

As plantas possuem duas bandas de absorção distintas na região do visível. A primeira situa-se próxima a 480 nm, devido à presença de carotenos e clorofilas, enquanto que a segunda 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. Outro atributo marcante do comportamento espectral da vegetação é a existência de uma região de alta reflectância, entre 700 nm e 1300 nm (infravermelho próximo, NIR), a qual está associada à estrutura celular interna da folha (Figueiredo, 2009) (Figura 1).

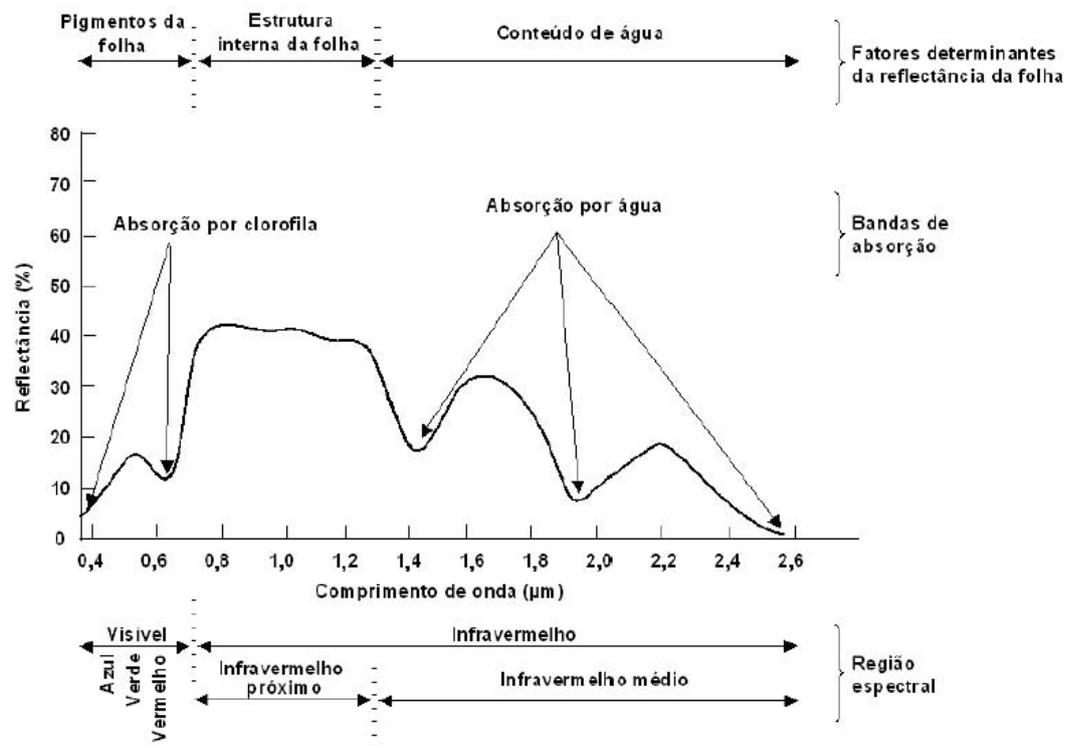


FIGURA 1. Curva típica de reflectância da vegetação. Fonte: Rizzi (2004).

A utilização da reflectância como indicativo de estresses em plantas, nas faixas do espectro luminoso do vermelho (680-700 nm) e do infravermelho próximo (700-1300 nm), foi reportada por diversos autores (Gates *et al.*, 1965; Carter & Knappa, 2001; 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 demonstraram 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).

Nas folhas, o teor de clorofila 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.

A quantidade de radiação refletida pelas plantas varia com o comprimento de onda. A reflectância na região do visível 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, observa-se um gradiente acentuado, que mostra a transição para uma região de elevada reflectância no infravermelho próximo, a qual corresponde a, aproximadamente, 40 a 50% da radiação incidente (Figura 1).

Na faixa do infravermelho próximo, a radiação incidente é pouco absorvida pela planta, sendo a reflectância nesta região do espectro eletromagnético definida fortemente pela biomassa na parte aérea e também

pelo estágio de desenvolvimento da cultura (Peñuelas & Filella, 1998). 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).

Com o aumento na concentração de nitrogênio em plantas de trigo, estas produzem alterações de reflectância espectral que podem ser detectadas por equipamentos de sensoriamento remoto (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, uma vez que a quantidade de nitrogênio acumulada pelo dossel, como produto do teor de N nas plantas e da biomassa vegetal, influencia a produtividade da cultura (Wright *et al.*, 2004).

O índice de vegetação vem a ser o resultado da combinação entre valores de reflectância em dois ou mais intervalos de comprimento de onda e correlaciona-se com a quantidade e o estado da vegetação em uma determinada área da superfície terrestre. Dentre os vários 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:

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

onde  $\rho_{\text{nir}}$  e  $\rho_{\text{r}}$  são as reflectâncias no infravermelho próximo e no vermelho, respectivamente.

O NDVI possui valores que variam numericamente entre -1 e +1 e será maior quanto maior for a diferença entre as reflectância 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) usaram o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) como um 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 com fechamento estomático desde os períodos iniciais de desenvolvimento da cultura, bem como com a senescência precoce das folhas no estágio de enchimento de grãos. O NDVI é considerado eficiente estimador de biomassa, constituindo 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).

Rudorff *et al.* (2005) validaram modelos para estimativa da biomassa acumulada na parte aérea em cultivares de trigo, enquanto Grohs *et al.* (2009) desenvolveu modelo para estimativa do potencial produtivo de trigo e cevada em função de leituras de NDVI do dossel com sensor radiométrico ativo. Igualmente, Junges (2007) desenvolveu modelos baseados em indicadores agrometeorológicos e espectrais para previsão de safra de trigo utilizando imagens de satélite NDVI/MODIS.

Nos últimos anos foram desenvolvidos alguns sensores remotos, com menor custo e com possibilidade de utilização pelo produtor (De Boer, 2009). Dentre estes sensores, 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, Alemanha) e o “Crop Circle” (Holland Scientific, Holanda) 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 se destacado em uma série de estudos. Tremblay *et al.* (2009) mostraram que o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), avaliado pelo sensor GreenSeeker foi eficaz na determinação de zonas de manejo em lavoura de algodão. Resultados obtidos por Raun *et al.* (2002) mostraram que, quando foi empregado este sensor para recomendações de adubação nitrogenada para o trigo de inverno em Oklahoma, ocorreu mais de 15% de aumento na eficiência de uso do N. Wright *et al.* (2004) demonstrou que 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 espectroradiômetro portátil (Analytical Spectral Devices, FieldSpecPro Inc., Boulder, Colorado).

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) confrontaram medições realizadas com espectroradiômetros portáteis, imagem aérea e de satélite e com o sensor Greenseeker para quantificação do estado nutricional das plantas em relação à disponibilidade de nitrogênio.

Experimentos realizados com base em modelos de recomendação de doses de nitrogênio usando leituras do NDVI têm demonstrado diminuição em torno de 15% na utilização 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 decisões de manejo de N devem ser baseadas em leituras de NDVI realizadas nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura. Avaliações 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, resultados estes que corroboram com os encontrados por Tremblay *et al.* (2009).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Caracterização da área experimental, tratamentos e delineamento experimental**

Os trabalhos a campo foram conduzidos nos anos de 2014 e 2015, na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), em Eldorado do Sul, RS. As determinações laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Fisiologia Vegetal do Departamento de Plantas de Lavoura da Faculdade de Agronomia da UFRGS, em Porto Alegre (RS).

A EEA/UFRGS está situada na região fisiográfica da Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul (RS), com altitude média de 46 metros acima do nível do mar. O clima da região é subtropical úmido de verão quente, do tipo Cfa, conforme classificação climática de Koeppen (Bergamaschi *et al.*, 2003). A precipitação pluvial média anual em Eldorado do Sul (RS) é de 1440 mm e a temperatura média mensal varia entre 14 e 25°C, entre o mês mais frio e o mais quente (Bergamaschi *et al.*, 2003). O solo da área experimental pertence à unidade de mapeamento São Jerônimo, classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2008).

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, 2014 e 2015.

Ano	Argila %	pH H <sub>2</sub> O	P --- mg dm <sup>-3</sup> ---	K ---	MO <sup>1</sup> g kg <sup>-1</sup>	Al <sup>3+</sup> ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	Ca <sup>2+</sup> -----	Mg <sup>2+</sup> -----	V <sup>2</sup> %
2014	25	5,2	42	202	18	0	3,4	1,6	64
2015	27	5,6	20	165	21	0	4,3	1,9	71

<sup>1</sup>MO=matéria orgânica

<sup>2</sup>V=saturação de bases

Nos experimentos, o trigo foi semeado nos dois anos sobre resteva (resíduos) de lavouras de milho. A dessecação das áreas antes da implantação dos experimentos foi realizada com herbicida de ação total a base de glyphosato (3 L ha<sup>-1</sup> do produto comercial).

Os tratamentos utilizados nos dois anos foram os seguintes: a) quatro doses de nitrogênio aplicadas na emergência das plantas (base) ( 0 , 20, 40 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de N); e b) cinco doses de nitrogênio aplicadas em cobertura ( 0 , 20, 40, 60 e 80 kg ha<sup>-1</sup> de N), no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas do colmo principal. Para a aplicação de N em cobertura utilizou-se uréia com 45% de N.

No experimento de 2014, as cultivares utilizadas foram: Quartzo, TBIO Sintonia e TBIO Iguaçu. No experimento de 2015, as cultivares utilizadas foram: TBIO Toruk, TBIO Sintonia e TBIO Sinuelo. Todas as cultivares utilizadas são recomendadas para cultivo na região homogênea de adaptação 2, região na qual se insere a EEA/UFRGS. Na Tabela 2, são listadas algumas características das cultivares utilizadas nos experimentos.

TABELA 2. Descrição das cultivares utilizadas nos experimentos conduzidos a campo nos anos de 2014 e 2015. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul (RS).

Cultivares	Ciclo <sup>1</sup>	Porte	Hábito de crescimento	Região cultivada	Classificação
Quartzo	141	Médio/alto	Semi-ereto	RS1- RS2	Pão
Sintonia	128	Média	Semi-ereto	RS1- RS2	Melhorador
Iguaçu	145	Médio/alto	Semi-ereto	RS1- RS2	Pão
Sinuelo	146	Baixo/médio	Semi-ereto	RS1- RS2	Pão
Toruk	145	Baixo	Ereto	RS1- RS2	Pão/melhorador

<sup>1</sup>Dias

Os experimentos foram conduzidos no delineamento experimental em parcelas subdivididas, com quatro repetições por tratamento, sendo os fatores dose de N na emergência (base) e dose de N em cobertura alocados na parcela principal e na sub-parcela, respectivamente. Cada unidade experimental foi composta por área de 7,02 m<sup>2</sup>. 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<sup>2</sup>. A área experimental recebeu, por ocasião da semeadura, adubação com fósforo e potássio. A adubação correspondeu à aplicação de 300 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 0-22-30 (NPK), sendo o P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e o K<sub>2</sub>O aplicados na forma de superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente.

A semeadura foi realizada no dia 10 de julho de 2014 e no dia 15 de julho de 2015, 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). 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<sup>-1</sup> do produto comercial), totalizando três aplicações no ano de 2014. A primeira aplicação foi realizada no dia 15 de setembro de 2014, quando as plantas se encontravam 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.

### **3.2 Avaliações realizadas**

**Leitura de reflectância do dossel (Índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI):** antes de realização da adubação nitrogenada em cobertura no estágio de 5-6 folhas expandidas, foi realizada leitura de reflectância do dossel, utilizando sensor óptico ativo de vegetação (Greenseeker), o qual fornece o valor do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). O aparelho foi posicionado paralelamente às linhas da cultura, em uma altura de aproximadamente 0,8 m acima do dossel. As leituras foram realizadas por ocasião do deslocamento linear do equipamento sobre a unidade experimental, com largura útil captada pelo sensor de 0,8 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 no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas (antes da aplicação de N em cobertura) e no estágio de emborrachamento da cultura. O emborrachamento é caracterizado quando a espiga encontra-se envolta pela bainha da folha bandeira.

**Biomassa da parte aérea e quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea (kg ha<sup>-1</sup>):** após a leitura com o sensor Greenseeker, no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, foi realizada amostragem de plantas em área de 0,27 m<sup>2</sup> (3 linhas de 0,5 m) em cada parcela. Nestas amostras, foi determinada a biomassa acumulada na parte aérea, após secagem das

amostras em estufa de aeração forçada, a aproximadamente 65°C, até peso constante. A quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea foi obtida a partir da multiplicação entre as variáveis biomassa da parte aérea e concentração de nitrogênio no tecido foliar. Esta última variável foi determinada nas amostras moídas e homogeneizadas pelo método semi-micro-Kjeldahl, conforme descrito por Tedesco *et al.* (1985). Os valores de biomassa da parte aérea e quantidade de N acumulada são expressos na unidade “kg ha<sup>-1</sup>”.

As avaliações acima citadas foram realizadas, da mesma maneira, nos experimentos conduzidos tanto no ano de 2014 quanto no ano de 2015.

**Rendimento de grãos:** por ocasião da maturação de colheita, foi realizada colheita de grãos em área de 4,05 m<sup>2</sup> em cada unidade experimental, o que corresponde às oito linhas centrais, utilizando colhedora automotriz de parcelas. Após a colheita, foi determinado o peso de grãos por unidade experimental e extrapolado este valor para rendimento de grãos, em kg ha<sup>-1</sup>, na umidade de 130 g kg<sup>-1</sup>.

**Dose de máxima eficiência técnica (DMET) de nitrogênio em cobertura:** a partir da resposta do rendimento de grãos à aplicação de N na base (emergência das plantas) e em cobertura (estádio de 5-6 folhas expandidas), foram ajustadas, para cada cultivar e para cada dose de N aplicada na base, curvas de resposta a doses de nitrogênio aplicadas em cobertura no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, através da fórmula  $-b/2.a$ .

Desta maneira, foi determinada, para cada cultivar e para cada dose de N na base, a dose de máxima eficiência técnica (DMET) de N em cobertura. A DMET é definida como a dose de N em cobertura que resulta em máximo rendimento de grãos. Posteriormente, a DMET de N em cobertura foi

relacionada com o valor do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado neste momento.

As determinações de rendimento de grãos e das doses de máxima eficiência técnica (DMET) somente foram realizadas no experimento conduzido no ano de 2014.

### **3.3 Análise dos dados**

No experimento realizado em 2014, os valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e a biomassa e quantidade de nitrogênio acumuladas na parte aérea no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas foram relacionados com a quantidade de nitrogênio aplicada na adubação de base, para cada uma das três cultivares avaliadas neste ano. Além disso, os valores de NDVI, avaliados no estágio de 5-6 folhas expandidas, foram relacionados com a biomassa e com a quantidade de N acumulada na parte aérea das plantas neste estágio de desenvolvimento, enquanto que os valores de NDVI avaliados no estágio de emborrachamento da cultura foram relacionados com o rendimento de grãos da parcela.

