

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

SENSORES DE VEGETAÇÃO PARA ESTIMATIVA *IN SITU* DO POTENCIAL
PRODUTIVO NA CULTURA DO MILHO

André Luis Vian
Engenheiro Agrônomo/UFSM

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

Porto Alegre (RS), Brasil
Julho de 2015

CIP - Catalogação na Publicação

Vian, André Luis
SENSORES DE VEGETAÇÃO PARA ESTIMATIVA IN SITU DO
POTENCIAL PRODUTIVO NA CULTURA DO MILHO / André Luis
Vian. -- 2015.
68 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,
2015.

1. Agricultura de precisão. 2. Milho. 3.
Greenseeker. 4. Imagem digital. 5. Potencial
produtivo. I. Bredemeier, Christian , orient. II.
Título.

“O saber a gente aprende com os mestres e com os livros.

A sabedoria se aprende com a vida e com os humildes!”

Cora Coralina

À Deus, pelo dom da vida. Aos meus pais, Ary Luiz Vian (*in
memorian*) e Soeli Candaten Vian, meus exemplos de vida,
por possibilitar em realização de meus sonhos.

Obrigado!

AGRADECIMENTOS

A minha família, em especial aos meus pais e ao meu irmão, Fernando Vian, pelo ombro amigo, pelas “brigas” construtivas, pelos incentivos e pela amizade. Ao meu padrasto, João Batista da Silva, pelos conselhos, pelas conversas e amizade.

Aos familiares da Família Vian e da Família Candaten, em especial aos meus avós, Matilde Candaten e Tranqüilo Luiz Vian (*in memoriam*) e aos meus tios e primos, que estiveram sempre presentes na minha vida e no decorrer da minha caminhada acadêmica, sempre me ajudaram, me aconselhando, me apoiando, me incentivando nos melhores e nos piores momentos, me incentivando para que eu não desistisse do meu sonho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e à Faculdade de Agronomia, por terem proporcionado a realização do sonho de cursar a pós-graduação em uma Universidade de excelência e de grande reconhecimento nacional e mundial.

Ao meu orientador, Prof. Christian Bredemeier, pela orientação, confiança, amizade, ensinamentos, dedicação, ajuda, oportunidades, paciência e incentivos às atividades de pesquisas compartilhadas durante o decorrer do mestrado.

Aos demais professores do Programa de Pós-graduação em Fitotecnia e aos funcionários, pela contribuição na minha formação pessoal e profissional.

Aos meus colegas do grupo de pesquisa (“família de pesquisa”), Danielle Almeida, Cecília Giordano, Marcos Turra, Neuri Feldman, Jhonatan A. da Silva e Murilo Hendz de Jesus, pela amizade, apoio, incentivo e vários momentos de descontração.

Aos colegas e amigos que fiz durante esta caminhada, Abraão, Alexandre, Andrew, Antônio Santi, Bianca, Catarine, Cristiano, Diandra Della Flora, Everton, Giliardi, Henrique, Itacir, Lisandra, Lorenzo, Marcus, Marli, Moacir, Silmara, Taiger, Tiago, Renan e aos demais colegas do Departamento de Plantas de Lavoura e os ingressantes na Pós-Graduação em Fitotecnia em 2013, pela simplicidade de cada momento vivido junto, pelos ensinamentos, pelo incentivo, pela amizade e pelos momentos de descontrações em jantares e almoços acompanhados sempre de uma boa cerveja.

Ao Prof. Paulo Régis Ferreira da Silva e ao seu grupo de pesquisa, pela colaboração e disponibilidade, que foram fundamentais na realização deste trabalho.

Aos Professores Antônio Luis Santi, Denise C. Fontana e Paulo Regis Ferreira da Silva, pela participação na banca de defesa deste trabalho e pelas contribuições.

Às demais pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para que eu vencesse mais uma etapa de minha caminhada.

Em especial ao meu eterno colega, Guilherme Trevisol (*in memoriam*), pelos seus ensinamentos, pela sua amizade e pelo seu amor para com a Agronomia.

A CAPES, pela concessão de bolsa durante o mestrado, permitindo dedicação integral às atividades acadêmicas.

SENSORES DE VEGETAÇÃO PARA ESTIMATIVA *IN SITU* DO POTENCIAL PRODUTIVO NA CULTURA DO MILHO¹

Autor: André Luis Vian

Orientador: Christian Bredemeier

RESUMO

Um dos principais fatores responsáveis pela construção de altas produtividades de grãos em milho é relacionado à sua nutrição, principalmente de nitrogênio (N), uma vez que este nutriente desempenha inúmeras funções na fisiologia da planta. Para manejar adequadamente o N na cultura do milho, são necessários métodos precisos que auxiliem os produtores na tomada de decisão na lavoura em tempo real. A avaliação de variáveis do dossel durante o desenvolvimento da cultura é uma oportunidade para melhorar o rendimento de grãos, através da aplicação localizada de fertilizantes nitrogenados. O objetivo do presente trabalho foi avaliar as relações entre o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), análise de imagens digitais, teor relativo de clorofila na folha (Índice SPAD) e o rendimento de grãos de milho em diferentes ambientes. Os trabalhos foram conduzidos a campo na safra 2013/2014, na EEA/UFRGS (Eldorado do Sul, RS) e na EEA/IRGA (Cachoeirinha, RS). Foram conduzidos três experimentos, sendo os tratamentos constituídos de diferentes densidades de plantas ou por diferentes épocas de dessecação da cobertura de solo no inverno (aveia branca). As avaliações com o sensor Greenseeker foram realizadas entre os estádios de desenvolvimento V4 e V10. O valor do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) apresentou variabilidade em diferentes estádios fenológicos da cultura do milho em função das diferentes densidades populacionais utilizadas. Foi verificada elevada correlação entre a análise de imagens digitais (porcentagem de planta na imagem) e os valores de NDVI e destas duas metodologias com o rendimento de grãos. Assim, foram estabelecidos limites críticos para definição de classes de potencial produtivo. Conclui-se que o uso do sensor óptico ativo de reflectância é importante ferramenta para estimativa do potencial produtivo da cultura do milho e da densidade de plantas *in situ* e em tempo real, visando desenvolver estratégias para adubação nitrogenada em dose variada.

¹Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (68p.) Julho, 2015.

VEGETATION SENSORS FOR *IN SITU* YIELD POTENTIAL ESTIMATION OF MAIZE¹

Author: André Luis Vian
Adviser: Christian Bredemeier

ABSTRACT

One of the main building blocks of high grain yields of maize is related to nitrogen nutrition, since this nutrient has key functions in plant metabolism. To properly manage nitrogen more precise methodologies are required to help decision-making process in real time in the field. The evaluation of canopy variables during plant development represents an opportunity to improve grain yield by site-specific nitrogen fertilization. The objective of this work was to evaluate the relationship between Normalized difference vegetation index (NDVI), digital image analysis, leaf relative chlorophyll content (SPAD index) and maize grain yield in different environments. Three field experiments were carried out in 2013/2014 at EEA/UFRGS (Eldorado do Sul, RS) and EEA/IRGA (Cachoeirinha, RS). Treatments consisted of different plant populations or different winter cover desiccation moments. Evaluations with the active sensor Greenseeker (NDVI) were done between V4 and V10 growth stages. NDVI values varied in different growth stages as a function of plant density. Digital image analysis (plant cover) and NDVI values were highly and significantly correlated. Both methodologies correlated well with maize grain yield and critical values of NDVI were defined for different yield potential classes. The use of the active canopy sensor Greenseeker is an important tool for *in situ* maize yield potential and plant density estimation to develop strategies for variable rate nitrogen fertilization.

¹Master of Science dissertation in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (68p.) July, 2015.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Aspectos gerais da cultura do milho.....	4
2.2 Importância do nitrogênio (N) para a cultura do milho.....	5
2.3 Agricultura de precisão (AP) e aplicação de insumos em dose variada.....	7
2.4 Sensores de vegetação como ferramentas para o manejo da adubação nitrogenada em dose variada.....	9
2.4.1 Greenseeker.....	9
2.4.2 Imagens digitais.....	12
2.4.3 Clorofilômetro.....	13
2.5 Referências bibliográficas.....	15
3 CAPÍTULO I - Uso de sensor óptico de vegetação para estimativa da população de plantas e potencial produtivo da cultura do milho.....	20
1 Introdução.....	21
2 Material e métodos.....	22
2.1 Caracterização dos ambientes.....	22
2.2 Caracterização dos experimentos.....	23
2.3 Variáveis analisadas.....	24
2.4 Análise estatística.....	24
3 Resultados e discussão.....	25
4 Conclusões.....	32
5 Referências bibliográficas.....	33
4 CAPÍTULO II - Análise de imagens digitais e sensor óptico de vegetação para estimativa do potencial produtivo no milho em função da época de dessecação da cultura antecessora.....	35
1 Introdução.....	36

	Página
2 Material e métodos.....	38
3 Resultados e discussão.....	42
4 Conclusões.....	49
5 Referências bibliográficas.....	51
5 CAPÍTULO III - Limites críticos do Índice de vegetação por vegetação normalizada (NDVI) em diferentes estádios fenológicos avaliado por sensor óptico ativo para estimativa do potencial produtivo do milho em tempo real.....	54
1 Introdução.....	55
2 Material e métodos.....	56
3 Resultados e discussão.....	59
4 Conclusões.....	64
5 Referências bibliográficas.....	65
6 CONCLUSÕES GERAIS.....	67
7 VITA.....	68

RELAÇÃO DE TABELAS

Página

CAPÍTULO I

1. Valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios fenológicos e rendimento de grãos de milho em função da densidade de plantas. EEA/IRGA, Cachoeirinha, RS, 2013/14..... 30
2. Coeficiente de correlação entre os valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado em diferentes estádios fenológicos e o rendimento de grãos da cultura do milho, em dois locais..... 31

CAPÍTULO II

1. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento milho (V3 a V8) e teor relativo de clorofila na folha (Índice SPAD) na cultura do milho no estágio V7 em função da época de dessecação da cultura antecessora (aveia branca)..... 45
2. Rendimento de grãos de milho em função da época de dessecação da cultura antecessora (aveia branca)..... 46
3. Matriz de correlação entre a análise de imagem digital (% de planta na imagem), Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), Índice SPAD e rendimento de grãos na cultura do milho..... 48

CAPÍTULO III

1. Limites críticos do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para definição de classes de potencial produtivo da cultura do milho em diferentes estádios fenológicos de desenvolvimento..... 62

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
1. Curva típica de reflectância da vegetação. Adaptado de Rizzi (2004).....	11
CAPÍTULO I	
1. Variação do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em milho em diferentes estádios fenológicos em função da densidade de plantas em dois experimentos. (a) EEA/UFRGS e (b) EEA/IRGA.....	26
2. Variação da produtividade de grãos de milho em função da densidade de plantas. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2013/14.....	29
CAPÍTULO II	
1. Leituras para a obtenção do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) com o sensor óptico Greenseeker no estádio fenológico V7 da cultura do milho.....	40
2. Obtenção e análise das imagens digitais, onde (A) representa a imagem das linhas centrais da unidade experimental e (B) representa a imagem processada e classificada nas classes solo (marrom), palha (amarelo) e planta (verde), no estádio fenológico V7 da cultura do milho.....	41
3. Relação entre análise de imagem digital (porcentagem de planta na imagem) e Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) no estádio fenológico V7 da cultura do milho.....	43
4. Relação entre os valores da análise de imagem digital (% de planta) e o índice SPAD no estádio fenológico V7 da cultura do milho.....	44
5. Relação entre os valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e do Índice SPAD no estádio fenológico V7 da cultura do milho.....	44
6. Relação entre os valores das imagens digitais (% de planta) no estádio fenológico V7 e o rendimento de grãos da cultura do milho.....	47
7. Relação entre o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) no estádio fenológico V7 e o rendimento de grãos da cultura do milho.....	47

8. Relação entre o teor relativo de clorofila na folha (Índice SPAD) no estágio fenológico V7 e o rendimento de grãos da cultura do milho..... 48

CAPÍTULO III

1. Exemplo de aplicação de metodologia para construção de classes de potencial produtivo da cultura do milho em função da variação do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)..... 59
2. Limites críticos do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para definição de classes de potencial produtivo nos estádios fenológicos V4 (A), V5 (B), V6 (C), V7 (D), V8 (E) e V9 (F) da cultura do milho..... 61

1 INTRODUÇÃO

O estudo do potencial produtivo da cultura do milho é de fundamental importância para a obtenção de elevadas produtividades, sendo o potencial definido em função da interação entre o ambiente (solo, clima, disponibilidade hídrica, entre outros) e a genética (cultivares para altos rendimentos) (Resende *et al.*, 2003). Dessa maneira, pode-se definir o potencial produtivo como o máximo do rendimento de grãos apresentado pela cultura em uma condição ambiental onde estejam adaptadas, sem limitações no suprimento de nutrientes e de água, controle de plantas daninhas, pragas e doenças, além de outros estresses abióticos e bióticos.

A grande variabilidade produtiva encontrada nas lavouras comerciais deve-se a três fatores principais: a água disponível no sistema, a adubação nitrogenada e a densidade populacional, fatores esses que contribuem de forma significativa na construção de altas produtividades de grãos.

A maior demanda de água na cultura do milho concentra-se nos estádios de florescimento e início de enchimento de grãos, sendo considerado este período, o mais crítico para a cultura. O suprimento adequado de nitrogênio (N) é de fundamental importância, uma vez que este nutriente desempenha inúmeras funções fisiológicas na planta, como a fotossíntese e o crescimento das plantas (Bissani *et al.*, 2008). O efeito que a densidade populacional da cultura causa na produção final de grãos é determinante para se obter altos rendimentos de grãos, pois a população final de plantas é um dos componentes de rendimento da cultura, desta forma interfere diretamente no rendimento de grãos.

Para manejar adequadamente o nitrogênio na cultura do milho, são necessários métodos precisos que auxiliem os produtores na tomada de decisão na lavoura em tempo real. Desta forma, surgem as ferramentas de agricultura de precisão, com o objetivo de determinar as doses de nitrogênio adequadas a serem aplicadas de forma espacialmente variável, de acordo com as necessidades das plantas em diferentes locais dentro de uma determinada área.

Essas ferramentas de agricultura de precisão, como o sensoriamento remoto, realizam leituras do teor de clorofila e da produção de biomassa do dossel vegetativo das plantas a partir de sensores ópticos de reflectância. A avaliação de variáveis do dossel durante o desenvolvimento da cultura, como o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), é uma oportunidade para melhorar o rendimento e a qualidade de grãos, através da aplicação localizada de fertilizantes nitrogenados. Variáveis importantes neste contexto são a biomassa total, área foliar, os teores de clorofila e nitrogênio na massa seca e o potencial produtivo, as quais são indicadoras da necessidade de N pela cultura. As variações espaciais e temporais destas variáveis devem ser determinadas, de modo que a quantidade de N aplicada corresponda às exigências da cultura tanto quanto possível.

Desta forma, a hipótese do trabalho é que, para se obter altos rendimentos de grãos na cultura do milho, deve-se ter manejo adequado dos fatores de produção, juntamente com a racionalização do uso de insumos agrícolas e, conseqüentemente, redução dos custos de produção e dos impactos ambientais. Diante deste cenário de lavouras altamente tecnificadas, estudar uma nova alternativa no manejo da densidade populacional e da adubação nitrogenada em cobertura na cultura do milho, visando buscar o aprimoramento do manejo da lavoura.

Os objetivos específicos do presente trabalho foram:

- Avaliar as relações entre o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), a população de plantas e o rendimento de grãos, para estimativa do potencial produtivo da cultura do milho *in situ* e em tempo real em diferentes estádios de desenvolvimento.
- Avaliar a relação entre três metodologias (NDVI, análise da imagem digital e teor relativo de clorofila na folha) e a relação destas com o rendimento de grãos de milho.
- Determinar os limites críticos de NDVI durante o período vegetativo de desenvolvimento da cultura do milho para definição de classes de potencial produtivo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais da cultura do milho

A produção mundial de grãos de milho atualmente está em ascensão, devido ao desenvolvimento de novos híbridos com maior capacidade produtiva, à ampla adoção de cultivares transgênicas, ao aprimoramento na habilidade de suportar, com maior eficiência, a deficiência hídrica e a melhorias na eficiência de uso do N.

Além dos investimentos em melhoramento genético e manejo da cultura, houve também aumento mundial na área cultivada deste cereal entre os anos de 1991 e 2015 de, aproximadamente, 40 milhões de hectares, em função da abertura de novas fronteiras agrícolas em países como Brasil e China. Na atualidade, a área mundial destinada à produção de milho é de, aproximadamente, 176,5 milhões de hectares, com produção de 1,01 bilhão de toneladas ao ano, sendo os maiores países produtores os Estados Unidos, China e Brasil (CONAB, 2015).

Aproximadamente 15,165 milhões de hectares foram destinados ao cultivo de milho no Brasil na safra 2014/15. Entre as regiões no país com maior produtividade média de grãos, destaca-se a Região Sul (6,11 t/ha) e a Região Centro-Oeste (5,65 t/ha) (CONAB, 2015). Nas duas últimas safras (2013/14 e 2014/15), a produção de milho no Brasil ultrapassou a marca de 80 milhões de toneladas de grãos, tendo como produtividade média nacional na última safra 5,18 t/ha (CONAB, 2015).

No Estado do Rio Grande do Sul (RS), a área destinada à produção de milho na safra 2014/15 foi de, aproximadamente, 940 mil ha, sendo que, em relação às safras anteriores,

houve diminuição da área cultivada com este cereal, o que pode ser explicado pelo aumento da área cultivada com soja (CONAB, 2015). A produção de grãos de milho no RS também apresenta redução em relação à safra anterior e deverá atingir, aproximadamente, 5,28 milhões de toneladas. Em relação à produtividade de grãos, observa-se incremento em relação à safra anterior, atingindo 5,61 t/ha, sendo superior à média nacional, porém inferior quando comparada aos demais estados que compõem a Região Sul (Santa Catarina e Paraná) (CONAB, 2015).

O aumento de produtividade da cultura do milho deve-se a importantes mudanças tecnológicas ocorridas recentemente, destacando-se os avanços no melhoramento genético, na qualificação da adubação, principalmente a nitrogenada, e na sua eficiência de aplicação e absorção, na qualidade do uso e manejo do solo, na irrigação e no aprimoramento na gestão dos recursos agrícolas, pela adoção das ferramentas da agricultura de precisão (AP) (Santi, 2007).

