

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Luiz Felipe Diaz de Carvalho

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO OBTIDOS POR SENSOR PROXIMAL
E EMBARCADO EM AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA E
SUA RELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DO MILHO**

Santa Maria, RS
2019

Luiz Felipe Diaz de Carvalho

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DE DOSSEL OBTIDOS POR SENSORIAMENTO
PROXIMAL E EMBARCADO EM AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA E
SUA RELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado

Santa Maria, RS
2019

CARVALHO, LUIZ FELIPE DIAZ
ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DE DOSSEL OBTIDOS POR
SENSORIAMENTO PROXIMAL E EMBARCADO EM AERONAVE
RENOTAMENTE PILOTADA E SUA RELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE /
LUIZ FELIPE DIAZ CARVALHO.- 2019.
91 p. ; 30 cm

Orientador: TELMO JORGE CARNEIRO AMADO
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2019

1. Agricultura de Precisão. Nitrogênio. Sensoriamento
Remoto. Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada. I.
CARNEIRO AMADO, TELMO JORGE II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2019.

Todos os direitos autorais reservados a Luiz Felipe Diaz de Carvalho. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Antônio Gonçalves do Amaral, 2180, Santa Maria – RS.

E-mail: felipe@politecnico.ufsm.br

Luiz Felipe Diaz de Carvalho

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO OBTIDOS POR SENSOR PROXIMAL E
EMBARCADO EM AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA E SUA
RELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DO MILHO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Aprovado em 15 de julho de 2019:

Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Jardes Bragagnolo, Dr. (URI)

Christian Bredemeier, Dr. (UFRGS)

José Cardoso Sobrinho, Dr. (UFSM)

Lúcio de Paula Amaral, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha amada Esposa, companheira fiel durante esta faina ingente Juliana Lorensi e aquele que veio remover o vazio da minha alma e preencher de pureza e amor o meu ser, meu amado filho Javier Luiz Lorensi Diaz de Carvalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Grande Arquiteto do Universo que permite que o Homem conheça a si mesmo e continuamente evolua, submetendo suas paixões, levantando templos a virtude e cavando masmorras ao vício.

Aos pais, (Oscar Luiz Moreira de Carvalho e Lígia Díaz de Carvalho), que nos legaram o dom da vida, açularam o aprendizado desde a infância, dando suporte necessário para chegar até esta etapa.

A família que nos momentos mais críticos e decisivos suportaram a distância, isolamento e solidão com serenidade e amor, minha amada esposa Juliana Lorensi, que com tanto afinho e dedicação tutelou nosso esperado e amado pequeno príncipe, Javier Luiz Lorensi Diaz de Carvalho.

Aos meus irmãos Luiz Eduardo Diaz de Carvalho e família e Amarflis Diaz de Carvalho e família, que mesmo distantes, sabemos que torcem pela minha conquista.

A nossa egrégia Instituição a Universidade Federal de Santa Maria e ao Colégio Politécnico, que proporcionaram guarida e apoio nesta jornada.

Ao meu estimado Orientador Professor Telmo Jorge Carneiro Amado, pelas luzes de seu conhecimento destinadas nesta faina e revelado o “fio de Ariadne” do conhecimento para mim.

Ao Prof^o Lúcio pelas ideias e parceria no campo, ao Prof^o Cardoso pela dedicação, Prof^o Christian e Jardes pelo pronto atendimento e disposição, Prof^o Aita pelo suporte e ao Geomar.

Aos colegas de Programa de Pós-Graduação: Maisa, Mariana, Juju, Carlos, Douglas, Luiz Antônio, pelo carinho e aos bons momentos passados juntos.

Aos colegas do Projeto Aquarius, Marcieli, Vinicius, Hoerbe, Luan, Rai, Geomar, pelas conversas, apoio e troca de experiências.

Aos amigos da Procampo Renato e Leonardo, que foram incansáveis no processamento dos dados para este projeto.

Aos amigos da Finish Produtora, Evandro e Cristian, pelas quedas e decolagens e pelo vasto conhecimento compartilhado na montagem e operação das Aeronaves Remotamente Pilotadas.

Aos funcionários que dão seu árduo suporte nesta caminhada especialmente ao nosso querido e sempre disposto secretário Heverton Heinz.

Ao Professor Carlito Vieira de Moraes pela atenção e organização no trabalho.

Ao Professor Rodrigo Josemar Seminotti Jacques, pelo incentivo a ingressar no Programa de Pós- Graduação.

Ao Professor Valmir Aita por todo apoio nesta jornada.

Ao Servidor Cláudio Humberto Corrêa pelo engajamento desta jornada e pelos Drones conseguidos para o nosso laboratório.

A Luciane e Gilce pelo comprometimento e parceria em todas as etapas do trabalho.

A toda turma da “colheita de precisão” que foi fundamental a campo para o sucesso deste trabalho.

Aos amigos que sempre estão por perto não nominados neste agradecimento.

RESUMO

ÍNDICES DE VEGETAÇÃO OBTIDOS POR SENSOR PROXIMAL E EMBARCADO EM AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA E SUA RELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DO MILHO

AUTOR: Luiz Felipe Diaz de Carvalho
ORIENTADOR: Telmo Jorge Carneiro Amado

Diferentes Índices de vegetação (IVs) têm sido utilizados como ferramenta para avaliar parâmetros biofísicos das plantas. Entre estes, destaca-se o sucesso do NDVI na avaliação do estado nutricional de nitrogênio (N) nas culturas do milho, trigo, cevada entre outras. O objetivo do estudo foi avaliar a relação entre IVs determinados por sensores ópticos, embarcados em duas diferentes plataformas, a proximal e o Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (SARP). As quantificações foram realizadas em distintos estádios fenológicos do milho, em cultivo submetido a distintos estados nutricionais de N. Para tanto, na ocasião da semeadura do milho, foram aplicadas doses de N de 20, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹, dispostas em delineamento de blocos ao acaso, com 5 repetições cada tratamento. Os IVs investigados foram o NDRE e NDVI (em plataforma proximal), e NDRE, NDVI, EVI2 e GNDVI (em plataforma SARP), avaliados nos estádios fenológicos V5, V6, V7, V9, V11 e V12. Para uma população de 80.000,00 plantas/há⁻¹ avaliadas pelas plataformas, a resolução espacial obtida para a plataforma embarcada foi de 3,7 cm/ px⁻¹ no monocromático e 0,8 cm/ px⁻¹ no modo RGB. O estado nutricional do milho foi monitorado através da avaliação do teor de N na parte aérea da planta e do N absorvido na colheita. No primeiro artigo foi realizada uma relação dos índices de vegetação com o estado nutricional das plantas e comparando os sensores proximais com embarcados em SARP, onde o sensor embarcado mostrou melhor relação no monitoramento do estado nutricional do que o proximal. No segundo artigo foi realizado correlações dos índices de vegetação com a produtividade na cultura do milho, o índice NDRE no estágio V12, demonstrou a melhor correlação com a produtividade do milho.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Nitrogênio. Sensoriamento Remoto. Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada.

ABSTRACT

VEGETATION INDEXES OBTAINED BY PROXIMAL SENSOR AND BOAT IN REMOTELY PILOT AIRCRAFT AND ITS RELATION TO CORN PRODUCTIVITY

AUTHOR: Luiz Felipe Diaz de Carvalho
ADVISOR: Telmo Jorge Carneiro Amado

Different vegetation indices (IVs) have been used as a tool to evaluate plant biophysical parameters. Among these, we highlight the success of NDVI in the evaluation of nitrogen nutritional status (N) in maize, wheat, barley, among others. The objective of the study was to evaluate the relationship between IVs determined by optical sensors, boarded on two different platforms, the proximal, and the Remotely Piloted Aircraft System (SARP). Quantifications were carried out at several corn phenological stages, under cultivation submitted to different N nutritional conditions. At the time of maize sowing, N doses of 20, 60, 120, 180 and 240 kg ha⁻¹ were applied, arranged in a randomized block design, with 5 replicates each. The IVs investigated were NDRE and NDVI (proximal platform), and NDRE, NDVI, EVI2 and GNDVI (in SARP platform), evaluated in the phenological stages V5, V6, V7, V9, V11 and V12. For a population of 6400 plants evaluated by platforms, the spatial resolution obtained for the embedded platform was 3.7 cm / px⁻¹ in the monochromatic and 0.8 cm / px⁻¹ in the RGB mode. The nutritional status of the corn was monitored by evaluating the N content in the aerial part of the plant and N absorbed at harvest. In the first article a relation of the vegetation indices with the nutritional state of the plants was carried out and comparing the proximal sensors with embedded in SARP. In the second article, correlations of vegetation indices with corn yield were carried out.

Keywords: Precision Agriculture. Nitrogen. Remote Sensing. Remotely Piloted Aircraft System.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
°C	Graus Celsius
cm	Centímetro
DAE	Dias Após a Emergência
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
EVI2	Índice de Vegetação Melhorado
GNDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada do Verde
GSD	Ground Sample Distance
ha	Hectare
IV	Índice de Vegetação
kg	Quilograma
m ²	Metro quadrado (área)
mm	Milímetro
Mp	Mega pixel
N	Nitrogênio
NDRE	Índice de Borda Vermelha da Diferença Normalizada
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
nm	Nanômetro
Px	Pixel
RGB	Red-Green-Blue
SARP	Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada
T	Tratamentos
UAS	Unmanned Aircraft Systems
USB	Universal Serial Bus
UTM	Universal Transversa de Mercator

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

- Tabela 1 – Índices de vegetação (IVs) e suas respectivas equações determinantes. 43
- Tabela 2 – Caracterização textural e química do solo ocorrente na área experimental antes da aplicação dos tratamentos. 45

ARTIGO 2

- Tabela 1 – Índices de vegetação (IVs) e suas respectivas equações determinantes. 71

APÊNDICE A

- Tabela 1 – Estimativa do déficit hídrico da cultura do milho, no estádio V11, no ano agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS. 91

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

APRESENTAÇÃO

Figura 1 – Localização da área experimental.	23
Figura 2 – Tratamentos para geração de variabilidade espacial, exemplo de disposição dos tratamentos em um dos blocos (A) e ilustração do tamanho da parcela e distância entre linhas de semeadura (B).	24
Figura 3 – a) Pesagem e b) disposição das diferentes doses de N (tratamentos) antes da aplicação.	25
Figura 4 – Esquema ilustrativo das doses de N dos tratamentos e dos sensores proximais e embarcado (SARP).	26
Figura 5 – Adaptação para deslocamento constante do sensor proximal.	28
Figura 6 – Média de observações dos sensores proximal e embarcado para cada repetição de 2m ²	29
Figura 7 – Espaçamento das linhas de plantio e tamanho de parcela.	31
Figura 8 – Localização das parcelas e tratamentos. Chamada no texto	31

ARTIGO 1

Figura 1 – Localização da área experimental.	39
Figura 2 – Esquema experimental utilizado.	40
Figura 3 – Configuração dos blocos, parcelas e repetições que constituíram a área experimental.	41
Figura 4 – Estádios fenológicos com avaliação dos índices de vegetação da cultura do milho; DAE: dias após a emergência; data: data da leitura; ST: soma térmica em graus dia (GD).	42
Figura 5 – Teor de nitrogênio presente no tecido das plantas nos estádios fenológicos V7, V11 e V12 do milho, correlacionado com as doses de Nitrogênio aplicado no solo, em Santa Maria, RS, na safra agrícola 2017/2018.	46
Figura 6 – Valores médios dos índices de vegetação (NDVI, NDRE, GNDVI e EVI2), obtidas a cada 2 m ² , para as plataformas proximal e embarcada, em cada estágio fenológico quantificado (V5, V6, V7, V9, V11 e V12) para cultura do milho, em Santa Maria, RS, no ano agrícola 2017/2018.	47
Figura 7 – Curvas de resposta dos índices de vegetação NDRE (A); NDVI (B); EVI2 (C) e GNDVI (D), determinados em duas plataformas (terrestre e aérea), obtidos, nos estádios fenológicos V5, V6, V7, V9, V11 e V12 do milho, Santa Maria, RS, ano agrícola 2017/2018	48
Figura 8 – Valores médios do teor de N acumulados nas plantas nos estádios V7, V11 e V12 do milho. Ano agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.	49
Figura 9 – Relação dos índices de vegetação NDRE (A); NDVI (B); EVI2 (C) e GNDVI (D) avaliado no estágio V7 com as quantidades de nitrogênio exportados para os grãos de milho. Ano agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.	51
Figura 10 – Coeficientes de determinação dos índices de vegetação obtidos por diferentes plataformas em relação aos estádios fenológicos do milho, na safra agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.	52
Figura 11 – Relação dos índices de vegetação NDRE (A); NDVI (B); EVI2 (C) e GNDVI (D) avaliado no estágio V12 com as quantidades de nitrogênio exportados para os grãos de milho. Ano agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.	53
Figura 12 – Gráfico da precipitação diária e acumulada no compreendido entre em 24 de outubro de 2017 até 04 de janeiro de 2018 (entre a semeadura e o estágio V12 da	

	lavoura de milho). Dados registrados para Santa Maria RS, provenientes da estação do INMET.	54
Figura 13	– Relação dos índices de vegetação NDRE (A); NDVI (B); EVI2 (C) e GNDVI (D) avaliado no estádio V11 (sob estresse hídrico) com as quantidades de nitrogênio exportados para os grãos de milho. Ano agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.	54

ARTIGO 2

Figura 1	– Localização da área experimental.	67
Figura 2	– Esquema experimental utilizado.	68
Figura 3	– Esquemática ilustrativa dos blocos, parcelas e repetições que constituíram a área experimental.	69
Figura 4	– Estádios de desenvolvimento do milho avaliado com sensores proximais e embarcados; DAE: dias após a emergência; data: data da leitura; ST: soma térmica em graus dia (GD).	70
Figura 5	– Produtividade de grãos de milho em relação aos tratamentos de diferentes doses de N com barras de erro padrão, cultivado na safra agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.	74
Figura 6	– Boxplot dos índices de vegetação nos diversos estádios fenológicos da cultura do milho. Ano agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.	74
Figura 7	– Correlação da produtividade de grãos de milho, com as leituras dos IVs, em diferentes estádios fenológicos. Ano agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS. Legenda: ns= não significativo. *= P<0.05, **= P<0.01.	75
Figura 8	– Modelo gerado para estimar a produtividade em V12, a partir do índice NDRE do sensor embarcado com a equação e coeficiente de determinação.	77
Figura 9	– Mapa temático de NDRE da plataforma SARP estádio V12, mapa temático da produção real (A), mapa temático do índice de vegetação (B) e mapa temático da produtividade predita pelo estimador do índice (C) do bloco 5 da área experimental.	78
Figura 10	– Comparação entre a produtividade real e a estimada como potencial, em V12, utilizando o modelo estimador, a partir do índice NDRE do sensor embarcado... ..	78
Figura 11	– Relação da produtividade com os tratamentos nos diferentes estádios fenológicos avaliados.	79

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	16
2	HIPÓTESES	21
3	OBJETIVOS	22
3.1	OBJETIVO GERAL.....	22
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
4	MATERIAL E MÉTODOS GERAL	23
4.1	DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	23
4.2	IMPLANTAÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	24
4.3	PLATAFORMA E SENSORES EMBARCADOS.....	25
4.4	PROCESSAMENTO DE DADOS E PRODUTOS CARTOGRÁFICOS.....	26
4.5	OBTENÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	28
4.6	COLETAS A CAMPO.....	30
4.7	DETERMINAÇÃO DO PERCENTUAL DE NITROGÊNIO NAS PLANTAS.....	31
4.8	DÉFICIT HÍDRICO INCIDENTE DURANTE O CICLO DA CULTURA DO MILHO.....	32
4.9	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	33
5	ARTIGO 1 – ÍNDICES DE VEGETAÇÃO OBTIDOS POR SENSORES DE IRRADIÂNCIA DO DOSSEL EMBARCADOS EM PLATAFORMA TERRESTRE E AÉREA E INFLUENCIADOS PELO ESTADO NUTRICIONAL DE NITROGÊNIO DO MILHO	34
5.1	RESUMO.....	34
5.2	ABSTRACT.....	34
5.3	INTRODUÇÃO.....	35
5.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	39
5.4.1	Caracterização do local de execução do experimento.....	39
5.4.2	Obtenção dos dados sensoriados via terrestre e embarcados em SARP.....	41
5.4.3	Planejamento de voo e processamento das imagens para obtenção dos IVs.....	42
5.4.4	Determinações de quantificação do N nas plantas.....	43
5.4.5	Análises dos dados.....	44
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.6	CONCLUSÕES.....	57
	REFERÊNCIAS.....	58
6	ARTIGO 2 – ÍNDICES DE VEGETAÇÃO EM DIFERENTES ESTÁDIOS FENOLÓGICOS RELACIONADOS COM A PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE MILHO	64
6.1	RESUMO.....	64
6.2	ABSTRACT.....	64
6.3	INTRODUÇÃO.....	65
6.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	67
6.4.1	Caracterização do local de execução do experimento.....	67
6.4.2	Obtenção dos dados sensoriados via terrestre e embarcados em SARPs.....	68
6.4.3	Processamento das imagens obtidas pelos sensores.....	70
6.4.4	Colheita e beneficiamento do milho.....	71
6.4.5	Análises dos dados.....	72
6.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
6.6	CONCLUSÕES.....	81
	REFERÊNCIAS.....	82
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86

REFERÊNCIAS	88
APÊNDICE A	91

1 INTRODUÇÃO GERAL

O rendimento de grãos de milho (*Zea mays L.*) e a determinação da população de plantas são importantes na predição de seu potencial produtivo devido ao seu arranjo espacial de plantas (KAPPES et al., 2011). A produção de biomassa de milho, do rendimento de grãos da cultura, e a avaliação de estádios de crescimento são recomendadas para direcionar aplicações variáveis de nitrogênio e melhorar a eficiência de seu uso (SOLARI et al., 2008). A resposta da produtividade da cultura do milho está diretamente ligada a densidade de plantas e as doses de nitrogênio (N) aplicadas na cultura (SCHWALBERT et al., 2018).

