

Modelo para indicação de adubação nitrogenada em cobertura na cultura do trigo utilizando sensor de vegetação

Model for indication of nitrogen fertilization in wheat crop using vegetation sensor

André Luis Vian¹, Christian Bredemeier², João Leonardo Fernandes Pires³, Carolina Trentin⁴, Maicon Andre Drum⁵, Manuele Zeni⁶, Marcos Caraffa⁷, Franciane Lemes dos Santos⁸, Alexandre Alan Cassinelli⁹, Anelise Brun¹⁰, Marcelo de Carli Toigo¹¹, Rogério Ferreira Aires¹²

¹ Engenheiro Agrônomo, Doutor em Fitotecnia, Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, andre.vian@ufrgs.br

² Engenheiro Agrônomo, Doutor em Nutrição de Plantas/Agricultura de Precisão, Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, bredemeier@ufrgs.br

³ Engenheiro Agrônomo, Doutor em Fitotecnia/Plantas de Lavoura, Pesquisador, Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS, Brasil, joao.pires@embrapa.br

⁴ Engenheira Agrônoma, Doutoranda em Agronomia, Universidade de Passo Fundo, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Passo Fundo (RS), Brasil, carolinatrentin@live.com

⁵ Engenheira Agrônoma, Doutoranda em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, maicon.andreo@hotmail.com

⁶ Engenheira Agrônoma, Doutoranda em Agronomia, Universidade de Passo Fundo, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Passo Fundo (RS), Brasil, zenimanuele@gmail.com

⁷ Engenheiro Agrônomo, Mestre em Fitotecnia, Sociedade Educacional Três de Maio, Três de Maio, RS, Brasil, carrafa@setrem.com.br

⁸ Engenheira Agrônoma, Doutora em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Solos, Porto Alegre (RS), Brasil, franciane_lemes@hotmail.com

⁹ Estudante de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, alexandrealanc@gmail.com

¹⁰ Engenheira Agrônoma, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, anelisebrun@gmail.com

¹¹ Engenheiro Agrônomo, Mestre em Produção Vegetal, Pesquisador, Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação do Estado do Rio Grande do Sul, Vacaria, RS, Brasil, marcelo-toigo@agricultura.rs.gov.br

¹² Engenheiro Agrônomo, Doutor em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Pesquisador, Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação do estado do Rio Grande do Sul, Vacaria, RS, Brasil, rogerio-aires@agricultura.rs.gov.br

RESUMO

A eficiência do uso do nitrogênio (N) pela cultura do trigo pode ser maximizada por meio de ajustes na recomendação para lavouras comerciais com o uso de ferramentas da Agricultura de Precisão (AP). Uma das maneiras de definir a dose da adubação nitrogenada para a necessidade da cultura é estimando o estado e a demanda nutricional do dossel vegetal, de modo a considerar a variabilidade espacial existente na lavoura. O objetivo foi desenvolver um modelo de adubação nitrogenada em cobertura na cultura do trigo por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), para otimizar a aplicação de nitrogênio conforme a necessidade da cultura. O modelo foi construído a partir de dados oriundos de experimentos conduzidos a campo em quatro regiões do Rio Grande do Sul. A partir dos resultados obtidos, encontrou-se alta relação entre o NDVI com a biomassa, conteúdo de nitrogênio do dossel vegetal e com o modelo para adubação nitrogenada. Portanto, o modelo proposto apresenta potencial para otimizar o uso de N e, conseqüentemente, maximizar o rendimento de grãos e/ou a rentabilidade da cultura.

Palavras-chave: *Triticum aestivum* L.; NDVI; Greenseeker; algoritmo.

ABSTRACT

The efficiency of nitrogen (N) use by the wheat crop can be maximized through adjustments in the recommendation for commercial crops with the use of Precision Agriculture (PA) tools. One way to define the dose of nitrogen fertilizer for the crop needs is to estimate the nutritional status and demand of the plant canopy, in order to consider the

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000013>

 Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

spatial variability existing in the field. The objective was to develop a model for nitrogen fertilization in the wheat crop using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), in order to optimize the application of nitrogen according to crop needs. The model was built based on data from field experiments conducted in four regions of Rio Grande do Sul. From the results obtained, a high relationship was found between NDVI with biomass, the nitrogen content of the plant canopy, and the model for nitrogen fertilization. Therefore, the proposed model presents the potential to optimize N use and, consequently, maximize grain yield and/or crop profitability.

Keywords: NDVI; Greenseeker; algorithm; *Triticum aestivum* L.

1 INTRODUÇÃO

A indicação de adubação nitrogenada para a cultura do trigo no Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC) é definida em função do teor de matéria orgânica no solo, da cultura antecessora e da expectativa de rendimento de grãos (Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2020). Esta forma de definição da dose, apesar de consolidada na prática, desconsidera a variabilidade espacial do crescimento das plantas em uma determinada lavoura e da dinâmica da disponibilidade de nitrogênio (N), sendo influenciados pelos diferentes tipos de solo, climas, mineralização da matéria orgânica, variações de relevo, variabilidade de distribuição de palha da cultura antecessora, entre outros (Drum et al., 2018). Nesse sentido, há espaço para o aprimoramento da metodologia de adubação nitrogenada em cobertura em trigo, incorporando, por exemplo, ferramentas da Agricultura de Precisão (AP).