Para cada cultivar de trigo em estudo, modelou-se a relação entre as diferentes variáveis avaliadas pelo ajuste de modelos lineares ( $y=a+bx$ ) ou quadráticos ( $y=a+bx+cx^2$ ), com auxílio dos aplicativos Sigma Plot 8.0 e ASSISTAT versão 7.6. Os critérios utilizados para escolher o modelo de melhor ajuste 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 a comparação entre as regressões (modelos) ajustadas para cada cultivar, foi calculado o intervalo de confiança da regressão ajustada, conforme metodologia descrita por Gomes (1990). Assim, quando duas ou mais regressões são comparadas, se os intervalos de confiança não se sobrepõem, tem-se, no mínimo, 95% de confiança de que os coeficientes e as regressões são significativamente diferentes. De forma análoga, se os intervalos de confiança apresentam sobreposição, tem-se 95% de confiança de que as regressões são significativamente semelhantes.

Este procedimento visou comparar os modelos ajustados entre as diferentes cultivares, com objetivo de avaliar se existiam diferenças significativas entre as cultivares de trigo testadas ou se um modelo único poderia ser empregado para as cultivares em questão.

O modelo desenvolvido no experimento de 2014 para a relação entre NDVI, biomassa e quantidade de N acumulada na parte aérea foi validado no experimento conduzido no ano de 2015. Assim, foi determinada a relação entre a biomassa da parte aérea estimada pelos valores de NDVI no estágio de 5-6 folhas expandidas, utilizando modelo desenvolvido em 2014, e a biomassa da parte aérea observada (real) no experimento de 2015, obtida pela amostragem e pesagem de plantas neste experimento, conforme metodologia descrita previamente. Este mesmo procedimento foi realizado para a variável quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea.

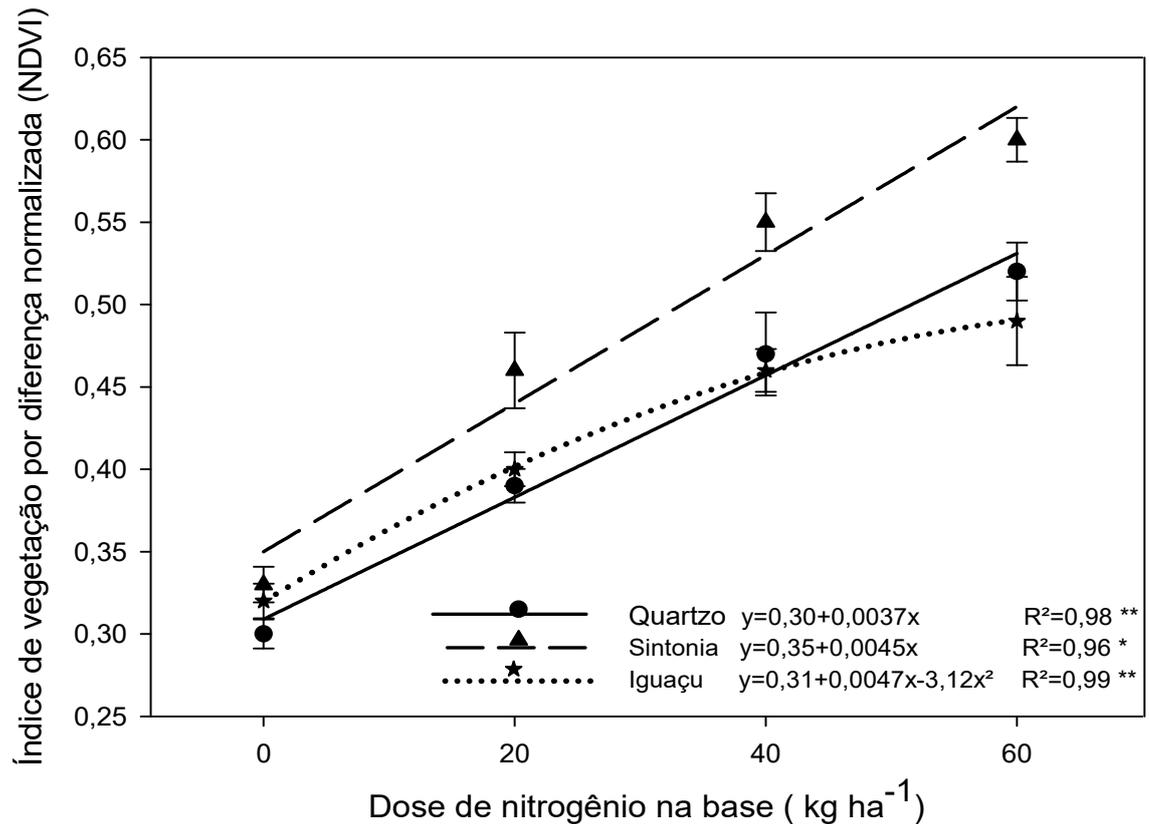
Os dados de rendimento de grãos do ano de 2014 foram submetidos à análise de variância pelo teste F. Quando houve significância, as médias dos tratamentos foram comparadas com base no valor da diferença mínima significativa (DMS), calculada pelo teste t, ao nível de 5% de significância, utilizando-se o aplicativo ASSISTAT versão 7.6.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Efeito da dose de nitrogênio aplicada na base e em cobertura sobre o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), produção de biomassa, quantidade de N acumulada na parte aérea e rendimento de grãos.**

#### **4.1.1 Relação da dose de nitrogênio aplicada na base (emergência) com o valor do NDVI, produção de massa seca e quantidade de N acumulada na parte aérea na cultura do trigo no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas.**

Antes da realização da adubação nitrogenada em cobertura, ou seja, no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, foram realizadas leituras de NDVI e os valores deste índice foram correlacionados com a dose de adubação nitrogenada aplicada na base (emergência das plantas). Na Figura 2, é apresentada a relação entre estas duas variáveis (NDVI e dose de N aplicada na base) para cada cultivar estudada. Foram ajustadas curvas de regressão, para cada cultivar, entre a dose de nitrogênio aplicada e a leitura de NDVI, sendo que, para as cultivares Quartzo e Sintonia, as regressões ajustadas foram lineares, enquanto que, para a cultivar Iguaçu, a regressão que melhor se ajustou foi a quadrática.



\* Significativo a 5% de probabilidade.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

FIGURA 2. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), avaliado no estágio de 5-6 folhas expandidas, em função de doses de nitrogênio aplicadas na base (emergência), para três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014. Barras indicam o desvio padrão da média.

De tal maneira, as regressões apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,96 e significativos para todas as cultivares, mostrando ser o NDVI uma variável influenciada pela quantidade de nitrogênio disponibilizado na base.

Doses maiores de nitrogênio na base promoveram maiores valores de NDVI no estágio de 5-6 folhas expandidas, conforme mostrado na Figura 2. Estes resultados mostram o efeito que ocorre, principalmente, pelo aumento de reflectância na região do infravermelho próximo, em função de maior acúmulo de massa seca na parte aérea, e maior absorvância na região do vermelho, em

função de maior quantidade de clorofila na folha, proporcionadas pela maior disponibilidade de N promovida por doses crescentes aplicadas na base.

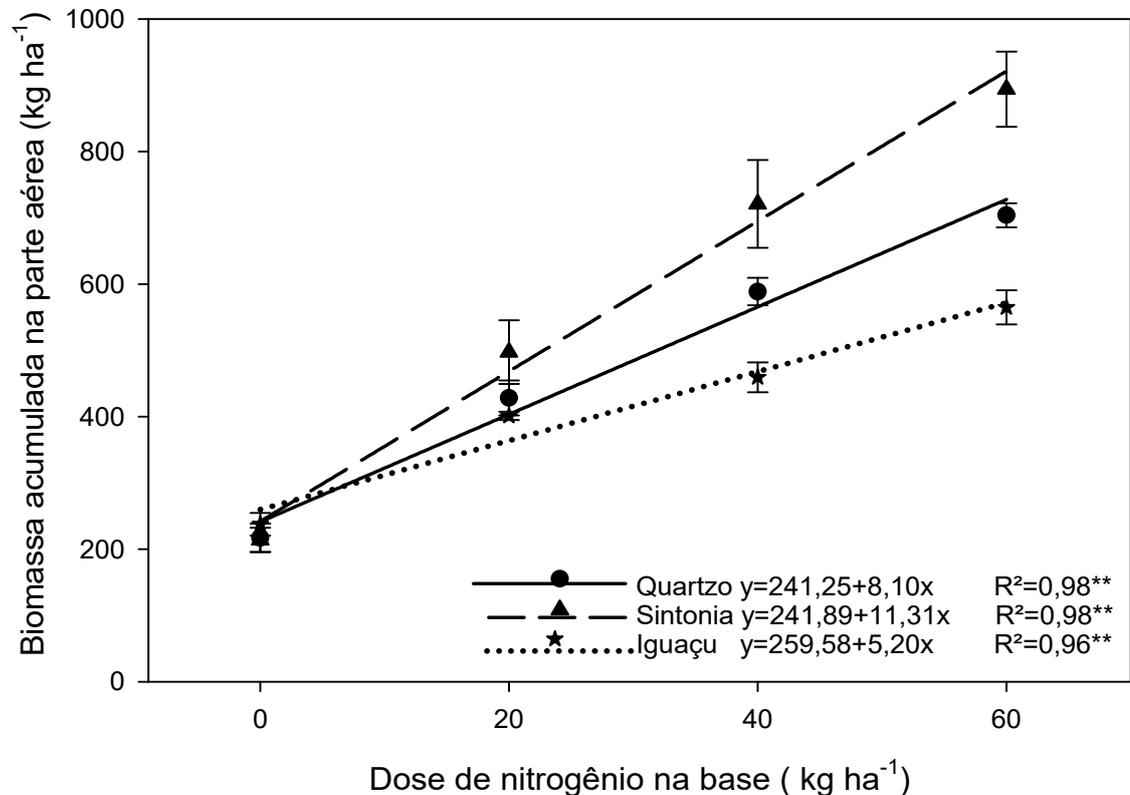
A tendência crescente do NDVI com o aumento das doses de nitrogênio aplicadas se explica pelo fato de folhas com baixos teores de nitrogênio sintetizarem baixos teores de clorofila, apresentando maior reflectância e transmitância na região visível do espectro eletromagnético (400-700 nm) e baixa reflectância na região do infravermelho próximo (NOH *et al.*, 2005), promovendo redução nos valores do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

Em relação ao comportamento do NDVI nas três cultivares avaliadas, observa-se que, quando as plantas não receberam aplicação de N na base (emergência), estas apresentaram menor variabilidade na média das leituras, sendo que as três cultivares apresentaram valores médios deste índice entre 0,30 e 0,33 (Figura 2). Contudo, quando observadas as maiores doses de N aplicadas ( $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ) passou a ocorrer maior variabilidade entre as cultivares (variação de NDVI entre 0,49 e 0,60), mostrando que a cultivar de trigo pode interferir no valor de NDVI determinado pelo sensor Greenseeker.

Apesar de ser ainda bastante cedo (estádio de 5-6 folhas expandidas) para estimar o potencial produtivo em uma determinada área, constatou-se que o NDVI foi eficiente em quantificar diferenças do desenvolvimento das plantas frente às diferentes doses de N aplicadas por ocasião da emergência das plantas.

Estes distintos acréscimos de NDVI para cada cultivar ocorreu devido aos diferentes incrementos de biomassa seca da parte aérea observados em cada cultivar, em função da aplicação de doses crescentes de N na base

(Figura 3), o que proporcionou incrementos no valor de NDVI avaliados no estágio de 5-6 folhas expandidas.



\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

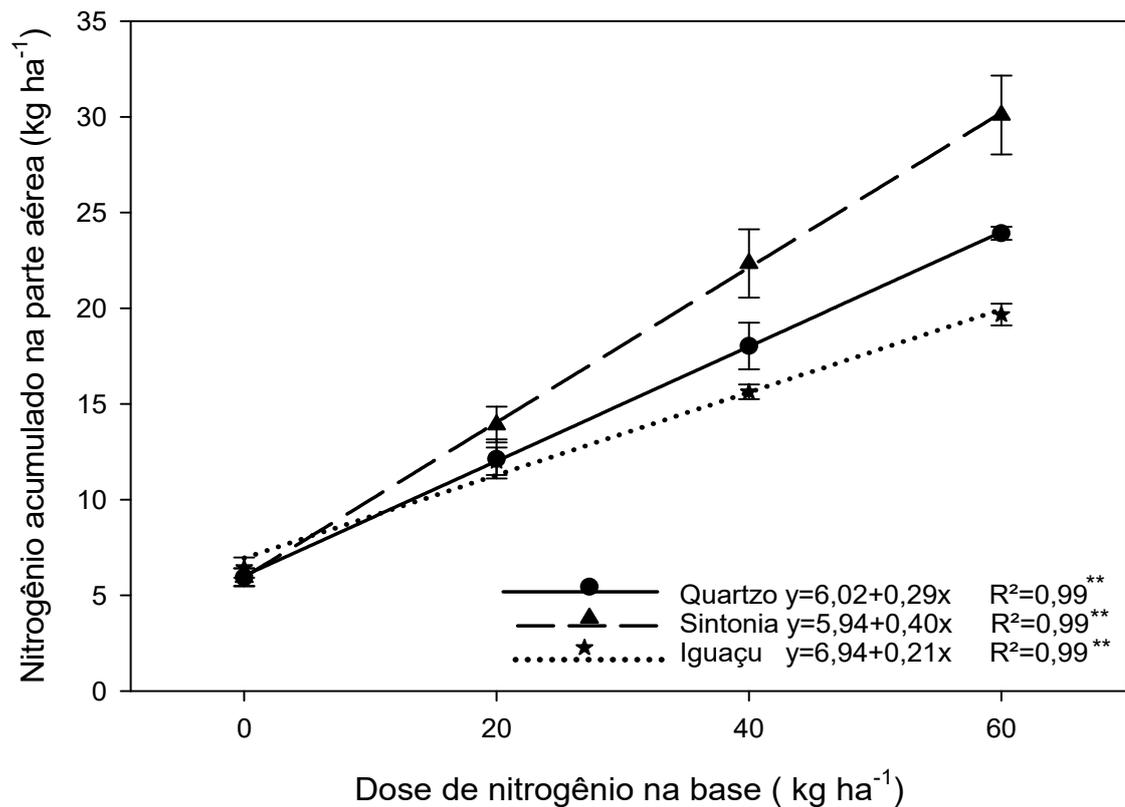
FIGURA 3. Biomassa acumulada na parte aérea no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, em função de doses de nitrogênio aplicadas na base (emergência), para três cultivares de trigo Eldorado do Sul, RS, 2014. Barras indicam o desvio padrão da média.

A elevação das doses de nitrogênio aplicadas na base proporcionou incremento na produção de biomassa na parte aérea no estágio de 5-6 folhas expandidas. Elevados coeficientes de determinação (acima de 0,96) foram verificados para as cultivares utilizadas no presente trabalho. Nas três situações, o modelo de regressão linear foi aquele que apresentou melhor ajuste para a relação entre biomassa seca da parte aérea e dose de N aplicada na base (Figura 3).