O manejo da adubação nitrogenada é tradicionalmente realizado a taxa fixa, ou seja, uma mesma dose aplicada uniformemente em toda a área, sem levar em consideração as condições da variabilidade espacial dos nutrientes no solo da área agrícola. Isto significa que em algumas áreas teremos N insuficiente, em algumas áreas suficiente e em outras em excesso. Isso pode promover desperdícios do nutriente, poluição ambiental e ineficiência de seu uso (SHANAHAN et al., 2008).

Os sensores ópticos que medem a reflectância das culturas podem ser uma ferramenta com grande potencial para otimizar o manejo do N, como demonstrado em culturas como milho e trigo (POVH et al., 2008). O N é um dos elementos de maior demanda, e potencial de reposição na cultura do milho e representam grande importância no seu estado nutricional, pois é o nutriente mais requerido pelas plantas (BENDER et al., 2013; CIAMPITTI et al., 2011). Ele está diretamente relacionado com o teor de clorofila das folhas, sendo dependente da variedade e do ambiente de produção (LOPES et al., 2012). Assim, o verde das folhas, que está fortemente correlacionado ao teor de clorofila foliar, mantém por consequência, essa correspondência com o status do N na planta (FOX; WALTHALL, 2008; HUNT et al., 2013).

Recomendações de N na região Sul do Brasil são baseadas no conteúdo de matéria orgânica no solo, na cultura antecessora e na expectativa de produtividade, que resulta em uma taxa de N a ser aplicada de forma uniforme no talhão (AMADO et al., 2002; CQFS RS/SC, 2013). No contexto da Agricultura de Precisão (AP), a identificação da variabilidade espacial e temporal, dentro de um determinado local, possui potencial para apoiar os conceitos de gestão de culturas, e atende grande parte das crescentes pressões ambientais, econômicas e de mercado nas terras agricultáveis (STAFFORD, 2000).

Existem diversas maneiras de se estimar o estado nutricional das culturas, que incluem métodos destrutivos e outros que preservam as plantas. A respeito dos primeiros, apesar de serem considerados mais precisos, apresentam o inconveniente de serem mais onerosos e

demorados de serem empregados, principalmente em grandes áreas (PANNETON; BROUILLARD, 2009). Neste sentido, assumem importância métodos que envolvam tecnologias capazes de manter a população de plantas, e que possibilite quantificar a biomassa da parte aérea, por Sensoriamento Remoto através de sistemas embarcados em aeronaves ou satélites, sendo uma fonte potencialmente importante de dados (SHANAHAN, 2001).

Também podem ser utilizados sensores remotos proximais. Todos os sensores determinam índices de vegetação (IVs) das culturas, e dentre estes, o mais empregado é o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), determinado por sensores como Greenseeker, Optrx e Crop Circle. Os primeiros trabalhos neste sentido foram preconizados com a utilização de clorofilômetros, sendo sua utilização possível devido à estreita relação entre a concentração de N foliar e o verde da folha. No entanto, fatores que envolvem o estágio de crescimento da cultura, as diferenças ocorrentes nas variedades híbridas, as janelas de aplicação dos fertilizantes nitrogenados e a fonte de N, normalmente limitam a viabilidade do uso desta ferramenta (SCHEPERS, 2008).

Assim, no contexto da AP, novos sensores de contato e proximais vêm sendo desenvolvidos e empregados, com o objetivo de analisar a variabilidade espacial das características do solo, bem como, das culturas nos talhões. Os recentes avanços tecnológicos em Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (SARP) e a miniaturização de sensores repercutem-se na atual explosão de sua aplicação na AP. Com base no SARP, dados de Sensoriamento Remoto de alta resolução espaço-temporal podem ser adquiridos para o monitoramento de culturas *in situ*, a baixos custos e de maneira mais prática (ZHANG; KOVACS, 2012; VERGER et al., 2014).

Neste cenário, os denominados sensores “proximais” têm se destacado, graças as vantagens da sua utilização, por não tocar o objeto medido, em razão da sua natureza óptica. Com isso, são capazes de processar a radiação visível ou infravermelha natural ou emitida pelo próprio instrumento, a partir da sua interação com o objeto alvo. Seu princípio básico de funcionamento é o mesmo aplicado aos sensores embarcados nas plataformas aéreas ou orbitais de Sensoriamento Remoto, fornecendo dados para a AP (FOX; WALTHALL, 2008).

Os IVs obtidos por esses sensores consistem em valiosas ferramentas de detecção das condições da cultura, sendo calculados a partir da combinação da refletância nos comprimentos de onda localizados na faixa do visível e do infravermelho próximo. Apesar disto, muitos pesquisadores se restringem à utilização de informações obtidas dentro do espectro do visível, para monitoramento da cultura.

Dentre os IVs dentro do espectro multi-espectral, mais comumente utilizado, destaca-se o (NDVI), desenvolvido para identificar áreas cobertas por vegetação natural (ROUSE et al., 1974), sendo capaz de caracterizar a copa das plantas. Dentre suas vantagens, verifica-se a possibilidade de estimativas de rendimento antes da colheita, podendo desempenhar papel fundamental na tomada de decisões que envolvem estado nutricional das plantas, uso de pesticidas e água, e planejamento de ações futuras relacionadas à mão-de-obra, custos, colheita, secagem e armazenamento (MOURTZINIS, 2013). O NDVI pode ser estimado pela equação 1 conforme proposto por Rouse et al. (1974):

$$NDVI = \frac{R_{760} - R_{670}}{R_{760} + R_{670}} \quad (1)$$

Para estádios fenológicos iniciais de algumas culturas, este índice apresenta problemas de detecção, pois o solo exposto reflete nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo quase na mesma intensidade, resultando em valores próximos de zero (JENSEN, 2011).

Outro índice multi-espectral largamente utilizado na AP é o índice de vegetação normalizado da borda do vermelho (NDRE) (BARNES et al., 2000), que é bastante utilizado para plantas de maior porte, e que tem um dossel mais estruturado, ou seja, em estágio de desenvolvimento mais próximos da maturidade fisiológica. Nessa condição, as plantas encontram-se com uma relação de albedo alta, pois, em estados de maturação mais avançados, as folhas acumulam níveis altos de clorofila.

A clorofila tem absorção máxima na faixa de onda vermelha e, portanto, a radiação vermelha não penetra muito além de algumas camadas de folhas. Por outro lado, a radiação na borda vermelha, pode penetrar na camada de folhas de forma muito mais profunda, em relação à luz azul ou vermelha. Assim, uma faixa de onda de borda vermelha pura será mais sensível a níveis médios a altos de clorofila e biomassa, portanto, detectando com maior sensibilidade o N foliar, do que uma faixa de onda ampla, que engloba luz azul, luz vermelha ou uma mistura de luz visível e infravermelho próximo (STEFFEN, 2019).

O conteúdo de clorofila de uma cultura é uma variável biofísica que expressa quantitativamente a capacidade fotossintética de uma determinada cultura e está relacionada com os parâmetros biofísicos do dossel, tais como: teor de N, índice de área foliar (IAF), entre outros (GITELSON et al., 2005). Desta forma, o NDRE possui maiores valores de índices nas culturas permanentes, ou em estágios posteriores de desenvolvimento, devido a sua capacidade

de penetração no dossel. Ele é dado pela seguinte equação (Equação 2) de acordo com (Eitel et al. 2010):

$$NDRE = \frac{R_{760} - R_{730}}{R_{760} + R_{730}} \quad (2)$$

Já o IV da diferença de verde normalizada (GNDVI) surge como um índice que substitui a banda do vermelho pelo verde e associado ao infravermelho, pode melhorar a visualização de sanidades do dossel e da quantidade de clorofila contida nas folhas (GITELSON et al., 2004).

Apesar das tecnologias disponíveis, a determinação da estimativa do potencial produtivo durante a safra agrícola, com uso dessas ferramentas ainda requer bastante atenção, visto que os desenvolvimentos de algoritmos adaptados para as particularidades das culturas são restritos. A determinação de sítios específicos e da taxa variável de semeadura são imprescindíveis ao desenvolvimento de algoritmos que possam reconhecer a variabilidade do potencial produtivo em uma determinada área relacionado com a cultura antecessora (HORBE et al., 2013).

Os sistemas de aeronaves não tripuladas, também chamados de drones, fornecem uma plataforma de sensoriamento remoto com as características de aquisição de dados que os administradores de fazendas exigem há muito tempo: tamanhos pequenos de pixels, cobertura sob demanda e entrega rápida de informação (ZHANG e KOVACS, 2012).

Atualmente, com a difusão dos “Drones” surgem novas oportunidades de forjar uma ferramenta tecnológica, que consiste no uso do sistema de aeronave remotamente pilotada (SARP) para imageamento de pequenas áreas, com alta taxa de revisita e altíssima resolução espacial (EISENBEISS, 2004; NEBIKER et al., 2008). Porém ainda são necessários estudos que abordem a segurança para a integração dessa categoria ao espaço aéreo, apesar dos progressos já atingidos no uso desses equipamentos (LUCIEER et al., 2012).

O Brasil não foi pioneiro na América na regulamentação dos SARP. O Chile criou seu marco regulatório em 2015 pela DN 151 no mesmo ano a Argentina publicou no *Boletín oficial, Primera Sección a resolución 527* normatizando o seu uso. A burocracia e a falta de comunicação dos distintos órgãos regulamentadores atrasaram sua utilização e prejudicou vários setores, entre eles a agricultura. Atualmente, três órgãos são necessários para avaliar, homologar e regulamentar o uso do SARP, sendo a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), que autoriza os links de transmissão dos receptores e o enlace da estação base com a aeronave. O Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), que regulamentou o acesso ao espaço aéreo para SARP, tendo isso ocorrido recentemente, no dia 9 de novembro de

2015, através da portaria nº 415/DGCEA, emitindo a Instrução do Comando da Aeronáutica a ICA100/40. Finalmente, após a pressão da comunidade de usuários e órgãos Públicos, a Agência Nacional de aviação Civil (ANAC), emitiu em 3 de maio de 2017, o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil especial, a RBAC-E nº 94, que trata dos requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil.

Diante do exposto, o presente estudo avaliou a correlação entre IVs distintos, obtidos em diferentes estádios fenológicos no milho, e a produtividade desta cultura, utilizando SARP.

2 HIPÓTESES

- Os sensores embarcados possuem maior poder de detecção da variabilidade espacial dos distintos estádios fenológicos da cultura do milho quando comparados com sensores terrestres;

- A utilização de sensores embarcados em SARP são viáveis para a avaliação dos diferentes índices de vegetação;

- É possível prever a produtividade da cultura do milho através da utilização dos IVs, NDVI, NDRE, GNDVI e EVI2;

- Dentre os índices avaliados todos possuem comportamentos iguais na detecção do estado nutricional da cultura do milho ou são diferenciados;

- Os Ivs provenientes de sensores em embarcados em SARP ou em proximais possuem a mesmo comportamento quando comparados a cultura normal ou sob estresse hídrico.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar a variabilidade espacial do NDVI, NDRE, GNDVI e do EVI2 e sua estimativa de produtividade, utilizando sensores proximais e embarcados em sistemas de aeronave remotamente pilotada para a cultura do milho.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

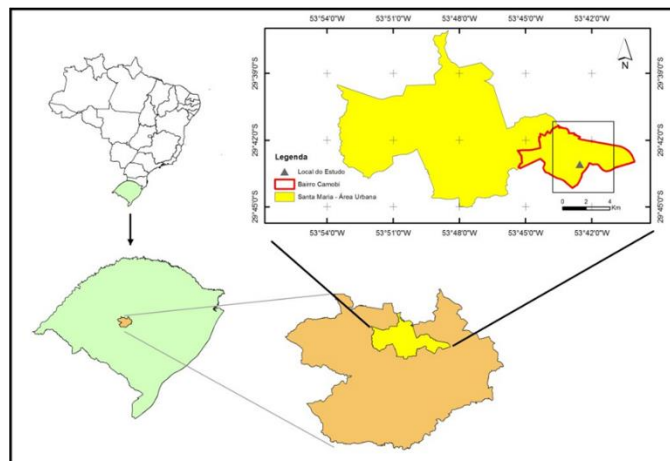
- Avaliar os índices de vegetação e sua correlação com a estimativa da produtividade na cultura do milho;
- Avaliar o comportamento dos sensores proximais e embarcados nos estádios fenológicos V5, V6, V7, V9, V11 e V12 em relação aos índices de vegetação.
- Avaliar o uso de sensores embarcados em SARP para estimar a variabilidade espacial dos IV.

4 MATERIAL E MÉTODOS GERAL

4.1 DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

O experimento foi implantado no ano agrícola de 2017/2018, em área experimental do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (Figura 1), pertencente à região fisiográfica da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, na latitude 29° 43' 10" S e longitude 53° 44' 16" O e 112 m de altitude. De acordo com a classificação climática de Köppen (1948) e Köppen et al. (1953), o clima que ocorre nesta região é o “Cfa”, com temperaturas médias anuais de 19,3 °C e precipitação média anual de mais de 1700 mm (MORENO, 1961).

Figura 1 – Localização da área experimental.



Fonte: o autor.

O local de condução do experimento possui solo classificado como Argissolo Vermelho Eutrófico arênico, pertencente à Unidade de Mapeamento São Pedro (BRASIL, 1973; STRECK et al., 2008). A litologia da área é constituída por rochas sedimentares, da formação geológica Formação Santa Maria, que data do Triássico superior. Seu material de origem é composto por siltito argiloso (Membro Alemoa) da Formação Santa Maria, ocorrendo em relevo suave ondulado. Na área, foram implantados cinco blocos de 20m x 20m, totalizando 400 m² cada bloco, dividido em 5 tratamentos que mediam 4m x 4m, com 5 repetições cada um, perfazendo 2.000,00 m² e subdivididos em repetições de 2m x 2m por parcela, totalizando 200 repetições

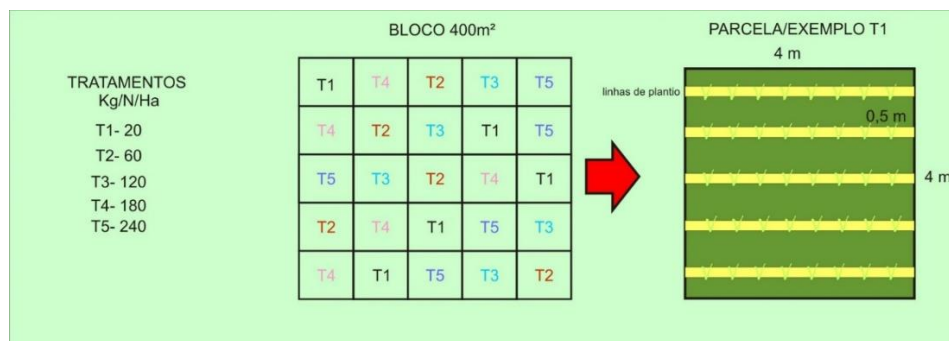
(Figura 2). O objetivo destas divisões menores foi proporcionar e gerar um mapa de colheita com maior precisão

4.2 IMPLANTAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

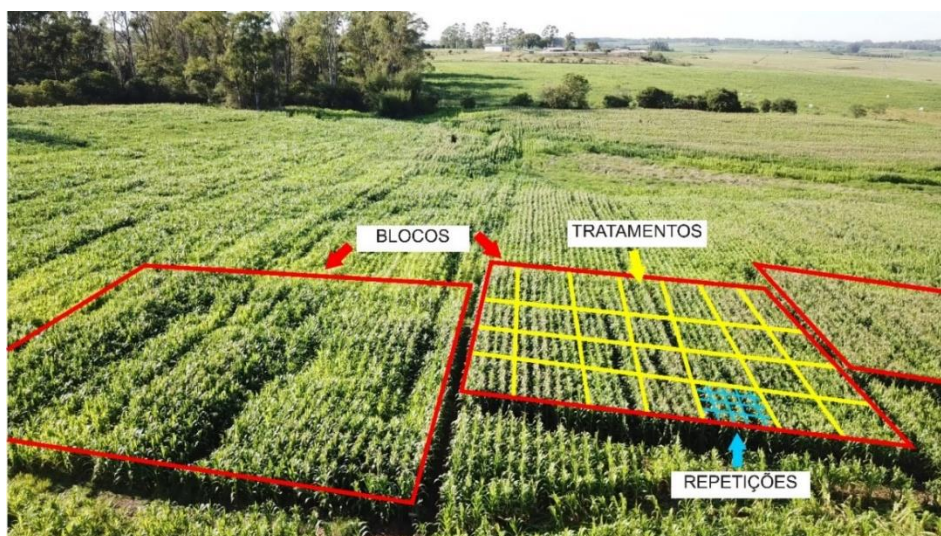
Os tratamentos dispostos nas unidades experimentais diferenciaram-se entre si nas dosagens de N amoniacal (uréia), para geração de variabilidade espacial (Figura 2), em que se utilizou: i) T1: 20 kg de N/há⁻¹; T2: 60 kg de N/ há⁻¹; T3: 120 kg de N/ há⁻¹; T4: 180 kg de N/ há⁻¹; T5: 240 kg de N/ há⁻¹ (Figura 2), todos aplicados na base em uma única dose.