O aumento da eficiência no uso do N na cultura do trigo pelo ajuste da adubação nitrogenada em função da demanda nutricional das plantas e da expectativa de rendimento de grãos, levando em consideração a variabilidade espacial do crescimento das plantas, é uma forma viável de se obter ganhos produtivos e sustentáveis na agricultura, devido à redução de perdas de N para o ambiente (Vian et al., 2018). Para realizar a indicação da dose de N em função da demanda nutricional das plantas, alguns modelos foram desenvolvidos para que as aplicações a taxa variada pudessem se tornar uma realidade. Esses modelos consideram variáveis como a disponibilidade de N no solo, as condições meteorológicas, o estágio de desenvolvimento da cultura, o conteúdo de clorofila das folhas, a demanda nutricional e o potencial produtivo (Raun et al., 2005; Shanahan et al., 2008; Holland; Schepers, 2013; Torres-Dorante et al., 2016; Padilla et al., 2018). Porém, a dificuldade em trabalhar a campo com essas inúmeras variáveis necessarias para viabilizar o uso desses algoritmos demandou a necessidade do desenvolvimento de modelos mais simples para aplicação no campo. Desta forma, entende-se que a implementação e a utilização dos modelos ocorrerão a partir da facilidade de seu uso,

além de serem calibrados e validados para as diferentes condições edafoclimáticas da região Sul do Brasil.

Alguns trabalhos já foram desenvolvidos para as culturas da cana-de-açúcar, do algodão e do milho nas condições edafoclimáticas do Cerrado brasileiro (Tarpley et al., 2000; Rosa et al., 2015). Entretanto, esses modelos não possuem o mesmo desempenho nas lavouras da região Sul, especialmente se consideradas as condições da elevada variabilidade espacial e temporal, onde é realizado o cultivo de trigo e outros cereais de inverno. Assim, o objetivo do presente estudo foi desenvolver um modelo de indicação da dose de adubação nitrogenada em cobertura em trigo em função da demanda nutricional de N, usando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos, para o desenvolvimento do modelo de indicação da dose de N a ser aplicada em cobertura em trigo, foram conduzidos a campo em 2015, 2017, 2018 e 2019, em quatro municípios do estado do Rio Grande do Sul (Coxilha e Vacaria, pertencentes à Região Homogênea de Adaptação de Cultivares 1 - RHACT 1, considerada fria e úmida, e Eldorado do Sul e Três de Maio, pertencentes à RHACT 2, considerada moderadamente quente e úmida) (Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2020) (Figura 1).

Na RHACT 1, situam-se as áreas experimentais da Embrapa Trigo, em Coxilha (RS), e da Secretaria da Agricultura, Pecuária Produção Sustentável e Irrigação do RS (Seapi), em Vacaria (RS), localizadas nas regiões fisiográficas do Planalto Médio e dos Campos de Cima da Serra, respectivamente (Silva et al., 2015). Em Coxilha, o clima é subtropical de verão úmido quente (Tipo Cfa) e, em Vacaria, o clima é subtropical de verão ameno (Tipo Cfb), conforme a classificação de Koppen (INMET, 2016) (Tabela 1). Na RHACT 2, situam-se a Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), em Eldorado do Sul (RS), e a área experimental da Sociedade Educacional Três de Maio (SETREM), em Três de Maio (RS), localizadas nas regiões fisiográficas da Depressão Central e das Missões, respectiva-

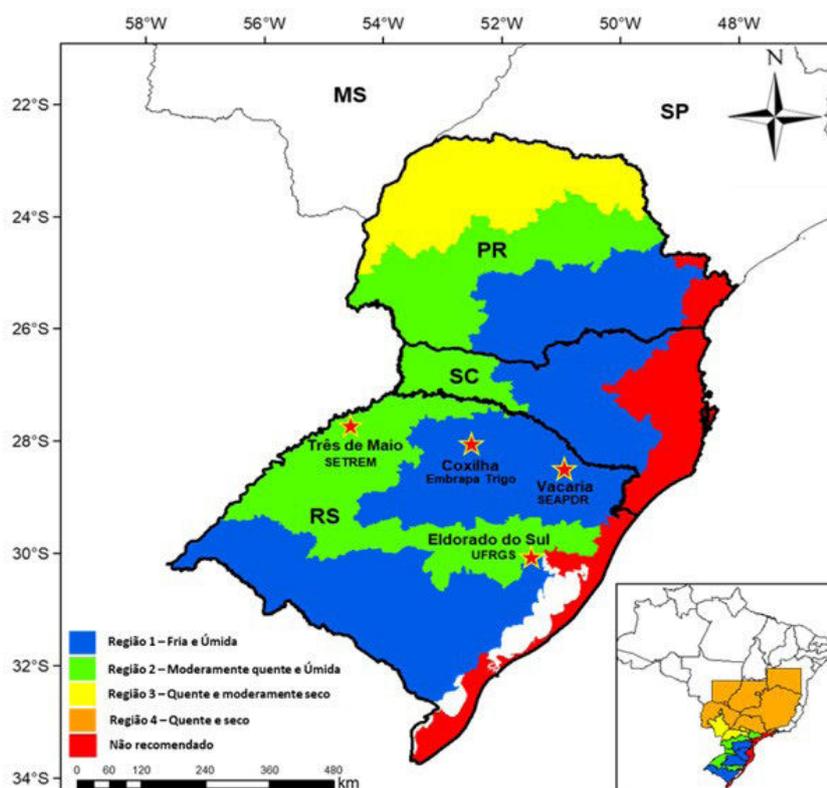


Figura 1. Localização dos experimentos em quatro municípios (marcados em vermelho) do Estado do Rio Grande do Sul (RS). SC = Santa Catarina; PR = Paraná.