Doses crescentes de nitrogênio aplicadas na base promoveram incremento na biomassa acumulada na parte aérea no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas (Figura 3), o que se refletiu em aumento nos valores de NDVI avaliados neste estágio (Figura 2). Conforme Moges *et al.* (2004), a biomassa acumulada na parte aérea é uma das variáveis que melhor se correlaciona com o valor do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). Ainda, de acordo com Liu (2006), o acúmulo de biomassa na parte aérea em trigo se relaciona diretamente com a produtividade final de grãos, que, por sua vez, também se relaciona com as doses de N aplicadas.

Povh (2007) encontrou coeficientes de determinação próximos aos encontrados no presente trabalho (0,88 e 0,74), quando analisou a relação entre doses de nitrogênio aplicadas e produção de massa seca na parte aérea, em dois diferentes tipos de solo (Cambissolo e Latossolo, respectivamente).

Doses crescentes de nitrogênio aplicadas na base também promoveram incremento na quantidade de N acumulada na parte aérea em todas as cultivares, no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas (Figura 4). Para o experimento realizado, encontraram-se coeficientes de determinação significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de 0,99, para as três cultivares (Quartzo, TBIO Sintonia e TBIO Iguazu), para os modelos ajustados entre dose de nitrogênio aplicada na base e nitrogênio acumulado na parte aérea (Figura 4). De acordo com Bredemeier (1999) e Polleto (2004), o decréscimo da disponibilidade de N no solo promove a redução significativa do teor foliar de N e da biomassa da parte aérea, reduzindo a quantidade de N acumulada no dossel.



\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

FIGURA 4. Nitrogênio acumulado na parte aérea no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, em função de doses de nitrogênio aplicadas na base (emergência), para três cultivares de trigo Eldorado do Sul, RS, 2014. Barras indicam o desvio padrão da média.

#### 4.1.2 Resposta do rendimento de grãos de três cultivares de trigo à disponibilidade de N na emergência (base) e em cobertura.

Na Tabela 3, são apresentadas as médias do rendimento de grãos de cada tratamento, combinando diferentes doses de N aplicadas por ocasião da emergência das plantas (base) e em cobertura, no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas. Como o resultado do teste F na análise de variância foi significativo para a interação entre os fatores “dose de N” e

“cultivar”, as médias são apresentadas em função do efeito simples da dose de N dentro de cada cultivar, ou seja, será apresentado o desdobramento da interação entre os tratamentos de adubação nitrogenada dentro de cada cultivar utilizada, demonstrando que as cultivares não respondeu da mesma forma ao fornecimento de nitrogênio.

TABELA 3. Rendimento de grãos de três cultivares de trigo, em função da dose de nitrogênio aplicada na emergência e em cobertura, no estádio de 5-6 folhas completamente expandidas. Eldorado do Sul, RS, 2014.

Dose de N		Cultivar de Trigo			
Emergência	Cobertura	Quartzo	Sintonia	Iguaçu	Média
0	0	G 1.054	F 997	E 1.018	1.023
0	20	EF 1.659	E 1.669	D 1.637	1.667
0	40	DEF 1.889	E 1.750	CD 1.827	1.822
0	60	ABCD 2.365	DE 2.117	ABC 2.383	2.288
0	80	ABCD 2.427	CDE 2.256	BCD 2.077	2.253
20	0	FG 1.517	E 1.782	DE 1.504	1.601
20	20	BCDE 2.204	CDE 2.246	BCD 2.081	2.177
20	40	ABC 2.505	BCD 2.436	AB 2.606	2.516
20	60	ABC 2.560	AB 2.920	A 2.691	2.724
20	80	ABC 2.597	ABC 2.765	A 2.681	2.681
40	0	CDE 2.183	DE 2.013	CD 1.897	2.031
40	20	ABCD 2.419	ABCD 2.592	AB 2.565	2.525
40	40	A 2.959	AB 3.007	A 2.740	2.902
40	60	ABC 2.514	AB 2.988	AB 2.609	2.704
40	80	A 2.860	A 3.108	AB 2.610	2.859
60	0	ABC 2.513	CDE 2.189	ABC 2.348	2.350
60	20	AB 2.787	AB 2.935	A 2.751	2.824
60	40	A 2.848	AB 2.937	A 2.824	2.870
60	60	ABC 2.647	A 3.157	A 2.799	2.868
60	80	A 2.819	A 3.149	A 2.944	2.971
<b>Média</b>		2.366 a	2.451 a	2.331 a	
<b>CV (%)</b>		10.4	9.8	10.6	

<sup>1</sup> Médias seguidas por letras iguais minúsculas na linha e por letras maiúsculas na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste t, ao nível de 5% de probabilidade.

O menor rendimento de grãos foi registrado no tratamento sem aplicação de N, tanto na base como em cobertura, sendo que a cultivar TBIO Sintonia obteve o menor rendimento (997 kg ha<sup>-1</sup>), diferindo significativamente do tratamento sem aplicação de N na base e com aplicação de 20 kg ha<sup>-1</sup> de N em cobertura (1669 kg ha<sup>-1</sup>).

O maior rendimento de grãos de trigo foi observado na cultivar TBIO Sintonia no tratamento com aplicação de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N na base (emergência

das plantas) e  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de N em cobertura (estádio de 5-6 folhas), que, na média, apresentou rendimento de grãos de  $3157 \text{ kg ha}^{-1}$ , não diferindo significativamente do tratamento com a mesma dose de N na base e  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de N em cobertura ( $3149 \text{ kg ha}^{-1}$ ) (Tabela 3).

Para a cultivar Quartzo, o menor rendimento de grãos foi registrado também no tratamento sem aplicação de nitrogênio, tanto na base como em cobertura ( $1054 \text{ kg ha}^{-1}$ ), diferindo significativamente do tratamento sem aplicação de N na base e com aplicação de  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  de N em cobertura ( $1659 \text{ kg ha}^{-1}$ ).

O maior rendimento de grãos para a cultivar Quartzo foi registrado no tratamento com aplicação de  $40 \text{ kg ha}^{-1}$  de N na base (emergência das plantas) e  $40 \text{ kg ha}^{-1}$  de N em cobertura (estádio de 5-6 folhas), atingindo rendimento de grãos de  $2959 \text{ kg ha}^{-1}$  (Tabela 3), não diferindo significativamente dos tratamentos que receberam  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de N na base (emergência das plantas).

Na cultivar TBIO Iguaçu, o menor rendimento de grãos foi registrado no tratamento sem aplicação de nitrogênio, tanto na base como em cobertura, sendo igual a  $1018 \text{ kg ha}^{-1}$ , porém diferindo significativamente do tratamento sem aplicação de N na base e com aplicação de  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  de N em cobertura ( $1637 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Obteve-se o maior rendimento de grãos na cultivar TBIO Iguaçu no tratamento com aplicação de  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de N na base (emergência das plantas) e  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de N em cobertura (estádio de 5-6 folhas), que, na média, apresentou rendimento de grãos de ( $2944 \text{ kg ha}^{-1}$ ), porém sem diferir significativamente dos tratamentos que receberam esta mesma dose de N na base e doses de 20 a  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de N em cobertura (Tabela 3).

Quando avaliadas as média das três cultivares de trigo, as diferentes doses de nitrogênio aplicadas na base levaram a diferentes produtividades ao

final do ciclo, sendo que os tratamentos sem N na base e em cobertura, comparativamente ao tratamento que recebeu  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  de N na base e sem aplicação de N em cobertura, apresentaram elevação de produtividade de aproximadamente  $580 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Recentemente pesquisas de melhoramento genético tem resultado no lançamento de inúmeras cultivares de elevado potencial produtivo, o que vem estimulando a utilização em maiores quantidades de insumos. De acordo com Zagonel *et al.* (2002), o nitrogênio, dentre os elementos componentes da adubação, é o que mais frequentemente limita patamares produtivos na cultura do trigo.

Em relação à cultura do trigo, a disponibilidade de nitrogênio tem grande influencia sobre os componentes do rendimento, os quais possuem papel fundamental na formação do rendimento final de grãos. A oferta inicial de N no início do desenvolvimento vegetativo tem grande importância em estimular a emissão e sobrevivência dos afilhos no período inicial de desenvolvimento da cultura do trigo, refletindo-se em maior número de espigas por unidade de área por ocasião da colheita. A emissão dos 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). Seu desenvolvimento em sincronia com o colmo principal aumenta as chances de estes sobreviverem (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.

Considerando as informações técnicas da cultura do trigo (Reunião..., 2015), a dose total de nitrogênio recomendadas para as condições de realização do experimento, considerando o cultivo de trigo após milho, seria de  $110 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, considerando uma expectativa de rendimento de  $3,0 \text{ t ha}^{-1}$ . Segundo Reunião... (2015), a dose de N a ser aplicada na semeadura varia entre  $15$  e  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  e o restante da dose deve ser aplicada em cobertura, ou seja, entre  $90$  e  $95 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, considerando as condições experimentais do ano de 2014. No entanto, a cultura respondeu, no presente trabalho, somente até a dose de  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  em cobertura (Tabela 3).

Seguindo-se esta indicação, seria aplicada a dose de  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  em cobertura. Portanto, teriam sido aplicadas doses maiores do que a resposta máxima obtida para a condição deste experimento. 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..., 2015), teriam sido superiores às máximas que se obteve resposta.

Assim, o sensor óptico ativo e os valores de NDVI podem ser utilizados a fim de detectar os níveis de desenvolvimento e o estado nutricional da cultura em relação ao N. Desta forma, seria utilizado o valor do NDVI para ajustar as doses aplicadas de N conforme as condições específicas variáveis dentro de um determinado talhão. Com isso, as doses seriam mais condizentes com a

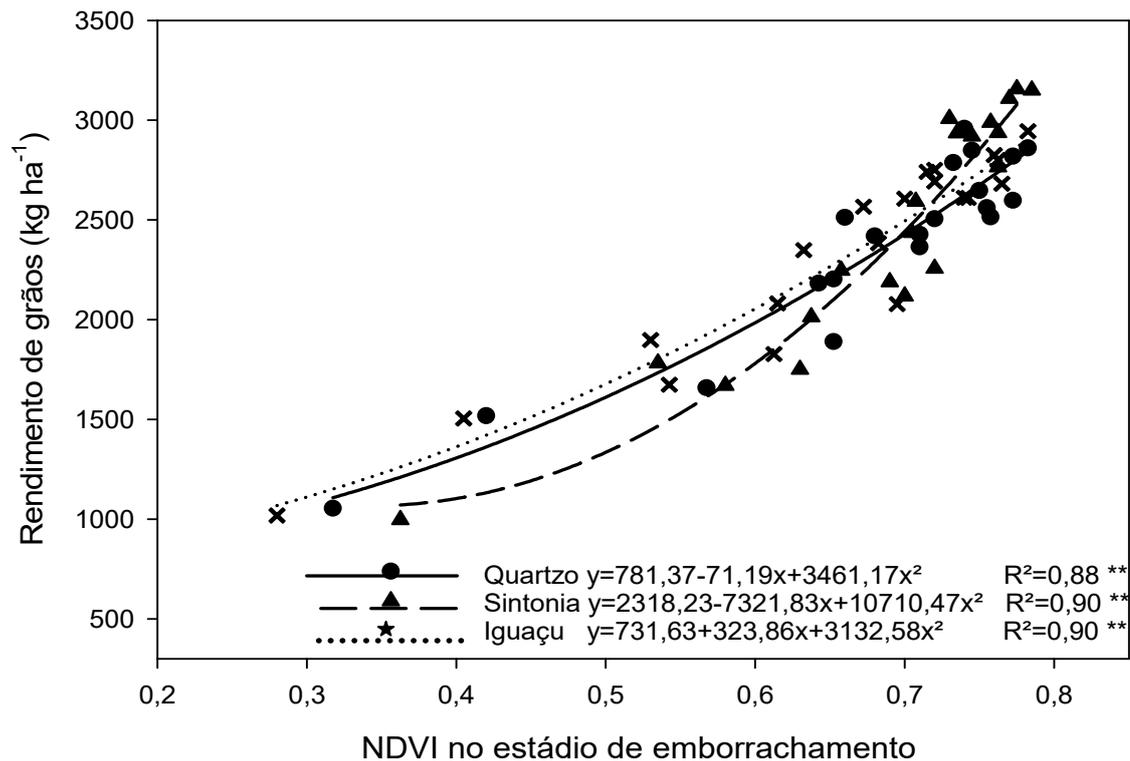
real demanda das plantas, evitando-se a aplicação de excesso do nutriente, caso fosse feita a aplicação a taxas uniformes.

#### **4.1.3 Relação entre os valores de NDVI avaliados no estágio de emborrachamento da cultura do trigo e o rendimento de grãos.**

As análises de correlação entre o rendimento de grãos e os valores de NDVI avaliados no estágio de emborrachamento, para as três cultivares, são apresentadas na Figura 5. Todas as cultivares apresentaram regressão quadrática entre o NDVI avaliado no emborrachamento e o rendimento de grãos, com valor de  $R^2$  (coeficiente de determinação) acima de 0,90.

Realizada a análise de regressão entre rendimento de grãos e o NDVI avaliado no estágio de emborrachamento para as três cultivares, observou-se correlação significativa entre essas duas variáveis. A cultivar Quartzo apresentou menor coeficiente de determinação ( $R^2=0,88$ ), enquanto as cultivares Sintonia e Iguazu apresentaram valores de  $R^2$  iguais a 0,90 para a relação entre valor de NDVI no emborrachamento e rendimento de grãos (Figura 5).

Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Mahey *et al.* (1991), que observaram alta correlação entre o NDVI e a produtividade de grãos de trigo, mostrando o potencial de estimativa da produtividade da cultura utilizando dados de sensoriamento remoto.



\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

FIGURA 5. Relação entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), avaliado no estágio de emborrachamento, e o rendimento de grãos, em três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.

A avaliação do NDVI em estádios de desenvolvimento mais tardios (emborrachamento) pode não ter mais aplicação sobre estratégias de manejo da adubação nitrogenada para o aumento da produtividade de grãos, uma vez que os estádios mais críticos para manejo deste nutriente já ocorreram no desenvolvimento das plantas. Neste momento, o potencial de rendimento já está praticamente estabelecido, especialmente o componente número de espigas por  $m^2$ , 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.

Outros usos potenciais das leituras de NDVI, utilizando sensor óptico ativo, realizadas a partir do emborrachamento podem ser identificados.

No sul do Brasil, é comum a entrada na lavoura para realização de aplicações de fungicidas a partir do estágio de emborrachamento da cultura do trigo. 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.

Além disso, quando não há disponibilidade de monitores de produtividade, a medição georreferenciada do NDVI na fase de emborrachamento 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, conforme mostrado na Figura 5.

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 à 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.

A utilização do NDVI medido por um sensor óptico ativo para quantificação do potencial produtivo da cultura no emborrachamento poderia 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.

O crescente aumento do NDVI foi mais importante que as diferenças de NDVI entre cultivares, indicando que a diferença de valores de reflectância entre cultivares no emborrachamento não é relevante o suficiente para modificar a estimativa de seu potencial produtivo, conforme mostrado na Figura 5.