Figura 2 – Tratamentos para geração de variabilidade espacial, exemplo de disposição dos tratamentos em um dos blocos (A) e ilustração do tamanho da parcela e distância entre linhas de semeadura (B).

(A)



(B)



Fonte: o autor.

A adubação constou de uréia (45% N), pesada em balança digital aferida pelo INMETRO, disposta em sacos plásticos individuais identificados (Figura 3), e posteriormente lançada nas parcelas.

Figura 3 – a) Pesagem e b) disposição das diferentes doses de N (tratamentos) antes da aplicação.



Fonte: o autor.

O milho foi semeado no dia 24 de outubro de 2017, empregando-se a variedade Pioneer 30F53 YH, com 0,5 metros entre filas e 4 sementes por metro linear, totalizando 80.000 plantas por há após o raleio que foi realizado no estádio V2, e a dosagem de NPK 05-30-15/ há⁻¹ aplicada na adubação de base, em toda área. As dosagens de uréia referentes aos tratamentos foram lançadas a mão em cada parcela no dia 02 de novembro onde a cultura estava em estágio fenológico V1, 2 horas antes da chuva, a qual totalizou 17,4 mm (dados da estação do INMET Santa Maria). No dia seguinte, ocorreu outro evento chuvoso promovendo mais 20,4 mm, contribuindo para solubilização total da uréia aplicada. Os demais tratamentos culturais seguiram as recomendações técnicas conforme a região.

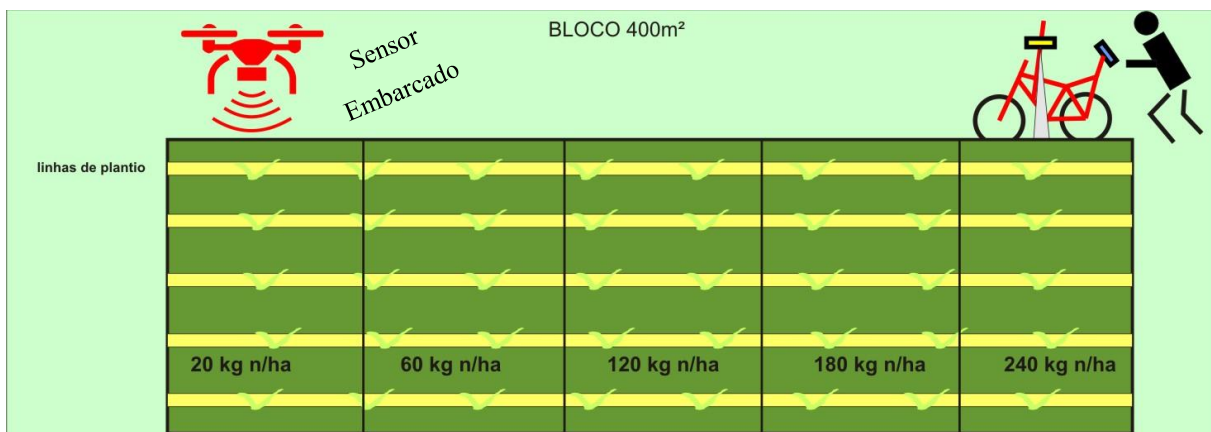
4.3 PLATAFORMA E SENSORES EMBARCADOS

Um Sistema de Aeronave Remotamente Pilotado (figura 4) caracterizado por uma aeronave da fabricante DJI, Shenzhen, China, modelo Phantom 4, certidão de cadastro de aeronave não tripulada na ANAC sob nº: PP-235155856, foi utilizado para as missões de levantamento aéreo nos estádios fenológicos V5, V6, V7, V9, V11 e V12. No estádio V8 houve um problema onde os arquivos da câmara ficaram corrompidos e em V10 não foi possível realizar a missão de voo, devido a ocorrência de condições meteorológicas adversas.

O sensor embarcado constou de uma câmara MicaSense Parrot Sequoia adaptada ao SARP, capaz de registrar a irradiância no comprimento de onda da região do verde ($550 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$), vermelho ($660 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$), borda do vermelho ($735 \pm 5 \text{ nm}$) e infravermelho próximo ($790 \pm 5 \text{ nm}$), com resolução de 1,2 Mp e resolução RGB de 16 Mp, equipada com “Sunshine sensor”. As leituras com o sensor proximal (Figura 4) foram realizadas com Optrx ACS 430 (Ag Leader), sensor que utiliza as bandas espectrais do vermelho ($630 \pm 5 \text{ nm}$), infravermelho próximo ($770 \pm 5 \text{ nm}$) e na região da borda do vermelho ($730 \pm 5 \text{ nm}$).

Para apoiar os trabalhos de campo, georreferenciar e gerar os ortomosaicos, foram materializados pontos de controle a campo (PCC), e ocupados com um receptor marca Topcon, modelo Hiper. No pós-processamento todos os 20 pontos obtiveram solução fixa com precisão melhor que 1 cm, ajustadas pela Rede de Referência Cadastral Brasileira situada dentro da Universidade Federal de Santa Maria – RS

Figura 4 – Esquema ilustrativo das doses de N dos tratamentos e dos sensores proximais e embarcado (SARP).



Fonte: o autor

4.4 PROCESSAMENTO DE DADOS E PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

As missões de voo foram compiladas no programa Dronedeploy, promovendo um voo automático sobre a área em estudo, a 15 metros acima do dossel da cultura, com duração de cerca de 8 minutos cada. Essas missões ocorreram sempre no horário das 15:00 h GMT, quando o sol estava no seu zênite, utilizando 80 % de sobreposição tanto na lateral quanto longitudinal.

Não foi necessária autorização de voo no portal de Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS), pois não houve acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro. A

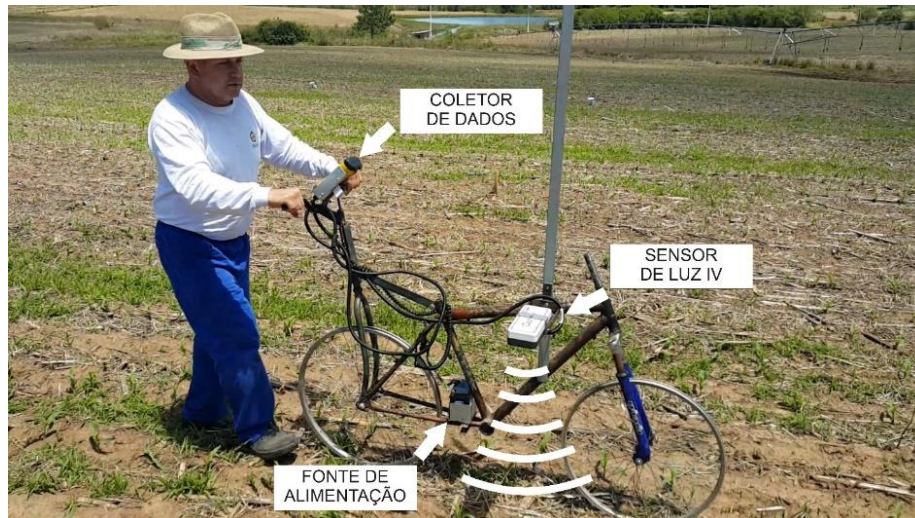
aeronave está classificada como classe 3, peso de decolagem menor ou igual a 25 kg, o voo da aeronave foi realizado em operação em linha de visada visual (VLOS) e foi realizada conforme o disposto na ICA 100/40 item 10.3.2 – Operações de Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS) em áreas confinadas.

O pixel gerado foi de 3,7 cm/ px⁻¹ no monocromático e 0,8 cm/ px⁻¹ no modo RGB. A câmera foi operada no modo automático, onde as bandas foram geradas separadamente. Em cada missão, obteve-se 177 imagens por banda adquirida, totalizando um conjunto de 885 imagens, sendo as mesmas descarregadas diretamente em computador através de cabo USB. As imagens foram geradas na extensão TIF.

O programa empregado para tratar e extrair as informações das imagens foi o PIX4D Mapper Pro-Educational versão 3.3.29. O sensor proximal utilizado foi o Optrix da AGLeader, e as leituras com o sensor proximal foram feitas de acordo com as especificações do manual do fabricante, a uma altura de 0,6 m do dossel vegetal, instalado sobre um equipamento posicionado paralelamente as linhas da cultura, onde foram lidas informações de todas as plantas de milho das parcelas. Para manter esta altura regular e sem oscilações, foi adaptada uma bicicleta (Figura 5) que carregava o dataloger, a bateria e o sensor de leitura localizado em um braço retrátil. À medida que a cultura se desenvolveu, o leitor foi deslocado no braço a maiores alturas, mantendo o padrão estabelecido pelo fabricante a 0,6 m em relação ao dossel da cultura.

Para descarga dos dados, o dataloger transformava os mesmos em formato de arquivo shapefile internamente após a coleta os arquivos, procedendo-se descarga no computador por cabo USB, para percorrer todas as linhas do experimento com o equipamento. O tempo de duração de cada leitura foi de aproximadamente 2 horas.

Figura 5 – Adaptação para deslocamento constante do sensor proximal.



Fonte: o autor

4.5 OBTENÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

O “Sunshine sensor” utilizado na câmara Sequoia, é um sensor de irradiância / luz. Ele foi utilizado com vistas a melhorar a qualidade radiométrica dos dados. Um sensor de luz mede a irradiância, que é altamente dependente da orientação do sensor em relação ao sol enquanto ele voa. Por exemplo, um sensor de luz apontado diretamente para o sol medirá um valor diferente do que um apontado diretamente para o topo do céu. É por isso que é importante ter um magnetômetro calibrado corretamente, que pode fornecer informações de rumo e orientação para ajudar o software de processamento especializado (Pix4DMapper) a tomar decisões melhores.

Após as missões de voo, as imagens foram descarregadas em computador e processadas no programa PIX4D, tomando o devido cuidado de utilizar os pontos de controle de campo, com vistas a otimizar a qualidade do produto cartográfico. Após realizados os processamentos iniciais, foi gerado o ortomosaico, e no menu calculadora de índices, foram obtidos os seguintes índices: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação da Borda do Vermelho (NDRE), Índice de Vegetação Normalizada do verde (GNDVI), Índice de Vegetação Realçado 2 (EVI2).

Após finalização dos processamentos, o resultado de cada estágio de desenvolvimento foi exportado no formato *raster* (linhas e colunas), onde os resultados dos índices analisados tiveram os valores extraídos pixel a pixel. Por sua vez, cada arquivo no formato *raster* foi

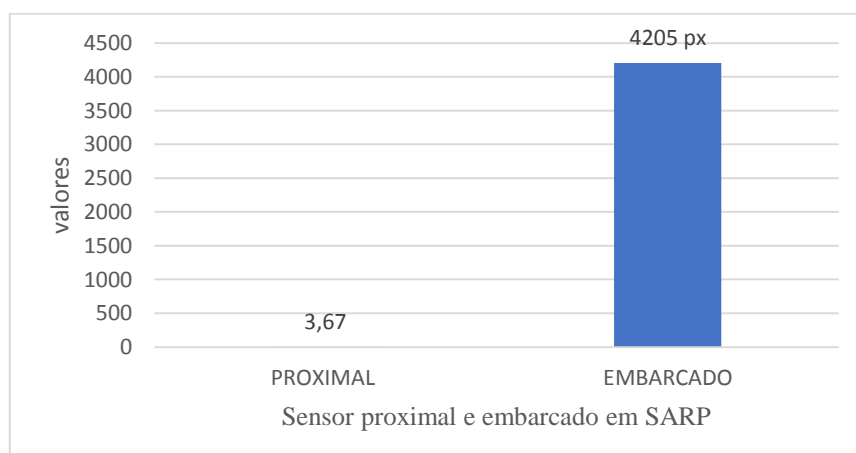
convertido para o formato vetorial *shapefile*, onde posteriormente, foram realizados o recorte para área de interesse e a categorização por parcelas, tratamentos e repetições.

Por fim, foram calculados os valores de média para cada parcela, tratamento e repetição e tabulados conforme tais segmentações. Estes processos foram executados na suíte de aplicativos ArcGIS Desktop, versão 10.1, aplicativo ArcMap, utilizando algumas ferramentas de conversão de dados disponíveis no ArcToolbox (*Analysis Tools, Data Management Tools e Spatial Analyst Tools*), que permitiram obter os valores dos índices de vegetação de cada parcela, para cada estágio de desenvolvimento.

Os valores obtidos foram dispostos em planilha do Excel (MICROSOFT OFFICE, 2013), para melhor organizar e manusear os dados. Os dados dos valores dos índices de vegetação, que foram extraídos como descrito anteriormente pelo aplicativo Arc Gis, gerou para cada parcela de 2 m² valores médios que foram obtidos do sensor OPTRX e das imagens. Estes valores foram de um montante de 3,67 informações advindas do sensor proximal e de 4205,2 px do sensor embarcado (Figura 6).

Estes valores constituíram a planilha do Excel que foi utilizada para a análise e tabulação dos dados, esta tabela finalizou com 3368 linhas. O número de informações geradas foram de 4205,2 mais 3,67 iguais a 4208,87 informações a cada parcela de 2 m², totalizando 800 parcelas teremos 3.367.096,00 de informações, multiplicando o número de índices que são seis, teremos 20.202.576,00 e para finalizar multiplicamos pelos seis estádios fenológicos totalizando 121.215.456,00 de informações, este foi o banco de dados gerador das informações.

Figura 6 – Média de observações dos sensores proximal e embarcado para cada repetição de 2m².



Previamente, foi realizado um teste de normalidade para cada bloco e cada estágio fenológico, finalizado o teste mostrou que as distribuições dos dados foram não normais. Detectada a não normalidade, foi realizada a normalização dos dados pela ferramenta BOX COX.

A transformação de Box-Cox recebeu o nome dos estatísticos que a formularam, George E. P. Box y David Cox, em artigo de 1964 (“An Analysis of Transformations”), é bastante conhecida no meio econométrico e usada para enfrentar problemas de heterocedasticidade (quando o modelo de hipótese matemático apresenta variâncias para Y e X ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) não iguais para todas as observações) e/ou falta de normalidade. Com os dados normalizados e apresentando homocedasticidade, passou a realizar a análises estatísticas como: ANOVA e teste de Tukey para a organização dos dados.

4.6 COLETAS A CAMPO

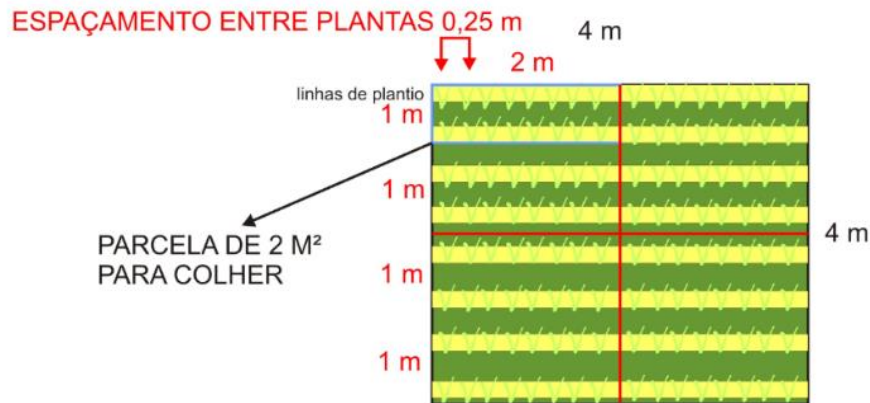
Os estádios fenológicos do milho variaram de 5 a 7 dias para sua mudança, onde as leituras iniciaram em V5, aos 20 dias após a emergência (DAE), V6 aos 25 DAE, V7 aos 32 DAE, V9 aos 44 DAE, V11 aos 59 DAE e V12 aos 66 DAE, posterior a esta etapa a cultura entrou em processo de pendoamento.