Tabela 1. Descrição das principais características edafoclimáticas dos locais de condução dos experimentos para desenvolvimento do modelo de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do trigo.

Município (Instituição)	Precipitação pluvial ¹ (mm)	Tipo de solo ²	Média de temperatura ³ (°C)		Altitude (m)
			Mínima	Máxima	
Coxilha (Embrapa Trigo)	1.788	Latossolo Vermelho Distrófico húmico	12,9	22,0	689
Vacaria (Seapi)	1.800	Latossolo Vermelho Distrófico	7,3	25,6	955
Eldorado do Sul (UFRGS)	1.440	Argissolo Vermelho Distrófico típico	14,0	25,0	46
Três de Maio (SETREM)	1.725	Latossolo Vermelho Distrófico típico	15,0	25,8	343

¹Precipitação pluvial média anual - Período 1991-2010; ²Segundo classificação proposta por Streck et al. (2008); ³ Temperatura do ar média anual no mês mais frio (mínima) e no mais quente (máxima) - Período 1991-2010 (INMET, 2016).

mente. O clima nos dois locais é subtropical de verão úmido quente (tipo Cfa) (INMET, 2016) (Tabela 1).

Os tratamentos consistiram de diferentes cultivares de trigo e estratégias de aplicação de N em cobertura. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, com parcelas subdivididas e quatro repetições. Nas parcelas principais, foram alocadas as cultivares e, nas subparcelas, as estratégias de aplicação de N em cobertura. A unidade experimental foi composta por dez linhas de três metros de comprimento com espaçamento entre linhas de 0,17 m, totalizando 5,1 m².

Foram utilizadas seis cultivares, com variações dependendo do ano e local, sendo todas indicadas para cultivo nas RHACTs 1 e 2 (Tabela 2). O critério de escolha das cultivares foi baseado na representatividade em área cultivada comercialmente nos diferentes anos de condução dos experimentos.

Nas subparcelas, as estratégias de aplicação de N em cobertura constaram da aplicação de diferentes doses de nitrogênio (sem N, 15, 30, 45 e 60 kg N ha⁻¹) na emergência das plantas, tendo como fonte nitrogenada a ureia (45% de N). Já a dose de N em cobertura, aplicada no estágio de seis folhas completamente

Tabela 2. Descrição das principais características agronômicas das cultivares de trigo utilizadas nos experimentos para desenvolvimento do modelo de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do trigo.

Cultivar	Ciclo ¹ (dias)	Porte	Hábito de crescimento	Experimento (Instituição)	Ano
BRS Parrudo	135	Médio	Ereto	Embrapa Trigo ¹ , Seapi ² UFRGS ³ , SETREM ⁴	2017, 2018, 2019
BRS Marcante	133	Médio	Semiereto	Embrapa Trigo ¹ , Seapi ²	2018
TBIO Sossego	130	Médio	Semiereto	Embrapa Trigo ¹ , Seapi ² UFRGS ³ , SETREM ⁴	2017, 2018
TBIO Toruk	145	Baixo	Semiereto	UFRGS ³	2015, 2019
TBIO Sinuelo	150	Médio	Semi-ereto	UFRGS ³	2015
TBIO Sintonia	128	Médio	Semi-ereto	UFRGS ³	2015

¹Embrapa Trigo - Coxilha (RHACT 1); ²Seapi - Vacaria (RHACT 1); ³UFRGS - Eldorado do Sul (RHACT 2); ⁴SETREM - Três de Maio (RHACT 2).
Fonte: Reunião... (2020).

expandidas em cada subparcela, foi ajustada conforme o modelo indicado na sequência.

As aplicações de diferentes doses de N na emergência tinham a finalidade de promover variabilidade no desenvolvimento das plantas, alterando a produção de biomassa da parte aérea e a quantidade de N absorvido no estádio de seis folhas completamente expandidas, com o intuito de simular a variabilidade encontrada nas lavouras comerciais, criando, assim, diferentes demandas potenciais de N nas plantas.

Os experimentos foram conduzidos após a cultura da soja, uma vez que esta é a cultura antecessora ao trigo que ocorre com maior frequência no RS. A densidade de semeadura foi de 300 sementes aptas m², sendo semeado no início do período indicado pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para cada local. A adubação de base de fósforo e potássio seguiu as indicações técnicas para a cultura do trigo para potencial produtivo de 5.000 kg ha⁻¹ (Reunião..., 2016). Antes da execução dos experimentos de campo, foram realizadas amostragens de solo para caracterização química das áreas e basear a adubação fosfatada e potássica.

No estádio de seis folhas expandidas, foram avaliados o NDVI, a produção de biomassa e a quantidade de N acumulado na parte aérea. A avaliação do NDVI foi realizada por meio da leitura da reflectância do dossel vegetativo com sensor óptico ativo GreenSeeker®. As leituras foram feitas com o equipamento percorrendo as linhas centrais das parcelas com altura 0,8 m acima do dossel da cultura. O NDVI foi calculado conforme a Fórmula 1.