## **4.2 Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), avaliado por sensor óptico ativo de vegetação, para a estimativa da produção de biomassa e quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea, em diferentes cultivares de trigo.**

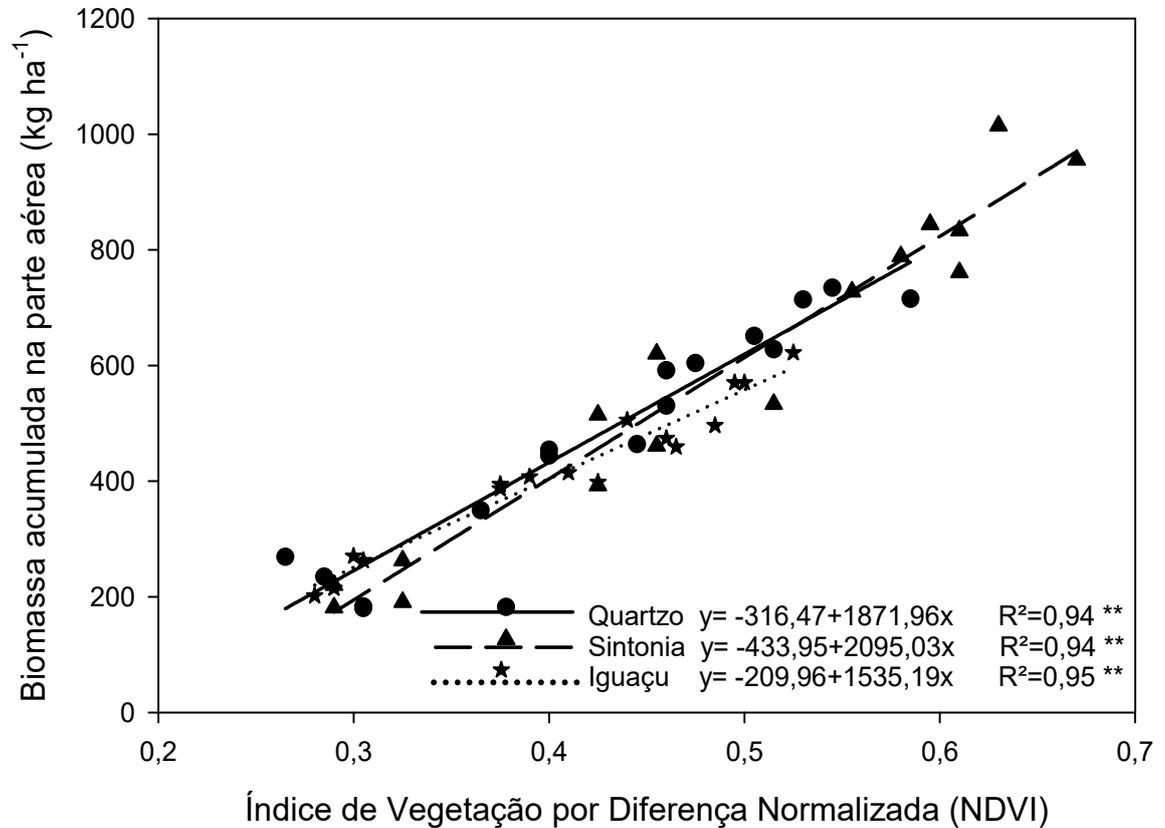
### **4.2.1 Relação entre NDVI avaliado no estágio de 5-6 folhas expandidas e quantidades de biomassa e nitrogênio acumulados na parte aérea.**

No estágio de desenvolvimento de 5-6 folhas completamente expandidas, foram realizadas avaliações para determinar as relações entre os valores de NDVI e biomassa e nitrogênio acumulados na parte aérea das plantas, para as três cultivares utilizadas no estudo conduzido em 2014.

A elevação das doses de nitrogênio aplicadas por ocasião da emergência das plantas (base) proporcionou incremento na produção de biomassa acumulada na parte aérea avaliada no estágio de 5-6 folhas expandidas, conforme mostrado na Figura 3. Este aumento na produção de biomassa na parte aérea também se refletiu em incrementos no valor do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (Figura 2), em função do incremento de doses de N aplicadas por ocasião da emergência das plantas (base).

Os valores de NDVI, independentemente da cultivar utilizada, apresentaram elevado coeficiente de determinação com a quantidade de biomassa acumulada na parte aérea (Figura 6). Os valores de NDVI, avaliados no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, variaram entre

aproximadamente 0,25 e 0,70, enquanto que a quantidade de biomassa variou entre 200 e 1000 kg ha<sup>-1</sup> neste estágio (Figura 6).



\*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

FIGURA 6. Relação entre índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), avaliado no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, e quantidade de biomassa acumulada na parte aérea, em três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.

Esta implicação mostra que o comprimento do infravermelho próximo parece ser o componente mais importante na modificação do NDVI em função do aumento da biomassa da parte aérea. O comprimento de onda do infravermelho próximo é refratado entre as paredes celulares, até ser remetido para a atmosfera (Liu, 2006). Desta forma, Slaton *et al.* (2001) determinaram que, nas condições favoráveis à maior quantidade de folhas (ou seja, maior biomassa) e materiais com maior espessura cuticular, haverá aumento da

reflexão de radiação na região do infravermelho próximo, conseqüentemente aumentando os valores do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), conforme resposta mostrada na Figura 6. Isso indica o efeito que ocorre, principalmente, pelo aumento de reflectância no infravermelho em função de maior acúmulo de biomassa e maior absorbância no vermelho em função de maior quantidade de clorofila na folha, mesmo nos estádios fenológicos iniciais.

As regressões que melhor se ajustaram para a relação entre os valores de NDVI e biomassa acumulada na parte aérea foram lineares, nas três cultivares testadas (Quartzo, TBIO Sintonia e TBIO Iguaçu). Elevados coeficientes de determinação entre estas duas variáveis foram verificados, sendo estes valores superiores a 0,94 para as diferentes cultivares testadas no presente estudo, conforme mostrado na Figura 6. Todas as regressões ajustadas apresentaram significância do coeficiente de determinação ao nível de 1% de probabilidade.

As alterações no NDVI conforme o maior acúmulo de biomassa na parte aérea são devidas à maior disponibilidade de nitrogênio, aumentando assim o acúmulo de biomassa e a quantidade de moléculas de clorofila nas folhas. Conforme Rizzi (2004), quanto maior o acúmulo da 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), com isso existindo um aumento da razão IVP/V e, em conseqüência, aumento do valor do NDVI.

Estes resultados mostram que a avaliação do NDVI utilizando sensor óptico ativo de vegetação 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 nitrogênio por ocasião da emergência das plantas.

Povh (2007), realizando estudo de leituras de NDVI com doses de 0, 30, 60, 90 e 120 kg ha<sup>-1</sup> de N, também encontrou coeficientes de determinação superiores a 0,83 na cultura do trigo entre as variáveis NDVI e biomassa acumulada na parte aérea. Grohs *et al.* (2007), trabalhando com o sensor Greenseeker na cultura da cevada, correlacionaram os valores de NDVI avaliados no estágio de seis folhas expandidas com o número de colmos por unidade de área, biomassa da parte aérea e rendimento de grãos, encontrando altas correlações positivas entre estas variáveis.

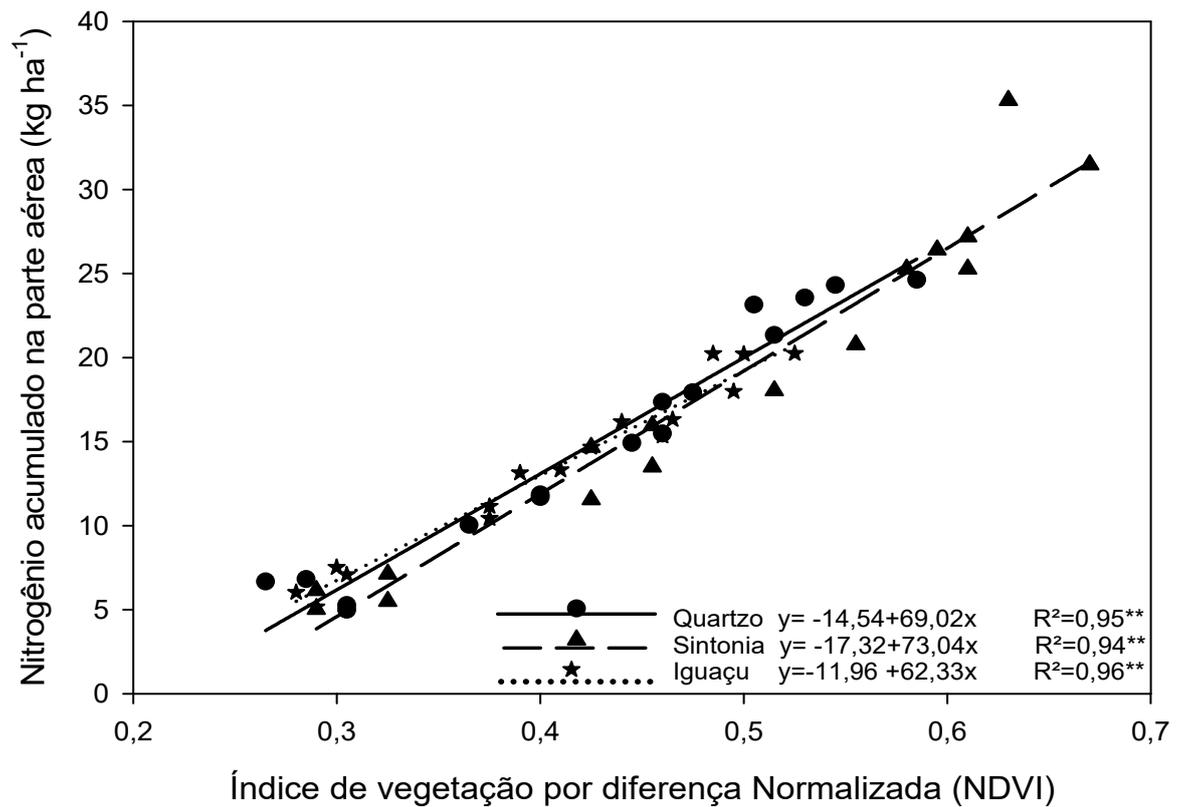
Nas plantas, quando ocorre aumento nos teores de clorofila, diminui a reflectância da radiação nos comprimentos de onda do vermelho, medidos pelo sensor Greenseeker na faixa de 660 nm, que estão ligados à atividade fotossintética da planta. O maior acúmulo de biomassa na parte aérea aumenta a reflectância no comprimento de onda na faixa de 770 nm, o qual se relaciona à estrutura celular das folhas (Figueiredo, 2009), que é o outro comprimento de onda medido pelo sensor. A maior reflectância na faixa do infravermelho e a menor reflectância no comprimento de onda vermelho leva ao aumento do valor do NDVI. Deste modo, quanto maiores às 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.

Nas mesmas amostras coletadas para a determinação da biomassa da parte aérea, foi determinado o teor de N na planta, sendo que, com este valor, foi calculada a quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea das plantas, pela multiplicação do teor de N e da quantidade de biomassa da parte aérea.

Posteriormente, a quantidade de N acumulada foi correlacionada aos valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliados no momento da amostragem (estádio de 5-6 folhas expandidas).

Para as três cultivares, observou-se incremento do NDVI em função do aumento da quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea. Foram verificados coeficientes de determinação elevados (acima de 0,94) e significativos para os modelos ajustados para a relação entre índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea (Figura 7). Os valores de NDVI, avaliados no estágio de 5-6 folhas, variaram entre aproximadamente 0,25 e 0,70, enquanto que a quantidade de N acumulada variou entre aproximadamente 5 e 35 kg N ha<sup>-1</sup> neste estágio (Figura 7).

Nas plantas de trigo, o aumento na concentração de nitrogênio 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.*, 2008; Grohs *et al.*, 2009). Folhas com baixos teores de nitrogênio, em consequência menores teores de clorofila, têm maior reflectância e transmitância na região visível do espectro eletromagnético (400-700 nm) e baixa reflectância e transmitância na região do infravermelho próximo do espectro (Noh *et al.*, 2005), promovendo alterações (redução) nos valores de NDVI. O aumento na quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea promove maior quantidade de clorofila e, conseqüentemente, maior absorção e menor reflectância do espectro vermelho, resultando em maiores valores deste índice.



\*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

FIGURA 7. Relação entre índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), avaliado no estágio de 5-6 folhas expandidas, e quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea, em três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.

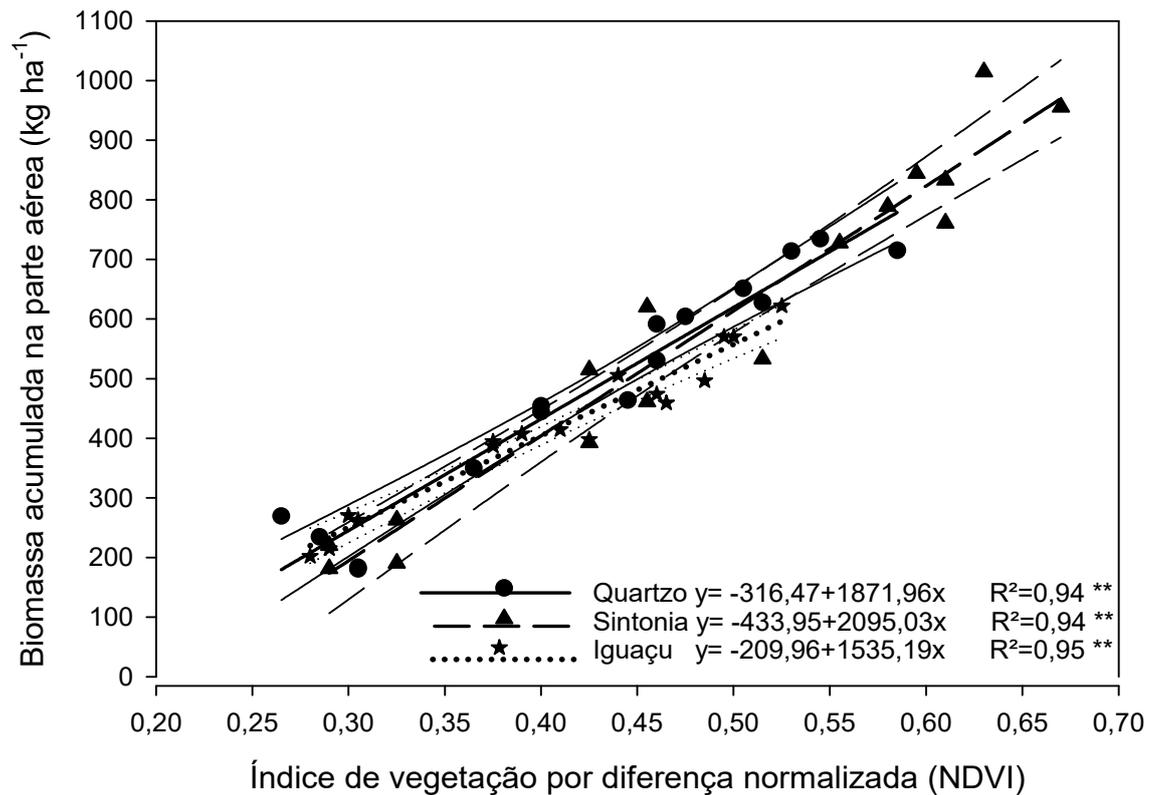
No presente trabalho, foram observadas boas associações do valor de NDVI avaliado no estágio de 5-6 folhas expandidas com a biomassa e quantidade de N acumulada na parte aérea (Figuras 6 e 7).