2.2 Importância do nitrogênio (N) para a cultura do milho

Os nutrientes com maior demanda pelas plantas de milho são o fósforo, o potássio e o nitrogênio, sendo o N o nutriente extraído em maior quantidade pela cultura (Silva *et al.*, 2005). Estudos mostram que, para cada tonelada de grãos produzidos, o milho acumula, aproximadamente, 28 kg ha⁻¹ de N na parte aérea e exporta nos grãos em torno de 60% deste valor, ou seja, 17 kg ha⁻¹ de N (Cantarella, 2007). O N é nutriente fundamental para as plantas, pois é constituinte de paredes celulares, proteínas, ácidos nucleicos, aminoácidos, enzimas, alcalóides, hormônios e clorofila (Chapman & Barreto, 1997; Weligama *et al.*, 2010; Marschner & Marschner, 2012).

As características apresentadas pelas plantas quando ocorre baixa disponibilidade de N no sistema, provocando sua deficiência na planta, são redução da atividade metabólica, clorose e amarelecimento das folhas mais velhas da planta, resultando em redução na taxa

fotossintética. Em consequência, ocorre redução do tamanho das folhas, do teor de proteína nos grãos e do potencial produtivo da cultura (Huang *et al.*, 2007; Bissani *et al.*, 2008; Saiz-Fernández *et al.*, 2015).

O N tem relação direta com o crescimento e o desenvolvimento das plantas, desempenhando importantes funções bioquímicas e fisiológicas no metabolismo vegetal. O efeito desta relação é influenciado pelas formas nas quais o N está disponível no solo (amônio - NH_4^+ ou nitrato - NO_3^-). Essa variação na absorção sofre influência das condições meteorológicas e de solo (temperatura, pH do solo, umidade, tipo de solo e atividade microbiana), as quais influenciam a mineralização da matéria orgânica para NH_4^+ e, posteriormente, a nitrificação para NO_3^- (Scharf *et al.*, 2005; Dharmakeerthi *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2015). Contudo, a eficiência na absorção destas formas minerais é baixa, sendo que a absorção do N aplicado varia entre 50 a 60% do total disponibilizado pela adubação (Coelho *et al.*, 1991; Zhu *et al.*, 2009; Saiz-Fernández *et al.*, 2015).

Apesar da sua importância fisiológica, em regiões tropicais e subtropicais, devido ao grande número de reações que o N sofre no ambiente e à sua mobilidade no solo e na planta, reduzindo a sua eficiência, assim, o N é um dos nutrientes mais difíceis de serem manejados eficientemente na agricultura (Ernani, 2003; Amaral *et al.*, 2015). Devido a isso, a adubação nitrogenada necessita ser manejada da maneira mais eficiente possível, pela utilização de doses condizentes com as reais necessidades da planta, pelo uso de fontes adequadas deste nutriente, pela aplicação nos estádios de desenvolvimento das plantas com maior necessidade ou resposta ao fertilizante e no local correto, podendo ser variada a quantidade de fertilizante nitrogenado ofertado para as plantas de acordo com sua necessidade (adubação em dose variada) (Fixen, 2010).

A definição do potencial produtivo do milho ocorre durante todo o ciclo da cultura, desde a emergência até a maturação fisiológica. Porém, nos estádios iniciais (V4 a V10) ocorrem importantes processos fisiológicos nas plantas, como a diferenciação do pendão e

da espiga e a diferenciação do número de óvulos na espiga. Por isso, o suprimento adequado de N para a planta nestes estádios é de fundamental importância para o desenvolvimento da cultura e para a definição de seu potencial produtivo (Saiz-Fernández *et al.*, 2015). Uma das maneiras para aumento na eficiência do uso do N pelas plantas, além das condições meteorológicas adequadas no momento da aplicação de N na lavoura, é a aplicação de doses condizentes com as reais necessidades da cultura, sendo este um desafio no manejo deste nutriente (Bredemeier, 1999).

2.3 Agricultura de precisão (AP) e aplicação de insumos em dose variada

A busca por maiores produtividades de grãos promoveu no meio rural uma nova maneira de realizar a agricultura. A implantação do sistema de plantio direto na palha, a inserção de cultivares geneticamente melhoradas, a maior eficiência no uso de insumos e o aprimoramento das máquinas permitiram incrementos na produtividade das culturas. Entretanto, a agricultura tradicionalmente realizada possui entendimento que uma área agrícola apresenta comportamento homogêneo, sendo seu manejo realizado em função da necessidade média para a aplicação dos insumos (fertilizantes na semeadura e nas aplicações em cobertura, defensivos agrícolas, água, calcário), fazendo com que a mesma formulação e/ou quantidade do insumo seja utilizada em toda a área, desconsiderando as necessidades específicas de cada parte da lavoura, ou das zonas de manejo, causando e aumentando a variabilidade de produtividade na área (Mulla & Schepers, 1997; Pierce & Nowak, 1999; McBratney *et al.*, 2005).

Diante deste cenário, na tentativa de manejar essa variabilidade e aumentar a eficiência na aplicação de insumos, surgiu a AP, com a finalidade de conhecer e estudar a variabilidade da lavoura e gerenciá-las, ou seja, aumentar a coleta de informações da área, proporcionando maior precisão na tomada de decisão sobre as intervenções realizadas. Com estas ferramentas tecnológicas, foram intensificadas a amostragem de solo e as demais

análises, permitindo o conhecimento da variabilidade existente de tipos de solo, de fertilidade, de diferentes potenciais produtivos e demais fatores que influenciam a produção, usando métodos adequados e diferenciados para o manejo destes (Carr *et al.*, 1991; Larson & Robert, 1991; Salviano *et al.*, 1998; Silva *et al.*, 2003). Um dos principais conceitos da AP pode ser explicado como a aplicação de insumos no local correto, nas quantidades necessárias e nos momentos adequados, em áreas cada vez menores e mais homogêneas, ou seja, em sítios específicos (Sawyer, 1994; Pierce & Sadler, 1997).

A AP se caracteriza por ser uma filosofia de gerenciamento e de gestão agrícola que parte de informações precisas, obtidas através da utilização de tecnologias disponíveis, como o sensoriamento remoto, o uso de sistemas de informações geográficas (SIG) e o sistema de posicionamento global (GPS), permitindo melhor manejo do solo, dos insumos e das culturas, de modo adequado para as variações espaciais e temporais e em tempo real dos fatores que afetam o potencial produtivo em uma determinada área (Dallmeyer & Schlosser, 1999; Corá *et al.*, 2004; Durigon, 2007).

A busca por eficiência na atividade agrícola faz com que uma maior quantidade de informações seja coletada, para auxiliar nas decisões em tempo real. Atualmente, estas ferramentas da AP evoluíram e estão sendo fundamentais na tomada de decisão, como, por exemplo, nas leituras de condutividade elétrica e de atributos químicos do solo, nas atividades de monitoramento de pragas e doenças e na aplicação de fertilizantes nitrogenados em cobertura. Essas ferramentas realizam a coleta de dados e variam a dose aplicada em tempo real, promovendo maior eficiência no uso dos insumos e redução da contaminação ambiental (Grohs *et al.*, 2011; Molin & Rabello, 2011; Riffel *et al.*, 2012; Bredemeier *et al.*, 2013; Molin & Faulin, 2013).

Dentre as ferramentas utilizadas, destacam-se as que utilizam o sensoriamento remoto para estimativa do potencial produtivo das culturas e realização de aplicações de fertilizantes nitrogenados em dose variada. Dessa forma, é possível estimar o estado

nutricional das plantas durante o ciclo de desenvolvimento e realizar a aplicação e a variação das quantidades aplicadas de N em tempo real, possibilitando maior eficiência do uso do fertilizante e aumento do potencial produtivo das culturas (Wei *et al.*, 2008; Schmidt *et al.*, 2011).

2.4 Sensores de vegetação como ferramentas para manejo da adubação nitrogenada em dose variada

As leituras realizadas por Greenseeker, imagens digitais e clorofilômetro (sensores de vegetação) em tempo real permitem maior agilidade no processo de tomada de decisão em relação a práticas de manejo durante o ciclo da cultura, permitindo a identificação e a correção de deficiências nutricionais causadas pelo N (Raun *et al.*, 2002; Povh *et al.*, 2008; Kitchen *et al.*, 2010; Amaral & Molin, 2011; Lofton *et al.*, 2012).

As leituras em tempo real foram adaptadas ao uso agrícola para serem realizadas a campo através do emprego de sensores de vegetação, os quais são montados em tratores ou em distribuidores a lanço auto-propelidos. Atualmente, encontra-se no mercado uma série de sensores de vegetação, tais como Greenseeker[®], N-Sensor[®] e Crop Circle[®]. O emprego desses sensores apresenta a mesma finalidade, ou seja, a determinação de um índice de vegetação específico para cada sensor para estimativa da dose de N em cobertura a ser aplicada em uma determinada cultura (Feng *et al.*, 2008; Schmidt *et al.*, 2009; Erdle *et al.*, 2011).

2.4.1 Greenseeker

Um dos sensores de vegetação atualmente utilizado é o Greenseeker, o qual foi desenvolvido pela Universidade de Oklahoma (EUA) na década de 90 e, atualmente, é comercializado pela empresa Trimble. O seu princípio de funcionamento é por diodos de emissão de radiação na faixa do vermelho (680 nm) e do infravermelho próximo (770 nm).

A radiação emitida é refletida pelo dossel da cultura e medida por um fotodiodo localizado no equipamento. Os dados são calculados por um microprocessador interno, fornecendo o valor do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (NTech Industries, 2013).

O NDVI é determinado pela seguinte relação: $(\rho_{ivp} - \rho_v)/(\rho_{ivp} + \rho_v)$, onde ρ_{ivp} e ρ_v se referem à reflectância do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente. Este índice apresenta variação numérica de -1 a +1, sendo os valores positivos referentes ao vigor vegetativo da cultura, enquanto que os valores negativos indicam presença de água ou ausência de vegetação (Rouse *et al.*, 1973; Liu *et al.*, 2006).

O princípio do sensor baseia-se nas bandas de absorção da radiação visível pelas plantas, que estão situadas principalmente próximas a 480 nm e 680 nm, relacionadas à presença de clorofila (Figura 1). O comprimento de onda entre 700 nm e 1300 nm representa o infravermelho próximo, onde ocorre alta reflectância pela vegetação, chegando a 50% da radiação incidente (Figura 1). Esta reflectância sofre influência da estrutura celular interna da folha, tamanho e formato da célula e ocorrência de espaços intercelulares (Slaton *et al.*, 2001; Campbell, 2002; Shanahan, 2008; Amaral & Molin, 2011).

Deste modo, as faixas do espectro eletromagnético do visível (480 - 680 nm) e do infravermelho próximo (700 - 1300 nm) foram definidas como indicadoras de deficiências nutricionais e estresses nas plantas, por apresentarem relação com a condição do dossel vegetativo (Carter & Knappa, 2001; Molin, 2001). A correlação existente entre a reflectância na faixa de 680 nm e a concentração de clorofila nas folhas, assim como entre a reflectância na região do infravermelho próximo e a quantidade de biomassa presente no dossel, é determinante na estimativa do estado nutricional de uma planta ou cultura, o qual se relaciona com a concentração de clorofila e a produção de biomassa de uma comunidade vegetal (Gitelson *et al.*, 1996; Carter & Knappa, 2001; Baker, 2008; Solari *et al.*, 2008; Shanahan *et al.*, 2008).

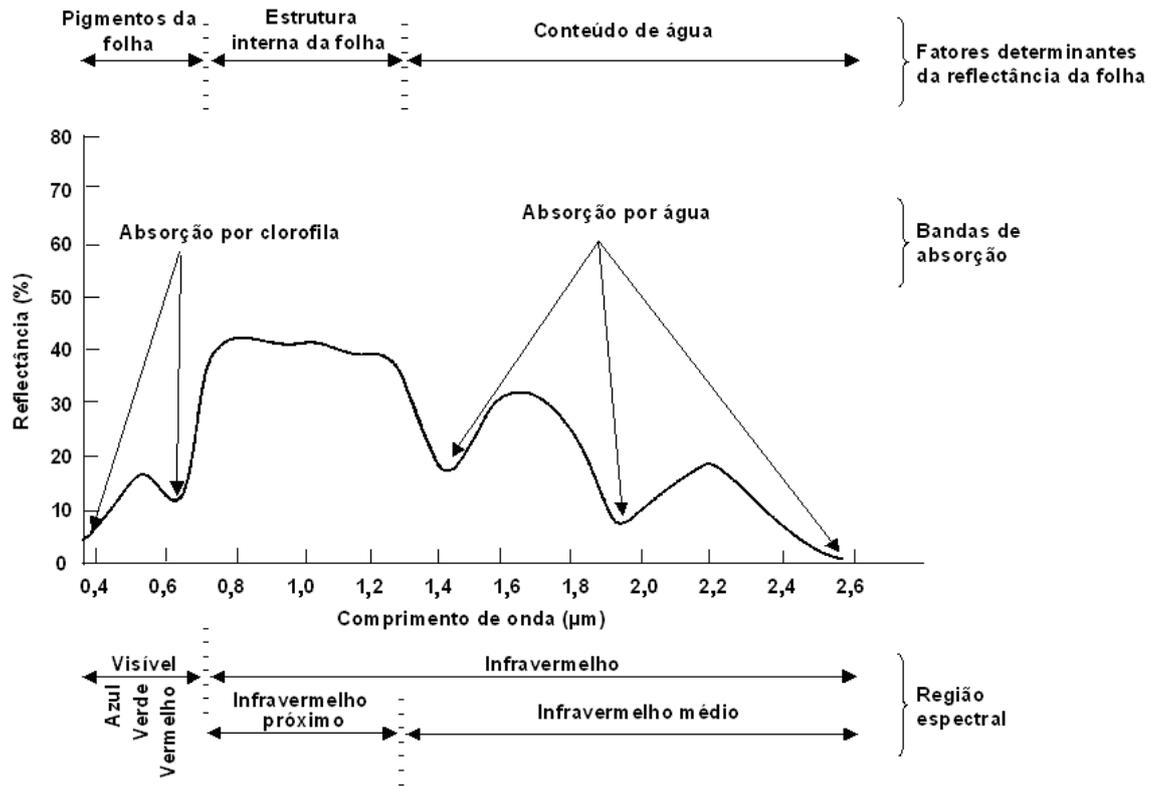


FIGURA 1. Curva típica de reflectância da vegetação. Adaptado de Rizzi (2004).

O desenvolvimento de sensores ópticos de vegetação que permite a realização do manejo *in situ* e em tempo real e com rápida interpretação dos resultados, tornou-se necessário, uma vez que os índices gerados através das imagens orbitais e aéreas não permitem a utilização dos resultados em tempo real, devido à necessidade de correções geométricas, atmosféricas, radiométricas e de softwares computacionais para o processamento das imagens digitais.

A utilização do sensor óptico ativo Greenseeker na estimativa da condição nutricional das culturas é influenciada pelas diferentes interações solo-planta. Em condições de lavouras, existe a variabilidade espacial de variáveis de planta e solo, resultando em diferentes respostas na reflectância, que podem não estar associadas apenas ao estado nutricional da planta, mas também ser decorrentes de outros estresses bióticos e/ou abióticos. Desta maneira, as avaliações frequentes do estado nutricional da cultura podem auxiliar no manejo da adubação nitrogenada durante seu ciclo, pois o teor de clorofila nas folhas de

milho se relaciona com a concentração de N nas mesmas e, devido às interações com os fatores bióticos e abióticos, promovem variação na atividade fotossintética das plantas e no potencial produtivo (Guimarães *et al.*, 1999).

As medições realizadas no dossel vegetativo da cultura durante seu desenvolvimento, como o NDVI ou a leitura do teor de clorofila, possibilitam melhorar o rendimento e a qualidade de grãos, através da aplicação localizada de fertilizantes nitrogenados em doses variadas. Os principais fatores que determinam uma adequada avaliação da condição nutricional são a área foliar, a biomassa total e os teores de clorofila e N na massa seca da cultura. As variações espaciais e temporais destas variáveis devem ser determinadas, de modo que a quantidade de N aplicada corresponda às reais exigências da cultura tanto quanto possível (Hansen & Schjoerring, 2003).

O NDVI é um índice agrônômico eficiente visando detectar deficiências nutricionais na cultura do milho, mas estudos alertam sobre a necessidade de se determinar a melhor estratégia para recomendação de adubações nitrogenadas a partir dessas leituras (Molin *et al.*, 2010; Portz, 2011; Portz *et al.*, 2011). Como maneira de validar a metodologia de estimativa da condição nutricional das plantas, estudos realizados mostraram alta relação entre NDVI e N acumulado na biomassa de cultivares de trigo e cevada (Serrano *et al.*, 2000; Grohs *et al.*, 2009). Também foram encontradas altas correlações entre NDVI e produtividade de colmos de cana-de-açúcar (Molin *et al.*, 2010; Lofton *et al.*, 2012). Na cultura do milho, foi reportada alta correlação entre os valores de NDVI e a produção de biomassa da parte aérea e a produtividade de grãos (Freeman *et al.*, 2007; Martin *et al.*, 2007; Martin *et al.*, 2012).

2.4.2 Imagens digitais

A utilização de imagens digitais proximais vem ganhando destaque na agricultura mundial. As câmeras digitais são consideradas sensores de vegetação passivos, pois

geralmente são utilizadas sem *flash*. O uso dessa ferramenta iniciou-se devido a demanda por maior agilidade no levantamento dos dados à campo, aumentando a eficiência no manejo nutricional das culturas, basicamente nas adubações nitrogenadas em cobertura.

As imagens digitais, de modo geral, tem por objetivo analisar a taxa de cobertura do solo, ou seja, a porcentagem que o dossel vegetativo da cultura consegue cobrir este solo. As câmeras fotográficas podem captar a reflectância em diferentes canais ou bandas, como binárias, monocromáticas, RGB (vermelho, verde e azul), NIR (infravermelho) e multiespectrais.

Inúmeros estudos vem sendo conduzidos com o objetivo de estudar e validar metodologias e algoritmos que permitam a utilização de imagens digitais na identificação da variabilidade no desenvolvimento das plantas causada pela deficiência de N. Vários estudos comparam o uso das imagens com os sensores de vegetação utilizados há mais tempo na agricultura em diferentes culturas, como o milho, arroz, soja e café (Panneton & Brouillard, 2009; Lee & Lee, 2011; Peng & Jun, 2011; Oliveira *et al.*, 2014).

A obtenção das imagens geralmente é realizada em condições ambientais de luminosidade e ângulo foliar semelhantes, pois são os principais fatores que afetam o pós-processamento das imagens, que neste caso podem originar áreas com sombras, acarretando em erro na análise. Outros cuidados que devem ser considerados na obtenção das imagens digitais são a distorção nas bordas das imagens, qualidade das imagens ou tamanho do pixel e a altura na obtenção das imagens.