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (1)$$

Onde:

V = reflectância no vermelho (680 nm) e IVP = reflectância na região do infravermelho próximo (770 nm).

A biomassa na parte aérea foi quantificada pela amostragem de três linhas com 0,5 m de comprimento, totalizando 0,27 m². Posteriormente, as amostras foram secas em estufa de ar forçado à temperatura de 60 °C até atingir peso constante e, após, pesadas. Foi avaliada a concentração de N no tecido vegetal, seguindo o método Kjeldahl (Tedesco et al., 1995). A quantidade de N acumulada na parte aérea foi obtida pela multiplicação da quantidade de biomassa seca da parte aérea pela concentração de N no tecido, sendo expressa em “kg ha⁻¹”.

O modelo proposto neste trabalho foi desenvolvido considerando a demanda nutricional de nitrogênio pela cultura do trigo no estádio de seis folhas completamente expandidas na escala proposta por Haun (1973), no estádio 3 da escala proposta por Feekes (Large, 1954) e no estádio 23 da escala proposta por Zadoks et al. (1974), sendo este estádio que marca o início do período anterior de maior demanda de N pela planta, no qual pode ser mais facilmente identificado utilizando índices de vegetação e que pode ser indicada a adubação nitrogenada em cobertura (Bredemeier; Mundstock, 2001).

Foi considerada a curva de absorção “ideal” de N pela cultura do trigo para obtenção de rendimento de grãos elevado, proposta por Wiethölter (2011). Essa curva se caracteriza pela absorção elevada de N entre os estádios de alongamento dos entrenós e espigamento, podendo atingir o máximo da absorção próximo aos 100 dias após a emergência das plantas. No estádio de seis folhas expandidas, as plantas de trigo precisam acumular em seus tecidos 35 kg N ha⁻¹ na parte aérea, para que rendimentos de grãos próximos de 5.000 kg ha⁻¹ possam ser alcançados. Dessa forma, o modelo proposto tem por objetivo de indicar a dose de N em cobertura indicada pela Comissão Brasileira

de Pesquisa de Trigo e Triticale, para a RHACT1 (100 kg N ha⁻¹) e RHACT2 (80 kg N ha⁻¹) (Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2020), acrescida da quantidade de N faltante ou redução da quantidade excedente em relação ao padrão de 35 kg N ha⁻¹, que será estimado pela leitura do NDVI e predito pelos modelos validados para os experimentos desenvolvidos. Para indicar a dose a ser utilizada pelo produtor, deve-se seguir a Fórmula 2.

$$\text{Dose indicada de N em cobertura (kg ha}^{-1}\text{)} = 35 - [N]_{\text{absorvido}} + \text{Padrão} \quad (2)$$

Onde:

“35” refere-se à quantidade padrão de N (em kg ha⁻¹) que a planta deve ter acumulado na parte aérea até o estágio de seis folhas completamente expandidas; [N] absorvido refere-se à quantidade real de N acumulada em um determinado local/ano (kg ha⁻¹), e “Padrão” refere-se à dose de N em cobertura indicada pela Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale (2020), sendo estimada de 80 kg ha⁻¹ para a RHACT 2 e de 100 kg ha⁻¹ para a RHACT 1, para potencial de rendimento de grãos de 5.000 kg ha⁻¹.

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo Teste F e, posteriormente, análise de regressão entre as variáveis analisadas ao nível de p < 0,05, com auxílio do pacote estatístico SASTM (Statistical Analysis System - SAS 8.0).

3 RESULTADOS

Na Figura 2 é apresentada a relação entre a biomassa seca da parte aérea com os valores de NDVI no estágio de seis folhas completamente expandidas. Observa-se que, conforme ocorre o aumento nos valores de biomassa seca, ocorre incremento nos valores de NDVI (R² = 0,65), sendo esse r² valor semelhante aos encontrados por Vian et al. (2018), em trabalho com a cultura do trigo usando sensores de vegetação. Observa-se que os valores de biomassa seca na parte aérea variaram entre 185 kg de biomassa ha⁻¹ a 1.190 kg de biomassa ha⁻¹, enquanto os valores de NDVI variaram entre 0,26 e 0,78, respectivamente (Figura 2).

A biomassa na parte aérea da cultura do trigo é importante, pois é responsável, entre outras coisas, pela taxa fotossintética da cultura. A quantidade de biomassa na parte aérea do trigo tem alta relação com as quantidades de N disponíveis às plantas, quando coletadas no estágio de seis folhas completamente expandidas, além de apresentar alta relação com os valores de NDVI (Li et al., 2018; Vian et al., 2018).