No comprimento de onda na região do infravermelho próximo, fora do espectro do visível, os processos relativos à reflectância, absorvância e transmitância ficam inteiramente relacionados à estrutura interna da folha (tamanho e formato das células e quantidade de espaços intercelulares), o que tem relação direta com o aumento na quantidade de biomassa.

Os modelos para a relação entre NDVI e biomassa da parte aérea (Figura 6), e entre NDVI e quantidade de N acumulada na parte aérea (Figura 7) foram ajustados individualmente para cada uma das três cultivares utilizadas no presente estudo. Visando avaliar se um modelo único para as relações acima citadas poderia ser utilizado para o conjunto de genótipos avaliados no estudo conduzido no ano de 2014, foi determinado o intervalo de confiança para cada uma das regressões ajustadas mostradas nas Figuras 6 e 7, considerando o modelo linear ( $y=a+bx$ ).

A Figura 8 apresenta os intervalos de confiança para as regressões entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e a biomassa acumulada na parte aérea para o estágio de desenvolvimento de 5-6 folhas completamente expandidas. O objetivo desta análise foi avaliar se os modelos ajustados para as diferentes cultivares (Quartzo, TBIO Sintonia e TBIO IGUAÇÚ) diferiam entre si ou não, ou seja, se um único modelo válido para as três cultivares testadas poderia ser adotado para a relação entre valores de NDVI e quantidade de biomassa acumulada no estágio de 5-6 folhas expandidas.

As sobreposições dos intervalos de confiança dos modelos de regressão ajustados mostram que o comportamento das três cultivares de trigo avaliado foi similar para a relação entre valores de NDVI e quantidade de biomassa acumulada na parte aérea (Figura 8).



\*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

FIGURA 8. Modelos de regressão e seus intervalos de confiança (95% de confiança) entre índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e biomassa da parte aérea no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, em três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.

As pequenas diferenças observadas nos valores de NDVI e biomassa entre as 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, principalmente nos estágios iniciais de desenvolvimento, onde a biomassa é ainda pequena e a cobertura do solo proporcionada pela cultura é baixa.

Assim, a cultivar Quartzó apresentou valores de NDVI intermediários perante as demais cultivares, devido à sua menor capacidade de afilamento e

ao seu hábito de crescimento com folhas mais eretas, que reduziram os valores das leituras de NDVI. Já a cultivar TBIO Sintonia apresentou valores de NDVI superiores, uma vez que apresenta alta capacidade de afilhamento e folhas mais decumbentes. TBIO Iguaçu apresentou os menores valores de NDVI, devido ao seu porte médio e presença de folhas mais eretas.

Estas diferentes características morfológicas das cultivares, entretanto, não foram suficientes para ocasionar diferenças na relação entre os valores de NDVI e a quantidade de biomassa na parte aérea no estágio de 5-6 folhas expandidas (Figura 8). Assim, a análise dos modelos ajustados para a relação entre NDVI e biomassa acumulada para as diferentes cultivares mostrou que é possível a adoção de um modelo único para descrever a relação entre estas duas variáveis, sem a necessidade de se adotar modelos individuais para cada uma das cultivares utilizadas no presente estudo.

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 elevado número de cultivares de trigo recomendadas e utilizadas pelos produtores.

Os valores de NDVI observados neste trabalho mostraram que este índice, avaliado por sensor óptico ativo de vegetação, apresenta grande sensibilidade em detectar variações de biomassa da parte aérea da cultura do trigo. Isto é confirmado pelo fato das diferentes doses de N disponibilizadas na base, por ocasião da emergência das plantas, terem levado a diferentes valores de NDVI e estes valores terem sido correlacionados, de maneira significativa, com a quantidade de biomassa da parte aérea.

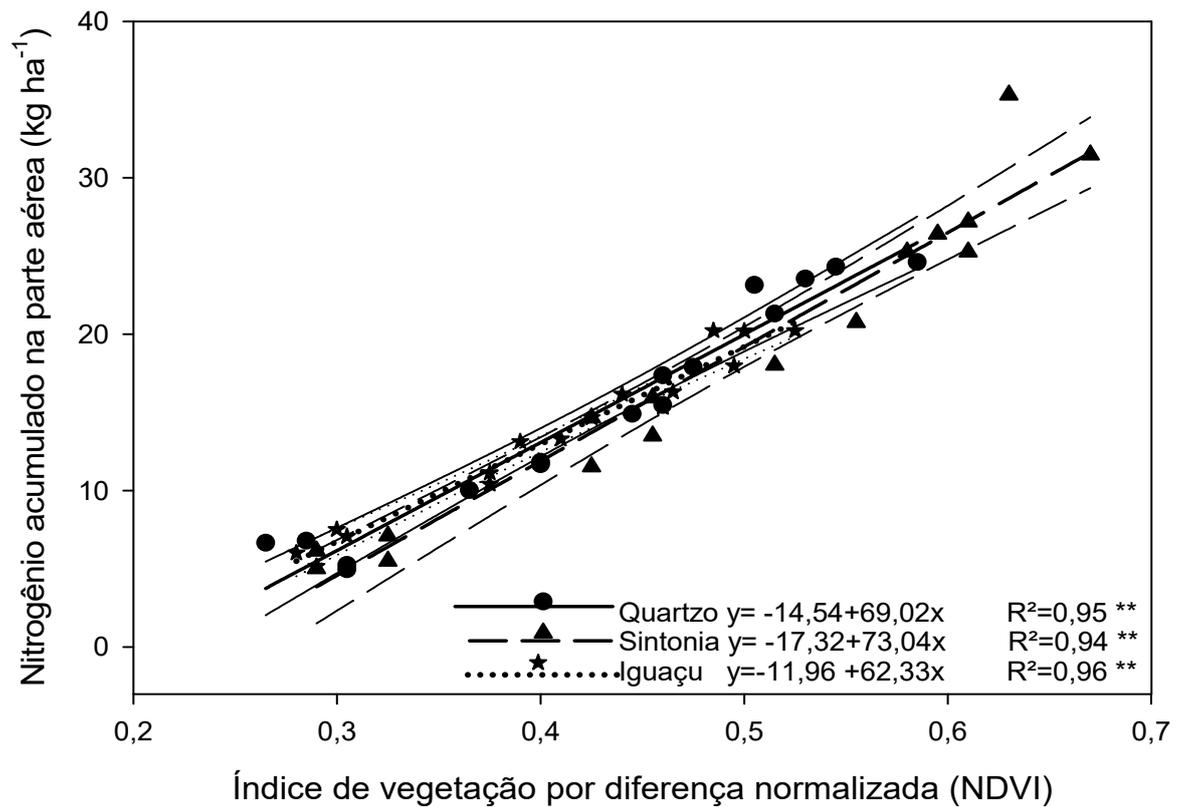
O mesmo procedimento descrito para avaliar a relação entre NDVI e biomassa da parte aérea foi aplicado para a relação entre os valores de NDVI e

a quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea das plantas, ou seja, foi determinado o intervalo de confiança para cada uma das regressões ajustadas mostradas na Figura 7, considerando o modelo linear ( $y=a+bx$ ) (Figura 9).

A análise dos modelos ajustados entre as variáveis NDVI e quantidade de N acumulada na parte aérea, com os respectivos intervalos de confiança, mostra que existe sobreposição entre os modelos ajustados para as diferentes cultivares utilizadas no estudo (Figura 9). A existência de sobreposição entre os intervalos de confiança mostra que o comportamento das cultivares de trigo foi similar, no estágio de 5-6 folhas expandidas, para a relação entre os valores de NDVI e a quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea. Assim, seria possível utilizar um modelo único para descrever a relação entre estas duas variáveis, sem a necessidade de adoção de modelos individuais para cada cultivar.

Este padrão, onde as cultivares se comportam de forma similar, permite que se utilize o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), medido por sensor óptico ativo de vegetação, como ferramenta no manejo de nitrogênio em lavouras de trigo. Para tanto, existe a necessidade de desenvolvimento e aperfeiçoamento de algoritmos que determinem/estimem a dose de fertilizante nitrogenado a ser aplicado em taxa variável em diferentes partes da lavoura, em função dos valores deste índice de vegetação.

Para diminuir o efeito da cultivar, uma alternativa seria trabalhar com intervalos de NDVI. Desta maneira, as diferenças no NDVI ocasionada pelas diferentes 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.



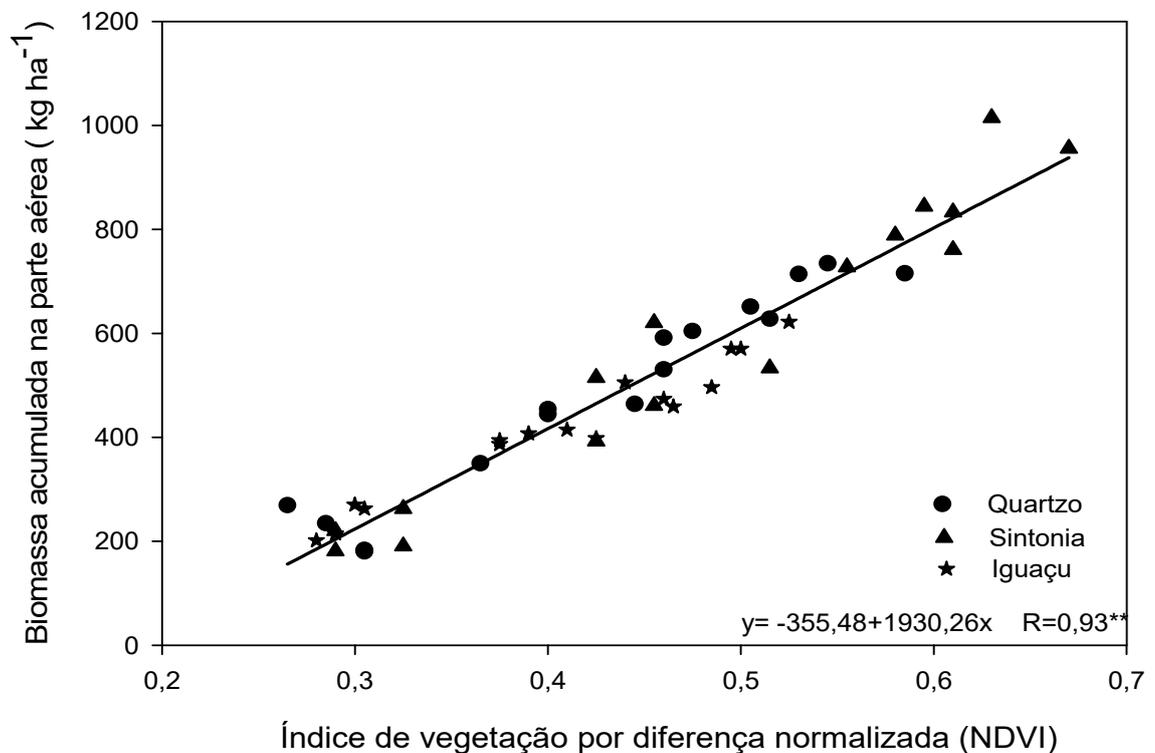
\*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

FIGURA 9. Modelos de regressão e seus intervalos de confiança (95% de confiança) entre índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea no estádio 5-6 folhas completamente expandidas, em três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.

Grohs *et al.* (2009) trabalharam com classes de potencial produtivo, encontrando 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 as cultivares testadas. Assim, 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 cultivar.

Com isso podemos utilizar o sensor Greenseeker em diferentes cultivares, utilizando-se a mesma relação entre NDVI, biomassa e quantidade de N acumulado na parte aérea, mesmo que estas apresentem diferentes características agronômicas.

Em função das análises realizadas indicarem ser possível a adoção de modelos únicos para as três cultivares avaliadas, foram então ajustados modelos de regressão linear únicos para as relações entre NDVI e biomassa da parte aérea (Figura 10).



\*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

FIGURA 10. Modelo de regressão única ajustada entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e a quantidade de biomassa acumulada na parte aérea no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, para três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.

Na Figura 10, é mostrado o modelo único ajustado entre as variáveis NDVI e biomassa da parte aérea, considerando as três cultivares utilizadas. Ainda assim, o coeficiente de determinação obtido foi elevado (0,93) e significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Esse fato mostra que a utilização do sensor Greenseeker pode ser feita em diferentes cultivares utilizando-se o mesmo modelo para a relação entre NDVI e quantidade de biomassa acumulada na parte aérea, mesmo que estas cultivares apresentem diferentes características agrônômicas.

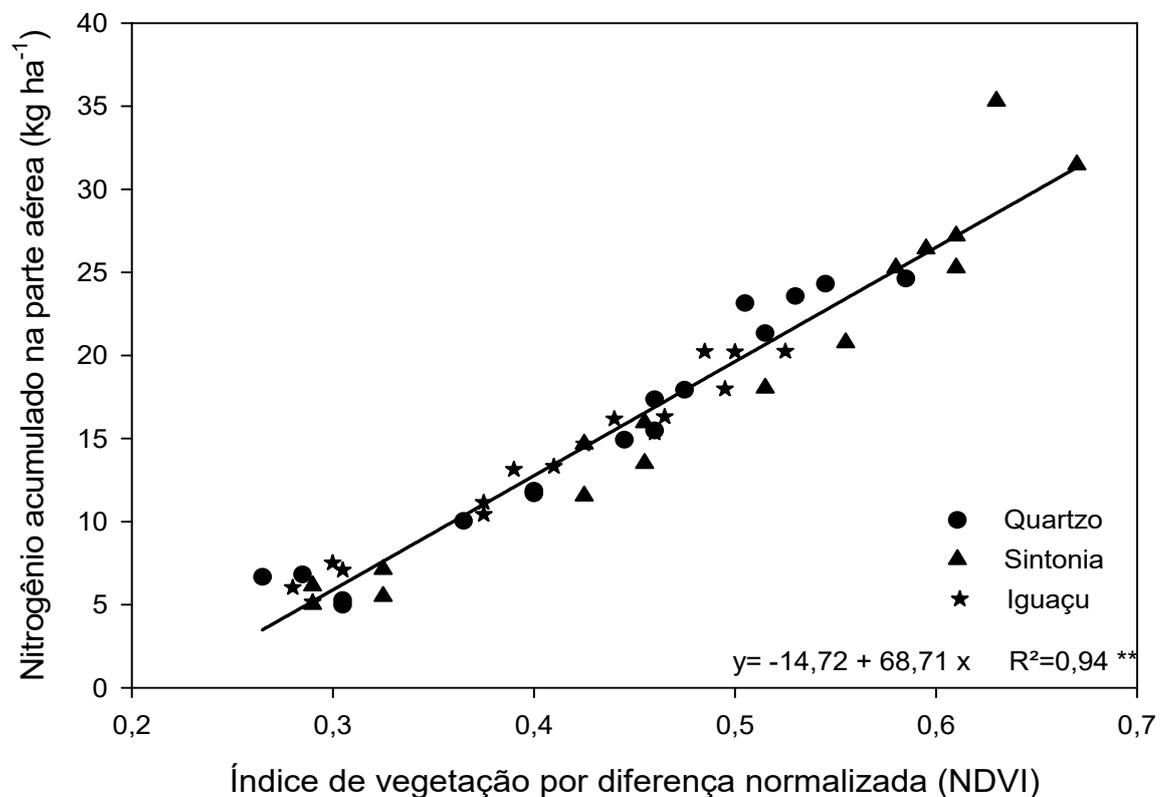
Nesse contexto, o uso do sensor GreenSeeker vem a ser uma alternativa no manejo de N na cultura do trigo pois pode ser embarcado em máquinas agrícolas, permitindo a leitura de reflectância do dossel da cultura e possibilitando a realização de aplicações de nitrogênio em taxas variáveis no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, por meio de uma estimativa de acúmulo de biomassa da parte aérea.