2.4.3 Clorofilômetro

Com o objetivo de analisar a campo o teor relativo de clorofila na folha e relacionar este valor com o estado nutricional das plantas, foi desenvolvido, na década de 90, equipamento portátil denominado clorofilômetro SPAD-502 (Soil and Plant Analysis Development) (MINOLTA, 1989). O clorofilômetro SPAD-502 tem sido investigado como

instrumento para diagnóstico do estado nutricional de diversas culturas em relação ao conteúdo de N, possibilitando avaliação rápida e não destrutiva do tecido foliar (Argenta *et al.*, 2001; Richardson *et al.*, 2002; Uddling *et al.*, 2007). Entretanto, diferentemente do Greenseeker, que atua por sensoriamento remoto, o clorofilômetro SPAD tem a necessidade de contato físico com a folha da cultura, sendo os valores relacionados ao teor relativo de clorofila na folha (Rajcan *et al.*, 1999).

Em contrapartida, a eficiente utilização do clorofilômetro e de sensores de vegetação depende da determinação de valores críticos para a cultura do milho. A utilização de valores críticos pressupõe que, para cada estágio de desenvolvimento da cultura, há um valor mínimo de um determinado índice (NDVI ou teor relativo de clorofila na folha) que a planta ou o dossel devem apresentar. Assim, com base nesse teor crítico, pode ser definida a aplicação ou não da adubação.

Atualmente, tornou-se possível integrar dados de solo e planta para a geração de informações de manejo (Santi, 2007). Assim, em áreas monitoradas com AP, o uso de sensores ópticos pode ser alternativa eficiente para estimar a disponibilidade de N e auxiliar na tomada de decisão da dose complementar a ser aplicada de maneira variável na área (Povh, 2007). Dessa forma, equipamentos capazes de estimar a quantidade de biomassa acumulada e os teores relativos de clorofila podem gerar resultados que podem ser utilizados visando aumentar a precisão da prática da adubação nitrogenada.

2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, L.R.D.; MOLIN, J.P. Sensor óptico no auxílio à recomendação de adubação nitrogenada em cana de açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.12, p.1633–1642, 2011.
- AMARAL, T.A. et al. Nitrogen management strategies for smallholder maize production systems: Yield and profitability variability. **International Journal of Plant Production**, v.9, n.1, p.75-98, 2015.
- ARGENTA, G. et al. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.13, n.2, p.158-167, 2001.
- BAKER, N.R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, n.1, p.89-113, 2008.
- BISSANI, C.B. et al. In: BISSANI, C.B., GIANELLO, C., CAMARGO, F.A.O., TEDESCO, M.J. Org, 2ed. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 145 – 166.
- BREDEMEIER, C. **Predição da necessidade de nitrogênio em cobertura em trigo e aveia**. 1999. 101f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- BREDEMEIER, C. et al. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, v.43, n.7, p.1147-1154, 2013.
- CAMPBELL, J.B. **Introduction to remote sensing**. 3rd ed. New York: The Guilford Press, 2002. 621 p.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 7, p. 375-470.
- CARR, P.M. et al. Farming fields, not soils: A strategy for increasing fertilizer profitability. **Journal of Production Agriculture**, v.4, n.1, p.57-61, 1991.
- CARTER, G.A.; KNAPPA, A.K. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. **American Journal of Botany**, n.4, v.88, p.677–684, 2001.
- CHAPMAN, S.C.; BARRETO, H.J. Using a chlorophyll meter to estimate specific leaf nitrogen of tropical maize during vegetative growth. **Agronomy Journal**, v.89, n.4, p.557-562, 1997.
- COELHO, A.M. et al. Balanço de nitrogênio ¹⁵N em um Latossolo Vermelho-escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n.1, p.187-193, 1991.
- CONAB – COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. 2015. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_02_13_10_34_06_boletim_graos_fevereiro_2015.pdf>. Acesso em: 15 de fev. 2015.

CORÁ, J.E. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.6, p.1013-1021, 2004.

DHARMAKEERTHI, R.S.; KAY, B.D.; BEAUCHAMP, E.G. Spatial variability of in season N uptake by corn across a variable landscape as affected by management. **Agronomy Journal**, v.98, n.2, p.255–264, 2006.

DALLMEYER, A.U.; SCHLOSSER, J.F. Mecanización para La agricultura de precisión. In: BLU, R.O.; MOLINA, L.F. **Agricultura de precisión - Introducción al manejo sitio específico**. Chillán-Chile: INIA, 1999. Cap.3, p.75-104.

DURIGON, R. **Aplicação de técnicas de manejo localizado na cultura do arroz irrigado (Oryza sativa L.)**. 147f. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria.

ERDLE, K.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. **Field Crops Research**, v.124, p.74-84, 2011.

ERNANI, P.R. **Disponibilidade de nitrogênio e adubação nitrogenada para macieira**. Lages: Graphel, 2003. 76p.

FENG, W. et al. Monitoring leaf nitrogen status with hyperspectral reflectance in wheat. **European Journal of Agronomy**, v.28, n.3, p.394-404, 2008.

FIXEN, P.E. The four rights within a global fertilizer best management practices framework. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. p.1-22.

FREEMAN, K.W. et al. By-plant prediction of corn forage biomass and nitrogen uptake at various growth stages using remote sensing and plant height. **Agronomy Journal**, v.65, n.2, p.530-536, 2007.

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**, v.148, n.7, p.501–508, 1996.

GROHS, D.S. et al. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor Greenseeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.1, p.101-112, 2009.

GROHS, D.S. et al. Validação de modelo para predição do potencial produtivo de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.4, p.446-449, 2011.

GUIMARÃES, T.G. et al. Teores de clorofila determinados por medidor portátil e sua relação com formas de nitrogênio em folhas de tomateiro cultivados em dois tipos de solo. **Bragantia**, v.58, n.1, p.209-216, 1999.

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**, v.86, n.4, p.542-553, 2003.

HUANG, Z.X. et al. Photosynthetic characteristics during grain filling stage of summer maize hybrids with high yield potential of 15,000 kg ha⁻¹. **Scientia Agricultura Sinica**, v.40, n.9, p.1898–1906, 2007.

KITCHEN, N.R. et al. Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. **Agronomy Journal**, v.102, n.1, p.71-84, 2010.

LARSON, W.E.; ROBERT, P.C. Farming by soil. In: LAL, R.;PIERCE, F.J. (Ed.). **Soil management for sustainability**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1991. p.103-112.

LEE, K.J.; LEE, B.W. Estimating canopy cover from color digital camera image of rice field. **Journal of Crop Science Biotechnology**, v.14, n.2, p.151-155, 2011.

LIU, Y.; SWINTON, S.M., MILLER, N.R. In site-specific yield response consistent over time? Does it pay? **American Journal of Agricultural Economics**, v.88, n.2, p.471-483, 2006.

LOFTON, J. et al. Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. **Sensors**, v.12, n.6, p.7529–7547, 2012.

MARSCHNER, H.; MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. London, UK: Academic Press; 2012.

MARTIN, K.L. et al. Expression of spatial variability in corn (*Zea mays* L.) as influence by growth stage using optical sensor measurements. **Agronomy Journal**, v.54, n.2, p.384-389. 2007.

MARTIN, K.L.; RAUN, W.; SOLIE, J. By-plant prediction of corn grain yield using optical sensor readings and measured plant height. **Journal of Plant Nutrition**, v.35, n.9, p.1429-1439, 2012.

McBRATNEY, A.; WHELAN, B.; ANCEV, T. Future directions of precision agriculture. **Precision Agriculture**, v.1, n.6, p.7-23, 2005.

MINOLTA CAMERA Co. Ltda. **Manual for chlorophyll meter SPAD 502**. Osaka, Minolta, Radiometric Instruments divisions. p.22, 1989.

MOLIN, J.P.; FAULIN, G.D. Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. **Scientia Agrícola**, v.70, n.1, p.1-5, 2013.

MOLIN, J.P.; RABELLO, L.M. Estudos sobre a mensuração sobre a condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.1, p.90-101, 2011.

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

MOLIN, J.P. et al. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.12, p.1345–1349, 2010.

MULLA, D.J.; SCHEPERS, J.S. Key process and properties for site-specific soil and crop management. In: PIERCE, F.J.; SADLER, E.J. (Ed.). **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1997. p.1-18.

NTECH INDUSTRIES, UKIAH, CA, USA. **Greenseeker manuals downloads**. Disponível em: <<http://www.ntechindustries.com/greenseeker-manual.html>>. Acesso: 15 de setembro de 2013.

- OLIVEIRA, L.S. et al. Métodos para quantificação e interpretação da distribuição espacial de cobertura do solo em cafezais arborizados. **Coffee Science**, v.9, n.2, p.168-177, 2014.
- PANNETON, B.; BROUILLARD, M. Colour representation methods form segmentation of vegetation in photographs. **Biosystems Engineering**, v. 102, n.4, p.365-378, 2009.
- PENG, Z.; JUN, C. Weed recognition using image blur information. **Biosystems Engineering**, v. 110, n.2, p.198-205, 2011.
- PIERCE, F.J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, v.67, p.1-85, 1999.
- PIERCE, F.J.; SADLER, E.J. (Ed.). **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1997. p.1-18.
- PORTZ, G. **Obtenção de algoritmo agrônomo para sensor foto ativo de refletância vegetal visando à aplicação da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar**. 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- PORTZ, G.; MOLIN, J.P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, v.13, n.1, p.33-44, 2011.
- POVH, F.P. **Utilização de sensor ótico ativo em culturas de cereais**. 2007. 86p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- POVH, F.P. et al. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, n.8, p.1075-1083, 2008.
- RAJCAN, I. et al. Note on relationship between leaf soluble carbohydrate and chlorophyll concentrations in maize during leaf senescence. **Field Crops Research**, v.63, n.1, p.13-17, 1999.
- RAUN, W.R. et al. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agronomy Journal**, v.94, n.1, p.815-820, 2002.
- RESENDE, M.; FRANÇA, G.E.; ALVES, V.M.C. **A cultura do milho irrigado**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. 317p.
- RICHARDSON, A.D.; DUGAN, S.P.; BERLYN, G.P. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. **New Phytologist**, v.153, n.1, p.185-194, 2002.
- RIFFEL, C.T. et al. Densidade amostral aplicada ao monitoramento georreferenciado de lagartas desfolhadoras na cultura da soja. **Ciência Rural**, v.42, n.1, p.1-8, 2012.
- ROUSE, J.W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **In. NASA ERTS Symposium**, v.3, p.309-317, 1973.
- SAIZ-FERNÁNDEZ, I. et al. High nitrate supply reduces growth in maize, from cell to whole plant, **Journal of Plant Physiology**, v.173, n.1, p.120-129, 2015.
- SALVIANO, A.A.C.; VIEIRA, S.R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em áreas severamente erodidas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.1, p.115-122, 1998.

SANTI, L.A. **Relações entre indicadores de qualidade do solo e a produtividade das culturas em áreas com agricultura de precisão**. Santa Maria, 2005, 175f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, 2007.

SAWYER, J.F. Concepts of variable rate technology with considerations for fertilizer application. **Journal of Agriculture Science**, v.7, n.1, p.195-201, 1994.

SCHARF, P.C. et al. Field scale variability in optimum nitrogen fertilizer rates for corn. **Agronomy Journal**, v.97, n., p.452-461, 2005.

SCHMIDT, J. et al. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor. **Field Crops Research**, v.120, n.1, p.94-101, 2011.

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

SERRANO, L.; FILELLA, I.; PEÑUELAS, J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. **Crop Science**, v.40, n.1, p.723-731, 2000.

SHANAHAN, J. et al. Responsive in-season nitrogen management for cereals. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.61, n.1, p.51-62, 2008.

SILVA, E.C. et al. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.3, p.353-362, 2005.

SILVA, V.R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho - Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.6, p.1013-1020, 2003.

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

SOLARI, F. et al. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, v.76, n.3, p.571-579. 2008.

UDDLING, J. et al. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. **Photosynthesis Research**, v.91, n.1, p.37-46, 2007.

WEI, F. et al. Monitoring leaf nitrogen accumulation in wheat with hyper-spectral remote sensing. **Acta Ecologica Sinica**, v.28, n.1, p.23-32, 2008.

WELIGAMA, C. et al. Application of nitrogen in NO_3^- form increases rhizosphere alkalisation in the subsurface soil layers in an acid soil. **Plant and Soil**, v.333, n.1, p.403-416, 2010.

ZHU, Q.; SCHMIDT, J.P.; BRYANT, R.B. Maize (*Zea mays* L.) yield response to nitrogen as influenced by spatio-temporal variations of soil-water-topography dynamics. **Soil & Tillage Research**, v.146, n.1, p.174-183, 2015.

ZHU, Q. et al. Hydropedological processes and their implications for nitrogen availability to corn. **Geoderma**, v.154, n.1, p.111-122, 2009.

3 CAPÍTULO I

Uso de sensor óptico de vegetação para estimativa da população de plantas e potencial produtivo da cultura do milho

1 INTRODUÇÃO

A variação na densidade de plantas é uma característica importante na determinação do potencial produtivo da cultura do milho (*Zea mays* L.), devido à sua influência direta na determinação do número de espigas por área (Trezzi *et al.*, 2008; Lana *et al.*, 2009; Modolo *et al.*, 2010; Kappes *et al.*, 2011). Além disso, a adequada população de plantas por unidade de área afeta a distribuição da área foliar, permitindo maximização da taxa fotossintética e aumento na produção de fotoassimilados. Estudos realizados apresentam variação na determinação da densidade ótima de plantas de milho em função do tipo e da fertilidade do solo, teor de matéria orgânica, disponibilidade hídrica, incidência de radiação solar, genótipo utilizado, manejo da adubação e expectativa de rendimento de grãos (Argenta *et al.*, 2001; Penariol *et al.*, 2003; Demétrio *et al.*, 2008).

O potencial produtivo da cultura do milho pode ser monitorado desde o início de seu desenvolvimento, sendo os estádios fenológicos de desenvolvimento V3 a V10 (três a dez folhas completamente expandidas na planta, respectivamente) os mais responsivos à aplicação de adubação nitrogenada, em função de relacionarem-se com a maior exigência nutricional da cultura por N. Nestes estádios fenológicos, ocorre formação e definição de parte do potencial produtivo da cultura do milho. Assim, ferramentas como o sensoriamento remoto podem ser empregadas para auxiliar no monitoramento do desenvolvimento das plantas e de seu estado nutricional em relação ao N (Alvarez *et al.*, 2006; Kaneko *et al.*, 2010; Chioderoli *et al.*, 2012).

O sensoriamento remoto, através do emprego de sensores proximais de vegetação, proporciona o monitoramento do desenvolvimento da cultura em função da variação do teor de clorofila presente na folha e da quantidade de biomassa vegetal presente na parte aérea (Esquerdo *et al.*, 2011; Karnielli *et al.*, 2010). Os sensores proximais variam em função da quantidade de bandas utilizadas e do índice de vegetação calculado, destacando-se os equipamentos comercialmente disponíveis Crop Circle, N-Sensor e Greenseeker (Huerta *et*

al., 2013). Um dos índices mais utilizados é o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), o qual pode ser empregado para a identificação da variabilidade espacial da produção de biomassa vegetal em uma lavoura. Essa variabilidade pode ser causada por variações na população de plantas na área, a qual determina potenciais produtivos espacialmente variáveis da cultura. Assim, o potencial produtivo precisa ser estimado durante o período de desenvolvimento vegetativo, para que ocorra direcionamento do manejo, buscando a maximização da produtividade (Grohs *et al.*, 2009).

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o emprego de sensor óptico ativo de reflectância (Greenseeker) como ferramenta para estimativa da densidade de plantas e do potencial produtivo da cultura do milho em diferentes estádios fenológicos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos ambientes

Os trabalhos a campo foram conduzidos na safra 2013/2014 na Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), no município de Eldorado do Sul (RS), e na Estação Experimental do Arroz do Instituto Rio Grandense do Arroz (EEA/IRGA), no município de Cachoeirinha (RS). As áreas experimentais estão situadas na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul (RS), em uma altitude média de 46 metros (EEA/UFRGS) e 7 metros (EEA/IRGA) acima do nível do mar, respectivamente. O clima é subtropical úmido de verão quente, do tipo Cfa, conforme a classificação de Koppen (Bergamaschi *et al.*, 2003).

A precipitação pluvial média anual em Eldorado do Sul é de 1440 mm e a temperatura média mensal varia entre 14 e 25°C, entre os meses mais frios e mais quentes (Bergamaschi *et al.*, 2003). Na EEA/UFRGS, o solo da área experimental pertence à unidade de mapeamento São Jerônimo, caracterizado como Argissolo Vermelho distrófico típico (Streck *et al.*, 2002). Na EEA/IRGA, a temperatura média anual é de 18°C, sendo o solo da

área experimental classificado como Gleissolo Háplico Distrófico Típico, o qual ocorre em áreas de terras baixas, está localizado em cotas mais baixas na paisagem e sujeito à saturação por água ou alagamentos periódicos (Streck *et al.*, 2008).

2.2 Caracterização dos experimentos

Na EEA/IRGA (Cachoeirinha, RS) os tratamentos constaram de quatro densidades populacionais (4, 6, 8 e 10 plantas/m²) e dois híbridos de milho (Dekalb 240 e Pioneer 30F53YHR), ambos com os eventos transgênicos Bt e RR. O delineamento experimental foi de blocos casualizados, com quatro repetições. A semeadura foi realizada em 02/11/2013, em microcamalhões de 15 cm de altura espaçados em 1 m, com duas fileiras de plantas pareadas em cada microcamalhão. Cada parcela foi composta por quatro fileiras de plantas de 8 m de comprimento. A adubação nitrogenada em cobertura foi de 300 kg de N/ha, parcelada igualmente em quatro aplicações (estádios V₃, V₈, V₁₂ e V₁₆), utilizando como fonte de N a ureia com inibidor de urease (Ritchie *et al.*, 1993). A irrigação por aspersão foi realizada sempre que necessário, sendo a umidade volumétrica do solo monitorada por equipamento Hidrofarm[®].

Na EEA/UFRGS (Eldorado do Sul, RS), o experimento foi realizado dentro de lavoura experimental, a qual foi semeada na densidade de 10 plantas/m² e, aos 14 dias após a emergência, as diferentes densidades populacionais foram ajustadas por desbaste manual, sendo os tratamentos alocados no delineamento experimental de blocos ao acaso dentro da área, com quatro repetições. Os tratamentos também constaram de quatro densidades populacionais (4, 6, 8 e 10 plantas/m²), sendo que o híbrido utilizado foi o Morgan 30A77PW. A semeadura foi realizada na primeira semana de janeiro de 2014, sendo cada parcela constituída de três linhas de semeadura de 3 de comprimento, espaçadas em 0,5 m. A adubação de cobertura foi de 126 kg/ha de nitrogênio, parceladas em duas aplicações, nos estádios V₄ (63 kg/ha) e V₇ (63 kg/ha). A área experimental foi conduzida sob condições

naturais de precipitação. Os tratos culturais foram realizados segundo as recomendações técnicas da cultura do milho (Reunião, 2013).