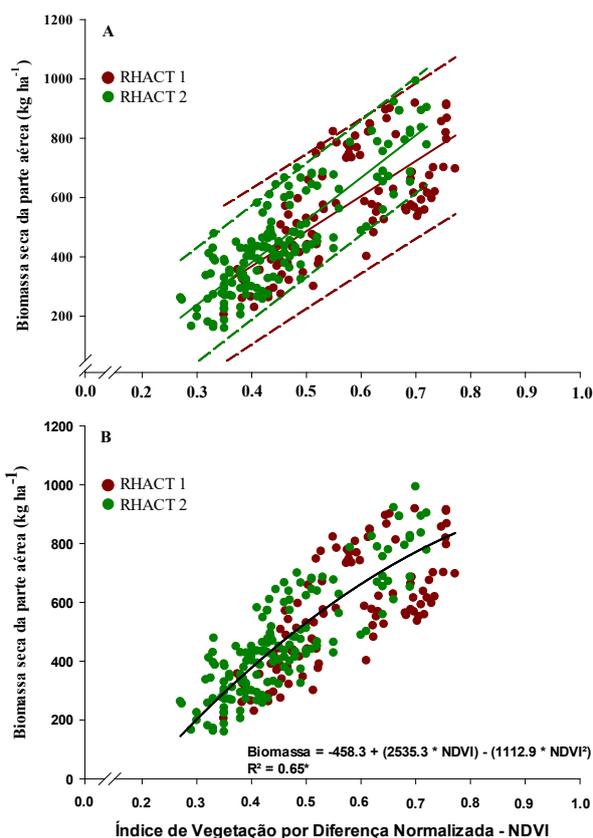


Figura 2. Relação entre a biomassa na parte aérea do trigo e valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), em duas Regiões Homogêneas de Adaptação de Cultivares de Trigo no sul do Brasil (RHACT), sendo: RHACT 1 - vermelho e RHACT 2 - verde. Considerando os diferentes locais, anos e doses de N aplicadas na emergência das plantas em função das doses de nitrogênio aplicadas na semeadura. * Significativo a p < 0,05.

A variação de produção de biomassa e, consequentemente, no acúmulo de N nos tecidos vegetais pode ser estimada, de forma indireta, pelo emprego de sensores de vegetação, os quais informam um índice de vegetação, como, por exemplo, o NDVI. Este índice de vegetação é formado por dois comprimentos de onda: o vermelho e o infravermelho próximo. A maior disponibilidade de N para as plantas proporciona maior acúmulo de biomassa fotossinteticamente ativa. Dessa forma, há maior refletância no infravermelho e maior absorção da radiação no vermelho, devido à concentração de clorofilas com aumento nos valores de NDVI (Coelho et al., 2018).

Também, a quantidade de N acumulada na parte aérea está ligada com a disponibilidade de N no solo, pois, quando da variação na disponibilidade de N no solo (exemplo: nitrato, nitrito e amônia), há variação na quantidade de N absorvida e acumulada no dossel da cultura (Meng et al., 2013; Carvalho et al., 2016). Quando se analisou a relação das quantidades de N acumulado na parte aérea e os valores de NDVI para

as cultivares utilizadas (BRS Marcante, BRS Parrudo, TBIO Sinuelo, TBIO Sintonia, TBIO Sossego e TBIO Toruk), foi possível representar essa relação com um modelo de regressão único. A relação entre a quantidade de N acumulada e o NDVI é alta, como se pode verificar na Figura 3, observando-se aumento dos valores da quantidade de N acumulado na parte aérea, aumentando de forma similar os valores de NDVI. Observa-se que os valores de N acumulado variaram entre 5 kg de N ha⁻¹ e 55 kg de N ha⁻¹, enquanto os valores de NDVI variaram entre 0,26 e 0,78, respectivamente (Figura 3).

Na Figura 4, a linha tracejada vermelha indica a quantidade mínima de nitrogênio acumulada na parte aérea das plantas no estágio de seis folhas completamente expandidas, visando à obtenção de rendimento de grãos elevado. A estimativa do balanço de N na planta foi baseada pela Fórmula 3:

$$\text{Balanço de N na planta} = 35 \text{ kg de N ha}^{-1} - \text{N acumulado no tecido} \left(\text{kg N ha}^{-1} \right) \quad (3)$$

Onde:

“35” refere-se à quantidade padrão de N (em kg ha⁻¹) que a planta deve ter acumulado na parte aérea até o estágio de seis folhas completamente expandidas; N acumulado no tecido (kg ha⁻¹) é estimado pelo modelo matemático ($y = -9,2172 + 54,92 * \text{NDVI}$), apresentada na Figura 4.

Observa-se que os sensores ópticos de dossel são capazes de estimar o teor de N no tecido em tempo real com nível adequado de precisão. Essa ferramenta possibilita estimar a absorção do N na parte aérea da cultura em tempo real ao longo do ciclo de crescimento da cultura.

As etapas anteriores de construção do modelo serviram para estimar as quantidades de N acumulado no dossel vegetativo (kg ha⁻¹) e quantificar a demanda de N pela cultura no estágio de seis folhas expandidas, possibilitando desenvolver a terceira etapa, ou seja, o desenvolvimento do modelo para aplicação de N à taxa variada, baseado nos valores de NDVI avaliados no estágio da sexta folha completamente expandida.