A definição dos trabalhos de campo foi embasada em uma subdivisão das parcelas principais 16 m² em parcelas menores, com 2m² (figura 7), perfazendo assim, 200 repetições por bloco, totalizando 800 repetições. Todo o processo de colheita e beneficiamento foi realizado manualmente, com espigas colhidas manualmente, condicionadas em sacos plásticos e rotuladas de acordo com o bloco, tratamento e parcela, numerados de 1 a 40 (figura 8). Esta etapa do trabalho durou 45 dias.

Após a colheita, foi realizada a debulha mecanizada, realizada por um debulhador modelo Triton TR 791 acoplado a um trator. Antecedendo a debulha de cada bloco/tratamento, sempre foi realizada a leitura da umidade dos grãos com o equipamento denominado agrologic AL-101 possui balança incorporada e possui software para gravar os resultados de medição e opção de inclusão de mais de 60 grãos no aparelho.

Os tratamentos foram debulhados individualmente, com a totalidade dos grãos recolhidos, pesados em balança de precisão aferida pelo INMETRO. Os dados obtidos foram organizados em planilha do Excel e posterior correção para 13 % de umidade. Esta etapa do trabalho durou 60 dias.

Figura 7 – Espaçamento das linhas de plantio e tamanho de parcela.

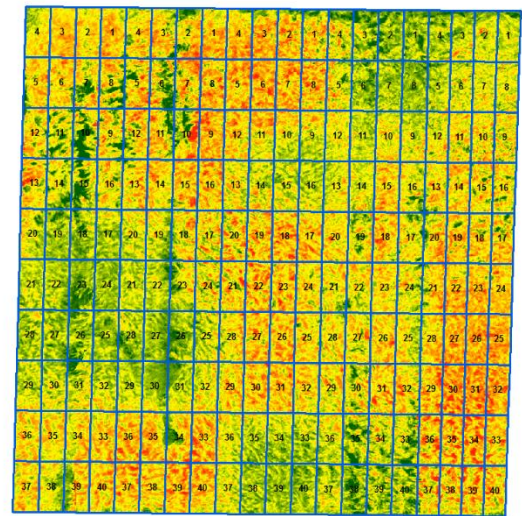


Fonte: autor.

Figura 8 – Localização das parcelas e tratamentos.

BLOCO 2

R40	R39	R38	R37	R40	R39	R38	R37	R40	R39	R38	R37	R40	R39	R38	R37
	T5		T3		T2		T4		T1						
R33	R34	R35	R36	R33	R34	R35	R36	R33	R34	R35	R36	R33	R34	R35	R36
R32	R31	R30	R29	R32	R31	R30	R29	R32	R31	R30	R29	R32	R31	R30	R29
	T3		T1		T4		T5		T2						
R25	R26	R27	R28	R25	R26	R27	R28	R25	R26	R27	R28	R25	R26	R27	R28
R24	R23	R22	R21	R24	R23	R22	R21	R24	R23	R22	R21	R24	R23	R22	R21
	T5		T3		T2		T1		T4						
R17	R18	R19	R20	R17	R18	R19	R20	R17	R18	R19	R20	R17	R18	R19	R20
R16	R15	R14	R13	R16	R15	R14	R13	R16	R15	R14	R13	R16	R15	R14	R13
	T2		T5		T3		T4		T1						
R9	R10	R11	R12	R9	R10	R11	R12	R9	R10	R11	R12	R9	R10	R11	R12
R8	R7	R6	R5	R8	R7	R6	R5	R8	R7	R6	R5	R8	R7	R6	R5
	T4		T1		T2		T3		T5						
R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4



4.7 DETERMINAÇÃO DO PERCENTUAL DE NITROGÊNIO NAS PLANTAS

A determinação do N total nas plantas foi pelo método de Kjeldahl, onde nos estádios V7, V11 e V12, foi coletada uma planta por parcela, seca em estufa por 7 dias, trituradas e determinadas o seu teor de N. Os resíduos vegetais foram secos em estufa a 65°C até peso constante para determinar a produção de matéria seca. O teor de N foi determinado por digestão

0,2 gramas de tecido vegetal com H_2SO_4 e mistura de digestão (Na_2SO_4 , $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ e selênio) e determinado em destilador de arraste de vapor semi-micro Kjeldahl (TEDESCO et al., 1995).

O cálculo do N absorvido foi realizado baseado na marcha de absorção de N, para cada tonelada de grãos produzida, o milho absorveu, em média 29,9 kg, este valor multiplicado pela produtividade de cada repetição proporcionou o valor absorvido, os cálculos são baseados na metodologia proposta por (SILVA et al., 2015).

4.8 DÉFICIT HÍDRICO INCIDENTE DURANTE O CICLO DA CULTURA DO MILHO

No 21 de dezembro de 2017, às 14h28min, o Sol atingiu o seu ponto mais distante do equador celeste no Hemisfério Sul Celeste, marcando o início do verão no Hemisfério Sul e o início do inverno no Hemisfério Norte. Isso está relacionado à forma como os raios solares atingem a superfície da Terra e a causa é a inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao seu plano de órbita (Observatório Nacional).

Agora, durante o verão os raios solares vão atingir mais diretamente o hemisfério sul e assim os dias serão maiores do que as noites, e a quantidade de energia solar que chega na superfície do solo é maior neste período o que promove maior aquecimento. O Sensoriamento no estágio fenológico V11 foi realizado no dia 28 de dezembro iniciando as 9:00 h da manhã e terminando perto das 13:00 h. Segue o relato histórico das condições meteorológicas obtidas pela estação climatológicas da UFSM do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) anteriores até o dia da leitura, dia 28 de dezembro, para melhor entender o fenômeno ocorrido.

O Milho foi semeado dia 24 de outubro, emergência dia 30 de outubro. No mês de outubro após a emergência não ocorreram chuvas e a radiação acumulada foi de 56.029,75 Kj/m^2 . No mês de novembro a primeira chuva ocorreu dia 03 e dia 04 com os seguintes acumulados respectivamente, 17,4 mm e 20,4 mm e no mês acumulou 73,6 mm.

As últimas chuvas antes das leituras ocorreram dia 24 de dezembro, porém até o dia 28, dia da leitura em V11, foram observadas temperaturas elevadas no dia 25 temperatura média de 20,9 C° e máxima de 26,9 C° , dia 26 a temperatura média de 23,07 C° e máxima de 31,6 C° , dia 27 a temperatura média de 26,72 C° e máxima de 33,5 C° , e no dia 28 temperatura média de 26,01 C° e máxima de 30,5 C° . Com estas temperaturas elevadas, precipitação deficitária aliado aos ventos que foi de 7,6 km/h de média por dia, verificamos um estresse hídrico sobre a cultura em estudo.

4.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Testou-se a normalidade dos dados usando o teste de normalidade de Shapiro Wilk, os dados que não apresentaram normalidade foram submetidos a rotina Boxcox nos parâmetros avaliados. Detectou-se que a maioria dos dados foram não normais, mas devido a abundância dos dados, mais de 120.000.000,00 informações (big data), foi realizada a Análise de Correlação e equação da reta, onde foi testada a normalidade do resíduo da análise de variância que se demonstrou normal e o R^2 nos parâmetros avaliados cujos gráficos estão inseridos.

5 ARTIGO 1 – ÍNDICES DE VEGETAÇÃO OBTIDOS POR SENSORES DE IRRADIÂNCIA DO DOSSEL EMBARCADOS EM PLATAFORMA TERRESTRE E AÉREA E INFLUENCIADOS PELO ESTADO NUTRICIONAL DE NITROGÊNIO DO MILHO

Artigo submetido a Revista Engenharia na Agricultura - Reveng.

Luiz Felipe Diaz de Carvalho¹, Telmo Jorge Carneiro Amado², José Cardoso Sobrinho³, Lúcio de Paula Amaral⁴, Luan Pierre Pott⁵, Marcieli Piccin⁶, Vinícius Freitas Pedron⁷

¹Mestre em Geomática, Discente no Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo na UFSM, felipe@politecnico.ufsm.br

²Engenheiro Agrônomo, Bolsista do CNPq, Professor Titular, UFSM, proftelmoamado@gmail.com

³Engenheiro Agrícola, Professor associado da UFSM, jcardosos@smail.ufsm.br

⁴Engenheiro Florestal, Professor Adjunto do Departamento Engenharia Rural UFSM, amaralufsm@gmail.com

⁵Engenheiro Agrônomo, Discente no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola na UFSM, luanpierrepott@hotmail.com

⁶Engenheiro Agrônoma, Discente no Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo na UFSM, marcielipiccin@gmail.com

⁷Engenheiro Agrônomo, pedron.vinicius@hotmail.com

5.1 RESUMO

Diferentes Índices de vegetação (IVs) têm sido utilizados como ferramenta para avaliar parâmetros biofísicos das plantas. Entre estes, destaca-se o sucesso do NDVI na avaliação do estado nutricional de nitrogênio (N) nas culturas do milho, trigo, cevada entre outras. O objetivo do estudo foi avaliar a relação entre IVs determinados por sensores ópticos, embarcados em duas diferentes plataformas, a proximal e o Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (SARP). As quantificações foram realizadas em distintos estádios fenológicos do milho, em cultivo submetido a diferentes estados nutricionais de N. Para tanto, na ocasião da semeadura do milho, foram aplicadas doses de N de 20, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹, dispostas em delineamento de blocos ao acaso, com cinco repetições cada tratamento. Os IVs investigados foram o NDRE e NDVI (em plataforma proximal), e NDRE, NDVI, EVI2 e GNDVI (em plataforma SARP), avaliados nos estádios fenológicos V5, V6, V7, V9, V11 e V12. Para uma população de 80.000,00 plantas avaliadas pelas plataformas, a resolução espacial obtida para a plataforma embarcada foi de 3,7 cm/px⁻¹ no monocromático e 0,8 cm/px⁻¹ no modo RGB. O estado nutricional do milho foi monitorado através da avaliação do teor de N na parte aérea da planta e do N absorvido na colheita. O sensor da plataforma SARP apresentou IVs melhores relacionados com o estado nutricional das plantas de milho em relação a plataforma proximal. À medida que os estádios fenológicos avançaram, observou-se de modo geral, melhores correlações dos IVs com o estado nutricional do milho. Ainda, nos estádios iniciais, o NDVI, e nos estádios mais avançados, o NDRE, se destacaram na detecção do estado nutricional do milho. Assim, no estádio V12, com o índice NDRE embarcado na plataforma SARP, registrou-se a melhor correlação (R² = 0,60). Os resultados obtidos suportam o uso do SARP embarcado com sensor óptico como uma ferramenta de avaliação do estado nutricional de N do milho.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Sensoriamento. Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada.

VEGETATION INDEX OF CANOPY DETERMINED IN DIFFERENT PHENOLOGICAL STAGES IN CULTURE OF CORN SUBMITTED TO DIFFERENT DOSES OF NITROGEN

5.2 ABSTRACT

Vegetation indices (VIs) have been proposed in the literature with the objective of exploring the spectral properties of the vegetation since; in general, they are related to biophysical parameters of the plants. The objective of this

study is to evaluate the relationship between VIs, obtained in two different boards (UAV and proximal) at different stages of maize with the nutritional state of nitrogen (N) of maize plants. There were 5 treatments with different doses of nitrogen, in order to generate nitrogen variability absorbed by the plant, being: 20, 60, 120, 180 and 240 kg ha⁻¹ of N in 5 blocks with 5 replicates each. NDRE and NDVI (proximal board, Optrx sensor) and NDRE, NDVI, EVI2 and GNDVI (UAV board, MicaSense Parrot Sequoia sensor) were performed at the phenological stages: V5, V6, V7, V9, V11 e V12. Plant collection was also performed to evaluate the N content in the plant. The percentage of N in the plant was higher in the phenological stage V7 and lower in stage V12. The VIs generated through the UAV board presented better relations with the nutritional state of the maize plants compared to the proximal sensor. The V12 stage of corn had higher values of VIs correlations and N content absorbed by the plant, especially the NDRE index with $R^2 = 0.60$ on the UAV board.

Keywords: Precision Agriculture. Sensing. Remotely Piloted Aircraft System.

5.3 INTRODUÇÃO

O aporte do nutriente Nitrogênio (N) é de grande importância para a produtividade do milho (*Zea mays L.*) (KAPPES et al., 2011; SCHWALBERT et al., 2018), uma vez que a demanda da cultura para atingir a produtividade em torno de 10 Mg ha⁻¹ e pode alcançar mais de 30 Mg ha⁻¹ (RESENDE et al., 2003), e o solo atende apenas uma pequena fração desta demanda (SOLARI et al., 2008). O N está diretamente relacionado com o teor de clorofila na folha na cultura do milho, de modo que, quanto maior for o teor de N na folha, maior será a síntese de clorofila, alcançando um platô máximo que é dependente da variedade, do ambiente e do manejo de produção (LOPES et al., 2012).

A recomendação de N para a região Sul do Brasil é atualmente baseada no conteúdo de matéria orgânica no solo (MOS), na cultura antecessora e na expectativa de produtividade de grãos (AMADO et al., 2002; CQFS-RS/SC, 2016). O manejo da adubação nitrogenada é realizado tradicionalmente à taxa fixa, ou seja, com uma dose uniforme em toda a área, sem levar em consideração a variabilidade espacial do N e da MOS (POLETTI, 2004), a disponibilidade dos demais nutrientes no solo (SHANAHAN et al., 2008), a disponibilidade hídrica e o clima (RESENDE et al., 2003). Desses fatores, resultam a elevada desigualdade do estado nutricional no N do milho no campo de produção, necessidade esta que justifica a oferta do suprimento de N de acordo com sua necessidade (taxa variável), (FIXEN, 2010).

Os sensores ópticos medem a reflectância das culturas (RAUN et al.; SCHEPPERS et al., 2008) e representam importante ferramenta, com potencial de captar a variabilidade espacial do estado nutricional do dossel de plantas (BRAGAGNOLO et al. 2013), e estimar o seu potencial produtivo (BREDEMEIER, 2013). Vários trabalhos têm sido empreendidos com o uso de sensores ópticos proximais, nas culturas do milho e do trigo (POVH et al., 2008). Dentre esses sensores, destacam-se os ativos de dossel, que viabilizam o manejo em sitio específico

(SHIRATSUCHI et al., 2014), e aplicação de N a taxa variável (RAUN et al., 2002; SHANAHAN et al., 2001).

Embora o sensoriamento proximal já tenha se mostrado genericamente eficiente, existem inconvenientes no que tange a mão de obra demandada, tempo consumido (caso a operação seja manual), e custos envolvidos (quando da embarcação em máquinas). Além disso, o Sensoriamento de todas ou da maior parte das plantas na lavoura, realizados em sistemas embarcados em máquinas agrícolas, pode requerer elevado número de sensores, também não realizam medições de diferentes parcelas simultaneamente e, por isso, são embarcados em sistemas como veículos/máquinas de fenotipagem (SINGH et al., 2016).

O uso de sensores ópticos embarcados ou adaptados em aeronaves (SARP) ou em satélites têm se revelado uma excelente alternativa de sensoriamento, ao proporcionar elevada resolução espacial, rápida execução e baixos custos (SHANAHAN, 2001). Assim, SARP têm possibilitado a obtenção de dados em Sensoriamento Remoto de alta resolução espaço-temporal, o que se reflete em vantagens econômicas e maior praticidade no monitoramento de culturas (ZHANG; KOVACS, 2012). O grande crescimento dos VANTs no sensoriamento remoto se deve principalmente à coleta de dados com alta precisão em curto espaço de tempo, atributos estes que os tornaram vantajosos em relação aos satélites orbitais (RANGO et al., 2009; SILVA et al., 2014).

As principais vantagens de um SARP, em imageamento de lavouras, em comparação aos aviões tradicionais tripulados, são a sua flexibilidade e versatilidade, que permitem a aquisição de imagens a partir de pontos de vista não convencional (IRSCHARA et al., 2010). Entretanto, esse sistema apresenta desvantagens referentes a limites de carga útil, peso e dimensões dos sensores. Disto, reflete-se a necessidade de assegurar o baixo peso dos sensores, tornando-se fator determinante a seleção de câmeras de pequeno e médio formato. Além disso, em comparação com as câmeras de grande formato utilizadas nos outros sistemas, os SARP devem possuir dispositivos capazes de adquirir maior número de imagens, a fim de obter a mesma cobertura e resolução (EISENBEISS, 2009). A exemplo do exposto, aplicações de Sensoriamento Remoto (imagens de satélite ou de aviões) na Agricultura e Silvicultura exigem imagens com alta resolução temporal, normalmente de onerosa obtenção, por meio de imagens de satélite ou por aeronaves convencionais (GRENZDÖRFFER, 2009), e que podem ser adquiridas com as vantagens já destacadas, através dos SARPs.

O uso de sensores ópticos embarcados em plataformas proximais ou remotas torna possível a obtenção de vários índices de vegetação (IVs) (BRAGAGNOLO et al., 2013), que consistem em valores digitais, que, entre outros, refletem o estado nutricional das plantas,

obtidos a partir de equações, combinando-se a reflectância nos comprimentos de onda localizados, geralmente na faixa do visível e do infravermelho próximo. Dentre estes, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é o mais empregado (ROUSE et al., 1973).