2.3 Variáveis analisadas

A identificação de diferentes populações de plantas foi realizada com o auxílio de sensor óptico (Greenseeker), sendo que as variações de NDVI foram relacionadas à variação na população de plantas nos dois experimentos conduzidos (Figura 1). O Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), o qual é dado pela relação $(\rho_{nir}-\rho_r)/(\rho_{nir}+\rho_r)$, onde ρ_{nir} e ρ_r são as reflectâncias no infravermelho próximo e no vermelho, respectivamente (Rouse *et al.*, 1973). As leituras foram realizadas com o equipamento posicionado paralelamente às linhas da cultura, em altura de 1,0 m acima do dossel, sendo avaliadas 4 linhas (experimento - EEA/IRGA) e 1 linha (experimento -EEA/UFRGS) de cada parcela. No experimento conduzido na EEA/IRGA (Cachoeirinha, RS), as avaliações foram realizadas nos estádios de desenvolvimento vegetativo V5, V6, V8, V9 e V10, enquanto que, na EEA/UFRGS (Eldorado do Sul, RS), as avaliações foram realizadas nos estádios V4, V5, V6, V7, V8 e V9, segundo escala proposta por Ritchie *et al.* (1993).

O rendimento de grãos foi determinado pela colheita de grãos na área útil da parcela, constituída de quatro linhas de 5 m de comprimento no experimento conduzido na EEA/IRGA e de três linhas de 3 m de comprimento no experimento conduzido na EEA/UFRGS. Após trilha, a massa de grãos de cada parcela foi pesada e corrigida para a umidade de 130 g/kg, sendo o valor extrapolado para kg/ha.

2.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo Teste F, com auxílio do pacote estatístico SASTM (Statistical Analysis System - SAS 8.0). Para os valores de NDVI e de produtividade de grãos foi gerada análise de variância e, posteriormente, análise de regressão

entre os valores de NDVI e o rendimento de grãos para cada estágio fenológico avaliado, nos dois experimentos. Foi determinado também o coeficiente de correlação linear de Pearson entre NDVI e rendimento de grãos para cada estágio fenológico. Quando houve diferença significativa entre os tratamentos (densidades de plantas), as médias foram comparadas pelo teste de Duncan, ao nível de 5% de probabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada estágio fenológico, foi realizada análise de variância e, posteriormente, ajustadas as regressões entre os valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e a população de plantas. Para todos os estádios vegetativos avaliados, as regressões apresentaram significância ao nível de 1% de probabilidade, apresentando elevada relação entre os valores de NDVI e as densidades populacionais utilizadas nos experimentos conduzidos na EEA/UFRGS (Figura 1.a) e na EEA/IRGA (Figura 1.b). Como não houve interação entre híbridos e densidades populacionais no experimento conduzido na EEA/IRGA, as médias foram decompostas nos efeitos principais.

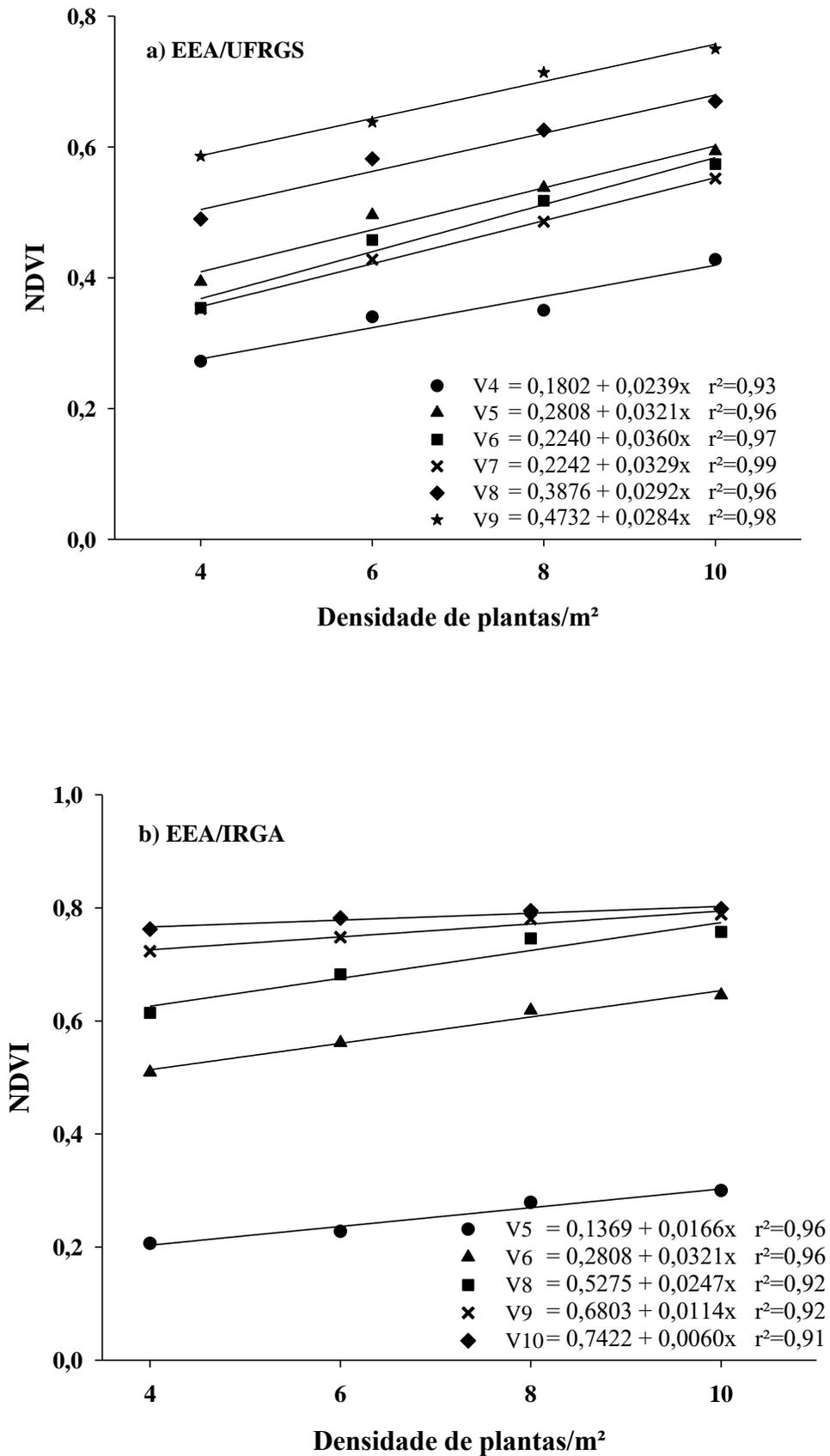


FIGURA 1. Variação do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na cultura do milho em diferentes estádios fenológicos em função da densidade de plantas em dois experimentos. (a) EEA/UFRGS e (b) EEA/IRGA.

Em todos os estádios avaliados foram verificados elevados coeficientes de determinação entre os valores de NDVI e as densidades populacionais da cultura do milho (Figura 1). Durante a fase inicial do desenvolvimento do milho foram realizadas leituras de NDVI em estádios vegetativos específicos (V4 a V10), correspondentes ao período de definição do potencial produtivo da cultura e da maior demanda por nitrogênio para a manutenção de seu metabolismo e aumento de área foliar, promovendo o incremento de biomassa e de clorofila por unidade de área, o que dará o suporte para o incremento na produtividade de grãos (Huang *et al.*, 2011).

Durante o período de desenvolvimento em que os valores de NDVI foram avaliados, pode-se observar diferenças entre os estádios vegetativos, em função do desenvolvimento do dossel, e diferenças em função da variação na população de plantas por área (Figura 1). No tratamento com densidade de 10 plantas/m² houve maiores valores de NDVI ao longo de todo o período avaliado, em comparação aos demais tratamentos, no estudo conduzido na EEA/UFRGS (Figura 1.a). No experimento realizado na EEA/IRGA, as populações de 10 e 8 plantas/m² apresentaram os maiores valores de NDVI ao longo do período, não apresentando diferença estatística significativa entre si (Figura 1.b).

Desta forma, as leituras de NDVI empregando sensor óptico ativo identificaram tratamentos com maior e menor população de plantas. Esse comportamento deve-se, principalmente, à menor quantidade de biomassa na parte aérea produzida nos estádios iniciais de desenvolvimento nos tratamentos com menores densidades de plantas, ou seja, 4 e 6 plantas/m². No presente trabalho, as diferentes populações de plantas foram diferenciadas pelas leituras de NDVI até o estágio fenológico V9-V10 (Figura 1). Em trabalho utilizando o sensor de vegetação Crop Circle, Povh (2011) reportou que as leituras de NDVI foram eficientes em identificar diferentes densidades populacionais (4, 5, 7, 8 e 10 plantas/m²)

somente até o estágio V6 (seis folhas completamente expandidas) da cultura do milho, quando foram aplicados 180 kg ha^{-1} de N aos dois dias após a semeadura.

Durante o período avaliado, observou-se que houve diferença entre a média das densidades populacionais em relação aos valores de NDVI (Figura 1). A variação média do valor deste índice entre a menor e a maior densidade de plantas (4 e 10 plantas/m², respectivamente) no estudo conduzido na EEA/UFRGS foi de 0,27 a 0,43 no estágio V4, 0,39 a 0,59 em V5, 0,35 a 0,57 em V6, 0,35 a 0,55 em V7, 0,49 a 0,67 em V8 e de 0,59 a 0,70 em V9, permitindo, assim, a identificação de diferentes populações de plantas a partir de leituras de NDVI em todos os estágios avaliados.

No estudo conduzido na EEA/IRGA, a variação dos valores de NDVI também foi significativamente afetada pelas diferentes populações de plantas testadas (Figura 1.b). O valor de NDVI apresentou maior variação entre as densidades de 4 e 10 plantas/m², sendo de 0,20 e 0,34 no estágio V5, 0,50 e 0,64 em V6, 0,61 e 0,75 em V8, 0,71 e 0,78 em V9 e 0,76 e 0,79 em V10, respectivamente para as densidades de 4 e 10 plantas/m², permitindo, assim, a diferenciação das diferentes populações de plantas até o estágio V10 (dez folhas completamente expandidas) da cultura.

Nos estágios iniciais de desenvolvimento (V4-V5) teoricamente seria mais marcante o efeito da população de plantas sobre os valores de NDVI, sendo que, no presente estudo, a diferenciação de diferentes populações de plantas pelo NDVI foi possível até os estágios V9-V10, contradizendo resultados encontrados por Povh (2011), que encontrou diferença apenas até o estágio V6.

Por outro lado, a limitação que o sensor Greenseeker apresenta é em diferenciar dosséis vegetativos muito densos, ou seja, a partir do estágio V9 ocorre alta quantidade de biomassa em todas as densidades populacionais e as entrelinhas da cultura estão quase ou completamente fechadas pelo dossel, podendo haver saturação do valor de NDVI (Molin *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2014). Povh (2011), utilizando sensor de reflectância Crop Circle,

encontrou saturação do valor de NDVI a partir dos estádios V6 e V7 da cultura do milho. Estudos desenvolvidos com cevada apresentam saturação do NDVI a partir de valores deste índice de 0,84 (Liu, 2006) e 0,87 (Grohs *et al.*, 2009).

A análise de regressão ajustada para explicar a variação da produtividade de grãos em função da população de plantas foi quadrática para o experimento desenvolvido na EEA/UFRGS (Figura 2). Quando se aumenta a densidade de semeadura do milho, essa densidade apresenta um limite agrônômico em que a cultura consegue incrementar a produção de grãos. Neste caso, ocorreu incremento de produtividade de grãos até a densidade de 8 plantas/m². Quando foi utilizada densidade de 10 plantas/m², em ambiente sem irrigação, a produtividade de grãos sofreu redução, quando comparada às densidades de 6 e 8 plantas/m², devido ao aumento da competição entre plantas por água e nutrientes ao longo do ciclo.

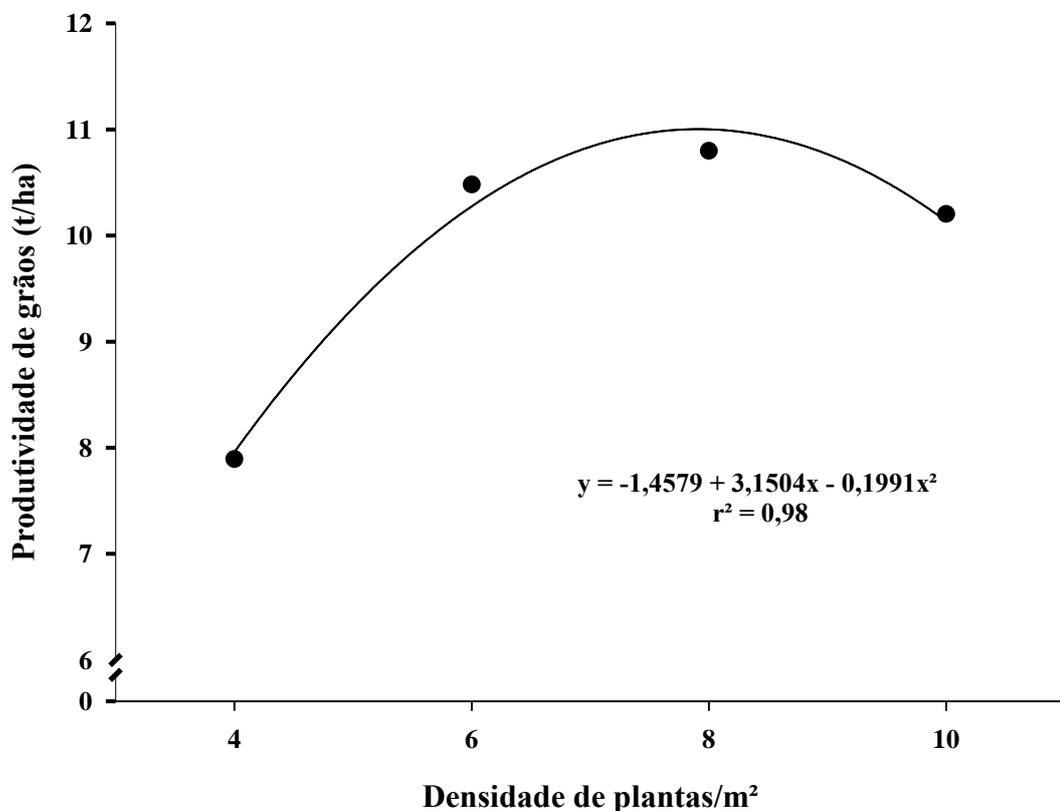


FIGURA 2. Variação da produtividade de grãos de milho em função da densidade de plantas. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2013/14.

No experimento conduzido na EEA/IRGA, não foi verificada correlação significativa entre o NDVI avaliado em diferentes estádios fenológicos e o rendimento de grãos, uma vez que, neste experimento, o rendimento de grãos não foi afetado, significativamente, pelas diferentes densidades de plantas testadas (Tabela 1). Consequentemente, não foi verificada correlação significativa entre a produtividade e as leituras de NDVI nos diferentes estádios vegetativos (Tabela 2). Entretanto, os valores de NDVI foram significativamente afetados pelas diferentes densidades de plantas utilizadas (Tabela 1).

TABELA 1. Valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios fenológicos e rendimento de grãos de milho em função da densidade de plantas. EEA/IRGA, Cachoeirinha, RS, 2013/14.

Densidade de plantas (nº/m ²)	V5	V6	V8	V9	V10	Rendimento de grãos (t/ha)
4	0,20 b*	0,50 c	0,61 b	0,71 b	0,76 b	10,63 a
6	0,22 b	0,55 bc	0,67 ab	0,74 ab	0,77 ab	11,76 a
8	0,27 ab	0,61 ab	0,74 a	0,77 a	0,79 a	11,38 a
10	0,34 a	0,64 a	0,75 a	0,78 a	0,79 a	11,85 a

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Duncan ($p>0,05$).

No experimento conduzido na EEA/UFRGS, a produtividade de grãos apresentou correlação significativa com os valores de NDVI avaliados pelo sensor Greenseeker em diferentes estádios fenológicos, resultados que conferem com os reportados por Povh (2011). Na Tabela 2, são apresentados os coeficientes de correlação entre os valores de NDVI avaliados entre os estádios vegetativos V4 e V10 e o rendimento de grãos. Em todos os estádios avaliados foi observada correlação significativa entre as duas variáveis, sendo que no estágio V8 (oito folhas completamente expandidas) foi verificado o mais elevado valor do coeficiente de correlação ($r=0,66$) entre NDVI e rendimento de grãos (Tabela 2).

A relação verificada no estudo conduzido na EEA/UFRGS entre os valores de NDVI e a produtividade de grãos é o ponto chave para que as produtividades em zonas de diferentes

potenciais produtivos em uma determinada área sejam maximizadas. O uso desta ferramenta permite que se realize a identificação em tempo real e *in-situ* do potencial produtivo em diferentes estádios vegetativos da cultura, permitindo que a adubação nitrogenada possa ser ajustada e aplicada de acordo com a necessidade das plantas no momento da leitura.

TABELA 2. Coeficiente de correlação entre os valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado em diferentes estádios fenológicos e o rendimento de grãos da cultura do milho, em dois locais.

Estádio vegetativo	Correlação - NDVI vs. Rendimento de grãos	
	Eldorado do Sul - RS	Cachoeirinha - RS
V4	0,52**	-
V5	0,59**	0,21 ^{ns}
V6	0,58**	0,17 ^{ns}
V7	0,53**	-
V8	0,66**	0,21 ^{ns}
V9	0,51**	0,17 ^{ns}
V10	-	0,32 ^{ns}

** Significativo a 1% de probabilidade; ns: não significativo.

A variação no NDVI é ocasionada pela variação na população de plantas, a qual promove variabilidade na quantidade de biomassa da parte aérea na área e na taxa de cobertura do solo. Observa-se que, em estádios de desenvolvimento a partir de V9-V10, ocorre o fechamento do dossel vegetativo e, com isso, a variabilidade dos valores de NDVI é reduzida (Tabela 1). Desta forma, a recomendação de uso deste sensor para estimativa da variabilidade na população de plantas e no potencial produtivo da cultura do milho é para os estádios V4 a V10, pois nestes estádios o sensor foi capaz de identificar a variação entre as populações e os potenciais produtivos, considerando o experimento conduzido na EEA/UFRGS.

Nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura do milho (V4 a V9), ocorre a definição do potencial produtivo e, conseqüentemente, a maior demanda por N, para expressão do potencial produtivo da cultura. Dessa maneira, a estimativa da população de

plantas e do potencial produtivo em lavouras bem manejadas em que se busca altos rendimentos de grãos é necessária para que o manejo da adubação nitrogenada apresente elevada resposta e eficiência, em função da aplicação de N em dose variada. Quando se identifica a variabilidade de plantas e se consegue estimar sua densidade, isto possibilita o manejo da aplicação de N em dose variada em zonas com diferentes potenciais produtivos dentro de uma mesma lavoura.

4 CONCLUSÕES

As diferentes densidades populacionais utilizadas nos experimentos são eficientes em gerar variabilidade nos valores de NDVI ao longo do ciclo da cultura do milho, sendo os menores valores deste índice relacionados às menores densidades e os maiores valores relacionados às maiores densidades.

Foi possível a identificação da densidade populacional entre os estádios fenológicos V4 e V10 de desenvolvimento da cultura. O equipamento Greenseeker foi eficiente em identificar tratamentos com maiores e menores densidades populacionais.

Nas leituras realizadas pelo sensor Greenseeker ficou evidente que o sensor começa a saturar, ou seja, não apresenta mais diferença significativa entre as leituras a partir dos estádios V9 e V10 para os híbridos testados.

A variabilidade (redução) no rendimento de grãos ocasionado pela variação na densidade populacional de plantas pode ser detectada pelo sensor Greenseeker, que auxiliou na estimativa do potencial produtivo da cultura do milho.

O emprego de sensor óptico ativo de reflectância é importante ferramenta para estimativa do potencial produtivo da cultura do milho entre estes estádios fenológicos e da densidade de plantas *in situ* e em tempo real.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, C.G.D. et al. Avaliação de características agronômicas e de produção de forragem e grãos de milho em diferentes densidades de semeadura e espaçamentos entre linhas. **Ciência e Agrotecnologia**, v.36, n.3, p.402-408, 2006.
- ARGENTA, G.S.; SILVA, P.R.F.; SANGOI, L. Arranjo de plantas em milho: análise do estado-da-arte. **Ciência Rural**, v.31, n.6, p.1075-1084, 2001.
- BERGAMASCHI, H. et al **Clima da Estação Experimental da UFRGS e região de abrangência**, Porto Alegre: UFRGS, 2003, 78p.
- BREDEMEIER, C. et al. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, v.43, n.7, p.1147-1154, 2013.
- CHIODEROLI, C.A. et al. Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.1, p. 37-43, 2012.
- DEMÉTRIO, C.S. et al. Desempenho de híbridos de milho submetidos a diferentes espaçamentos e densidades populacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, n.12, p.1691-1697, 2008.
- ESQUERDO, J.C.D.M.; ZULLO, J.; ANTUNES, J.F.G. Use of NDVI/ AVHRR time-series profiles for soybean crop monitoring in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v.32, n.1, p.3711-3727, 2011.
- 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.
- HORBE, T.A.N. et al. Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. **Precision Agriculture**, v.14, n.4, p.450-465, 2013.
- HUANG, W. et al. Estimation of vertical distribution of chlorophyll concentration by bi-directional canopy reflectance spectra in winter wheat. **Precision Agriculture**, v.12, n.11, p.165–178, 2011.
- HUERTA, R.F.M. et al. A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: Advantages, disadvantages and recent advances. **Sensors**, v.13, n.8, p.10823-10843, 2013.
- IPAGRO. **Observações meteorológicas no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: IPAGRO, 1979. 272p. (Boletim Técnico, 3).
- KANEKO, F.H. et al. Manejo do solo e do nitrogênio e milho cultivado em espaçamentos reduzidos e tradicional. **Bragantia**, v.69, n.3, p.677-686, 2010.
- KAPPES, C. et al. Desempenho de híbridos de milho em diferentes arranjos espaciais de plantas. **Bragantia**, v.70, n.2, p.334-343, 2011.

KARNIELI, A. et al. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: merits and limitations. **Journal of Climate**, v.23, n.3, p.618-633, 2010.

LANA, M.C. et al. Arranjo espacial e adubação nitrogenada em cobertura na cultura do milho. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.31, n.3, p.433-438, 2009.

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

MODOLO, A.J. et al. Desempenho de híbridos de milho na Região Sudoeste do Paraná sob diferentes espaçamentos entre linhas. **Revista Ciência Agrônômica**, v.41, n.3, p.435-441, 2010.

MOLIN, J.P. et al. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.12, p.1345-1349, 2010.

PENARIOL, F.G. et al. Comportamento de cultivares de milho semeados em diferentes espaçamentos entre linhas e densidades populacionais, na safrinha. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.2, n.2, p.52-60, 2003.

POVH, F.P. **Gestão da adubação nitrogenada em milho utilizando sensoriamento remoto**. 2011. 108f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE MILHO E SORGO. **LVIII Reunião Técnica Anual do Milho e XLI Reunião Técnica Anual de Sorgo: Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul – Safras 2013/2014 e 2014/2015**. Pelotas (RS). 2013. 124p.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a corn plant develops**. Ames, Iowa State University of Science and Technology, 1993. 26p. (Special Report, 48).

ROUSE, J.W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: **Third earth resources technology satellite symposium**. Washington, D.C.: NASA, 1973. Volume 1: Technical Presentations. p.309-317.

SANTOS, J.S. et al. Identificação da dinâmica espaço-temporal para estimar área cultivada de soja a partir de imagens MODIS no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.1, p.54-63, 2014.

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

TREZZI, M.M. et al. Manejo químico de plantas daninhas na cultura do milho em função de características morfofisiológicas e redução de espaçamento da cultura. **Planta Daninha**, v.26, n.4, p. 845-853, 2008.

4 CAPÍTULO II

Análise de imagens digitais e sensor óptico de vegetação para estimativa do potencial produtivo no milho em função da época de dessecação da cultura antecessora

1 INTRODUÇÃO

A estimativa do potencial produtivo da cultura do milho durante a fase vegetativa da cultura é de fundamental importância para se potencializar elevados rendimentos de grãos, sendo o N aquele nutriente que promove maior influência sobre a definição do potencial produtivo da cultura (França *et al.*, 2011; Sangoi *et al.*, 2011; Dovale *et al.*, 2012).

O N é nutriente fundamental para as plantas, pois é constituinte de parede celular, proteínas, ácidos nucléicos, aminoácidos, aminas, amidas, enzimas, alcalóides, hormônios e clorofila (Weligama *et al.*, 2010; Marschner & Marschner, 2012). Dessa maneira, plantas com deficiência de N apresentam redução da atividade metabólica, clorose e amarelecimento das folhas mais velhas da planta, provocando redução na taxa fotossintética e redução de processos vitais da planta. Em consequência, ocorre diminuição do tamanho das folhas e redução do potencial produtivo da cultura e do teor de proteínas nos grãos (Bissani *et al.*, 2008; Saiz-Fernández *et al.*, 2015).

A recomendação da dose total de N a ser aplicada na cultura do milho é determinada em função de três fatores principais: o teor de matéria orgânica do solo, a cultura antecessora e a expectativa de rendimento de grãos (Reunião, 2013). Contudo, o uso dos dois primeiros indicadores para estimar a quantidade de N suprida pelo solo e pelos resíduos da cultura antecessora é pouco eficiente, uma vez que inúmeros fatores meteorológicos e de solo estão envolvidos no processo de mineralização do N orgânico (Poletto, 2004). Também a definição da “expectativa de rendimento de grãos” é complexa, pois o potencial produtivo varia em função das condições meteorológicas de cada ano específico e a probabilidade da “expectativa de rendimento” não se concretizar é elevada. Com a existência de variabilidade espacial e temporal destes indicadores em áreas agrícolas, geralmente opta-se por aplicar maiores doses de N em cobertura para garantir elevados rendimentos (Poletto, 2004), sem levar em consideração o potencial produtivo da cultura e sua variabilidade espacial na área.

O emprego de ferramentas de sensoriamento, sejam elas remotas ou não, permite a estimativa do potencial produtivo da cultura através de leituras não destrutivas das plantas, avaliando o estado nutricional da cultura *in situ* e identificando zonas com diferentes condições nutricionais dentro de uma área agrícola (Hurtado *et al.*, 2011; Bredemeier *et al.*, 2013). Neste sentido, a disponibilidade de N pode ser influenciada, entre outros, pelo manejo da dessecação da cultura antecessora, que, por ter a decomposição da palhada antecipada, pode interferir no desenvolvimento da cultura do milho implantado em sucessão (Silva *et al.*, 2006; Molin *et al.*, 2010; Cunha *et al.*, 2011; Ricci *et al.*, 2011).

Desta maneira, é importante o uso de ferramentas que estimem o potencial produtivo da lavoura *in situ* de maneira precisa e rápida e em tempo real, visando aperfeiçoar a aplicação de N em cobertura e permitir a aplicação deste nutriente em taxa variável. Esta estimativa pode ser realizada pela caracterização da reflectância, que é a relação entre a radiação refletida pelo dossel e a radiação incidente e está associada à quantidade de biomassa, teor de clorofila nas folhas e potencial produtivo da cultura (Grohs *et al.*, 2009). Um dos índices de reflectância mais utilizados é o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – “Normalized Difference Vegetation Index”), dado pela relação $(p_{ivp} - p_v) / (p_{ivp} + p_v)$, onde p_{iv} e p_v são as reflectâncias no infravermelho próximo e no vermelho, respectivamente (Rouse *et al.*, 1973).

A correlação existente entre a reflectância na faixa de 680 nm e a concentração de clorofila nas folhas, assim como entre a reflectância na região do infravermelho próximo e a quantidade de biomassa do dossel, é determinante na estimativa do estado nutricional de uma cultura, o qual se relaciona com a concentração de clorofila e a produção de biomassa de uma comunidade vegetal (Shanahan *et al.*, 2008; Solari *et al.*, 2008;).

A análise de imagens digitais obtidas por câmeras digitais pode ser empregada para estimativa do desenvolvimento da cultura e de seu potencial produtivo. Estudos utilizando imagens digitais foram desenvolvidos para a estimativa da biomassa da parte aérea na cultura

do arroz (Lee & Lee, 2011) e do grau de infestação de plantas daninhas nas culturas da soja, milho e café (Panneton & Brouillard, 2009; Peng & Jun, 2011; Oliveira *et al.*, 2014).

Outro método para estimativa do potencial produtivo e do estado nutricional da cultura é a avaliação do teor relativo de clorofila na folha (Índice SPAD). A avaliação do Índice SPAD é um método não destrutivo para estimar o estado nutricional da cultura em relação ao N, uma vez que este nutriente é o principal constituinte da molécula de clorofila. Entretanto, este método apresenta a necessidade do contato físico do equipamento com a folha, aumentando o tempo necessário para a realização das avaliações a campo e reduzindo o rendimento operacional (Jørgensen & Jørgensen, 2007; Rorie *et al.*, 2011; Portz *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2015).

A hipótese deste trabalho é que exista uma alta relação entre as metodologias NDVI, cobertura de solo pelas plantas e o índice SPAD e que as mesmas podem ser utilizadas para determinar o potencial produtivo da cultura do milho.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a relação entre o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), a cobertura do solo, o teor relativo de clorofila na folha e o rendimento de grãos de milho, visando desenvolver procedimentos mais precisos para a adubação nitrogenada em cobertura em dose variada na cultura do milho.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na safra 2013/2014, na Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), em Eldorado do Sul (RS), em solo classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico (Streck *et al.*, 2008). A área experimental está situada na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul (RS), em altitude média de 46 metros acima do nível do mar. O clima é subtropical úmido de verão quente, do tipo Cfa, conforme a classificação de Köppen (Ipagro,

1979). A precipitação pluvial média anual 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).

Os tratamentos consistiram de diferentes épocas de dessecação da aveia branca (*Avena sativa* L.) antes da semeadura da cultura do milho (45, 30, 15 e 0 dias antes da semeadura), além dos tratamentos com aveia branca dessecada 30 dias antes da semeadura sem aplicação de N na cultura do milho implantado em sucessão e pousio (manejo durante o inverno sem a presença de qualquer tipo de cobertura vegetal). Os tratamentos foram escolhidos com o objetivo de gerar variabilidade na disponibilidade de N ao milho e no desenvolvimento das plantas, resultando em diferentes potenciais produtivos da cultura.

O experimento foi conduzido no delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições, sendo cada unidade experimental composta por oito linhas de cinco metros de comprimento, espaçadas em 0,5 m. A semeadura foi realizada no sistema de plantio direto, com auxílio de semeadora manual (saraquá), na densidade de 8 plantas/m². O híbrido simples utilizado foi Status TL TG (Syngenta Seeds), de ciclo precoce. A adubação na semeadura foi de 30, 120 e 120 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, e a adubação em cobertura foi de 200 kg ha⁻¹ de N, parcelada em duas aplicações, nos estádios V₄ (60 kg ha⁻¹) e V₇ (140 kg ha⁻¹) da cultura. A fonte de N utilizada foi ureia com inibidor da enzima urease.

Durante o desenvolvimento da cultura, foi realizado controle de plantas daninhas e pragas sempre que necessário, conforme as recomendações técnicas da cultura do milho (Reunião, 2013). O monitoramento da necessidade de irrigação foi realizado pela instalação de sondas no solo (Equipamento Hidrofarm[®]) para determinação da umidade volumétrica, sendo a irrigação realizada sempre que a umidade volumétrica do solo atingia o valor de 0,18 m³/m³.

A reflectância do dossel foi avaliada pelo sensor óptico ativo Greenseeker, o qual utiliza diodos de emissão de radiação nos comprimentos de onda do vermelho (650 nm) e

do infravermelho próximo (770 nm), fornecendo o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). O sensor foi posicionado em altura de 1,0 m acima do dossel e as leituras foram realizadas em quatro linhas de cada parcela, com largura útil captada pelo sensor de aproximadamente 0,8 m (Figura 1).



FIGURA 1. Leituras para a obtenção do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) com o sensor óptico Greenseeker no estágio fenológico V7 da cultura do milho.

A obtenção das imagens digitais no sistema RGB (vermelho, verde e azul) foi realizada com câmera fotográfica digital modelo Canon Power Shot A95, com resolução de 5 megapixels (Figura 2.A), no mesmo dia das leituras de reflectância do dossel com o sensor Greenseeker. As imagens foram feitas perpendicularmente em relação à linha de semeadura, em altura de 1,5 m acima do dossel, no horário entre 11:30 e 12:00 horas em condição de ausência de nebulosidade. Para o processamento e análise das imagens digitais foi utilizado programa computacional SISCOB versão 1.0 (Jorge & Silva, 2009). Em cada imagem digital, foi determinada a porcentagem de *pixels* em cada classe de interesse (planta, solo e palha) (Figura 2.B). Para tanto, é necessária a determinação das classes de padrões, bem como os padrões destas, para a construção do classificador de imagens a partir de uma rede neural supervisionada (Jorge & Silva, 2009).

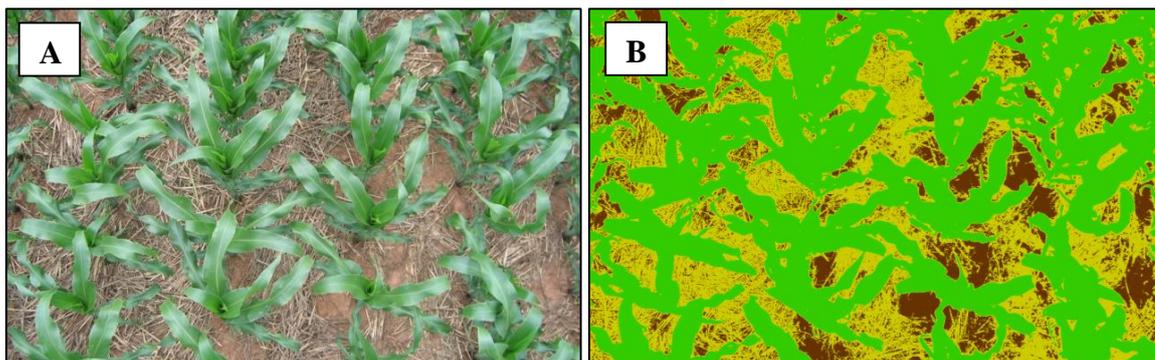


FIGURA 2. Obtenção e análise das imagens digitais, onde (A) representa a imagem das linhas centrais da unidade experimental e (B) representa a imagem processada e classificada nas classes solo (marrom), palha (amarelo) e planta (verde), no estágio fenológico V7 da cultura do milho.

O teor relativo de clorofila na folha (Índice SPAD) foi avaliado com o clorofilômetro Minolta (SPAD-502[®] Chlorophyll meter), o qual estima o teor de clorofila através da medição da transmitância da luz através da folha (Blackmer & Schepers, 1994; Argenta, 2001). O teor de clorofila é um bom indicador do estado nutricional da cultura em relação ao N, pois a maior parte do N presente nas células se encontra associado às moléculas de clorofila (Lopez-Cantarero *et al.*, 1994). As leituras foram realizadas em cinco pontos nos terços mediano e superior na última folha completamente desenvolvida de cinco plantas em cada unidade experimental.

Todas as avaliações acima descritas foram realizadas no estágio de desenvolvimento vegetativo V7 da cultura do milho (sete folhas completamente expandidas na planta), segundo a escala fenológica de Ritchie (Ritchie *et al.*, 1993).

O rendimento de grãos foi determinado pela colheita de 8 m² de área útil em cada parcela, o que corresponde a quatro linhas de 4 metros de comprimento. A colheita foi realizada de forma manual, sendo a trilha realizada em trilhadora estacionária. Após, foi determinado o peso de grãos por unidade experimental e extrapolado o valor para rendimento de grãos (em kg ha⁻¹), na umidade de 130 g kg⁻¹.

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância pelo Teste F, com auxílio do pacote estatístico SASTM (Statistical Analysis System - SAS 8.0). Posteriormente, foi realizada análise de variância (Teste F) e teste de comparação de médias pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, assim como análise de regressão e correlação linear de Pearson, quando pertinente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como a cultura antecessora foi manejada com diferentes épocas de dessecação antes da semeadura da cultura do milho, foi observado que essa variação promoveu variação na disponibilidade de N no solo, em função das diferentes épocas de dessecação. Esse efeito resultou em variabilidade no desenvolvimento das plantas entre os diferentes tratamentos, permitindo o estudo da relação entre as metodologias utilizadas no presente trabalho.

Os valores do coeficiente de determinação para a relação entre as diferentes metodologias utilizadas foram satisfatórios (Figuras 3, 4 e 5). Todas as relações apresentaram ajuste linear, sendo o maior valor do coeficiente de determinação encontrado para a regressão entre NDVI e a taxa de cobertura verde do solo (%) ($r^2=0,81$) (Figura 3). Esta resposta corrobora com estudo onde foi comparado o uso de imagens digitais proximais com o valor de NDVI obtido por imagens de satélite nas culturas da soja e do milho, obtendo $r^2=0,80$ (Sakamoto *et al.*, 2012). Igualmente, nas culturas do algodão e do milho foram reportados resultados semelhantes (Alganci *et al.*, 2014).