Este modelo foi definido com o objetivo de ser simples e prático a campo. O modelo matemático segue a Fórmula 2, apresentada no item material e métodos (Dose indicada = 35 - [N] absorvido + Padrão). Com base nessas informações, foram construídas duas curvas de indicação de N em cobertura, uma para a RHACT 1 (100 kg ha⁻¹) e outra para RHACT 2 (80 kg ha⁻¹), como é previsto pela Comissão Brasileira de

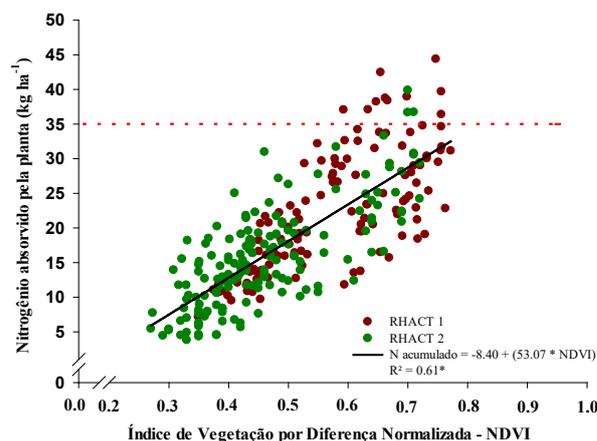


Figura 3. Relação entre os valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e a quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea do trigo em função das doses de nitrogênio aplicadas na semeadura. Linha tracejada vermelha indica a concentração mínima de nitrogênio que a cultura precisa ter absorvido (kg N ha⁻¹) no estágio de seis folhas completamente expandidas. * Significativo a $p < 0,05$. Regiões Homogêneas de Adaptação de Cultivares de Trigo no sul do Brasil (RHACT), sendo: RHACT 1 - vermelho e RHACT 2 - verde.

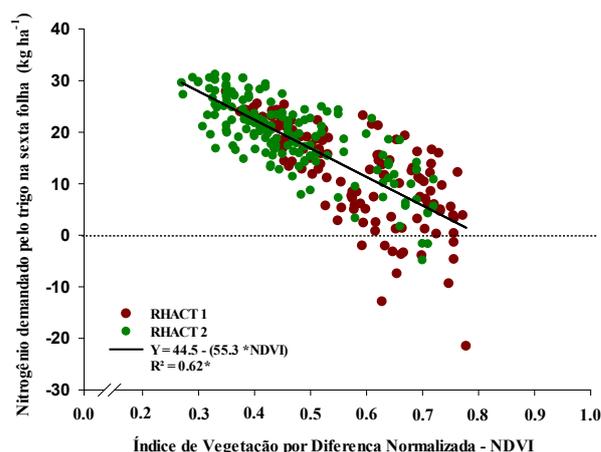


Figura 4. Nitrogênio acumulado no tecido (kg N ha⁻¹) do trigo no estágio de seis folhas completamente expandidas. * Significativo a $p < 0,05$. Regiões Homogêneas de Adaptação de Cultivares de Trigo no sul do Brasil (RHACT), sendo: RHACT 1 - vermelho e RHACT 2 - verde.

Pesquisa de Trigo e Triticale (Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2020).

Na Figura 5A e 5B, são apresentadas as curvas de indicação de adubação nitrogenada em cobertura para trigo, considerando a quantidade de N e de ureia, respectivamente. Na Figura 5A, o modelo proposto obteve valor do coeficiente de correlação de $r = 0,72$ (RHACT 1) e $r = 0,79$ (RHACT 2), considerando todas as cultivares, locais e anos. Foi definido que a dose sofre variação em função dos valores de NDVI, sendo calculada a partir da fórmula: RHACT 1 - Dose de N (kg ha⁻¹) = 142,22 + (50,837 * NDVI) e RHACT 2 - Dose de N (kg ha⁻¹) = 123,94 + (54,005 * NDVI). Observa-se que

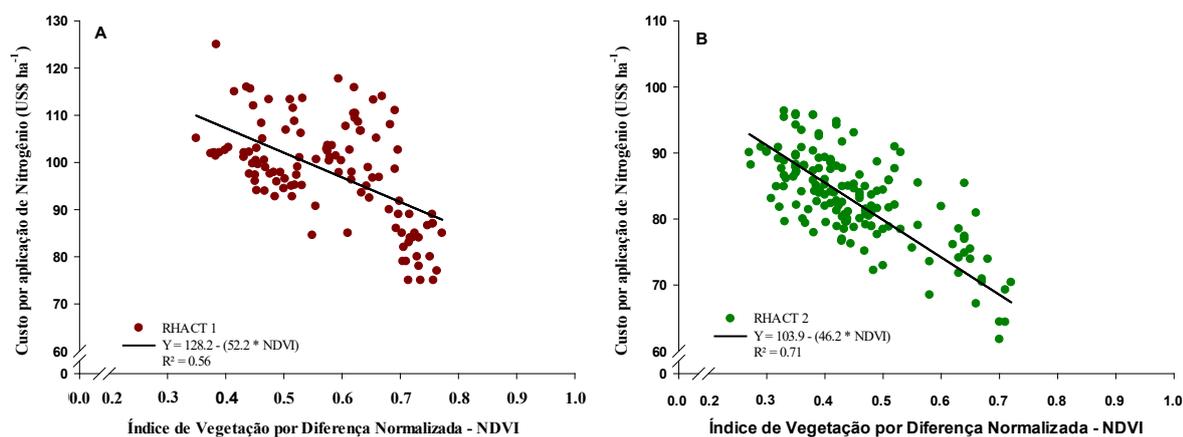


Figure 5. Estimativa de custos em dólares (US\$) com o uso de nitrogênio em função do modelo proposto para o manejo da adubação nitrogenada em cobertura de trigo no estágio de seis folhas totalmente expandidas para as regiões de cultivo no sul do Brasil (RHACT), sendo RHACT 1 - A e RHACT 2 - B.

houve uma variação entre os menores e maiores valores de NDVI, promovendo assim a variação nas doses indicadas de N entre 130 e 100 kg N ha⁻¹, respectivamente (RHACT 1). Já para a RHACT 2, verificou-se uma variação entre 110 e 85 kg N ha⁻¹, entre os menores e maiores valores de NDVI.