O sensor GreenSeeker é eficiente em detectar a variabilidade de desenvolvimento da cultura, conforme mostrado também Raun *et al.* (2005). Neste caso, diferentes doses de N levaram a diferentes valores de NDVI e estes valores foram correlacionados de maneira significativa com o rendimento de grãos.

A variabilidade em lavouras comerciais pode ser originada 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 pelo sensor. Após avaliar as diferentes condições de desenvolvimento das plantas e do estado nutricional, é possível realizar a aplicação de acordo com a variabilidade existente.

Igualmente, foi ajustado um modelo único para a relação entre os valores de NDVI e a quantidade de N acumulada na parte aérea, considerando as três cultivares utilizadas, conforme mostrado na Figura 11.

O coeficiente de determinação entre as duas variáveis foi elevado (0,94) e significativo a 1% de significância, indicando que um mesmo modelo pode ser utilizado para a relação entre os valores de NDVI e a quantidade de N acumulada na parte aérea, considerando as três cultivares conjuntamente.



\*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

FIGURA 11. Modelo de regressão ajustada entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e a quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, para três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.

Os modelos desenvolvidos acima (Figuras 10 e 11) mostraram comportamento similar das cultivares utilizadas para a relação entre NDVI, biomassa da parte aérea e quantidade de N acumulada. Assim, para qualquer

medida de NDVI obtida na lavoura, esta poderá ser comparada com a quantidade de biomassa acumulada e/ou quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea e, desta forma, rapidamente o operador terá a informação sobre o status nutricional do dossel naquele intervalo de espaço quantificado.

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.

#### **4.2.2 Validações dos modelos desenvolvidos nos experimentos do ano de 2014 utilizando avaliações realizadas nos experimentos conduzidos no ano de 2015.**

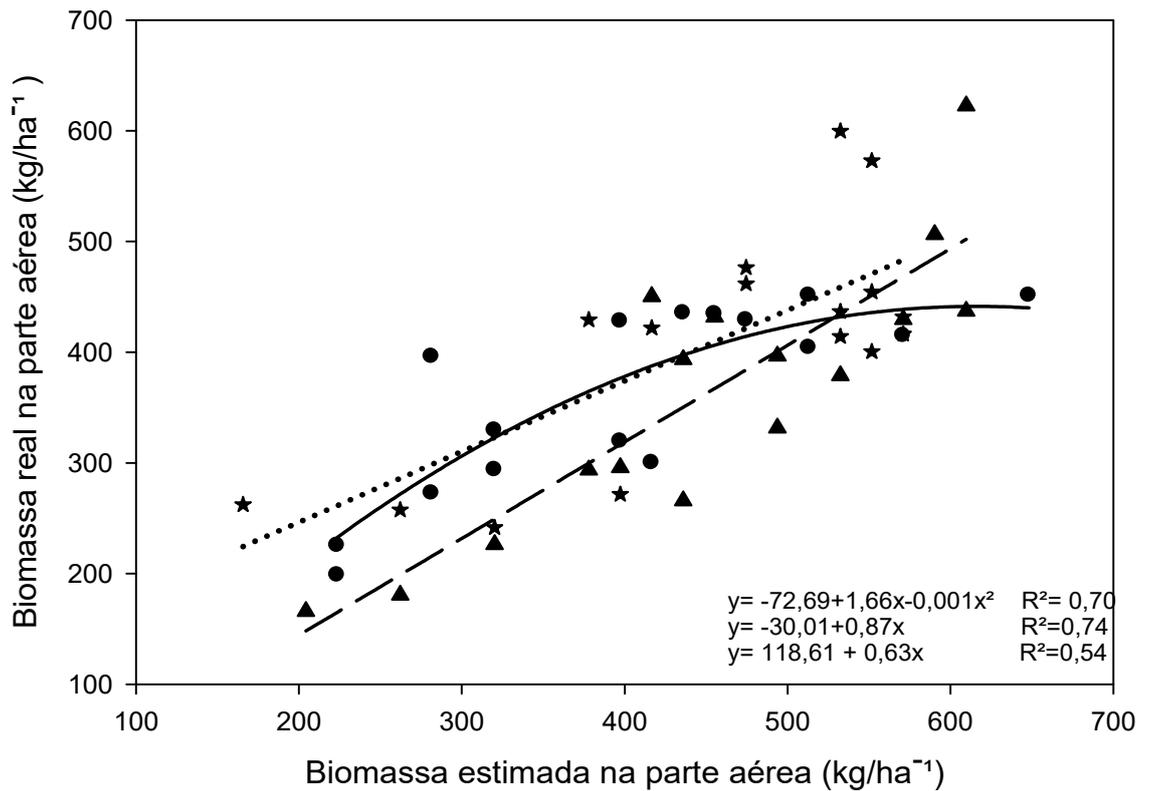
No ano de 2015, foi realizado experimento de campo no mesmo local e com os mesmos tratamentos utilizados no ano de 2014. As cultivares utilizadas em 2015 foram TBIO Sintonia, TBIO Sinuelo e TBIO Toruk.

Neste experimento, foram efetuadas as mesmas avaliações no estágio de 5-6 folhas, ou seja, medição de valores de NDVI, utilizando sensor óptico ativo de vegetação, e avaliação das quantidades de biomassa e N acumulado na parte aérea das plantas. O objetivo deste procedimento foi verificar a adequação e validar os modelos desenvolvidos nos experimentos de 2014 para

as cultivares Quartzo, TBIO Sintonia e TBIO Iguaçu, utilizando dados obtidos em 2015 para as cultivares TBIO Sintonia, TBIO Sinuelo e TBIO Toruk.

Utilizando o modelo determinado no experimento conduzido no ano de 2014 para a relação entre os valores de NDVI e a quantidade de biomassa da parte aérea ( $y = -355,48 + 1930,26x$ , Figura 10), foi realizada a verificação da adequação deste modelo, utilizando-se avaliações de NDVI e determinações de biomassa da parte aérea do experimento conduzido em 2015, com as cultivares TBIO Sintonia, TBIO Sinuelo e TBIO Toruk. As avaliações no ano de 2015 foram realizadas também no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas.

Os resultados são mostrados na Figura 12. Os coeficientes de determinação para a relação entre a biomassa determinada no experimento de 2015 (biomassa observada) e biomassa estimada pelo NDVI, segundo o modelo desenvolvido em 2014, variaram entre 0,54 e 0,74, respectivamente para as cultivares TBIO Toruk e TBIO Sinuelo.



\*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

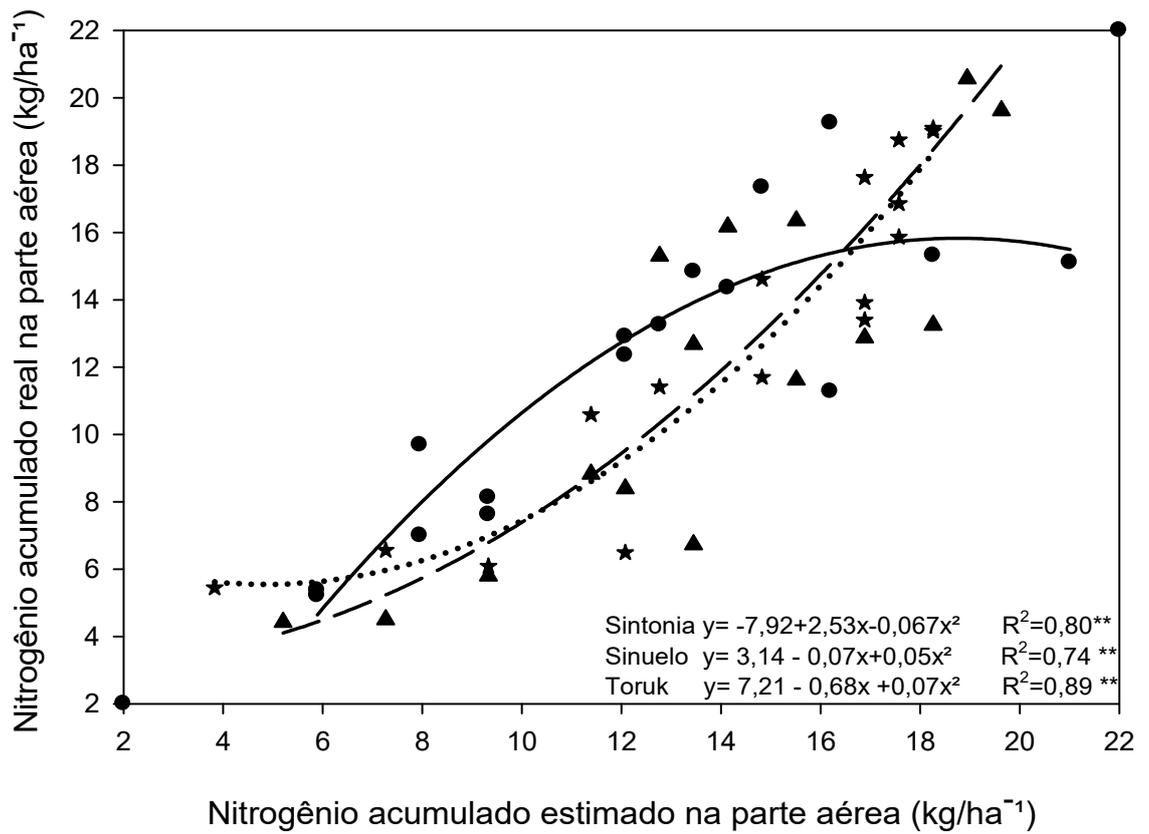
FIGURA 12. Relação entre biomassa observada na parte aérea, avaliada no estágio de 5-6 folhas expandidas no experimento de 2015, e a biomassa estimada na parte aérea, utilizando modelo desenvolvido no experimento de 2014. Eldorado do Sul, RS, 2015.

Utilizando o modelo de regressão de 2014, calculado com o valor do NDVI na safra de 2015, foi verificado que o modelo foi eficiente em estimar a quantidade de biomassa na parte aérea utilizando os valores de NDVI medidos em 2015. Os coeficientes de variação variaram entre  $R^2=0,54$  e  $R^2=0,74$ , para as cultivares TBIO Toruk e TBIO Sinuelo, respectivamente (Figura 12).

O mesmo procedimento utilizado para a variável biomassa da parte aérea foi empregado para a variável quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea. Utilizando o modelo determinado no experimento conduzido no ano de 2014 para a relação entre os valores de NDVI e a quantidade de N

acumulada ( $y = -14,72 + 68,71x$ , Figura 11), foi realizada a verificação da adequação deste modelo, utilizando-se avaliações de NDVI e determinações de N acumulado do experimento conduzido em 2015, com as cultivares TBIO Sintonia, TBIO Sinuelo e TBIO Toruk (Figura 13).

Utilizando o modelo de regressão de 2014, calculado com o valor do NDVI da safra de 2015, foi verificado que o modelo conseguiu explicar de 74% a 89% das variações observadas entre N acumulado observado (real) e N acumulado estimado pelo modelo desenvolvido em 2014. Os coeficientes de determinação para a relação entre a quantidade de N acumulada determinada (real) no experimento de 2015 e a quantidade de N acumulada estimada pelo NDVI, segundo o modelo desenvolvido em 2014, variaram entre 0,74 e 0,89, respectivamente para as cultivares TBIO Sinuelo e TBIO Toruk, indicando adequação do modelo desenvolvido para estimar a quantidade de N acumulada na parte aérea de plantas de trigo no estágio de 5-6 folhas expandidas, utilizando valores de NDVI medidos por sensor óptico de vegetação (Figura 13).



\*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

FIGURA 13. Relação entre a quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea, avaliado no estágio de 5-6 folhas expandidas no experimento de 2015, e a quantidade de nitrogênio acumulada estimada na parte aérea, utilizando modelo desenvolvido no experimento de 2014. Eldorado do Sul, RS, 2015.

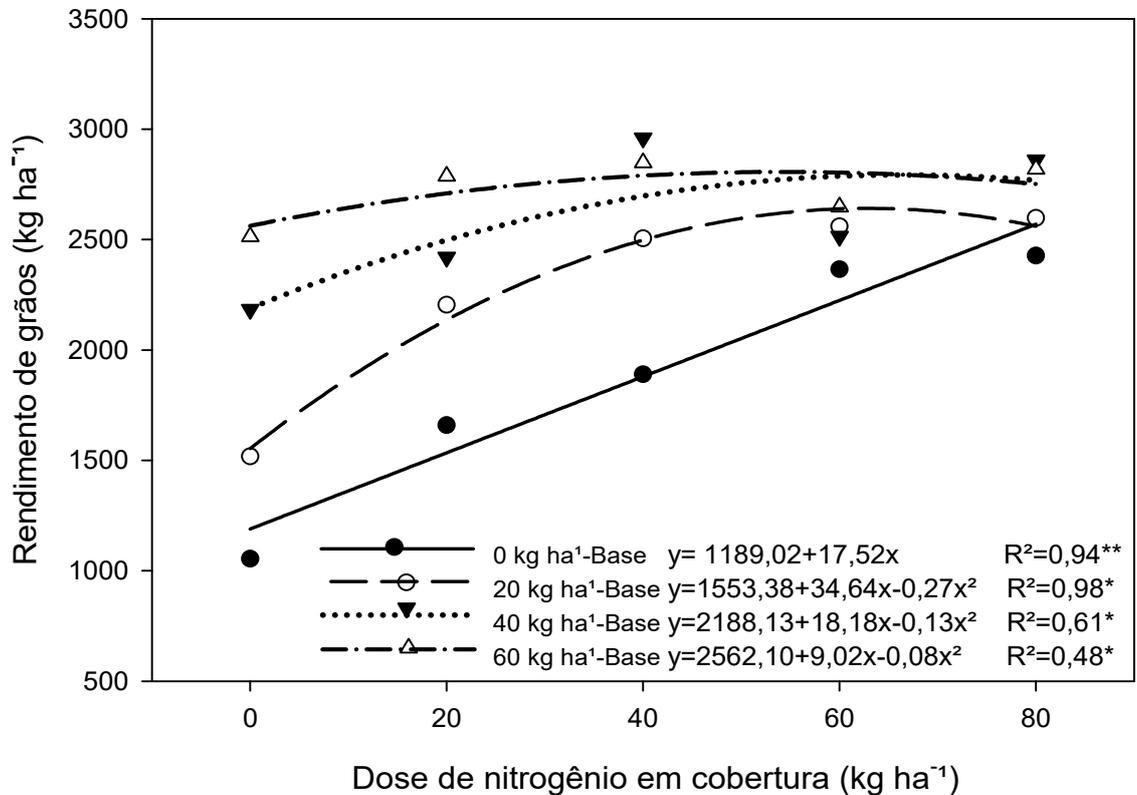
#### **4.3 Determinação da dose de máxima eficiência técnica de nitrogênio (DMET) em cobertura, em função do valor do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado por sensor ativo de reflectância.**

Em cada cultivar, para cada dose de nitrogênio aplicada na base (emergência), foi ajustada curva de regressão de dose-resposta a doses de N em cobertura (Figuras 14, 15 e 16). A partir deste ajuste, foi determinada a dose de máxima eficiência técnica (DMET), ou seja, a dose que resultou na produtividade máxima, para cada dose de N aplicada na base. Esta DMET em cobertura no estágio de 5-6 folhas expandidas foi relacionada ao valor do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) determinado neste mesmo estágio (Figura 17).