Alguns IVs apresentam problemas na detecção do estado nutricional de algumas culturas nos seus estádios fenológicos iniciais, o que se deve ao solo exposto refletir praticamente a mesma intensidade de comprimento de onda nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo, o que acontece, por exemplo, no caso do NDVI (JENSEN, 2011). Já nos estádios fenológicos tardios, esse índice apresenta elevada saturação, provocada pelo acúmulo de biomassa (ZANZARINI et al., 2013).

Neste cenário, o NDRE (*Normalized Difference Red Edge Index*) (BARNES et al., 2000) vêm sido utilizado com destacado sucesso (SHARMA et al., 2015). Excelentes resultados da aplicabilidade desse índice vêm sendo obtidos, em plantas de maior porte, que apresentam dossel mais estruturado, ou seja, em estágio próximo a maturidade fisiológica e com uma relação de albedo alta. Nessa condição, as folhas acumulam níveis de clorofila elevados, apresentam valores superiormente expressivos na correlação entre NDRE e o índice de área foliar (TAVAKOLI et al., 2014), assim como para correlação entre esse índice e a variável biofísica radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAI) (CATTANI, 2018).

O GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*) (GITELSON et al., 1996), foi proposto como um índice que substitui a banda do vermelho pelo verde. Associado ao infravermelho, pode melhorar a visualização de sanidades do dossel e da quantidade de clorofila contida nas folhas. O GNDVI é calculado similarmente ao NDVI e está relacionado com a proporção de radiação fotossinteticamente absorvida, sendo linearmente correlacionado com Índice de Área Foliar (LAI) e biomassa (HUNT et al., 2008). Deste modo, o GNDVI possui maior sensibilidade na detecção da variabilidade da clorofila foliar, com destacada pertinência, nas situações em que o índice de área foliar encontra-se moderadamente alto (GITELSON et al., 1996). Os índices baseados em verde, podem, em muitos casos, apresentar altas correlações com o rendimento de grãos de milho, e podem explicar cerca de 86% da variância observada (ISLA et al., 2011).

Outro índice que mais recentemente vêm sendo utilizado para estimar concentração de N nas folhas das culturas é o EVI2 (*Enhanced Vegetation Index*) (JIANG et al., 2008). Este índice foi idealizado para minimizar as influências do solo no monitoramento da cultura (JUSTICE et al., 1998). Apresenta ainda a vantagem de oportunizar substancial incremento na sensibilidade às alterações do dossel, quando comparado ao NDVI, principalmente em áreas de maior densidade de biomassa (HUETE et al., 2002).

Em cultivos de lavouras de milho, cada híbrido responde e requer quantidades diferentes de suprimento de N, de acordo com seu potencial produtivo (BELASQUE, 2000), sendo suas respostas diferenciadas, dependendo da época de aplicação (LARA CABEZAS et al., 2005; SILVA et al., 2006). A determinação da estimativa do potencial produtivo da cultura, no decorrer da safra agrícola, com base no estado nutricional das plantas, através da utilização de sensores ópticos possui grande potencial para o incremento da produtividade, mas ainda requer o desenvolvimento de algoritmos adaptados para as especificidades culturais e locais. Apesar da sua empregabilidade já ser usual em algumas situações, ainda se fazem necessários ajustes que atendam a essas demandas inerentes. Neste cenário, são escassas no Brasil e no Sul do Brasil, pesquisas que abordem as relações dos IVs, especialmente adquiridos por sensores embarcados em SARPs, com o estado nutricional das plantas, incluindo a cultura do milho.

Assim, a utilização de IVs, oriundos de levantamentos com plataforma capazes de realizar avaliações em tempo real, podem se tornar importantes ferramentas na determinação de doses de fertilizante nitrogenado mais condizentes com a real necessidade de N pelas plantas (VIAN et al., 2018). A exemplo disso, a boa eficiência entre as leituras de NDVI com a quantificação da necessidade de fertilizantes nitrogenados em milho, foi demonstrada por Schmidt et al. (2011).

Os usos de ferramentas de captura dos IVs permitem que se realize a identificação, em tempo real e *in situ*, do estado nutricional e do potencial produtivo em diferentes estádios vegetativos da cultura do milho e permite que a adubação nitrogenada possa ser ajustada e aplicada de acordo com o potencial produtivo estimado (LI et al., 2010; VIAN et al., 2018). Segundo Milani et al. (2006), a predição das condições de desenvolvimento das culturas em um determinado estágio fenológico viabiliza o manejo de sítio-específico em lavouras, como adubações em taxa variável. Neste sentido, sensores remotos para avaliação da reflectância e IVs surgem como importantes ferramentas para detectar a variabilidade espacial do potencial produtivo de maneira mais precisa.

Buscando atender algumas destas demandas, o presente estudo avaliou, para as condições da Região Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, a relação entre IVs, obtidos em duas diferentes plataformas (SARP e proximal), em distintos estádios fenológicos do milho, com diferentes estados nutricionais de nas plantas, induzidos pela aplicação de doses distintas de adubação nitrogenada.

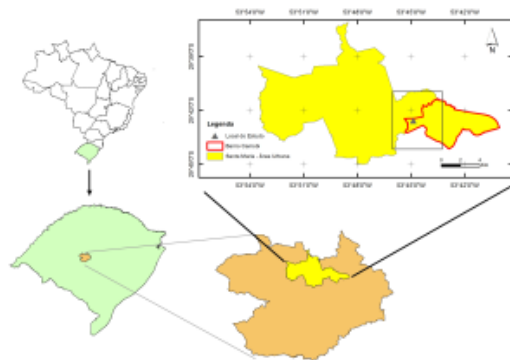
5.4 MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1 Caracterização do local de execução do experimento

O experimento foi implantado e conduzido na safra agrícola 2017/2018, na área experimental do Colégio Politécnico, localizada no campus da Universidade Federal de Santa Maria (Figura 1), na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, em latitude 29° 43' S, longitude 53° 44' O e 112 m de altitude. De acordo com a classificação climática de Alvarez et al. (2013), o clima da região é o “Cfa”, com temperaturas médias anuais de 19,3°C e precipitação média anual de mais de 1700 mm. O solo da área foi descrito e classificado como Argissolo Vermelho Eutrófico arênico (SANTOS et al., 2015), pertencente à Unidade de Mapeamento São Pedro (BRASIL, 1973; STRECK et al., 2008).

A litologia da área é constituída por rochas sedimentares, da formação geológica Formação Santa Maria, que data do Triássico superior. Seu material de origem é composto por siltito argiloso (Membro Alemoa) da Formação Santa Maria, ocorrendo em relevo suave ondulado. No local, foram coletadas amostras compostas de solo, a partir de subamostras representativas, na profundidade 0-10 cm, com vistas a realização das análises químicas básicas, para nortear a recomendação da adubação da lavoura de milho, e do enquadramento da classe textural do solo nesta faixa de cultivo.

Figura 1 – Localização da área experimental.

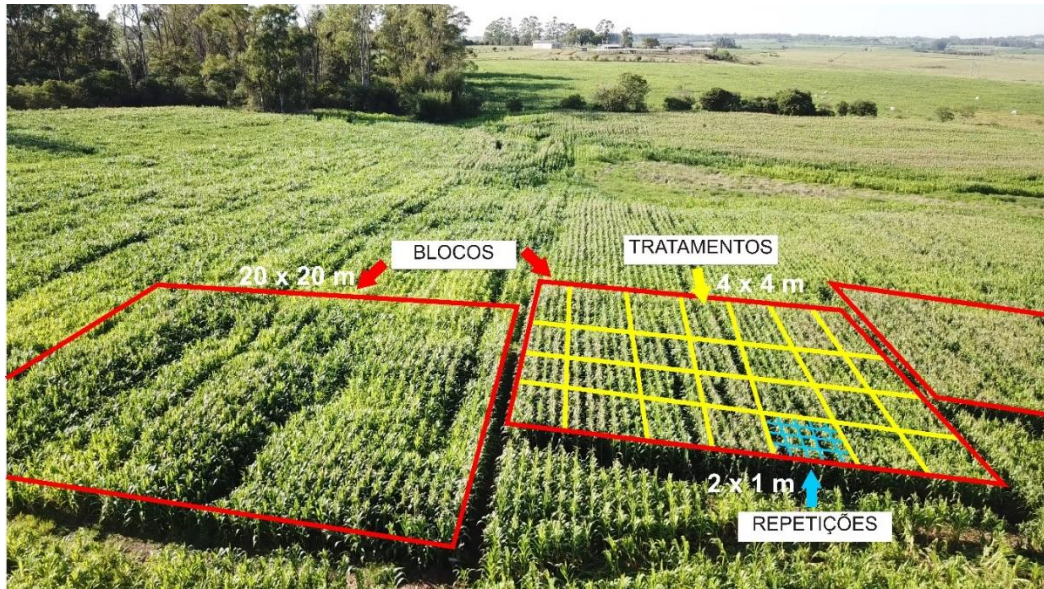


Fonte: o autor.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos inteiramente casualizados. Na área foram implantados sob pivô central, quatro blocos medindo 20 x 20m, cada qual, totalizando 400 m² individualmente. Em cada bloco, foram distribuídos cinco tratamentos que

constituíram as parcelas individuais, nas medidas de 4 x 4m, com cinco repetições cada, perfazendo uma área experimental de 1.600 m² (Figura 2).

Figura 2 – Esquema experimental utilizado.



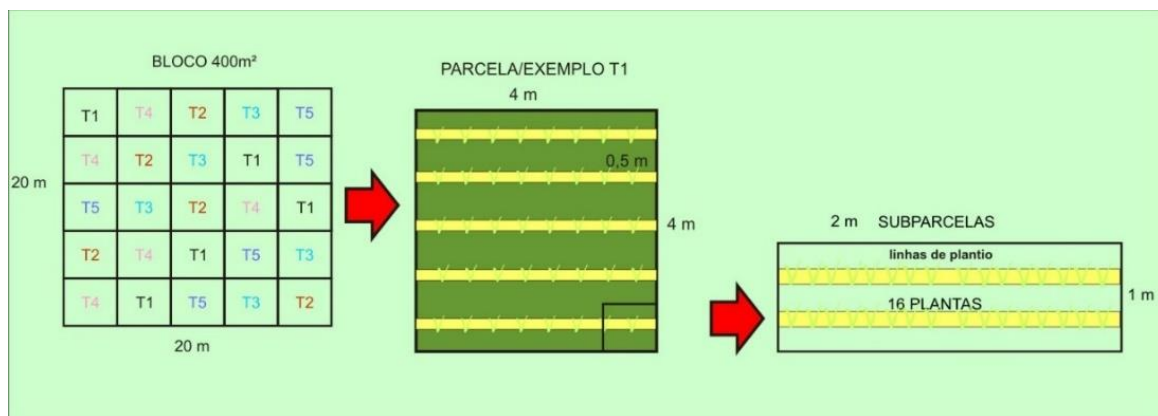
Fonte: o autor

O milho foi semeado no dia 24 de outubro de 2017, empregando-se a variedade Pioneer 30F53 YH, com 0,5 metros de espaçamento entrelinhas e quatro sementes por metro, totalizando 80.000 plantas por hectare, na população final, após procedimento de desbaste (para fins de uniformização do número de plantas). A fertilização de base consistiu em 150 kg ha⁻¹ da fórmula NPK 05-30-15. As doses de N que constituíram os tratamentos distintos de adubação nitrogenada foram fornecidas na forma de ureia (45%), onde: T1: 20 kg de N ha⁻¹; T2: 60 kg de N ha⁻¹; T3: 120 kg de N ha⁻¹; T4: 180 kg de N ha⁻¹; T5: 240 kg de N ha⁻¹. A sua aplicação ocorreu a lanço, em cobertura, e em evento único (sem parcelamento de dose), no dia dois de novembro, ou seja, transcorridos 8 dias pós-semeadura do milho. Na referida data, ocorreu uma precipitação de 17,4 mm (dados da estação do INMET Santa Maria), e no dia seguinte, registrou-se outro evento pluviométrico de 20,4 mm, ambos contribuíram para a incorporação e solubilização da ureia.

5.4.2 Obtenção dos dados sensorizados via terrestre e embarcados em SARP

Para os trabalhos de Sensoriamento, procedeu-se a subdivisão das parcelas (de 16m²) em oito repetições, cada qual, com área de 2 m² (Figura 3), e constituída por 16 plantas alvo. Assim, ao final, 800 repetições foram sensoriadas, tanto em procedimentos terrestres como aéreos, ambos realizados nos estádios fenológicos V5, V6, V7, V9, V11 e V12, sendo inviabilizada as determinações em V8 e V10. O motivo de dividir e repetições menores ocorreu no momento da colheita, devido a diferença de resolução espacial dos Ivs com a colheita, isto diminui a diferença de resolução entre os sensores proximais e embarcados.

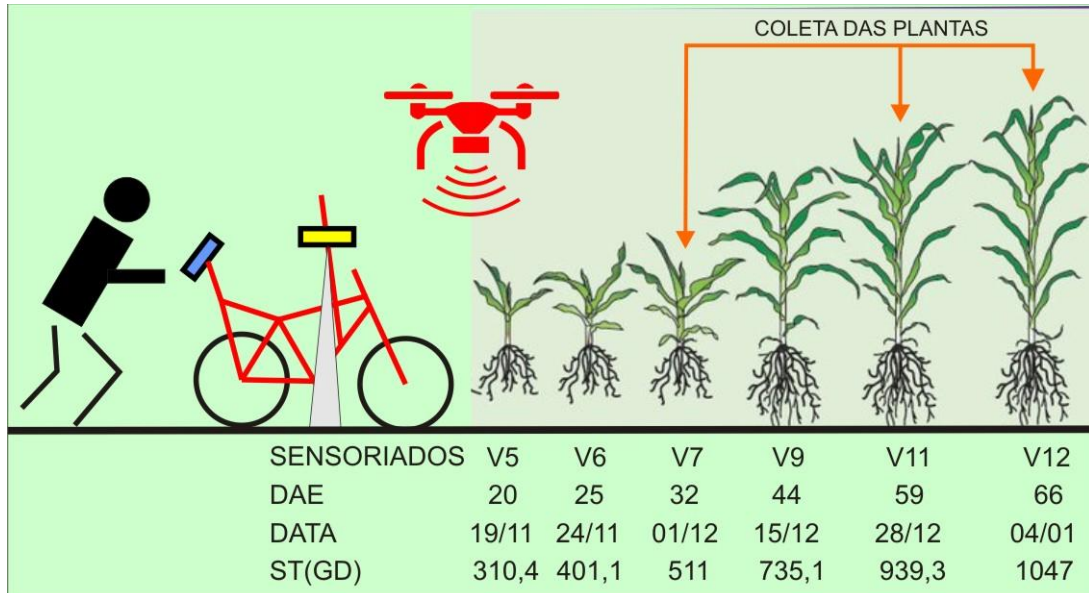
Figura 3 – Configuração dos blocos, parcelas e repetições que constituíram a área experimental.



Fonte: o autor

A obtenção dos dados com o sensor proximal, foi realizado com o equipamento Optrx ACS 430TM (Ag Leader), o qual utiliza as bandas espectrais do vermelho (630 ± 5 nm), infravermelho próximo (770 ± 5 nm) e a região da borda do vermelho (730 ± 5 nm). As leituras foram executadas seguindo as especificações do fabricante, sendo o sensor proximal posicionado a uma altura fixa de 0,6 m acima do dossel vegetativo com leituras na vertical. Para tanto, o dispositivo Optrx fora acoplado à uma bicicleta, que deslocada paralelamente às linhas da cultura, e conduzida manualmente pelo operador, à velocidade constante de 1 m/s, proporcionou que todas as plantas de milho das repetições fossem sensoriadas (Figura 4). Para manter esta altura regular, o instrumento de leitura foi adaptado a um braço metálico retrátil (ajustado conforme ocorrência do crescimento das plantas ao longo do ciclo produtivo), o equipamento foi conduzido manualmente pelo operador com o leitor na vertical, a uma velocidade de 1 m/s, a bateria com capacidade de duração de cinco horas, permitiu a operação completa sem a necessidade de recarga ou troca.

Figura 4 – Estádios fenológicos com avaliação dos índices de vegetação da cultura do milho; DAE: dias após a emergência; data: data da leitura; ST: soma térmica em graus dia (GD).



Fonte: o autor

Um SARP caracterizado por uma aeronave modelo Phantom 4 (DJI[®]), foi utilizado para os procedimentos de levantamentos aéreos. O sensor embarcado foi uma câmara Parrot Sequoia (MicaSense[®]), capaz de registrar a reflectância no comprimento de onda da região do verde ($550 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$), vermelho ($660 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$), borda do vermelho ($735 \pm 5 \text{ nm}$) e infravermelho próximo ($790 \pm 5 \text{ nm}$), com resolução de 1.2 Mp e resolução RGB de 16 Mp, equipada com “Sunshine sensor”.