Foi definido que a dose sofre variação em função dos valores de NDVI, sendo calculada a partir da fórmula: RHACT 1 - Dose de ureia (45% N) (kg ha⁻¹) = 316,04 + (112,97 NDVI) e RHACT 2 - Dose de ureia (45% N) (kg ha⁻¹) = 275,43 + (120,01 NDVI). Observa-se que houve uma variação entre os menores e maiores valores de NDVI, promovendo assim a variação nas doses indicada de ureia entre 230 e 290 e kg N ha⁻¹, respectivamente (RHACT 1). Já para a RHACT 2, houve uma variação entre 190 e 250 e kg N ha⁻¹, respectivamente.

Essa variação é explicada em razão de as plantas apresentarem teores elevados de N acumulados no tecido vegetal, no estágio da sexta folha completamente expandida. Porém, para baixos valores de NDVI, observa-se que o N acumulado no tecido é baixo e, conseqüentemente, deverá receber uma dose maior de N, ou seja, doses próximas a 130 kg de N ha⁻¹. Dessa forma, o modelo tem por objetivo distribuir, de maneira adequada, o nitrogênio que seria aplicado em dose uniforme em toda área, o que promove o melhor aproveitamento do N pelas plantas, maximiza o rendimento de grãos, reduz a contaminação ambiental e pode resultar em menor custo de produção, dependendo da situação.

O desenvolvimento de algoritmos robustos para a adubação nitrogenada, com praticidade e eficiência de uso, é discutido por diversos autores e para diferentes culturas no Brasil e no mundo, sendo cada vez mais disponibilizados para utilização em lavouras comerciais. No entanto, é fundamental utilizar vari-

áveis regionais para o desenvolvimento e validação desses modelos, caracterizando as variáveis edafoclimáticas da região de cultivo e a interação genótipo x ambiente. Tarpley et al. (2000) desenvolveram um algoritmo de adubação nitrogenada em cobertura para a cultura do algodoeiro, baseado em sensores de vegetação. Vian et al. (2018) desenvolveram método de aplicação de N em cobertura para a cultura do trigo em relação à dose de máxima eficiência técnica, usando o NDVI.

Com a utilização do modelo de indicação de N em cobertura em taxa variada utilizando o NDVI, pode-se estimar os custos médios, em dólar (US\$) ha⁻¹ (Associação Comercial, Industrial e de Serviços de Novo Hamburgo, Campo Bom e Estância Velha, 2021), considerando um valor médio da ureia de US\$ 0,37 kg ureia⁻¹ (safras 2015 e 2017), US\$ 0,43 kg ureia⁻¹ (safra 2018) e US\$ 0,39 kg ureia⁻¹ (safra 2019) (Companhia Nacional de Abastecimento, 2021). Na Figura 5, são apresentadas as curvas com os referidos custos para ambas as regiões estudadas, RHACT 1 e RHACT 2. As regiões apresentaram uma variação acima de US\$ 25,00 ha⁻¹. Na RHACT 1, houve uma variação entre US\$ 75,00 e 125,00 ha⁻¹, e, para a RHACT 2, uma variação entre US\$ 62,00 e 98,00 ha⁻¹, entre os menores e maiores valores de NDVI utilizados no modelo.

4 CONCLUSÕES

A resposta espectral do trigo, a partir de valores de NDVI, para a estimativa da quantidade de N acumulado no tecido, mostra que a geração do modelo baseado em dados relacionando a quantidade de N acumulada e o NDVI possui elevada precisão e permite a utilização em lavouras comerciais para a estimativa deste parâmetro.

O modelo proposto possui potencial para aprimoramento da indicação de adubação nitrogenada em cobertura na cultura do trigo, pois permite variação adequada da dose de N na área, quando comparada com a utilização de dose fixa.