Na Figura 14, para a cultivar Quartzo, observa-se que, quando não houve aplicação de N na base, a resposta ao N em cobertura foi linear, mostrando maior resposta do rendimento de grãos ao incremento de doses de N aplicadas em cobertura. Já quando se aplicou 20, 40 ou 60 kg ha<sup>-1</sup> na base, o comportamento do rendimento de grãos de trigo mostrou resposta quadrática, a ponto de evidenciar que existe um limite máximo para o aproveitamento de N considerando o intervalo estabelecido.

Os maiores coeficiente de determinação entre rendimento de grãos e dose de N em cobertura foram observados nas doses de 0 e 20 kg ha<sup>-1</sup> de N na base, mostrando alta relação ou maior resposta do rendimento de grãos ao N em cobertura quando a dose aplicada na base foi menor (Figura 14). Nas doses de 40 e 60 kg ha<sup>-1</sup>, o coeficiente de determinação foi mais baixo (0,61 e 0,48, respectivamente), indicando menor resposta do rendimento de grãos a

doses de N em cobertura com o incremento da dose aplicada por ocasião da emergência das plantas (base).



\*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste-t.

\* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste-t.

FIGURA 14. Resposta do rendimento de grãos na cultivar Quartzo à aplicação de doses de N em cobertura, para diferentes doses de N aplicadas por ocasião da emergência das plantas (base). Eldorado do Sul, RS, 2014.

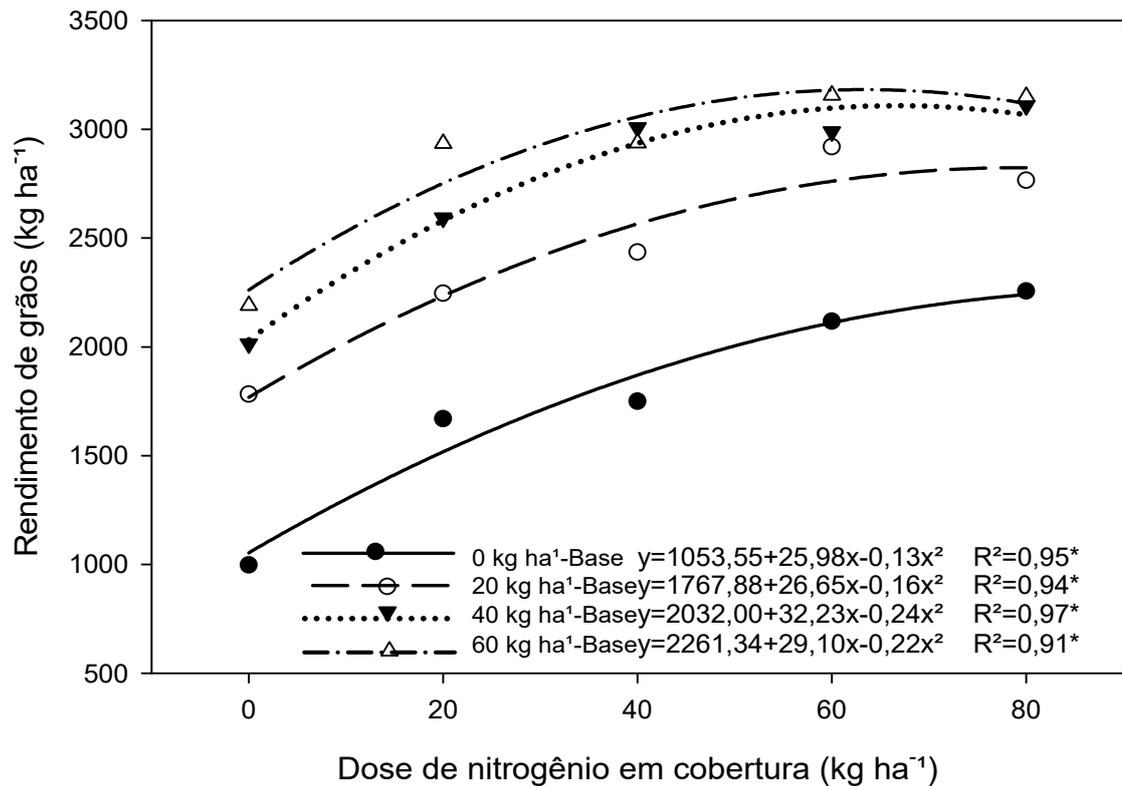
Para a cultivar Quartzo, o maior rendimento de grãos (2959 kg ha<sup>-1</sup>) foi observado com a aplicação de 40 kg ha<sup>-1</sup> de N na base e aplicação de 40 kg ha<sup>-1</sup> em cobertura, no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas. A menor produtividade (1054 kg ha<sup>-1</sup>) foi observada quando não aplicou N na base nem em cobertura. Ainda, quando não aplicou N na base, foi observada resposta linear a doses crescentes de N em cobertura, sendo que, a cada 1 kg

ha<sup>-1</sup> de N aplicado a mais na lavoura em cobertura, houve incremento de aproximadamente 17,5 kg ha<sup>-1</sup> no rendimento de grãos (Figura 14). A maior dose total de N aplicada (60 kg ha<sup>-1</sup> na base e 80 kg ha<sup>-1</sup> em cobertura) apresentou rendimento menor do que o tratamento que recebeu a mesma dose de N na base e a aplicação de 60 kg ha<sup>-1</sup> em cobertura (Figura 14).

Assim, a dose de 40 kg ha<sup>-1</sup> de N na base, onde se obteve o maior rendimento de grãos com a aplicação adicional de 40 kg ha<sup>-1</sup> em cobertura, representa o dobro da dose recomendada por Reunião... (2015). Segundo a indicação técnica da cultura do trigo, a dose de N a ser aplicada na semeadura varia entre 15 e 20 kg ha<sup>-1</sup>.

Pettinelli Neto *et al.* (2002), pesquisando 5 doses de nitrogênio (0, 20, 40, 60 e 80 kg ha<sup>-1</sup>) e 6 cultivares de trigo, verificaram que houve efeito das doses de N na produção de grãos, sendo que o único componente do rendimento de grãos que não foi afetado pela dose de N aplicada foi o número de grãos por espiga. Teixeira Filho *et al.* (2010), trabalhando com combinação de cinco doses de N (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha<sup>-1</sup>), três fontes de nitrogênio (Entec, sulfato de amônio e ureia) e duas épocas de aplicação (na semeadura ao lado na linha e cobertura), mostraram que as doses de N influenciaram a produtividade de grãos de trigo nos diferentes anos de estudo, com ajuste de função quadrática e com a máxima produtividade observada na dose de 122 kg ha<sup>-1</sup> de N.

A Figura 15 mostra a resposta do rendimento de grãos à aplicação de doses de N na base e em cobertura na cultivar de trigo TBIO Sintonia. Para esta cultivar, o melhor ajuste para a relação entre o rendimento de grãos e doses de N aplicadas em cobertura, nas diferentes doses de N aplicadas na base, foi obtido com regressões quadráticas.



\* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste-t.

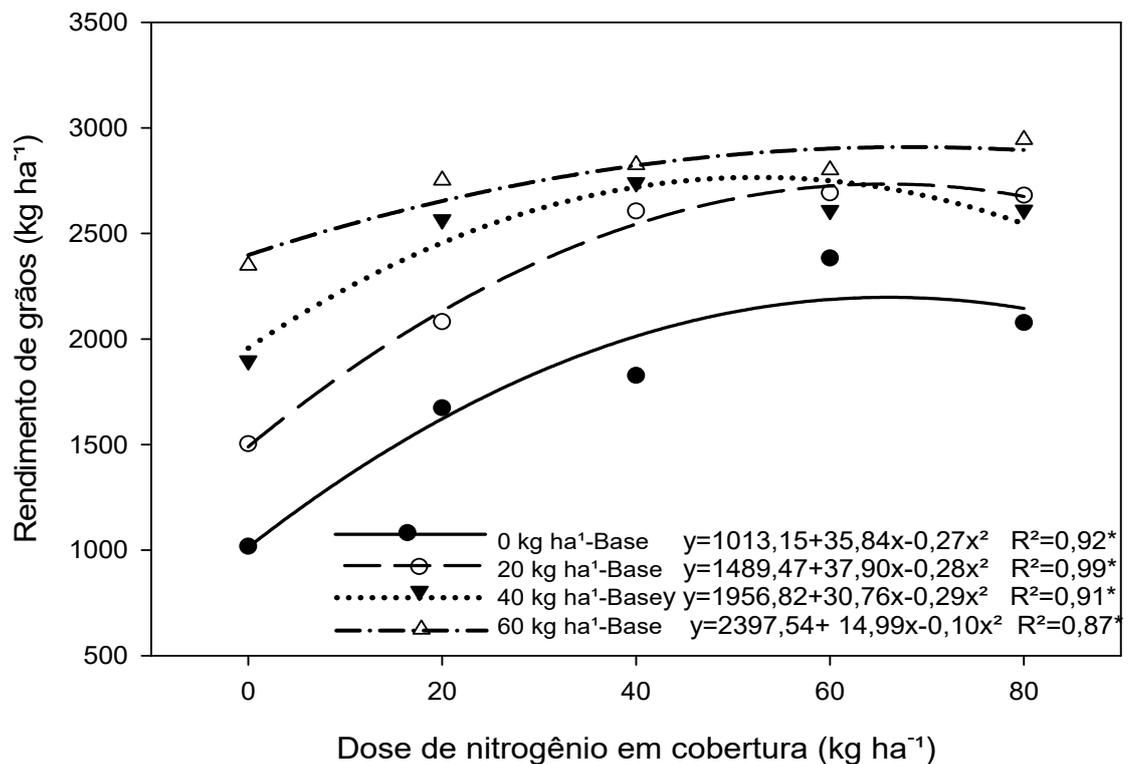
FIGURA 15. Resposta do rendimento de grãos na cultivar TBIO Sintonia à aplicação de doses de N em cobertura, para diferentes doses de N aplicadas por ocasião da emergência das plantas (base). Eldorado do Sul, RS, 2014.

Para a cultivar TBIO Sintonia, doses crescentes de N em cobertura promoveram incremento no rendimento de grãos. Isso é verificado nos modelos ajustados entre doses de N em cobertura e rendimento de grãos, que apresentaram coeficientes de determinação acima de 0,91 (Figura 15). Nesta cultivar, a dose de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N na base e 60 kg ha<sup>-1</sup> em cobertura foi suficiente para o alcance do maior rendimento de grãos (3157 kg ha<sup>-1</sup>).

No trabalho desenvolvido por Nakayama *et al.* (2006), a produtividade de grãos de trigo foi crescente com a aplicação de até 159 kg ha<sup>-1</sup> de N, com produtividade de grãos de 2810 kg ha<sup>-1</sup>, mostrando resposta favorável da cultivar para esta prática.

Para a cultivar TBIO Iguaçu, também foram ajustadas regressões quadráticas entre o rendimento de grãos e as doses de N aplicadas em cobertura, para cada dose de N aplicada por ocasião da emergência das plantas (base) (Figura 16). Os coeficientes de determinação foram significativos e superiores a 0,87.

Desta forma, o rendimento de grãos para a cultivar TBIO Iguaçu apresentou resposta quadrática às doses de N aplicadas em cobertura. Quando as plantas não receberam N na base, houve maior incremento no rendimento de grãos para cada kg de N aplicado em cobertura (Figura 16).



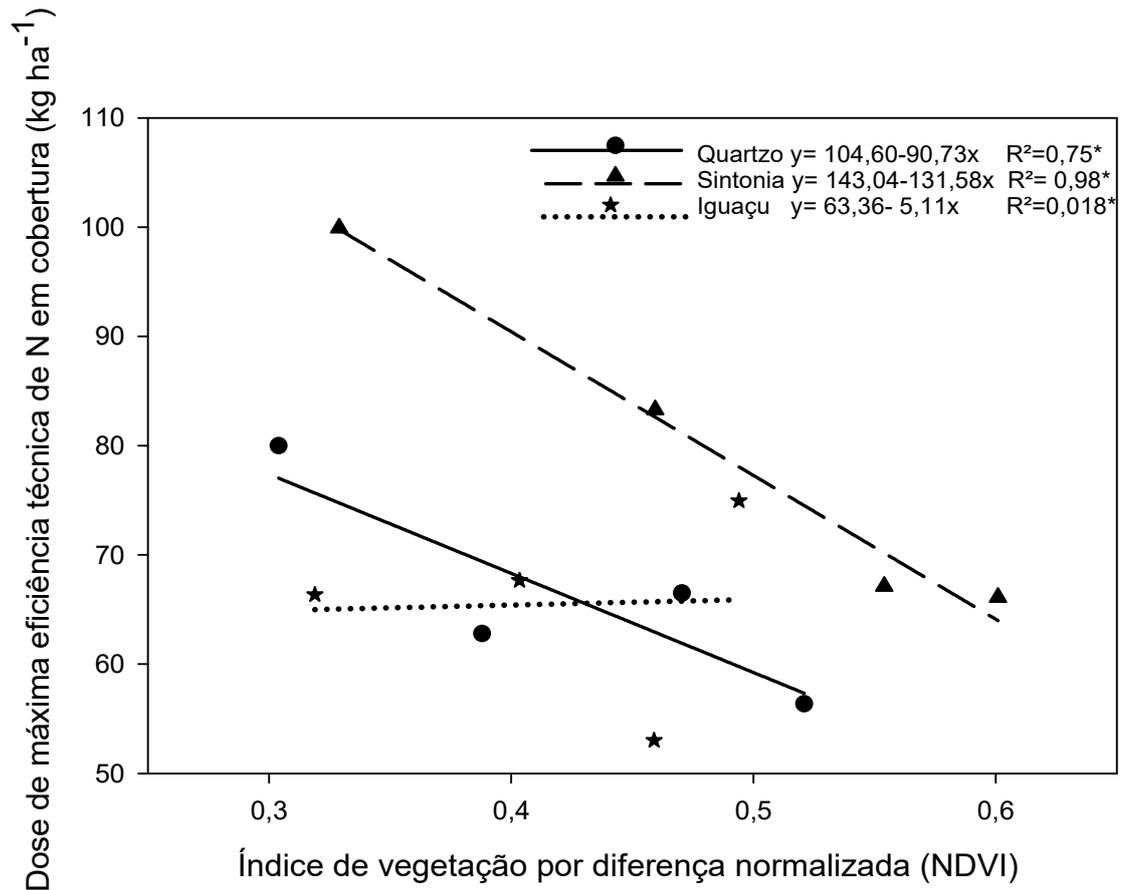
\* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste-t.