5.4.3 Planejamento de voo e processamento das imagens para obtenção dos IVs

As missões de voo foram compiladas no programa Dronedeploy[®], gerando um voo automático sobre a área em estudo, a 15 metros acima do dossel da cultura, com duração de cerca de 8 minutos cada. Essas missões ocorreram sempre no horário das 15:00 h GMT, quando o sol estava no seu zênite, utilizando 80 % de recobrimento tanto na lateral quanto longitudinal. Não foi necessária autorização de voo no portal de Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS), pois não houve acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro. A aeronave está classificada como classe 3, peso de decolagem menor ou igual a 25 kg, o voo da aeronave foi realizado em operação em linha de visada visual (VLOS) e foi realizada conforme o disposto na ICA 100/40 item 10.3.2 – Operações de Sistemas de Aeronaves Remotamente

Pilotadas (RPAS) em áreas confinadas. O pixel gerado foi de 3,7 cm/ px⁻¹ no monocromático e 0,8 cm/ px⁻¹ no modo RGB. A câmera foi operada no modo automático, onde as bandas foram geradas separadamente.

Em cada missão obteve-se 177 imagens por banda adquirida, totalizando um conjunto de 885 imagens, sendo as mesmas descarregadas diretamente em computador através de cabo USB. As imagens geradas estão na extensão TIF. O programa empregado para tratar e extrair as informações das imagens foi o PIX4D Mapper Pro-Educational[®], versão 3.3.29. Em todas as etapas, após executados os processamentos das informações geradas, Georreferenciamento das imagens, ortoretificação e mosaicagem, posteriormente elaboram-se os seguintes índices, NDVI, NDRE, GNDVI e EVI2 (Tabela 1). Estes processos foram realizados no software ArcGIS Desktop[®].

Tabela 1 – Índices de vegetação (IVs) e suas respectivas equações determinantes.

Índice	Equação
NDRE	$(R_{IVP} - R_{BV}) / (R_{IVP} + R_{BV})$
NDVI	$(R_{IVP} - R_V) / (R_{IVP} + R_V)$
EVI2	$2.4 (R_{IVP} - R_V) / (R_{IVP} + 2.4R_V + 1)$
GNDVI	$(R_{IVP} - R_G) / (R_{IVP} + R_G)$

Legenda: R= reflectância. IVP = infravermelho próximo, BV = borda do vermelho, V = vermelho, G = verde.

5.4.4 Determinações de quantificação do N nas plantas

As passagens de estágio fenológico do milho variaram de cinco a sete dias, aproximadamente, de modo que as leituras de sensoriamento iniciaram, obedecendo a escala proposta por (RITCHIE et al., 2003) sendo determinados os estádios fenológicos de V5, aos 20 dias após a emergência (DAE), V6 aos 25 DAE, V7 aos 32 DAE, V9 aos 44 DAE, V11 aos 59 DAE e V12 aos 66 DAE. A coleta da parte área das plantas, para estimativa dos valores de N total, foi realizada nos dos estádios V7, V11 e V12. Foram coletadas uma planta por parcela (representativa de 16 m² e não 2 m² pois a parcela é a representação do experimento as menores são somente repetições), secas em estufa a 65°C até peso constante, trituradas e determinadas o seu teor de N pelo método de Kjeldahl (1883), conforme metodologia atualmente adotada pela EMBRAPA, e descrita no Manual de Laboratórios: Solo, Água, Nutrição Animal e Alimentos (NOGUEIRA; SOUZA, 2005). De acordo com esses autores, esta técnica possibilita a

determinação do N em plantas para a avaliação do estado nutricional. Anteriormente foi realizado um desbaste de plantas para que fosse uniformizada a população para 80.000,00 plantas por há, porém na colheita algumas repetições apresentaram maior número de plantas devido à perfilhação deste híbrido, estas repetições foram descartadas com a filtragem dos dados assim como as repetições que estavam com número de plantas abaixo da população de 80.000,00 plantas.

5.4.5 Análises dos dados

Testou se a normalidade dos dados pelo teste de Shapiro – Wilk (LEOTTI, V. B; A. R. BIRCK e J. RIBOLDI, 2005), os dados que não apresentaram normalidade foram submetidos a rotina Boxcox nos parâmetros avaliados. Detectou-se que a maioria dos dados foram não normais, mas devido a abundância dos dados mais de 120.000.000,00 de informações (Big Data), foi realizada a análise de correlação e equação da reta, onde foi testada a normalidade do resíduo da análise de variância, e demonstrou se normal e o R^2 nos parâmetros avaliados cujos gráficos estão inseridos, o programa utilizado para realizar os testes foi o R Core Team versão 3.1 e o pacote utilizado foi o Plot para geração dos gráficos. Para a obtenção dos dados foi realizado filtros, que concernem em retirar dados que não contribuem para a análise estatística tais como: valores negativos de NDVI, NDRE, GNDVI e EVI2, isto acontece devido a ruído na observação ou influência de outro alvo que não seja a biomassa avaliada. Foi retirado também repetições de 2 m² que não possuem 16 plantas, algumas possuem menos devido ao amassamento da cultura pela máquina agrícola outra possuem mais devido ao perfilhamento da cultura em estádios mais avançados onde após o desbaste ainda perfilharam, foram descartadas para uniformizar a população.

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As informações sobre a determinação da classe textural e resultados químicos da análise do solo onde o experimento fora implantado, encontram-se apresentados na Tabela 2. Pode-se verificar, entre outros, o valor da MOS, que é utilizado conjuntamente com a expectativa do rendimento de grãos de milho, discriminada a cultura antecedente e a produção de massa seca da mesma, para fins da recomendação de adubação nitrogenada em milho, conforme preconizado pela Comissão de Fertilidade do Solo do Estado do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016).

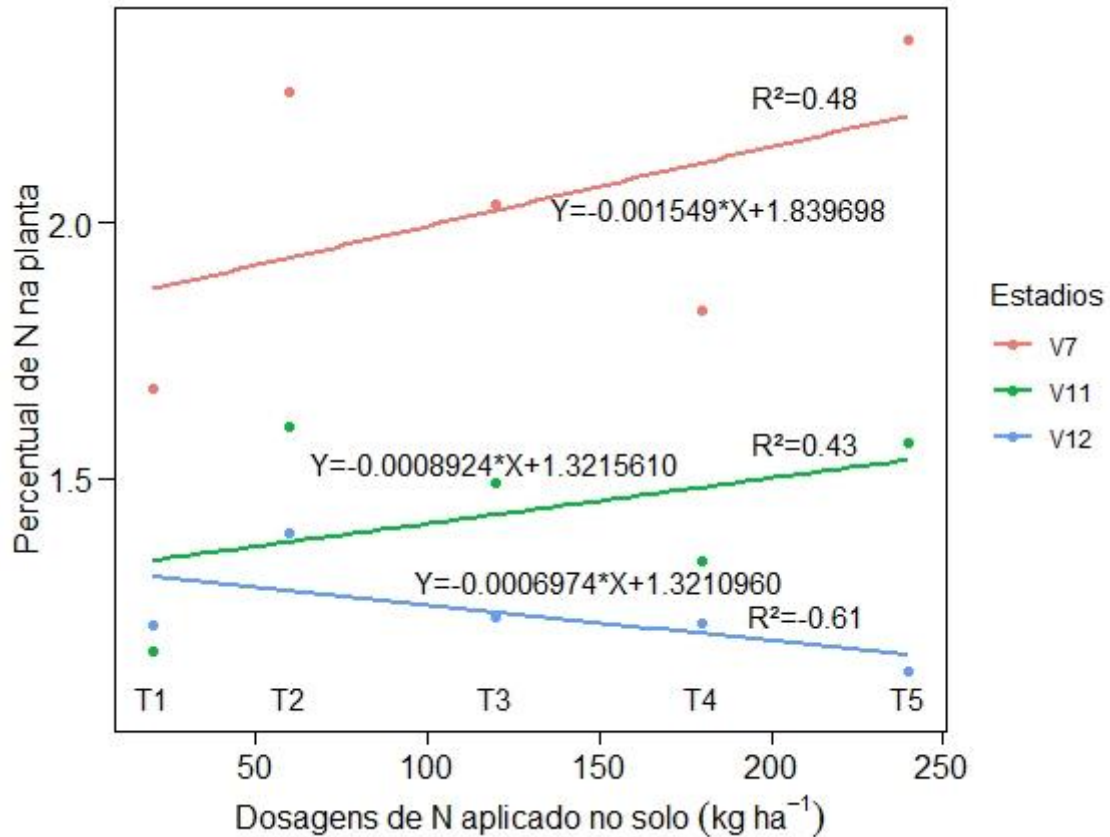
Tabela 2 – Caracterização textural e química do solo ocorrente na área experimental antes da aplicação dos tratamentos.

Prof.	Textura	pH	CTC pH 7	P	Ca/CTC	Mg/CTC	MOS	V	m
Cm	Classe	H ₂ O	--- cmol _c kg ⁻¹ ---		----- % -----				
0-15	3	5,43	19,13	13,96	50,67	22,21	2,91	74,93	0,75

Prof. – Profundidade; CTC – Capacidade de Troca de Cátions; P – Fósforo; Ca/CTC – Saturação de Cálcio na CTC; Mg/CTC – Saturação de Magnésio na CTC; MOS – Matéria Orgânica do Solo; V – Saturação de Bases; m – Saturação de Alumínio.

Os tratamentos com as doses distintas de uréia foram planejados vislumbrando gerar uma nítida faixa estratificada de estado nutricional de N ao longo dos estádios de desenvolvimento do milho, o que de fato pode ser constatada pelo teor de N absorvido na planta nos diferentes estádios fenológicos (Figura 5). O estágio fenológico V7 apresentou uma faixa de 1,7 a 2,3 % de N na planta, sendo os maiores valores obtidos nos tratamentos com maior dose de N aplicado ($y = 0,001549 * X + 1,839698$; $r^2=0,48$, $p<0,05$). No estágio V11, os resultados foram semelhantes ($y = 0,0008924 * X + 1,321561$, $r^2=0,43$; $p<0,05$), porém verificados menores valores de teor de N, devido ao provável efeito de diluição, que ocorre à medida que a biomassa da cultura aumenta, havendo acúmulo da quantidade de matéria seca (MS) em relação ao nutriente, e assim consequente constatação do declínio na concentração total de N. Nos materiais vegetais, de forma usual, a verificação da diminuição da concentração de N ocorre sinergicamente com o incremento de biomassa acima do solo, sendo estas duas variáveis denominadas curvas críticas de diluição do N (GREENWOOD et al., 1990). O comportamento dessas curvas já fora estimado para várias culturas, dentre as quais o milho (PLENET; LEMAIRE, 2000).

Figura 5 – Teor de nitrogênio presente no tecido das plantas nos estádios fenológicos V7, V11 e V12 do milho, correlacionado com as doses de Nitrogênio aplicado no solo, em Santa Maria, RS, na safra agrícola 2017/2018.



França et al. (2011) reportaram que a partir da emergência do milho, a absorção de N na planta é crescente, com maiores valores sendo alcançado aos 74 DAE (grão leitoso). A partir deste valor máximo, observa-se redução de N na biomassa, a qual se deve à mobilização do nutriente para o grão, queda de folhas e lixiviação a partir das folhas e colmos senescentes. Vasconcelos et al. (1998) observaram decréscimo nos teores de N nas folhas e nos colmos, caracterizando a mobilização do nutriente para os grãos a partir do estágio V12 antes do florescimento.

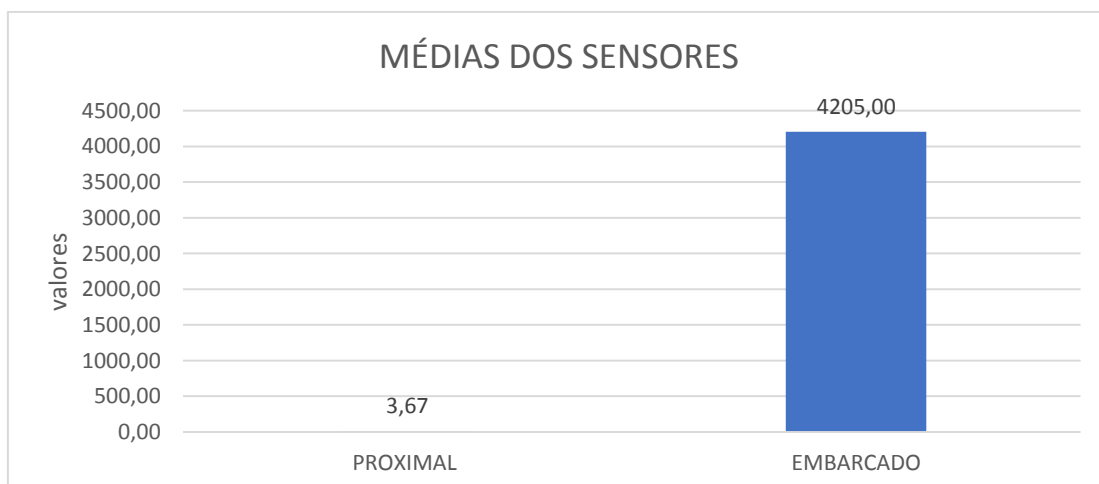
Em relação ao comportamento dos IVs ao longo dos estádios de desenvolvimento do milho, observou-se, de modo geral, que os valores foram crescentes a medida que houve avanço no estágio fenológico da cultura (figura 4). Nota-se claramente que alguns IVs atingiram um platô (saturação do índice) conforme Gitelson et al. (2002) e Myneni et al. (1997), enquanto noutros isto não aconteceu (Figura 7). Também foi evidenciado o comportamento distinto entre o sensoriamento terrestre e o aéreo, de modo que o primeiro alcançou platô, enquanto o segundo, de um modo geral, apresentou valores menos expressivos, à exceção do estágio V12,

em que ocorreu um discreto incremento deste. Aliando-se essa informação ao fato de que nesse tipo de mecanismo de leitura ocorre melhor estimativa do percentual de N nas plantas, infere-se que o SARP poderia ser utilizado em estádios mais tardios, possibilitando, assim, fertilizações com maior grau de precisão em estádios fenológicos mais avançados (PÖLÖNEN et al., 2013).

Os índices NDVI e NDRE apresentaram comportamento similar para a plataforma proximal (Figura 4), alcançando um valor máximo próximo ao V10 (não avaliado) para o NDVI, e V9 para o NDRE, ambos decrescendo a partir do V12. No entanto, para estes mesmos índices na plataforma SARP, não foi observado o platô máximo até o V12. Da mesma forma o EVI2 em SARP não alcançou o platô até V12.

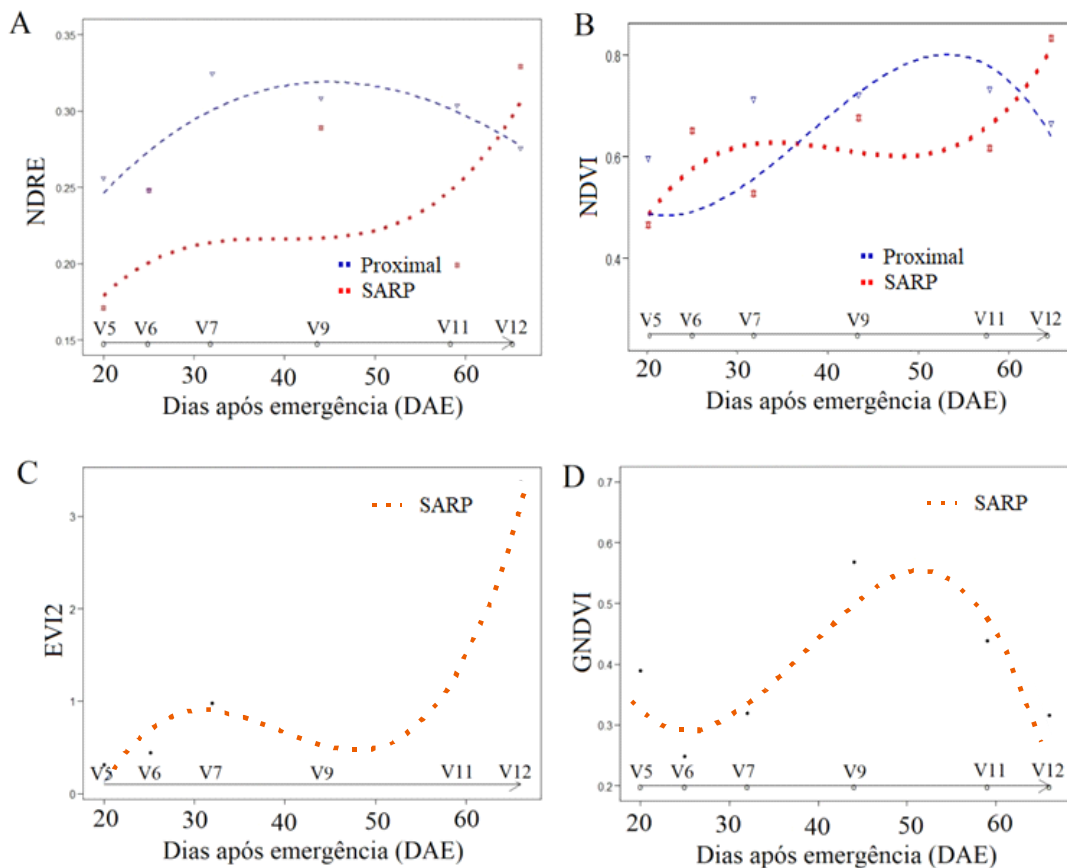
Esses resultados sugerem, que ao compararmos esses mesmos índices, quando embarcado em SARPs, em relação à obtida via plataforma terrestre, que os primeiros poderão ser utilizados até estádios mais avançados de desenvolvimento da cultura. Este fato pode estar associado ao footprint do sensor a 0,60 m e também ao número de observações coletadas. Enquanto o sensor proximal coleta uma em média de 3,67 informações a cada 2 m² a plataforma embarcada coleta 4205,0 informações para a mesma área (Figura 6). Assim, ao passo que o sensor proximal trabalha com uma taxa de coleta de 1 ponto a cada segundo, registrando apenas valores amostrais das plantas, a plataforma embarcada proporciona a obtenção de informações para a população total, produzindo abrangência completa da população de plantas no mapeamento (Figura 6).