O modelo proposto apresenta facilidade de implementação, devido à relação da quantidade de N na parte aérea com os valores de NDVI, conferindo um modelo simples para a indicação de N à taxa variada em trigo, utilizando sensor ativo de vegetação.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento à Fundação Agrisus pelo apoio financeiro da pesquisa por meio do projeto 2222/17. Também, à Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação do RS pela cedência de área para realização dos ensaios em Vacaria, RS.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO COMERCIAL, INDUSTRIAL E DE SERVIÇOS DE NOVO HAMBURGO, CAMPO BOM E ESTÂNCIA VELHA. **Cotação do Dolar**, 2021. Disponível em: <http://www.acinh.com.br/servicos/cotacao-dolar>. Acesso em: 20 jan. 2022.
- BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. Estádios fenológicos do trigo para a adubação nitrogenada em cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 317-323, 2001. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200008>.
- CARVALHO, J. M. G.; BONFIM-SILVA, E. M.; SILVA, T. J. A.; SOUSA, H. H. F.; GUIMARÃES, S. L.; PACHECO, A. B. Nitrogen and potassium in production, nutrition and water use efficiency in wheat plants. **Ciencia e Investigación Agraria**, v. 43, n. 3, p. 442-451, 2016. DOI: <http://doi.org/10.4067/S0718-16202016000300010>.
- COELHO, A. P.; ROSALEN, D. L.; FARIA, R. T. Vegetation index in the prediction of biomass and grain yield of White oat under irrigation levels. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, n. 2, p. 109-117, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1590/1983-40632018v4851523>.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Insumos Agropecuários**, 2021. Disponível em: <https://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultaInsumo.do?method=acaoCarregarConsulta>
- DRUM, M. A.; TRENTIN, C.; VIAN, A. L.; BREDEMEIER, C. Development and validation of algorithm for nitrogen fertilization at varied rate in maize. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 24, n. 3, p. 53, 2018.
- HAUN, J. R. Visual quantification of wheat development. **Agronomy Journal**, v. 65, n. 1, p. 116-119, 1973. DOI: <http://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010035x>.
- HOLLAND, K. H.; SCHEPERS, J. S. Use of a virtual-reference concept to interpret active canopy sensor data. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 1, p. 71-85, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11119-012-9301-6>.
- INMET. **Normais Climatológicas**, 2016. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 10 jan. 2019.
- LARGE, E. C. Growth stages in cereals: illustration of the feekes scale. **Plant Pathology**, v. 3, n. 4, p. 128-129, 1954. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1954.tb00716.x>.
- LI, D.; WANG, X.; ZHENG, H.; ZHOU, K.; YAO, X.; TIAN, Y.; ZHU, Y.; CAO W.; CHENG, T. Estimation of area-and mass-based leaf nitrogen contents of wheat and rice crops from water-removed spectra using continuous wavelet analysis. **Plant Methods**, v. 76, p. 1-20, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1186/s13007-018-0344-1>.
- MENG, Q.; YUE, S.; CHEN, X.; CUI, Z.; YE, Y.; MA, W.; TONG, Y.; ZHANG, F. Understanding Dry Matter and Nitrogen Accumulation with Time-Course for High-Yielding Wheat Production in China. **PLoS One**, v. 8, n. 7, p. e68783, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0068783>.
- PADILLA, F. M.; GALLARDO, M.; PEÑA-FLEITAS, M. T.; SOUZA, R.; THOMPSON, R. B. Proximal optical sensors for nitrogen management of vegetable crops: a review. **Sensors**, v. 18, n. 7, p. 2083, 2018. DOI: <http://doi.org/10.3390/s18072083>.
- 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**, v. 36, n. 19/20, p. 2759-2781, 2005. DOI: <http://doi.org/10.1080/00103620500303988>.
- COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE. **Informações técnicas para trigo e triticale: safra 2016**. Passo Fundo: Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2016, 228 p.
- COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE. **Informações técnicas para trigo e triticale: safra 2020**. Passo Fundo: Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2020. 255 p.
- ROSA, H. J. A.; AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P.; CANTARELLA, H. Sugarcane response to nitrogen rates, measured by a canopy reflectance sensor. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 9, pp. 840-848, 2015. DOI: <http://dxdoi.org/10.1590/S0100-204X2015000900013>.
- SHANAHAN, J. F.; KITCHEN, N. R.; RAUN, W. R.; SCHEPERS, J. S. Responsive in-season nitrogen management for cereals. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 61, n. 1, p. 51-62, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2007.06.006>.
- SILVA, J. A. G.; ARENHARDT, E. G.; KRÜGER, C. A. M. B.; LUCHESE, O. A.; METZ, M.; MAROLLI, A. A expressão dos componentes de produtividade do trigo pela classe tecnológica e aproveitamento do nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19,

- n. 1, p. 27-33, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n1p27-33>.
- STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS ASCAR, 2008. 222 p.
- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).
- TARPLEY, L.; REDDY, K. R.; SASSENATH-COLE, G. F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. **Crop Science**, v. 40, n. 6, p. 1814-1819, 2000. DOI: <http://doi.org/10.2135/cropsci2000.4061814x>.
- TORRES-DORANTE, L.; PAREDES-MELESIO, R.; LINK, A.; LAMMEL, J. A methodology to develop algorithms that predict nitrogen fertilizer needs in maize based on chlorophyll measurements: a case study in central Mexico. **Journal of Agriculture Science**, v. 154, n. 4, p. 705-719, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1017/S002185961500074X>.
- VIAN, A. L.; BREDEMEIER, C.; TURRA, M. A.; GIORDANO, C. P. S.; FOCESATTO, E.; SILVA, J. A.; DRUM, M. A. Nitrogen management in wheat based on the normalized difference vegetation index (NDVI). **Ciência Rural**, v. 48, n. 9, pp. 1-9, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20170743>.
- WIETHÖLTER, S. Fertilidade do solo e a cultura do trigo no Brasil. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, I.; CUNHA, G. R. (eds.). **Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011. p.135-184.
- ZADOKS, J. C.; CHANG, T. T.; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, v. 14, n. 6, p. 415-421, 1974. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>.