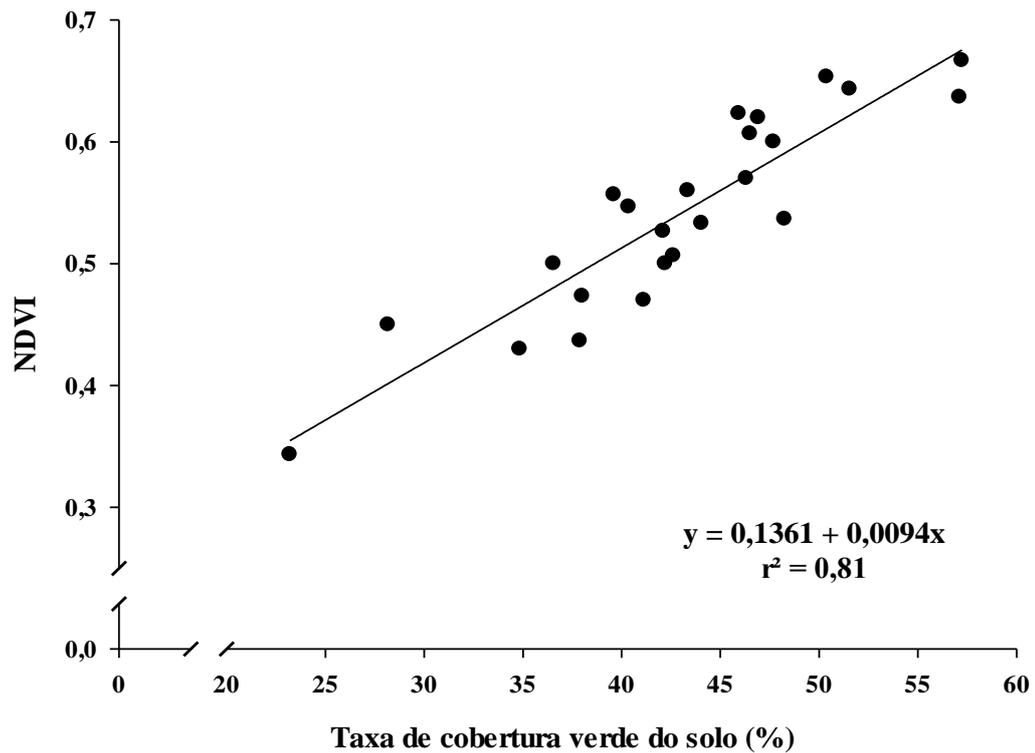


FIGURA 3. Relação entre análise da taxa de cobertura verde do solo (%) e Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) no estágio fenológico V7 da cultura do milho.

Considerando a avaliação do Índice SPAD, os coeficientes de determinação entre as diferentes metodologias variaram de $r^2=0,48$ (Índice SPAD e a taxa de cobertura verde do solo (%)) (Figura 4) e $r^2=0,54$ (NDVI e índice SPAD) (Figura 5). Como mencionado anteriormente, a análise de imagens digitais estima a percentagem de plantas na imagem, o NDVI determina o índice de vegetação da cultura através da reflectância da biomassa e da clorofila e o índice SPAD estima o teor de clorofila através da transmitância da luz pela folha.

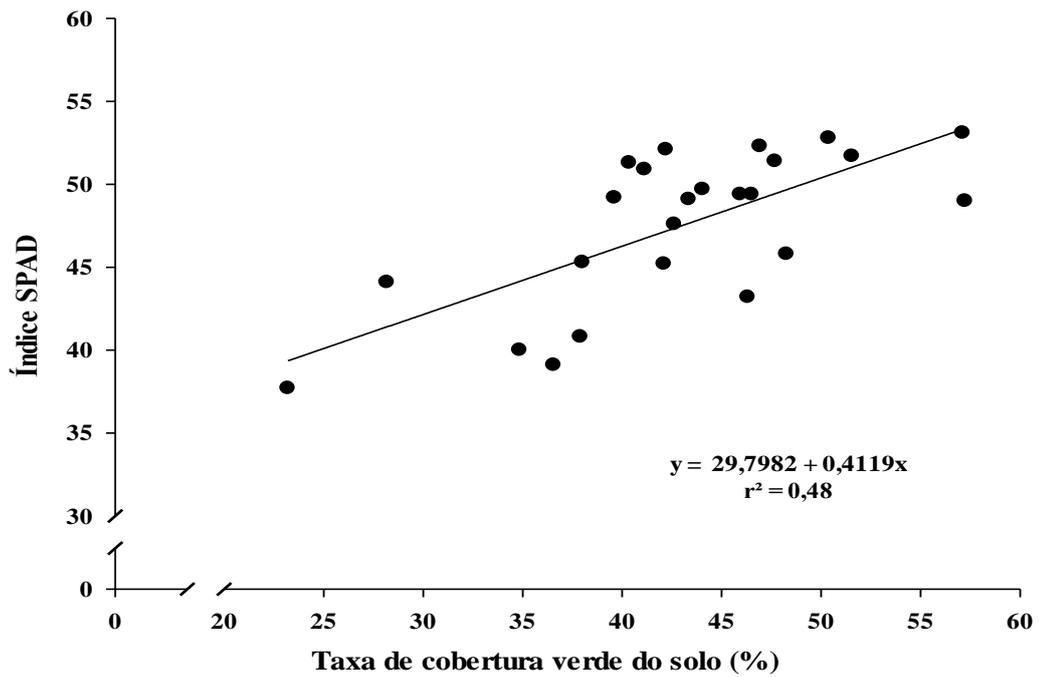


FIGURA 4. Relação entre os valores da taxa de cobertura verde do solo (%) e o índice SPAD no estágio fenológico V7 da cultura do milho.

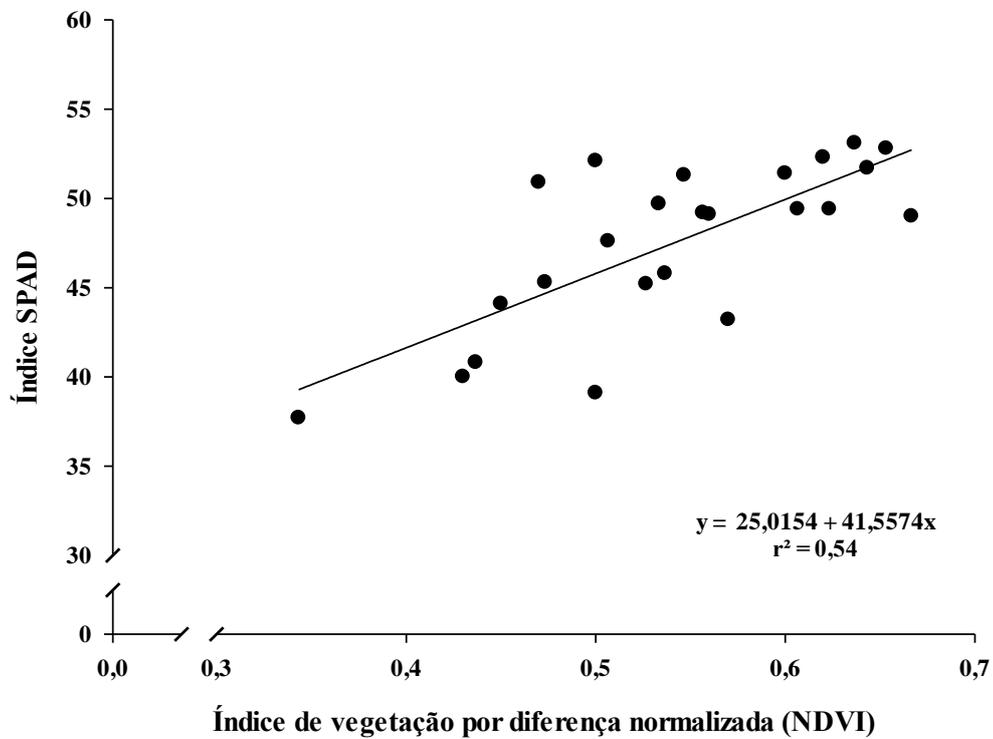


FIGURA 5. Relação entre os valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e do Índice SPAD no estágio fenológico V7 da cultura do milho.

A variação no desenvolvimento das plantas foi influenciada pelas diferentes épocas de dessecação da aveia branca em pré-semeadura, promovendo diferentes épocas de liberação do N de seus tecidos para o solo, onde o mesmo poder ter sido imobilizado e disponibilizado para a cultura do milho em diferentes períodos de seu desenvolvimento (Lourente *et al.* 2007; Fontoura & Bayer, 2009; Santos *et al.*, 2013). Desta forma, observa-se que as diferentes metodologias foram capazes de identificar a variabilidade no desenvolvimento da cultura do milho em função dos tratamentos utilizados (Tabela 1).

TABELA 1. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios de desenvolvimento milho (V3 a V8) e teor relativo de clorofila na folha (Índice SPAD) na cultura do milho no estádio V7 em função da época de dessecação da cultura antecessora (aveia branca).

Época de dessecação ²	NDVI					SPAD
	V3	V5	V6	V7	V8	V7
POUSIO	0,20 a ¹	0,50 a	0,59 a	0,63 a	0,75 a	43,2 a
0 DAS	0,16 c	0,35 b	0,47 bc	0,53 ab	0,69 ab	40,7 ab
15 DAS	0,16 c	0,35 b	0,44 c	0,49 cd	0,64 bc	40,2 ab
30 DAS	0,18 b	0,47 a	0,54 ab	0,58 ab	0,74 a	40,0 ab
45 DAS	0,19 ab	0,48 a	0,56 a	0,59 ab	0,76 a	41,7 a
30 DAS Sem N	0,16 c	0,32 b	0,40 c	0,43 d	0,59 c	35,3 b

¹Médias seguidas pela mesma letra na coluna dentro de cada estádio fenológico não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$).

²Época de dessecação da cultura antecessora (DAS=dias antes da semeadura do milho).

Um aspecto importante que deve ser levado em consideração é a limitação que o sensor *Greenseeker* apresenta em diferenciar dosséis vegetativos muito densos, ou seja, quando se atingiu 50% de plantas na imagem digital observa-se que o NDVI não apresentou pequena variação (Figura 3). Dessa forma, ocorreu a saturação do valor deste índice em função do aumento da cobertura de solo, o que pode ser uma limitação no uso do sensor a partir de estádios mais avançados da cultura, especialmente a partir dos estádios V10-V11 (Molin *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2013).

Os elevados rendimentos de grãos no presente experimento foram obtidos em função da irrigação, da adubação e do manejo empregado (Tabela 2). Todos os tratamentos que receberam adubação nitrogenada na cultura do milho não apresentaram diferença estatística

significativa entre si, mas foram estatisticamente diferentes do tratamento sem adubação na cultura do milho. A variabilidade na produtividade de grãos encontrada deve-se aos tratamentos de dessecação da cultura antecessora, uma vez que, com a antecipação da dessecação da aveia branca, se tem algumas vantagens, como, por exemplo, a mineralização do N da palhada no sistema e melhor qualidade do estabelecimento da lavoura, por não haver danos do excesso da palhada sobre a emergência das plântulas.

Essa variação na produtividade de grãos da cultura também é atrelada à adubação nitrogenada aplicada, a qual foi parcelada nos estádios V4 e V7, pois durante os estádios iniciais de desenvolvimento da cultura ocorrem importantes processos fisiológicos nas plantas, como a diferenciação do pendão e da espiga e a definição do número de óvulos na espiga. Por isso, nestes estádios o suprimento adequado de N para a planta é de fundamental importância para a definição do potencial produtivo (Saiz-Fernández *et al.*, 2015).

TABELA 2. Rendimento de grãos de milho em função da época de dessecação da cultura antecessora (aveia branca).

Época de dessecação ²	Rendimento de grãos (t/ha)
POUSIO	14,87 A ¹
O DAS	13,70 A
15 DAE	13,50 A
30 DAS	14,40 A
45 DAS	14,63 A
30 DAS Sem N	7,79 B

¹Médias seguidas pela mesma letra na coluna em cada estágio vegetativo de avaliação não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$).

²DAS=dias antes da semeadura do milho.

Os coeficientes de determinação das relações entre as metodologias utilizadas comparadas com as produtividades de grãos foram elevados, apresentando ajuste linear ($r^2=0,53$) para a regressão entre a taxa de cobertura verde do solo (%) e o rendimento de grãos (Figura 6) e entre o valor de NDVI e rendimento de grãos ($r^2=0,56$) (Figura 7). Já para a relação entre Índice SPAD e rendimento de grãos, o ajuste foi quadrático, com valor de coeficiente de determinação de $r^2=0,79$ (Figura 8).

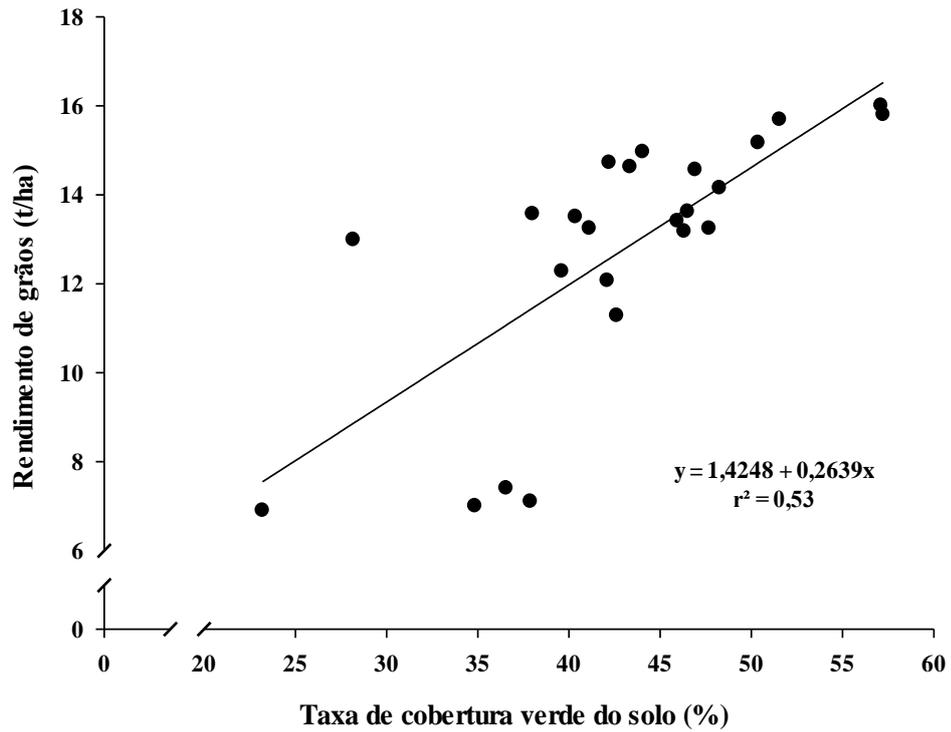


FIGURA 6. Relação entre os valores da taxa de cobertura verde do solo (%) no estágio fenológico V7 e o rendimento de grãos da cultura do milho.

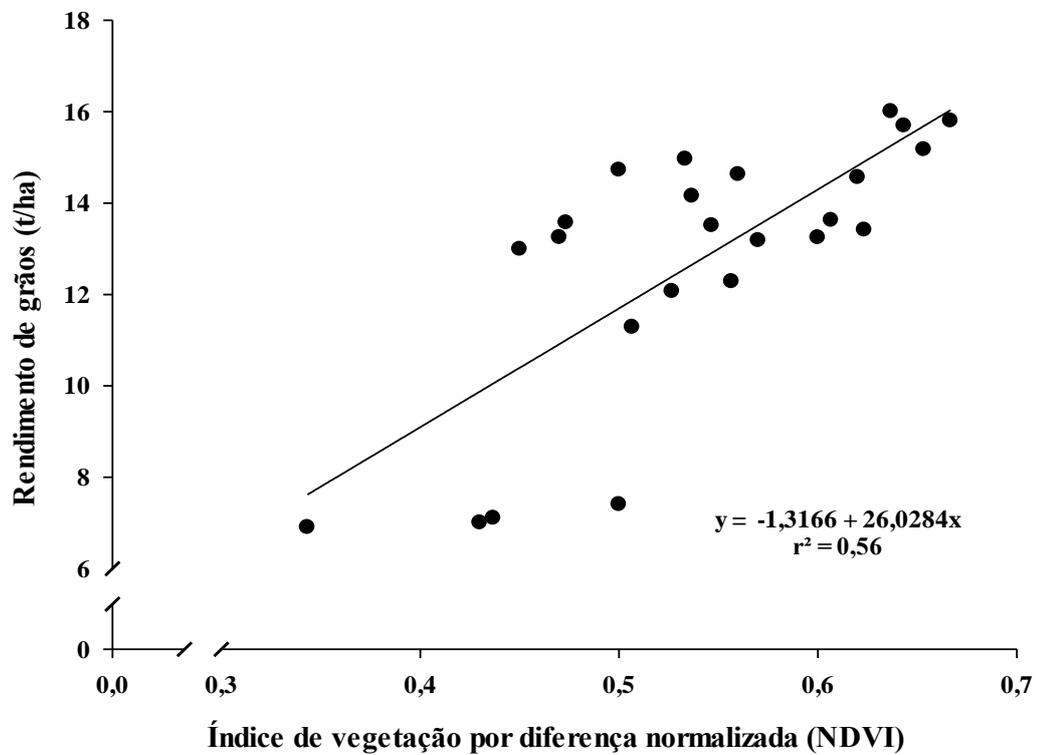


FIGURA 7. Relação entre o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) no estágio fenológico V7 e o rendimento de grãos da cultura do milho.