Figura 6 – Valores médios dos índices de vegetação (NDVI, NDRE, GNDVI e EVI2), obtidas a cada 2 m², para as plataformas proximal e embarcada, em cada estágio fenológico quantificado (V5, V6, V7, V9, V11 e V12) para cultura do milho, em Santa Maria, RS, no ano agrícola 2017/2018.



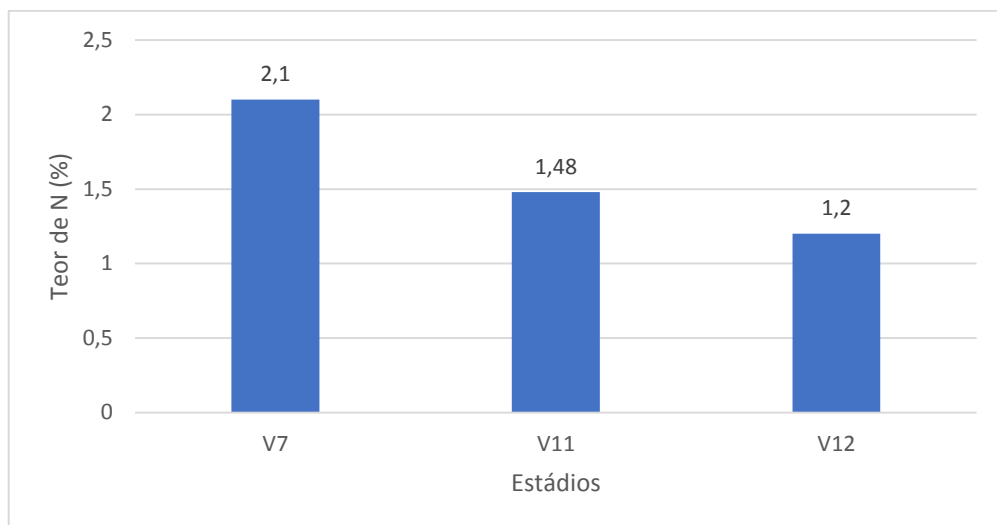
Enquanto isso, o GNDVI embarcado em SARP, apresentou comportamento semelhante ao NDVI e NDRE embarcado em plataforma terrestre, com saturação próximo ao V10 não avaliado (Figura 4). Este fato provavelmente esteja associado as características semelhantes dos comprimentos de onda investigados por estes índices. Considerando que o GNDVI é calculado similarmente ao NDVI, diferenciando-se apenas pela substituição da faixa do vermelho pela faixa no comprimento de onda verde. Desta maneira, o índice GNDVI mantém estreita relação com a proporção de radiação fotossinteticamente absorvida, sendo, portanto, linearmente correlacionado com Índice de Área Foliar (LAI) e com a biomassa, e assim, mais sensível à detecção das alterações na quantificação da clorofila (GITELSON, 2006). Acerca disso, pesquisas explorando vegetações apontam ao fato da refletância ser baixa na região do azul e vermelho, enquanto apresentam um pico na região verde (BACHMANN et al., 2013).

Figura 7 – Curvas de resposta dos índices de vegetação NDRE (A); NDVI (B); EVI2 (C) e GNDVI (D), determinados em duas plataformas (terrestre e aérea), obtidos, nos estádios fenológicos V5, V6, V7, V9, V11 e V12 do milho, Santa Maria, RS, ano agrícola 2017/2018



As leituras dos índices NDRE e NDVI, obtidas utilizando a plataforma SARP apresentaram comportamento similar entre si (Figura 7), em função dos estádios de desenvolvimento. As respostas dessas curvas foram semelhantes a encontrada por Wilda (2018), avaliando NDVI em milho, utilizando sensor embarcado na mesma plataforma. Os resultados mostraram incrementos nos valores até próximo do estágio V9, estabilizando-se após este período, tornando a ocorrer, a seguir, um novo incremento. A literatura reporta que, entre os estágios fenológicos V9-V10, ocorre elevada absorção de nutrientes na cultura do milho, notadamente de N, para atender as necessidades das plantas, ocorrendo acúmulo nas folhas (FANCELLI, 2015; SOUZA et al., 2015; BELOW et al., 2013), o que pode manter relação com os valores elevados registrados para os índices NDRE e NDVI, nas leituras do período desses estádios, na condição testada (Figura 8).

Figura 8 – Valores médios do teor de N acumulados nas plantas nos estádios V7, V11 e V12 do milho. Ano agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.



Esse crescimento contínuo e o acúmulo concomitante de nutrientes e de massa, implicam que a planta terá aproximadamente 85 a 90% de sua área foliar totalmente desenvolvida no estágio V12 (VON PINHO et al., 2009; FANCELLI, 2015). Esse padrão de desenvolvimento é consistente com a tendência de redução dos valores das leituras obtidas através dos sensores, nos estágios vegetativos mais avançados. Nestas etapas, as folhas funcionam como fonte de nutrientes para as estruturas reprodutivas da planta.

No milho irrigado, a maior parte do fertilizante nitrogenado tende a ser aplicada na semeadura ou durante os primeiros estágios do crescimento da cultura, simplificando o gerenciamento da lavoura (logística e custos). Isto pode constituir um problema, pois além das

perdas que podem acontecer para o solo e atmosfera, diminuindo a disponibilidade do nutriente, a absorção de N não ocorre de forma pontual e uniforme, limitando-se apenas a esta etapa, o N é absorvido durante praticamente todo o ciclo do milho, sendo que a maior demanda se dá na fase vegetativa (BÜLL, 1993).

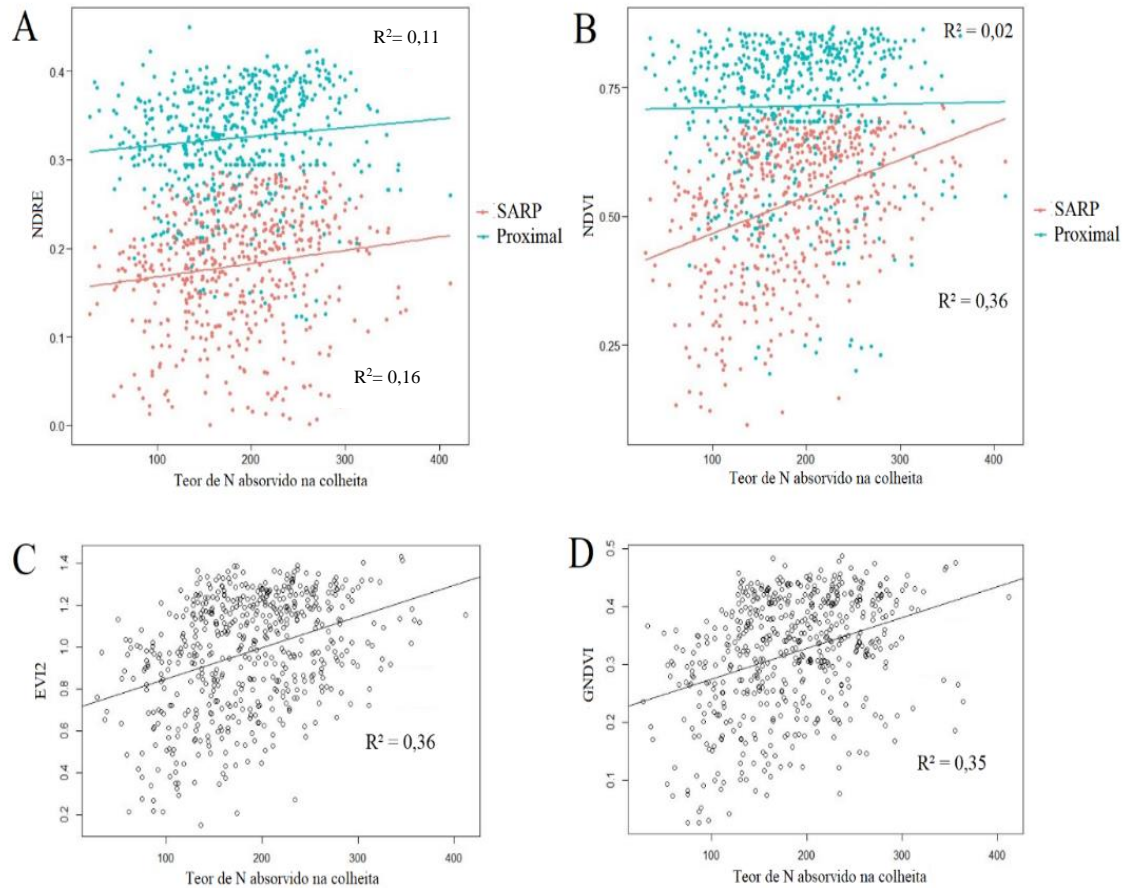
Sob condições favoráveis de umidade do solo, aproximadamente um terço do total da absorção do N ocorre após a polinização (HANWAY, 1962). Consequentemente, deve-se considerar o fracionamento das aplicações de N em momentos distintos. De forma geral, na cultura do milho há expressiva absorção de N, P, Ca, Mg e S durante a fase reprodutiva, indicando possibilidade de resposta ao fornecimento tardio desses nutrientes em sistemas de alta produtividade (SILVA, 2016).

Neste trabalho, as relações testadas entre IVs, obtidos nos sensores embarcados em SARPs as quantidades de N aportadas à lavoura indica que houve a continuidade de absorção do nutriente pelas plantas no decorrer da evolução dos estádios fenológicos V5 – V12 (figura 7). A plataforma embarcada possibilitou detectar, através dos índices NDRE, NDVI e EVI2, essa continuidade de absorção tardia de nutrientes, sugerindo que a dinâmica nutricional segue em movimento além das etapas que atualmente são contempladas nas recomendações de adubação nitrogenada. Inclusive, ao final dos estádios (V11 e V12) ainda ocorreu incremento nos valores desses índices.

Enquanto isso, os índices da plataforma proximal apresentaram valores menores que a plataforma SARP, o que pode estar relacionado a forma do comprimento de onda e a reflectância da borda do vermelho. A continuidade da absorção do N não foi evidenciada nas leituras desses sensores, o que pode ser demonstrado pela saturação do índice NDRE em V9, e NDVI entre V9 e V10 não avaliado.

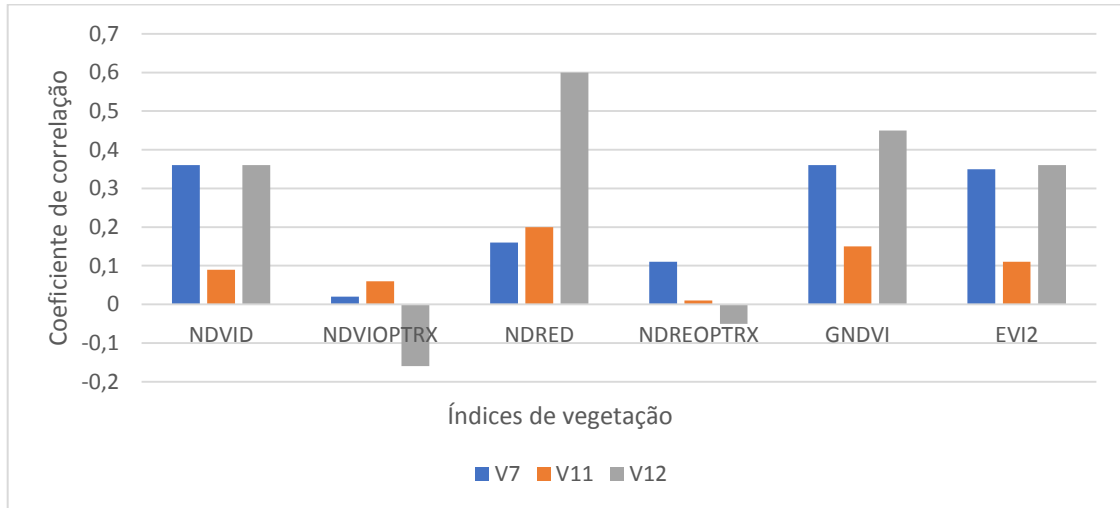
A continuidade da absorção do N verificada pelos sensores embarcados, pode ser melhor evidenciada nos resultados encontrados em V7 (Figura 9), e V12 (Figura 11). Em ambos, esse incremento nos teores de N absorvido pelas plantas, se expressou melhor nos valores de R^2 das relações entre valores lidos nos índices, e N da adubação.

Figura 9 – Relação dos índices de vegetação NDRE (A); NDVI (B); EVI2 (C) e GNDVI (D) avaliado no estádio V7 com as quantidades de nitrogênio exportados para os grãos de milho. Ano agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.



No estádio V7 os índices NDVI, EVI2 e GNDVI (plataforma SARP) apresentaram as melhores relações, e semelhantes entre si, com valores de $R^2 \approx 0,35$ (Figura 5). Já no estádio V12 (Figura 6), o índice que expressou melhor essa relação foi o NDRE, obtido pela plataforma SARP, com $R^2 = 0,60$, seguido do GNDVI com $R^2 = 0,45$ (Figura 9). De fato, o NDRE no SARP partiu de uma relação de $R^2=0,16$ para $R^2 = 0,60$, enquanto o GNDVI subiu de $R^2= 0,36$ para $R^2= 0,45$, para os estádios V7 e V12 respectivamente (Figura 9 e 11). O NDVI e o EIV2 gerado a partir do sensor embarcado na plataforma aérea mantiveram a mesma relação ($R^2= 0,36$) em ambos os estádios fenológicos.

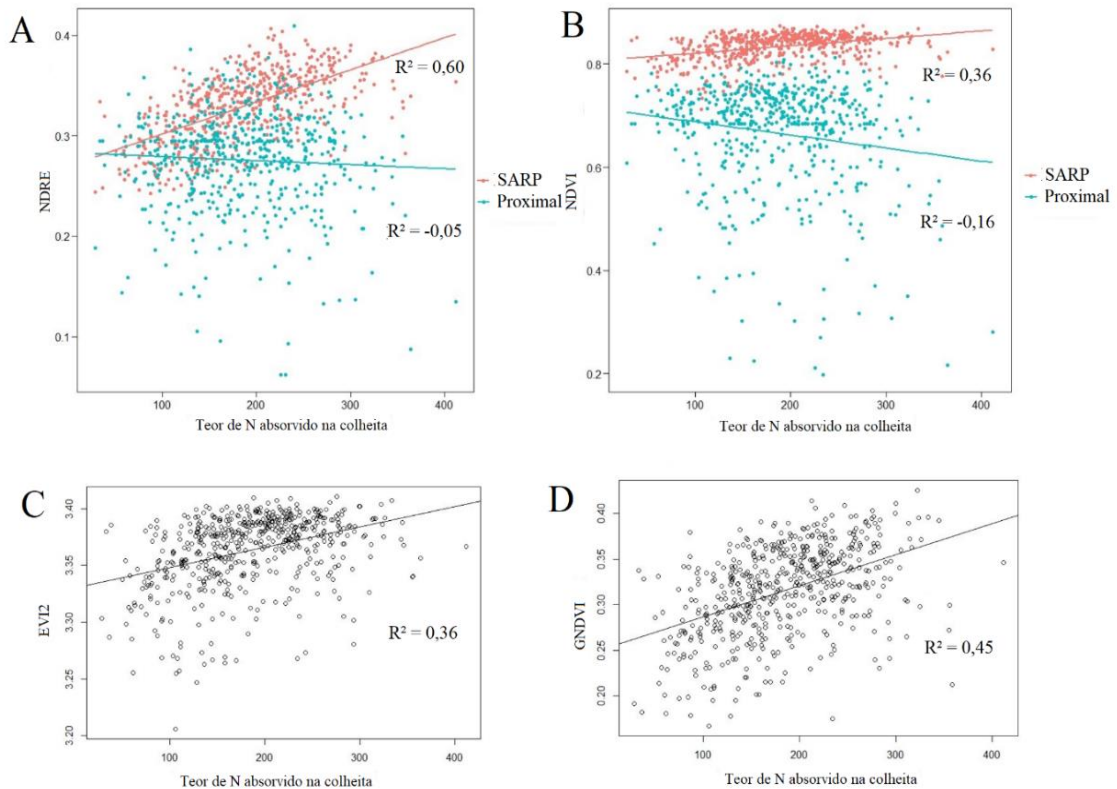
Figura 10 – Coeficientes de determinação dos índices de vegetação obtidos por diferentes plataformas em relação aos estádios fenológicos do milho, na safra agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.