FIGURA 16. Resposta do rendimento de grãos na cultivar Iguaçu à aplicação de doses de N em cobertura, para diferentes doses de N aplicadas por ocasião da emergência das plantas (base). Eldorado do Sul, RS, 2014.

Utilizando-se as regressões ajustadas mostradas nas Figuras 14, 15 e 16 foram determinada matematicamente, para cada dose de N aplicada na base, o máximo rendimento de grãos e, com isso, foi determinada a dose de máxima eficiência técnica (DMET) no estágio de 5-6 folhas expandidas, para cada de N na base em cada cultivar. Após, a DMET foi relacionada com o valor do índice de vegetação normalizada (NDVI) avaliado imediatamente antes da aplicação de N em cobertura (estádio de 5-6 folhas), conforme mostrado na Figura 17.

No momento de aplicação de N em cobertura (estádio de 5-6 folhas), quando são verificados valores de NDVI mais baixos, devido ao menor acúmulo de biomassa resultante da menor disponibilidade de N nos estádios iniciais de desenvolvimento, observou-se que a dose de máxima eficiência técnica (DMET) foi maior. Por outro lado, quanto mais elevado for o valor de NDVI da cultura do trigo no momento de aplicação de N em cobertura, menor será a resposta à aplicação de N em cobertura (Figura 17).

Quando a planta atingir o final do afilhamento, a mesma já absorveu aproximadamente um terço do nitrogênio utilizado durante o ciclo. Quando grandes quantidades de N forem absorvidas até o final do afilhamento, as plantas pouco responderão à adição da adubação nitrogenada em cobertura (Lamothe, 1994). Welsh *et al.* (2003a, 2003b) concluíram que as estratégias mais eficientes de aplicação de N em taxa variável para cevada e trigo de inverno foram relacionadas à aplicação de maiores doses de N em áreas de baixa densidade de colmos e redução da dose de adubação nitrogenada em áreas de alta densidade de colmos.



\* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste-t.

FIGURA 17. Relação entre a dose de máxima eficiência técnica (DMET) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) no estágio de 5-6 folhas expandidas, em três cultivares de trigo. Eldorado do Sul, RS, 2014.

A aplicação de doses adequadas de N em cobertura, no estágio de 5-6 folhas expandidas, é fundamental para a garantia de maior potencial de rendimento de grãos. Ainda no início do desenvolvimento da cultura (estádio de 5-6 folhas expandidas), as plantas estão definindo os componentes de rendimento de grãos número de espigas por unidade de área e número de grãos por espiga.

Estes que 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 afillhos e iniciando a diferenciação das estruturas reprodutivas na inflorescência.

Portanto, o NDVI avaliado pelo sensor óptico ativo de vegetação poderia ser empregado para estimar o potencial produtivo de diferentes áreas dentro de uma lavoura neste estágio de desenvolvimento e, com esta informação, realizar a adubação nitrogenada em taxa variável.

Desta maneira, torna-se fundamental avaliar a variabilidade da biomassa acumulada pelas plantas, para estimar o potencial produtivo da lavoura e, de maneira precisa e eficiente, otimizar a aplicação de N em cobertura e permitir a aplicação deste nutriente em taxa variável, com doses condizentes com a real necessidade das plantas em diferentes áreas de uma lavoura. Neste contexto, sensores remotos, como o Greenseeker que realizam avaliação da reflectância e de índices de vegetação, surgem como importantes ferramentas para detectar a variabilidade espacial do potencial produtivo e da necessidade de N de maneira precisa e em tempo real.

Segundo Bredemeier *et al.* (2007), a variabilidade espacial da quantidade de biomassa da parte aérea em lavoura comercial de cevada pode ser se até 400% na no estágio de emissão da sexta folha do colmo principal (variação entre 1250 e 5000 kg ha<sup>-1</sup>). Esta variabilidade condiciona resposta variável ao N aplicado em cobertura, sendo que esta variabilidade deve ser considerada quando da aplicação deste nutriente no estágio de 5-6 completamente expandidas. Quantificando o desenvolvimento da cultura e a real necessidade de N no momento da aplicação da adubação nitrogenada com o sensor Greenseeker, é possível a obtenção de rendimentos de grãos satisfatórios e redução de investimento em adubos nitrogenados.

Quando ocorre aplicação de nitrogênio a taxa variável, além da redução na aplicação deste insumo em locais onde o as plantas estão bem supridas e

onde não haveria resposta a altas doses de N aplicadas, é possível também reduzir a lixiviação e contaminação de nitrato no solo.

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).

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.

## 5 CONCLUSÕES

O Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) apresenta associação significativa com a biomassa da parte aérea, quantidade de nitrogênio acumulado e doses de nitrogênio aplicadas na base, para todas as cultivares de trigo utilizadas no presente trabalho.

A modificação do NDVI ao longo do ciclo foi afetada pela disponibilidade de nitrogênio, tanto na emergência das plantas quanto em cobertura. Quando avaliado o NDVI no estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, este mostrou os maiores valores quando foram aplicadas maiores doses de N na emergência das plantas (base).

As leituras do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) no estágio de 5-6 folhas expandidas, utilizando sensor óptico ativo de reflectância, se mostraram eficientes em identificar variações de biomassa e nitrogênio acumulado na parte aérea na cultura do trigo.

A dose de máxima eficiente técnica de N relacionou-se negativamente com os valores de NDVI avaliados no momento de aplicação de N em cobertura. No estágio de 5-6 folhas completamente expandidas, a dose de máxima eficiência técnica (DMET) aumentou com a redução dos valores de NDVI avaliados neste estágio.

Os modelos obtidos neste trabalho para as relações entre NDVI, biomassa da parte aérea e quantidade de N acumulada indicam que é possível

a estimativa destas variáveis pela realização de avaliações de NDVI utilizando sensor de vegetação. Foi possível o desenvolvimento de modelos únicos que contemplam as diferentes variedades de trigo utilizadas no presente estudo.

A avaliação do NDVI no estágio do emborrachamento da cultura permitiu a estimativa precisa do rendimento de grãos de diferentes cultivares de trigo.

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.

BERGAMASCHI, H. et al. **Clima da estação experimental da UFRGS e região de abrangência.** Porto Alegre: UFRGS, 2003. 77p.

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

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

BÜLL, L. T. **Nutrição mineral do milho.** In: YAMADA, T. Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, 1993.

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.

CARVALHO, M. A. C.; FURLANI JÚNIOR, E.; ARF, O.; SÁ, M. E.; PAULINO, H. B.; BUZETTI, S. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio e teores foliares deste nutriente e de clorofila em feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 445-450, 2003.

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.

COLLE, C. A. **A cadeia produtiva do trigo no Brasil: contribuição para geração de emprego e renda.** 1998. 89f. Dissertação (Mestrado em Economia Rural). Centro de Estudos e Pesquisas Econômicas – IEPE, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira.** 2016. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 30 de Maio. 2016.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Séries históricas de área plantada, produtividade e produção, relativas às safras 1976/77 a 2014/15 de trigo.** Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&>, 2016b. Acesso em: 20 de Junho. 2016.

DE BOER, J.L. **The management time economics of on-the-go sensing for nitrogen application.** v.4, n.5, p.35-40, 2009 .Disponível em:p:// [www .agriculture.purdue.edu/](http://www.agriculture.purdue.edu/) >.Acesso em: 12 de Abril. 2016.

DRURY, C.F. et al. The non-limiting and least limiting water ranges for soil nitrogen mineralization. **Soil Science Society of América Journal**, v.67, n.5, p.1388-1404, 2003. Disponível em: <[HTTPS://www.agronomy.org/publications/sssaj/articles/67/5/1388](https://www.agronomy.org/publications/sssaj/articles/67/5/1388)>. Acesso em: 23 de Março 2016.

EMBRAPA (2009). **Um pouco de história e política do trigo e Triticultura no Brasil.** Disponível em <<http://www.cnpt.embrapa.br>>. Acesso em 12-Jan-2016.

FENG, W.; YAO, X.; ZHU, Y.; TIAN, Y.C.; CAO, W.X. Monitoring leaf nitrogen status withhyperspectral 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\\_m.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_m.pdf). v.5, 2009 > Acesso em: 10 Abril. 2016.

FRANK, A. B.; BAUER, A. Temperature, nitrogen and carbon dioxide effects on spring wheat development and spikelet numbers. **Crop Science**, Madison, v.36, p. 659-665, 1996.

GASTAL, F.; LEMAIRE, G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. **Journal of Experimental Botany**, New York, v. 53, p. 789-799, 2002.

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.; 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. **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. et al. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor Greenseeker. **Engenharia Agrícola**, 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.

HARMELL, R.D.; KENIMER, A.L.; SEARCY, S.W.; TORBERT, H.A. Runoff water quality impact of variable rate sidedress nitrogen application. **Precision Agriculture**. New York, v. 5, p. 247-261, 2004.

HARPER, J. E. Nitrogen metabolism. In: BOOTE, K. J. et. al. **Physiology and determination of crop yield**. Madison, p. 285-302, 1994.

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

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/r=estacoes/estacoesAutomaticas>

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE - IPNI. Informações recentes para otimização da produção agrícola. Piracicaba: POTAFÓS, 2007. p. 1-4 Disponível em <[http://www.ipni.org.br/ppiweb/gbrazil.nsf/\\$webindex/article](http://www.ipni.org.br/ppiweb/gbrazil.nsf/$webindex/article)>. Acesso em: 10 jul. 2016.

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

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.

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.; DE BOER, J.L.; MALZER, G.L. Economic analysis of spatialtemporal 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: UNIDERP, 2006. 908 p.

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.

MAHEY, R.K.; SINGH, R.; SIDHU, S.S.; NARANG, R.S. The use of remote sensing to assess the effects of water stress on wheat. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 27, p. 423-429, 1991.

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.

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, p. 1.431-1.441, 2004.

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

MUNDSTOCK, C. M. **Planejamento e Manejo Integrado da Lavoura de Trigo**. Editora Evangraf. Porto Alegre, 1999. 227p.

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.

NAKAYAMA T, F. MELLO R, M. FAGUNDES L, J. CAVICHIOLI C, J. KASAI S, F. Utilização de nitrogênio em cobertura na cultura do trigo na região da alta paulista. **Pesquisa & Tecnologia**, v. 3, n. 2, Jul-Dez 2006.

NOH, H.; ZHANG, Q.; HAN, S.; SHIN, B.; REUM, D. **Dynamic calibration and image segmentation methods for multispectral imaging crop nitrogen deficiency sensors**. Transactions of the ASAE. St. Joseph, v.48, n.1, p. 393-401, 2005.

NTECH INDUSTRIES, UKIAH, CA, USA. **GreenSeeker manuals downloads**. Disponível em :< [www.ntechindustries.com/greenseeker-manual.html](http://www.ntechindustries.com/greenseeker-manual.html)>. Acesso em: 15 Abril. 2016.

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.

PENCKOWSKI, L. H. **Efeitos de regulador de crescimento e de doses de nitrogênio na qualidade industrial e em características agrônômicas da cultura de trigo**. 2006. 84p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 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.

PETTINELLI NETO, A. et al. Eficiência e resposta de genótipos de trigo irrigado ao nitrogênio para o Estado de São Paulo. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTIFICA, 14., 2002, Presidente Prudente. **Resumos...** Presidente Prudente: Unesp, 2002. 1 CD-Rom.

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

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, 2008. 1 CD-ROM

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, 2008b

POVH, F. P. **Utilização de sensor ótico ativo em culturas de cereais**. 2007. 86 f. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

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.

RAIJ, B. Van. **Fertilidade do Solo e Adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1991. 343p.

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 2015**. Canela-RS, 2015. 171p.

RINGUELET, A., BACHMEIER, O.A. Kinetics of soil nitrogen mineralization from undisturbed and disturbed soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.33, 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, 1973. 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.

SÁ, J. C. M. **Manejo da fertilidade do solo no plantio direto**. Castro: Fundação ABC, 1996, 96 p.

SALA, V.M.R.; FREITAS, S. dos 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**, v.29, p.345-352, 2005.

SCHÄCHTL, J.; HUBER, G.; MAIDL, F.X.; STICKSEL, E.; SCHULZ, E.; HASCHBERGER, P. Laser-induced chlorophyll fluorescence measurements for detecting the nitrogen status of wheat (*Triticum aestivum* L.) canopies. **Precision Agriculture**, New York, v. 6, p. 143-156, 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.

SCHUCH, L. O. B. et al. Vigor de sementes de populações de aveia preta: II. Desempenho e utilização de nitrogênio. **Scientia Agricola Journal**, Piracicaba, v. 57, p. 121-127, 2000.

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.

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.

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

TEDESCO, M.J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1985. 176p.

TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; ALVAREZ, R. C. F.; FREITAS, J. G.; ARF, O.; SÁ, M. E. Resposta de cultivares de trigo irrigado por aspersão ao nitrogênio em cobertura na região do Cerrado. **Acta Scientiarum-Agronomy**, Maringá, v. 29, p. 421-425, 2007.

TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; ANDREOTTI, M.; ARF, O.; BENETT, C. G. S. Doses, Fontes e épocas de Aplicação de Nitrogênio em trigo irrigado em Plantio Direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v 45, n. 8, p. 797-804, 2010.

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.

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.

VARIANI, C.; BREDEMEIER, C.; ALMEIDA, D.; ROSA, T, A.; Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, Santa Maria, V. 43, p. 1147-1154, 2013.

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.

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.

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.

WRIGHT, D.L.; RAMSEY, R.D.; RASMUSSEN, V.P.; ELLSWORTH, J.W. **Midseason nitrogen application using remote sensing**. Columbia 2011. Disponível em: <[http://www.gis.usu.edu/ArcWebpage/inside\\_table/2002 Presentations /2002wright.pdf](http://www.gis.usu.edu/ArcWebpage/inside_table/2002%20Presentations/2002wright.pdf)>. Acesso em: 11 jul. 2016.

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.

ZAGONEL, J.; VENÂNCIO, W. S.; KUNZ, R. P.; TANAMATI, H. Doses de nitrogênio e densidade de plantas com e sem um regulador de crescimento afetando o trigo, cultivar OR-1. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, p. 25-29, 2002.