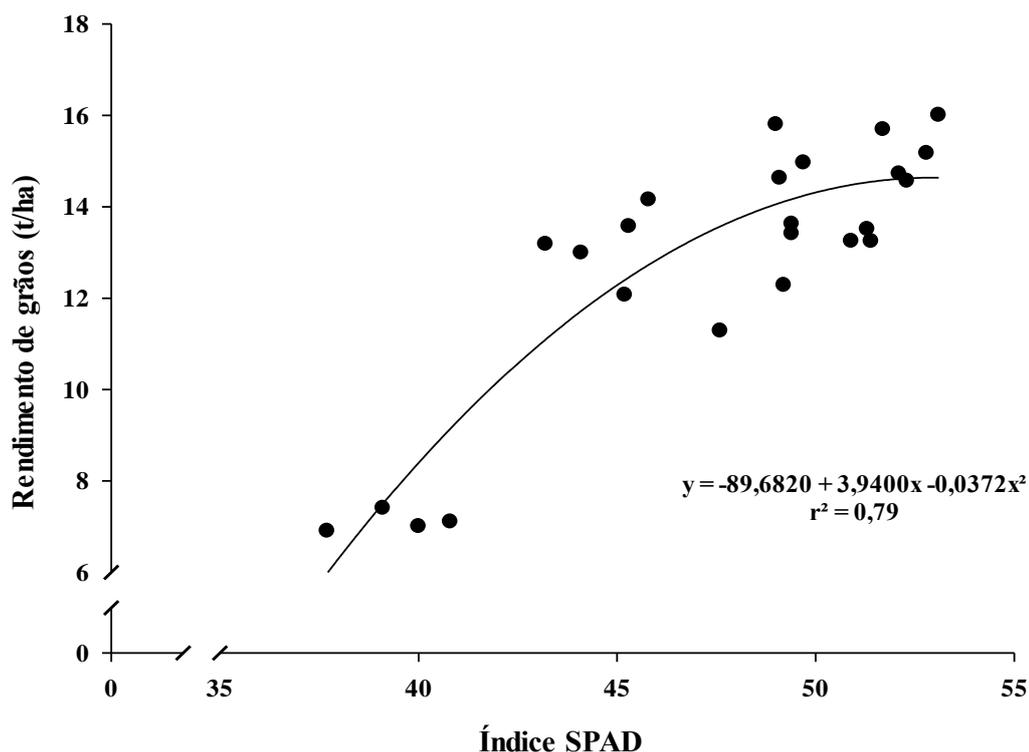


FIGURA 8. Relação entre o teor relativo de clorofila na folha (Índice SPAD) no estágio fenológico V7 e o rendimento de grãos da cultura do milho.

A análise de correlação entre as metodologias testadas e destas metodologias com o rendimento de grãos indicou elevadas e significativas correlações entre as variáveis (Tabela 3), destacando-se a correlação verificada entre a taxa de cobertura verde do solo (%) e o valor de NDVI ($r=0,90$). Em relação aos coeficientes de correlação entre as metodologias empregadas e o rendimento de grãos, estes variaram entre $r=0,73$, para a análise da taxa de cobertura verde do solo (%), e $r=0,83$, para o valor do Índice SPAD (Tabela 3).

TABELA 3. Matriz de correlação entre a taxa de cobertura verde do solo (%), Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), Índice SPAD e rendimento de grãos na cultura do milho.

	Taxa de cobertura verde do solo (%)	NDVI	SPAD	Rendimento de grãos
Taxa de cobertura verde do solo (%)	-	0,90**	0,68**	0,73**
NDVI		-	0,74**	0,77**
SPAD			-	0,83**
Rendimento de grãos				-

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

O monitoramento das condições nutricionais da cultura do milho é necessário para estimativa do potencial produtivo da cultura ao longo do ciclo, visando o desenvolvimento de procedimentos mais precisos para a adubação nitrogenada em cobertura.

As doses de N recomendadas em milho variam em função do teor de matéria orgânica do solo, cultura antecessora e expectativa de rendimento de grãos (Reunião, 2013). Uma vez que o potencial produtivo da cultura apresenta variação ao longo do ciclo, em função das condições meteorológicas, dos teores dos nutrientes no sistema e do manejo da cultura antecessora, o uso das metodologias testadas no presente trabalho possibilita a estimativa do potencial produtivo da cultura ao longo do ciclo e em tempo real, direcionando e otimizando as aplicações de N de acordo com a variabilidade existente.

Uma limitação no uso da Taxa de cobertura verde do solo (%) para estimativa do potencial produtivo é o efeito que o sombreamento ou a variação de luminosidade entre o dossel vegetativo da cultura e o solo ou a superfície de fundo da imagem digital exerce, devido à variação da radiação solar (Rasmussen *et al.*, 2007; Rasmussen *et al.*, 2008). Além disso, a ocorrência de água (orvalho, irrigação ou precipitação) sobre a folha pode promover diminuição na qualidade da análise da imagem (Alganci *et al.*, 2014).

4 CONCLUSÕES

As metodologias apresentaram elevada correlação entre si e com o rendimento de grãos, sendo adequadas para estimativa do potencial produtivo da cultura do milho no estágio fenológico V7.

Destaca-se a alta correlação entre a taxa de cobertura verde do solo e o valor do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e destas com o rendimento de grãos, possibilitando o uso destas ferramentas em trabalhos de pesquisa e em aplicações práticas a campo.

O NDVI foi capaz em diagnosticar variabilidade de desenvolvimento das plantas já no estágio V3 de desenvolvimento da cultura, variabilidade essa gerada a partir de diferentes épocas de dessecação da aveia branca.

Uma possibilidade de melhorar a eficiência da adubação nitrogenada em cobertura será utilizando uma dessas metodologias apresentadas, as quais foram capazes de detectar a variabilidade espacial do potencial produtivo da cultura. De posse dessa informação, pode-se dividir uma determinada área em diferentes zonas de manejo, a partir dos valores dos índices avaliados, realizando a aplicação de N em taxa variada e em tempo real.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALGANCI, U. et al. Estimating maize and cotton yield in southeastern Turkey with integrated use of satellite images, meteorological data and digital photographs. **Field Crops Research**, v.157, n.1, p.8-19, 2014.
- ARGENTA, G. et al. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.13, n.2, p.158-167, 2001.
- BERGAMASCHI, H. et al. **Clima da Estação Experimental da UFRGS (e região de abrangência)**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 77p.
- BISSANI, C.B. et al. Nitrogênio e adubos nitrogenados. In: BISSANI, C. B., GIANELLO, C., CAMARGO, F. A. O., TEDESCO, M. J. Org, 2ed. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 145 – 166.
- BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.25, n.9, p.1791-1800, 1994.
- BREDEMEIER, C. et al. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, v.43, n.7, p.1147-1154, 2013.
- CUNHA, E.Q. et al. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. II – Atributos biológicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.2, p.603-611, 2011.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre (RS), 2004. 400p.
- DOVALE, J.C. et al. Efeitos gênicos de caracteres associados á eficiência no uso de nitrogênio em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.3, p.385-392. 2012.
- FRANÇA, S. et al. Nitrogênio disponível ao milho: crescimento, absorção e rendimento de grãos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.11, p.1143-1151, 2011.
- FOUNTOURA, S.M.V.; BAYER, C. Adubação Nitrogenada para Alto Rendimento de Milho em Plantio Direto na Região Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.6, p.1721-1732, 2009.
- HURTADO, S.M.C. et al. Clorofilômetro no ajuste da adubação em cobertura para o milho de alta produtividade. **Ciência Rural**, v.41, n.6, p.1011-1017, 2011.
- IPAGRO. **Observações meteorológicas no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: IPAGRO, 1979. 272p. (Boletim Técnico, 3).
- JORGE, L.A.C.; SILVA, D.J.C.B. **SisCob: manual de utilização**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2009. 18p.

JØRGENSEN, J.R.; JØRGENSEN, R.N. Uniformity of wheat yield and quality using sensor assisted application of nitrogen. **Precision Agriculture**, v.8, n.1-2, p.63-73, 2007.

LEE, K.J.; LEE, B.W. Estimating canopy cover from color digital camera image of rice field. **Journal of Crop Science Biotechnology**, v.14, n.2, p.151-155, 2011.

LOPEZ-CANTARERO, I.; LORENTE, F.A.; ROMERO, L. Are chlorophylls good indicators of nitrogen and phosphorus levels?. **Journal of Plant Nutrition**, v.17, n.2, p.979-990, 1994.

LOURENTE, E.R.P. et al. Culturas antecessoras, doses e fontes de nitrogênio nos componentes de produção do milho. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.29, n.1, p.55-61, 2007.

MARSCHNER, H.; MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. London, UK: Academic Press; 2012.

MOLIN, J.P. et al. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.12, p.1345-1349. 2010.

OLIVEIRA, L.S. et al. Métodos para quantificação e interpretação da distribuição espacial de cobertura do solo em cafezais arborizados. **Coffee Science**, v.9, n.2, p.168-177, 2014.

PANNETON, B.; BROUILLARD, M. Colour representation methods form segmentation of vegetation in photographs. **Biosystems Engineering**, v. 102, n.4, p.365-378, 2009.

PENG, Z.; JUN, C. Weed recognition using image blur information. **Biosystems Engineering**, v. 110, n.2, p.198-205, 2011.

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

PORTZ, G.; MOLIN, J.P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, v.13, n.1, p.33-44, 2012.

RASMUSSEN, J.; BIRBY, B.M.; SCHOU, A.P. Investigating the selectivity of weed harrowing with new methods. **Weed Research**, v.48, n.6, p.523-532, 2008.

RASMUSSEN, J.; NØRREMARK, M.; BIBBY, B.M. Assessment of leaf cover and crop soil cover in weed harrowing research using digital images. **Weed Research**, v.47, n.1, p.299-310, 2007.

REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE MILHO E SORGO. **LVIII Reunião Técnica Anual do Milho e XLI Reunião Técnica Anula de Sorgo: Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul – Safras 2013/2014 e 2014/2015**. Pelotas (RS). 2013. 124 p.

RICCE, W.S. et al. Épocas de dessecação de pastagem de inverno e produtividade de grãos de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p. 1220-1225. 2011.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a corn plant develops**. Ames, Iowa State University of Science and Technology, 1993. 26p. (Special Report, 48).

ROUSE, J.W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **In. NASA ERTS Symposium**, v.3, p.309-317, 1973.

RORIE, R.L. et al. The assessment of leaf nitrogen in corn from digital images. **Crop Science**, v.51, n.5, p.2174-2180, 2011.

SAIZ-FERNÁNDEZ, I. et al. High nitrate supply reduces growth in maize, from cell to whole plant, **Journal of Plant Physiology**, v.173, n.1, p.120-129, 2015.

SAKAMOTO, T. et al. An alternative method for using digital cameras for continuous monitoring of crop status. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.154–155, n.1, p.113–126. 2012.

SANGOI, L. et al. Disponibilidade de nitrogênio, Sobrevivência e contribuição dos perfilhos ao rendimento de grãos do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.35, n.1, p. 183-191, 2011.

SANTOS, L.P.D. et al. Doses de nitrogênio na cultura do milho para altas produtividades de grãos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.12, n.3, p. 270-279, 2013.

SHANAHAN, J. et al. Responsive in-season nitrogen management for cereals. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 61, n. 1, p.51–62, 2008.

SILVA, P.R.F. et al. Estratégias de manejo de coberturas de solo no inverno para cultivo do milho em sucessão no sistema semeadura direta. **Ciência Rural**, v.36, n.3, p.1011-1020, 2006.

SOLARI, F. et al. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, v.76, p.571-579. 2008.

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

UDDLIN G,J. et al. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. **Photosynth. Research**, v. 91, n.1, p. 37-46, 2007.

WELIGAMA, C. et al. Application of nitrogen in NO_3^- form increases rhizosphere alkalisation in the subsurface soil layers in an acid soil. **Plant and Soil**, v.333, n.1, p.403–416, 2010.

ZHAO, B. et al. Characterization of nitrogen and water status in oat leaves using optical sensing approach. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.95, n.2, p.367-378, 2015.

5 CAPÍTULO III

Limites críticos do Índice de vegetação por vegetação normalizada (NDVI) em diferentes estádios fenológicos avaliado por sensor óptico ativo para estimativa do potencial produtivo do milho em tempo real

1 INTRODUÇÃO

Entre as novas práticas agrícolas que foram recentemente aprimoradas, destaca-se a implantação da agricultura de precisão (AP), a qual proporcionou aos agricultores maior conhecimento da variabilidade da lavoura. Um dos principais avanços foi a inserção de sensores de vegetação, com a finalidade de realizar o monitoramento da condição nutricional da cultura ao longo do seu ciclo de desenvolvimento, possibilitando aplicações a taxa variável de nitrogênio (N), de acordo com a necessidade da planta em diferentes áreas dentro de um talhão.

A variação na dose de fertilizante nitrogenado tende a aumentar a sua eficiência agronômica, pois a necessidade de N é estimada através da reflectância do dossel vegetativo da cultura, ou seja, é estimada a partir da demanda da planta (Raun *et al.*, 2002). A aplicação de N em taxa fixa (dose uniforme) indica a desconsideração da variabilidade espacial existente nas lavouras. Assim, a aplicação de uma mesma dose de N em toda área promove aplicações desnecessárias deste nutriente, podendo resultar em contaminação do meio ambiente, pela lixiviação de nitratos para águas subterrâneas, e redução da eficiência agronômica, devido à aplicação adicional em zonas que não necessitam de tanto N para o adequado desenvolvimento das plantas (Hong *et al.*, 2007; Shanahan *et al.*, 2008).

As doses de N recomendadas para a cultura do milho no estado do Rio Grande do Sul (RS) baseiam-se no teor de matéria orgânica do solo, na cultura antecessora e na expectativa de rendimento. Desta forma, são definidas as doses de N a serem aplicadas na semeadura e em cobertura, nos estádios de quatro a oito folhas completamente expandidas (Reunião, 2013). Entretanto, em muitas situações a aplicação de N em cobertura apresenta baixa eficiência, em função do desconhecimento da demanda real das plantas em relação a este nutriente no momento da aplicação (Poletto, 2004).

Para contornar essa limitação, surgem os sensores de vegetação, os quais permitem a realização da recomendação de N através de leituras de reflectância do dossel da cultura,

uma vez que o estado nutricional das plantas está relacionado com alterações de reflectância do dossel (Serrano *et al.*, 2000; Liu, 2006). O conhecimento do comportamento espectral da vegetação proporcionou o desenvolvimento de sensores remotos proximais, como o *Greenseeker*, adaptado para a adubação nitrogenada a taxa variada e em tempo real, sendo um método mais eficiente e preciso (Grohs *et al.*, 2009).

Contudo, o uso intensivo a campo de sensores de vegetação ainda é restrito, devido ao custo de aquisição dos equipamentos e à reduzida disponibilidade de algoritmos adequados para as diferentes culturas. Com o advento do manejo *in situ* e da taxa variável de semeadura, torna-se necessária a utilização de novos algoritmos que reconheçam a variabilidade do potencial produtivo em uma determinada área agrícola em função da densidade populacional e de sua condição nutricional (Horbe *et al.*, 2013).

Os algoritmos empregados pelos sensores de vegetação buscam aumentar a precisão das decisões de recomendação da adubação nitrogenada em cobertura em função da variabilidade de plantas encontrada nas lavouras e também em função da necessidade de N que as plantas apresentam. No Brasil, algoritmos foram desenvolvidos para aumentar a eficiência da adubação nitrogenada nas culturas do trigo, cevada e cana-de-açúcar (Grohs *et al.*, 2009; Amaral *et al.*, 2011).

O objetivo do presente trabalho foi determinar os limites críticos do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) utilizando sensor óptico ativo de vegetação para determinação de classes de potencial produtivo da cultura do milho em diferentes estádios fenológicos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na safra 2013/2014 na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), no município de Eldorado do Sul (RS). A área experimental situa-se na região fisiográfica da Depressão Central do Rio

Grande do Sul (RS), em uma altitude média de 46 metros acima do nível do mar. O clima é subtropical úmido de verão quente, do tipo Cfa, conforme a classificação de Köppen (Ipagro, 1979). A precipitação pluvial média anual em Eldorado do Sul é de 1440 mm e a temperatura média mensal varia entre 14 e 25°C, entre os meses mais frios e mais quentes (Bergamaschi *et al.*, 2003). O solo pertence à unidade de mapeamento São Jerônimo, caracterizado como Argissolo Vermelho distrófico típico (Streck *et al.*, 2002).

O experimento foi conduzido dentro de lavoura experimental na EEA/UFRGS (Eldorado do Sul, RS), com densidade de 10 plantas/m² e, aos 14 dias após a emergência, as diferentes densidades populacionais foram ajustadas por desbaste manual, sendo os tratamentos alocados no delineamento experimental de blocos ao acaso dentro da área, com quatro repetições. Os tratamentos constaram de quatro densidades populacionais (4, 6, 8 e 10 plantas/m²), sendo que o híbrido utilizado foi o Morgan 30A77PW. A semeadura foi realizada na primeira semana de janeiro de 2014, com semeadura direta na palha sobre restos culturais de trigo. Cada parcela foi constituída de três linhas de 3 de comprimento, espaçadas em 0,5 m. A adubação em cobertura foi de 126 kg ha⁻¹ de nitrogênio, parceladas em duas aplicações, nos estádios V4 (63 kg ha⁻¹) e V7 (63 kg ha⁻¹). A lavoura foi conduzida sob condições naturais de precipitação.

A reflectância do dossel vegetativo foi avaliada pelo radiômetro GreenSeeker, o qual fornece o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), o qual é dado pela relação $(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{V}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{V}})$, onde ρ_{NIR} e ρ_{V} são as reflectâncias no infravermelho próximo e no vermelho, respectivamente. As leituras foram realizadas com o equipamento posicionado paralelamente às linhas da cultura, em uma altura de 1,0 m acima do dossel, sendo avaliada a linha central de cada unidade experimental. As leituras foram realizadas nos estádios fenológicos V4, V5, V6, V7, V8 e V9, segundo a escala proposta por Ritchie *et al.* (1993), a qual leva em conta o número de folhas completamente expandidas na planta.

O rendimento de grãos foi determinado pela colheita manual de espigas na área útil, constituída de uma linha de 3 m de comprimento. Após pesagem, a massa de grãos foi pesada e corrigida para umidade de 130 g kg^{-1} , sendo o valor extrapolado para kg/ha . Os tratos culturais realizados foram de acordo com a necessidade, seguindo as recomendações técnicas da cultura do milho (Reunião, 2013).

Para definição dos limites críticos do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) foram adaptadas as classes utilizadas nos trabalhos desenvolvidos por Molin (2002) e Santi *et al.* (2012). Nestes trabalhos, as classes geradas foram utilizadas para dividir zonas de manejo de “alta”, “média” e “baixa” produtividade de grãos, tendo como base a média de produtividade de grãos da área. Desta forma, o desenvolvimento da metodologia para monitoramento do potencial produtivo da cultura do milho ao longo do ciclo no presente trabalho seguiu o mesmo processo para a construção de classes sugerido por estes autores, ou seja, a relativização das produtividades de grãos obtidas no experimento em relação à média do experimento ($9,84 \text{ t ha}^{-1}$), a qual se assume como tendo o valor de 100%. Assim, foram determinadas as seguintes classes de potencial produtivo: “baixo” (<90% da média do experimento), “médio” (90 a 110%) e “alto” (>110% da média do experimento) (Figura 1).

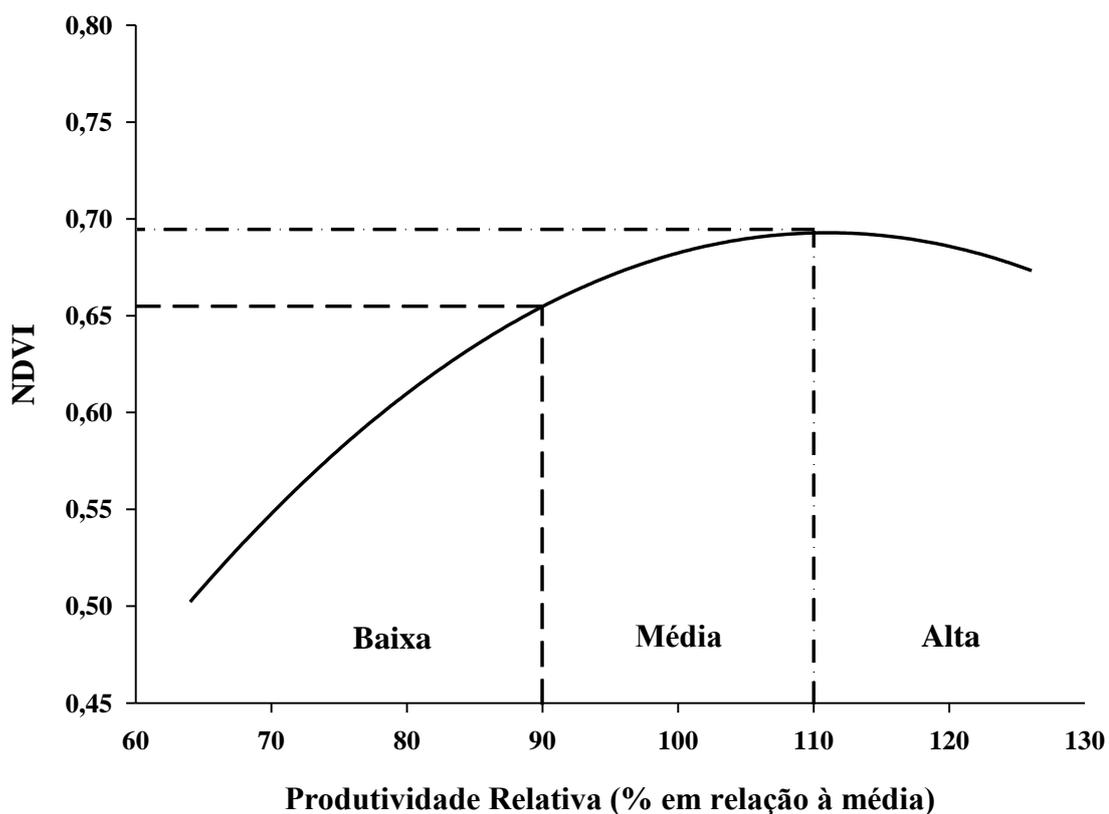


FIGURA 1. Modelo teórico de metodologia para construção de classes de potencial produtivo da cultura do milho em função da variação do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância pelo Teste F, com auxílio do pacote estatístico SASTM – (Statistical Analysis System - SAS 8.0). Para os valores de NDVI e de produtividade de grãos relativizada foi gerada a análise de variância e, posteriormente, ajustada a análise de regressão para cada estágio fenológico de avaliação do NDVI.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de aprimorar o uso de sensor óptico baseado na leitura do NDVI na cultura do milho foram determinadas classes (ou limites críticos) deste índice para estádios vegetativos entre V4 (quatro folhas completamente expandidas) e V9 (nove folhas completamente expandidas), correspondente ao período que compreende a definição de parte

do potencial produtivo da cultura. Este período exige adequada suplementação de N para manutenção do seu metabolismo, promovendo o aumento de área foliar, biomassa na parte aérea e teor de clorofila, os quais darão o suporte para elevada produtividade de grãos através da fotossíntese (Huang *et al.*, 2011).

Em todos os estádios vegetativos avaliados, os valores de NDVI apresentaram elevada relação com o rendimento de grãos da cultura. Para todas as avaliações, houve correlação significativa entre NDVI e produtividade de grãos, sendo ajustadas regressões quadráticas entre estas duas variáveis ($p < 0,05$) (Figura 2).

Os maiores valores de NDVI avaliados em diferentes estádios fenológicos se relacionaram a maiores produtividades de grãos no momento da colheita (Figura 2). Esta relação também foi encontrada por Povh *et al.* (2008) que, trabalhando com adubação em taxa variável em trigo, encontraram valores de NDVI mais elevados em áreas que tinham recebido maior dose de N e apresentaram maior potencial produtivo. Neste caso, o maior potencial produtivo foi proporcionado pela maior disponibilidade de N e maior acúmulo de biomassa e sobrevivência dos afilhos. Grohs *et al.* (2007), trabalhando com o sensor Greenseeker em cevada, encontraram alta correlação entre o NDVI avaliado no estágio de seis folhas expandidas, o número de colmos por área e a biomassa da parte aérea.

Os limites críticos de NDVI para a definição das classes de potencial produtivo em cada estágio fenológico avaliado foram definidos de acordo com a metodologia descrita anteriormente, tomando-se como base a relação existente entre o NDVI e o rendimento de grãos relativo (Figura 2).

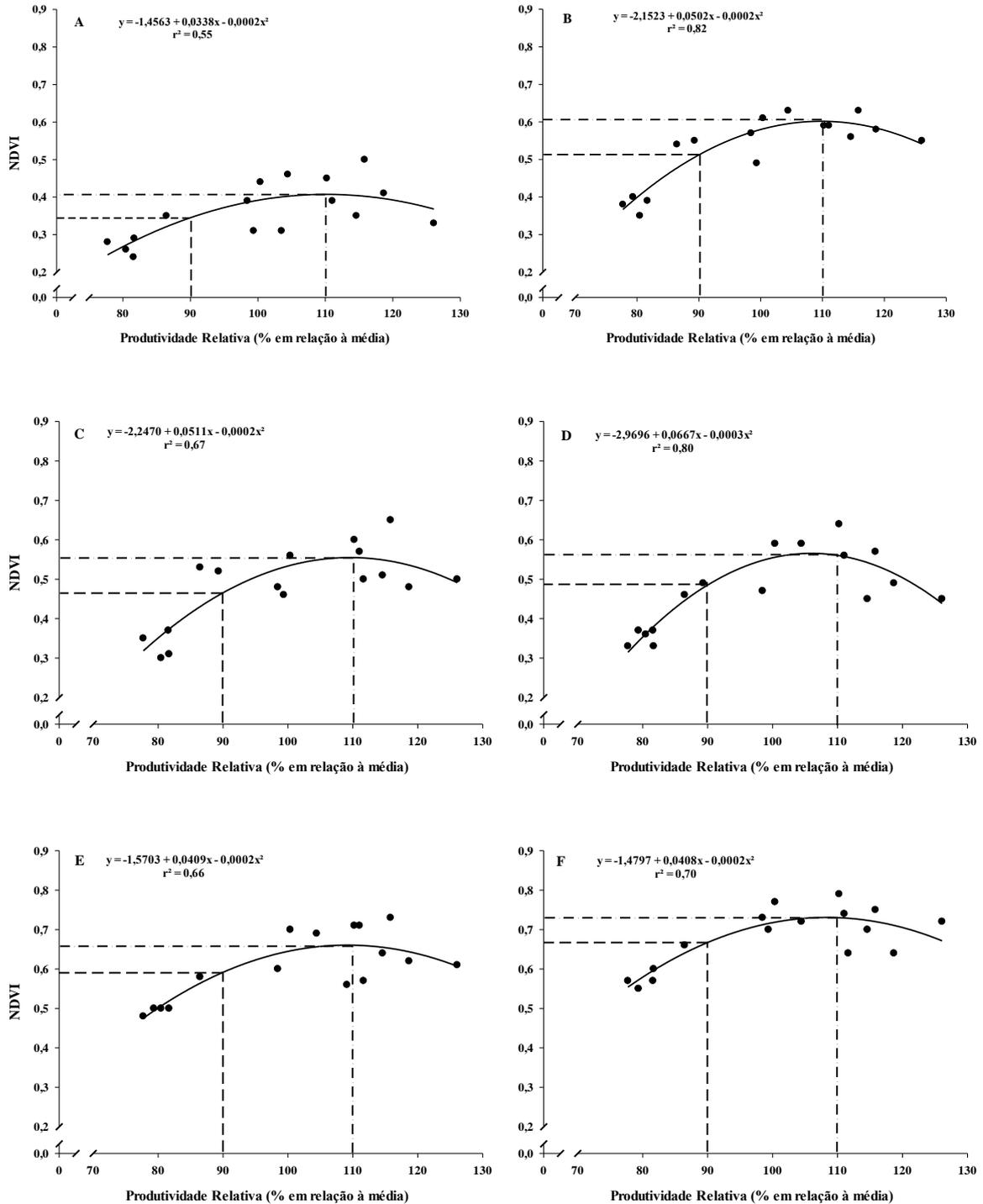


FIGURA 2. Limites críticos do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para definição de classes de potencial produtivo nos estádios fenológicos V4 (A), V5 (B), V6 (C), V7 (D), V8 (E) e V9 (F) da cultura do milho.

Os limites críticos de valores do NDVI, determinados com base nas relações mostradas na Figura 2 para as classes “baixa”, “média” e “alta”, são sumarizados na Tabela 1.

TABELA 1. Limites críticos do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para definição de classes de potencial produtivo da cultura do milho em diferentes estádios fenológicos de desenvolvimento.

Estádio de desenvolvimento ¹	Classes de potencial produtivo		
	Baixo	Médio	Alto
V4	<0,35	0,35 – 0,41	>0,41
V5	<0,52	0,52 – 0,60	>0,60
V6	<0,47	0,47 – 0,56	>0,56
V7	<0,49	0,49 – 0,56	>0,56
V8	<0,59	0,59 – 0,66	>0,66
V9	<0,67	0,67 – 0,73	>0,73

¹Escala de Ritchie *et al.* (1993).

Observa-se que, para os estádios vegetativos V6 e V7, houve redução dos limites de NDVI em todas as classes (Tabela 1). Essa redução no valor deste índice deve-se a ocorrência de deficiência hídrica durante estes estádios de desenvolvimento, o que influenciou a abertura das folhas e o grau de fechamento do dossel da cultura. Estas alterações causam redução do valor do NDVI, em função da diminuição da área foliar para interceptação da radiação vermelha e infravermelha emitida pelo sensor óptico ativo Greenseeker (Anamari *et al.*, 2009).

As recomendações de doses de adubação nitrogenada são tradicionalmente realizadas ainda na pré-semeadura da cultura do milho (Reunião, 2013), onde se considera critérios como o teor de matéria orgânica do solo e o rendimento de grãos esperado, não se levando em consideração outros fatores que influenciam a disponibilidade deste nutriente no solo. Assim, a ocorrência de fatores pós-semeadura faz com que haja um padrão de desenvolvimento que leva a diferentes potenciais produtivos da cultura dentro de uma mesma lavoura.

Além disso, a definição da dose de N a ser aplicada em função do rendimento de grãos esperado é imprecisa, uma vez que o potencial de rendimento de grãos varia ao longo do desenvolvimento da cultura, em função das condições meteorológicas específicas de cada safra, existindo grande probabilidade da expectativa de rendimento não se concretizar. Além disso, existe variabilidade espacial do potencial produtivo na lavoura, o que determina diferentes demandas de N em diferentes locais dentro de uma mesma lavoura.

Com a utilização do NDVI para estimativa de classes de potencial produtivo da cultura ao longo do ciclo de desenvolvimento, a expectativa de rendimento de grãos pode ser ajustada em cada estágio fenológico, o que confere um melhor manejo nutricional quando comparado ao método tradicional de aplicação em taxa fixa. A relação que o NDVI apresenta com a produtividade de grãos é o ponto chave para que a produção nas zonas de diferentes potenciais produtivos sejam maximizadas (Li *et al.*, 2010). O uso desta ferramenta permite que se realize a identificação em tempo real e *in situ* do potencial produtivo em diferentes estádios vegetativos da cultura, permitindo que a adubação nitrogenada possa ser ajustada e aplicada de acordo com a necessidade nutricional das plantas no momento da leitura.

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

Para auxiliar nesta avaliação do potencial produtivo, a utilização de sensores de vegetação, como o Greenseeker, pode ser importante ferramenta para auxiliar na determinação de doses de fertilizante nitrogenado mais condizentes com a real necessidade

de N pelas plantas. Schmidt *et al.* (2011) encontraram adequada eficiência para o sensor de NDVI na quantificação da necessidade de fertilizantes nitrogenados na cultura do milho.

Os valores de NDVI apresentaram alta correlação com rendimento de grãos da cultura do milho (Figura 2) e podem ser empregados como ferramenta para definição de “zonas de manejo”, visando a aplicação de fertilizantes em taxa variável. Esse método consiste na definição e na demarcação a campo de divisas para setores do talhão onde serão aplicadas doses diferenciadas de algum insumo. Este conceito subentende, além disso, que o tratamento seja feito uniformemente dentro de cada zona.

Os resultados apresentados neste trabalho mostraram que o sensor óptico ativo apresentou eficiência satisfatória na identificação da produtividade em diferentes densidades populacionais e em diferentes estádios fenológicos da cultura. Os limites críticos de NDVI que correspondem a diferentes classes de potencial produtivo na cultura do milho podem ser empregados de maneira rápida e eficiente em algoritmo direcionado para a adubação nitrogenada em tempo real, segundo o potencial produtivo estimado.

4 CONCLUSÕES

As diferentes densidades populacionais utilizadas no experimento foram eficientes na geração de variabilidade nos valores de NDVI ao longo do ciclo da cultura e no rendimento de grãos. Maiores valores deste índice entre os estádios fenológicos V4 a V9 foram significativamente correlacionadas com maiores rendimentos de grãos no momento da colheita. A relação verificada entre os valores de NDVI e a produtividade de grãos é o ponto chave para que as produtividades nas zonas de diferentes potenciais produtivos em uma determinada área sejam maximizadas, através do uso dos limites críticos de NDVI e da realização da adubação nitrogenada em dose variada utilizando sensor óptico ativo de vegetação.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P. Sensor óptico no auxílio a recomendação de adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.12, p.1633-1642, 2011.
- ANAMARI, V.A. et al. Utilização de sensor óptico ativo para detectar deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.2, p.137-145, 2009.
- BERGAMASCHI, H. et al **Clima da Estação Experimental da UFRGS e região de abrangência**, Porto Alegre: UFRGS, 2003, 78p.
- GROHS, D.S. et al. 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. 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.
- HONG, S.D. et al. Comparison of ground-based remote sensors for evolution of corn biomass affected by nitrogen stress. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.38, n.15, p.2209-2226, 2007.
- HORBE, T.A.N. et al. Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. **Precision Agriculture**, v.14, n., p.450-465, 2013.
- HUANG, W. et al. Estimation of vertical distribution of chlorophyll concentration by bi-directional canopy reflectance spectra in winter wheat. **Precision Agriculture**, v.12, n.11, p.165-178, 2011.
- IPAGRO. **Observações meteorológicas no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: IPAGRO, 1979. 272p. (Boletim Técnico, 3).
- LI, Y. et al. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. **Field Crops Research**, v.118, n.1, p.221-227, 2010.
- LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. 908p.
- MILANI, L. et al. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.28, n.4, p.591-598, 2006.
- MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 41p., 1961.
- MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v.22, n.1, p.83-92, 2002.
- POLETTI, N. Disponibilidade de nitrogênio no solo e sua relação com o manejo da adubação nitrogenada. 2004. 119f. **Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)** - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

POVH, F.P. et al. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, n.8, p.1075–1083, 2008.

RAUN, W.R. et al. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agronomy Journal**, v.94, n.4, p.815-820, 2002.

REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE MILHO E SORGO. **LVIII Reunião Técnica Anual do Milho e XLI Reunião Técnica Anual de Sorgo: Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul – Safras 2013/2014 e 2014/2015**. Pelotas (RS). 2013. 124p.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a corn plant develops**. Ames, Iowa State University of Science and Technology, 1993. 26p. (Special Report, 48).

SANTI, A.L. et al. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.9, p.1346-1357, 2012.

SCHMIDT, J. et al. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor. **Field Crops Research**, v.120, n.1, p.94-101, 2011.

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

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

SHANAHAN, J.F. et al. Responsive in-season nitrogen management for cereals. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.61, n.1, p.51-62, 2008.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Emater/RS, UFRGS, 2002. 107p.

6 CONCLUSÕES GERAIS

O Índice de vegetação por diferença normalizado (NDVI) avaliado por sensor óptico ativo de vegetação apresenta variabilidade ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do milho em função de diferentes densidades populacionais. Dessa forma, torna-se possível a identificação da densidade populacional nos estádios iniciais de desenvolvimento desta cultura.

Foram verificadas correlações positivas e significativas entre os valores de NDVI, porcentagem de planta na imagem digital, índice SPAD e rendimento de grãos. Destaca-se a alta correlação entre a análise de imagens digitais e o valor do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e destas duas metodologias com o rendimento de grãos, possibilitando o uso destas ferramentas em outros trabalhos científicos e aplicações práticas a campo.

Visando desenvolver estratégias de aplicação prática das informações coletadas nos estudos, foram determinados limites críticos de valores de NDVI para os estádios fenológicos V4 a V9, os quais foram significativamente correlacionados com o rendimento de grãos de milho. Conclui-se que o uso do sensor óptico ativo de reflectância Greenseeker é importante ferramenta para estimativa do potencial produtivo da cultura do milho e da densidade de plantas *in-situ* e em tempo real em diferentes estádios fenológicos e para desenvolvimento de estratégias para adubação nitrogenada em dose variada.

7 VITA

André Luis Vian, nascido em 27 de outubro de 1989 no município de Seberi, Rio Grande do Sul, Brasil, é filho de Ary Luiz Vian (*in memoriam*) e Soeli Candaten Vian.

No ano de 2005, iniciou os estudos no Colégio Agrícola de Frederico Westphalen (CAFW-UFSM), vinculado à Universidade Federal de Santa Maria, formando-se em técnico em agropecuária em 2007. Durante este período, obteve experiências em todos os setores da agricultura e da agropecuária, realizando estágio e monitoria nos setores de jardinocultura e fruticultura. No ano de 2008, ingressou no Curso de Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria, Campus de Frederico Westphalen (CESNORS), graduando-se Engenheiro Agrônomo em 2012. Durante este período, atuou em diferentes áreas de iniciação científica, como climatologia, fisiologia vegetal, melhoramento genético, herbologia, uso e manejo do solo e agricultura de precisão. Em 2013, ingressou no Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com ênfase em fisiologia e manejo vegetal.

Tem como linhas de pesquisa agricultura de precisão, sensores de reflectância e fisiologia e manejo de plantas de lavoura.