No estágio V12, tanto o NDVI como NDRE do sensor proximal apresentaram valores negativos. Estes resultados estão de acordo com a Figura 4, na qual pode-se verificar que estes índices apresentaram saturação no estágio V12. O GNDVI apresentou incremento do índice até V10, e atingiu saturação em V12. Os índices NDVI plataforma SARP e EVI2 obtiveram ambos $R^2 = 0,36$.

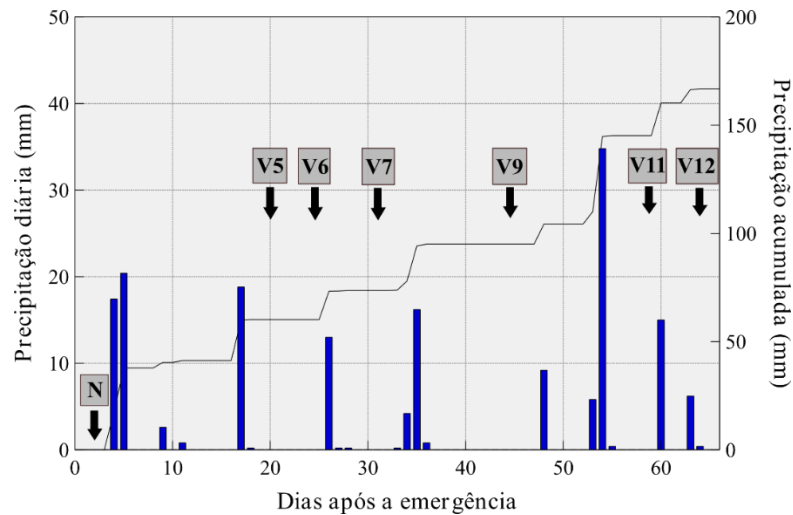
Destaca-se ainda, que os índices NDVI, GNDVI e EVI2 da plataforma embarcada apresentaram bom potencial na detecção precoce do estado nutricional das plantas, o que seria importante para a fertilização a taxa variável. Já os índices NDRE e NDVI obtidos por sensor proximal não tiveram relações eficientes em nenhum estágio com estado nutricional de nitrogênio na planta.

Figura 11 – Relação dos índices de vegetação NDRE (A); NDVI (B); EVI2 (C) e GNDVI (D) avaliados no estádio V12 com as quantidades de nitrogênio exportados para os grãos de milho. Ano agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.



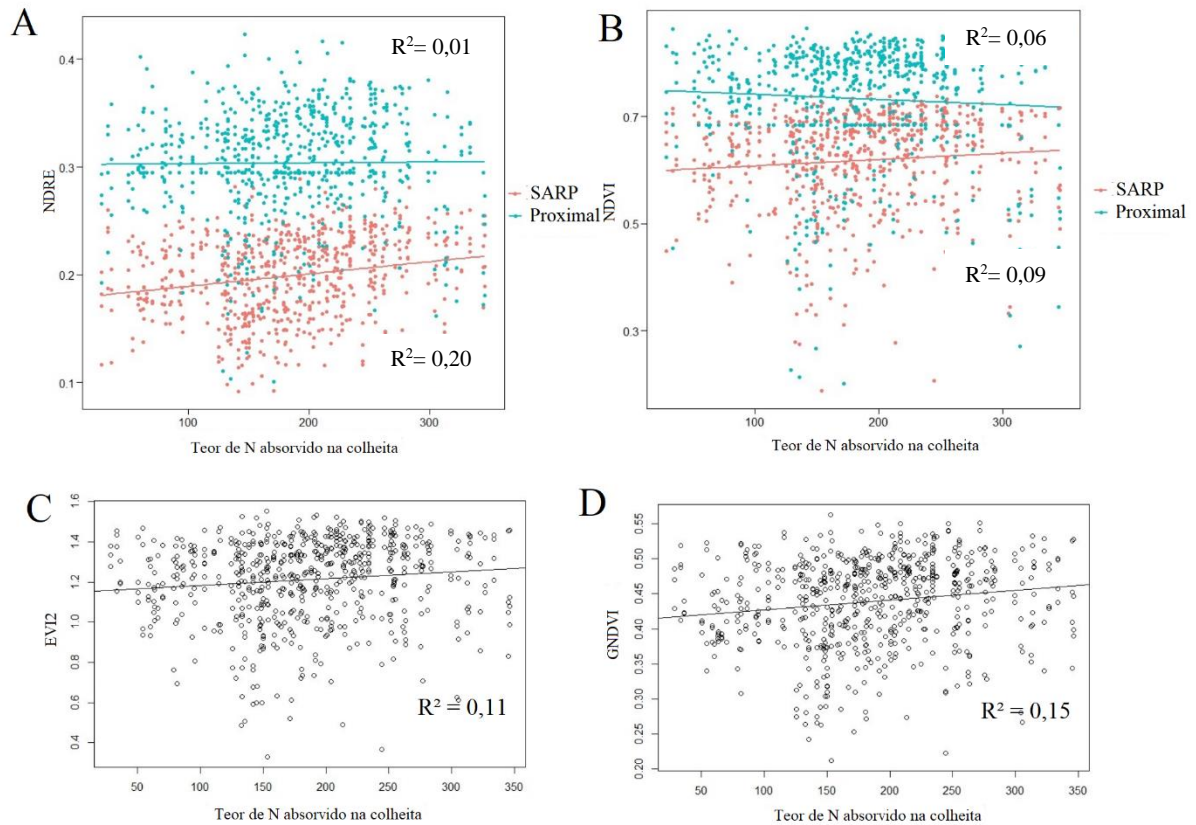
No estádio V11 a cultura do milho foi submetida a uma restrição hídrica por falta de pluviosidade e problemas mecânicos do pivot central o que motivou um estresse hídrico por aproximadamente 20 dias (Figura 13). Nesta condição de estresse, de um modo geral houve decréscimo na sensibilidade dos IVs em captar o estado nutricional das plantas.

Figura 12 – Gráfico da precipitação diária e acumulada no compreendido entre em 24 de outubro de 2017 até 04 de janeiro de 2018 (entre a semeadura e o estágio V12 da lavoura de milho). Dados registrados para Santa Maria RS, provenientes da estação do INMET.



Assim em V11, sob tal condição de estresse hídrico, o índice NDRE dos sensores embarcados em SARP apresentou $R^2 = 0,20$, enquanto em V12, em condição satisfatória de aporte de água na cultura, esse valor foi de $R^2 = 0,60$ (Figura 6 e Figura 8). Já o NDVI com sensoriamento em SARP que em V12 obteve $R^2 = 0,36$ em V11, obteve apenas $R^2 = 0,06$. De forma análoga, o EIV2 que em V12 atingiu $R^2 = 0,36$, em V11 foi de $R^2 = 0,09$, enquanto o GNDVI obteve $R^2 = 0,15$ sob estresse, e $R^2 = 0,45$ quando as plantas se recuperaram em V12. O estresse hídrico afeta a morfologia da estrutura provocando o enrolamento das folhas (SYVERTSEN; LLOYD 1994), prejudicando a reflectância do dossel vegetativo. Isso ocorre em razão do conteúdo de água na folha afetar a concentração de clorofila, provocando desarranjo nas estruturas internas da folha, o que promove a redução do seu conteúdo de clorofila, e propicia menor absorção de energia na região do visível, entre 400 a 700 nm (MOREIRA, 2001).

Figura 13 – Relação dos índices de vegetação NDRE (A); NDVI (B); EVI2 (C) e GNDVI (D) avaliado no estágio V11 (sob estresse hídrico) com as quantidades de nitrogênio exportados para os grãos de milho. Ano agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.



Essas relações entre estado nutricional de N absorvido pela planta durante os estádios de desenvolvimento com os IVs assumem grande importância para obtenção de parâmetros de recomendações de adubação nitrogenada para a cultura do milho, principalmente quanto ao atendimento de necessidades nutricionais tardias, ao mesmo tempo, que podem sustentar ajustes na melhoria de eficiência do uso dos fertilizantes. Hageman e Below (1984) já assinalavam que a adubação nitrogenada em estágios fenológicos mais avançados permite a manutenção do crescimento radicular e a integridade da área foliar por um período mais longo. De acordo com esses autores, graças a essas vantagens, pode ocorrer um retardamento na absorção de N e de outros nutrientes, refletindo-se em ganhos que podem ser expressos em altos rendimentos de grãos de milho.

Nesse cenário, considerando o desenvolvimento de híbridos comerciais modernos, mais produtivos, e de maior grau de exigência nas quantidades de N necessárias para expressar seu potencial de máximo rendimento, pode ser viável, postergar parte da fertilização nitrogenada, realizando-a até próximo aos estágios finais de enchimento dos grãos (SANGOI et al., 2001).

Diante desta expectativa de resposta para tais cultivares, Huber et al. (1994) já denotava que tais mudanças na dinâmica e assimilação da captação de N, expressas nas alterações fisiológicas desses híbridos modernos de milho, incrementam a habilidade da planta em absorver N, até mesmo durante o enchimento de grãos. Isto pode justificar a recomendação de uso tardio de N, nas situações em que as restrições climáticas não impedem o fornecimento adequado deste nutriente ao milho (SILVA et al., 2005).

Diante do exposto, em um cenário da agricultura moderna, que demanda necessidade de acesso rápido às informações para tomadas de decisão, aliando-se a utilização de cultivares com maior expectativa de produtividade, e tecnologias de detecção das demandas nutricionais das plantas, os IVs revelam-se importantes aliados, necessitando mais estudos para aprimorar seu uso.

Esse trabalho verificou a pertinência da viabilidade do uso dos IVs em distintas plataformas e os resultados obtidos permitiram inferir que os sensores embarcados em SARP carregam diversas vantagens em relação aos terrestres. Dentre estas, a possibilidade de verificação das necessidades nutricionais da planta no final do ciclo, pela cultura do milho, com vistas a facilitar as tomadas de decisão sobre o manejo da adubação da lavoura nas etapas que atualmente não são contempladas nas recomendações de adubação desta cultura.

5.6 CONCLUSÕES

Os índices de vegetação gerados através de plataforma SARP apresentaram melhores relações com o estado nutricional das plantas de milho, em comparação ao sensor proximal.

O estágio V12 do milho teve maiores valores de correlações de índice de vegetação e teor de N absorvido pela planta, destacando-se o índice NDRE com $R^2 = 0,60$ na plataforma SARP.

O índice de borda do vermelho (NDRE) obteve melhor desempenho na detecção do estado nutricional em relação ao índice de vegetação baseado em radiação vermelha (NDVI e EVI2), e foi mais eficiente na detecção do estado nutricional das plantas em estádios intermediários e finais de desenvolvimento da cultura do milho.

O IV baseado no comprimento de onda do verde (GNDVI) é eficiente em detectar estado nutricional das plantas em estádios iniciais e intermediários de desenvolvimento da cultura do milho.

O estresse hídrico pode comprometer a eficiência dos sensores de dossel embarcados e proximais, no seu potencial de captação do estado nutricional da cultura do milho.

Para uma adequada análise estatística é necessário realizar a filtragem de dados (valores negativos e de ruído) e a padronização da população de plantas, que no estudo em tela foi de 80.000,00 plantas.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; DE MORAES GONÇALVES, J.L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p.711–728, 2013.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob Sistema de Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.1, p.241-248, 2002.
- BACHMANN, F.; HERBST, R.; GEBBERSC, R.; HAFNER, V.V. **Micro UAV based georeferenced orthophoto generation in VIS+NIR for precision agriculture**. In Proceedings of the UAV-g2013, Rostock, Germany, 4–6 September 2013; Volume XL-1/W2.
- BARNES, E.M.; CLARKE, T.R.; RICHARDS, S.E. et al. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. In: **5th international conference on precision agriculture**. MADISON, WI, 2000.
- BELASQUE JÚNIOR, J. **Doses e épocas de aplicação de nitrogênio sobre dois híbridos de milho cultivados na “safrinha”**. 2000. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal.
- BRAGAGNOLO, J.; AMADO, T.J.C.; NICOLOSO, R.S.; JASPER, J.; KUNZ, J. & TEIXEIRA, T.G. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: I. Plant nutrition and dry matter production. *R. Bras. Ci. Solo*, 37:1288-1298. 2013
- BRASIL. Ministério de Agricultura. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973.
- BREDEMEIER, C.; VARIANE C.; ALMEIDA D.; ROSA. A. T.; *Ciência Rural*, Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável, 2013.
- BÜLL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: Bull, L. T., Cantarella, H (eds.). **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba. 1993. p.63-145.
- CATTANI, CARLOS EDUARDO VIZZOTTO. Dinâmica espectro-temporal do trigo e do feijão por meio de dados espectrais multisensor. Cascavel (PR), 2018.
- CQFS-RS/SC - COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. SBRS-NRS: Brasil, 10 ed., Porto Alegre, 376p., 2016.
- EISENBEISS, H. **UAV Photogrammetry**. Doctor of sciences, University of Technology Dresden, Germany, 2009.
- FANCELLI, A.L. Ecofisiologia, fenologia e implicações básicas de manejo. BORÉM, A.; GALVÃO, J.C.C.; PIMENTEL, M.A. **Milho: do plantio à colheita**. Viçosa: Ed. UFV, p.50-76, 2015.

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**, p.1-22, 2010.

FRANÇA, S.; MIELNICZUK, J. ROSA, L.M.G.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J.I. Nitrogênio disponível ao milho: Crescimento, absorção e rendimento de grãos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.11, p.1143–1151, 2011.

GITELSON, A.A.; KAUFMAN, Y.J.; MERZLYAK, M.N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sens. Environ.** 58, p. 289–298, 1996,

GITELSON, A. A. Wide Dynamic Range Vegetation Index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. **Journal of Plant Physiology**, Muenchen, v. 161, n. 2, p. 165–173, 2004.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 80, n. 1, p. 76–87, 2002.

GRENZDÖRFFER, G.; ENGEL, A. Eine vergleichende Untersuchung von zwei Micro-UAV's – Perspektiven für die aktuelle und kostengünstige **Geoinformationsgewinnung**, In: GIS, 1/2008, 17-25. 2008.

GREENWOOD, D. J.; LEMAIRE, G.; GOSSE, G.; CRUZ, P.; DRAYCOTT, A.; LANGDALE, J. J. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. **Ann. Bot.** 66: 425_436. 1990.

HANWAY, J. Corn growth and composition in relation to soil fertility. II Uptake of N, P, and K, and their distribution in different plant parts during the growing season. **Agron. J.** 1962, 54, 217–222.

HUBER, D.M.; TSAI, C.Y.; STROMBERGER, J.A. Interaction of K with N and their influence on growth and yield potential of maize. In: **ANNUAL CORN AND SORGHUM RESEARCH CONFERENCE**, 48., Chicago, 1994. Proceedings . Chicago: American Seed Trade Association, p.165-176, 1994.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; LEEUWEN, W. V. **Modis vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis document**, 1999.

HAGEMAN, R.H.; BELOW, F.E. The role of nitrogen in the productivity of corn. In: **Annual Corn & Sorghum Research Conference**, 39., Chicago, 1984. Proceedings . Chicago: American Seed Trade Association, p.145-155, 1984.

HUNT, E.R.J.; HIVELY, W.D.; DAUGTRY, C.S.T.; MCCARTY, G.W. Remote sensing of crop leaf area index using unmanned airborne vehicles. In Proceedings of the Pecora 17 **Conference, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, Denver, Colorado, 18–20 November, 2008.

IRSCHARA, A.; KAUFMANN, V.; KLOPSCHITZ, M.; BISCHOF, H.; LEBERL, F. **Towards fully automatic photogrammetric reconstruction using digital images taken from uavs.** 100 Years ISPRS, Vienna, Austria, July 5–7, 2010.

ISLA, R.; QUÍLEZ, D.; VALENTÍN, F.; CASTERAD, M.A.; AIBAR, J.; MATURANO, M. **Utilización de imágenes aéreas multiespectrales para evaluar la disponibilidad de nitrógeno en maíz** (Use of multispectral airborne images to assess nitrogen availability in maize). In *Teledetección, Bosques y Cambio Climático*; Recondo, C., Pendás, E., Eds.; Asociación Española de Teledetección: Mieres, Spain, p. 9–12, 2011.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente.** 2.ed. São José dos Campos, Parêntese, 2011.

KAPPES, C.; ANDRADE J.A.C.; ARF, O.; OLIVEIRA, A.C.; ARF, M.V.; FERREIRA, J.P. Desempenho de híbridos de milho em diferentes arranjos espaciais de plantas. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.2, p.334-343, 2011.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p. 3833-3845, 2008.

LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; KONDÖRFER, G.H.; PEREIRA, S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura do milho, em sistema plantio direto no triângulo mineiro (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 363-376, 2000.

LI, Y.; CHEN, D.; WALKER, C.N.; ANGUS, J. F. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. **Field Crops Research**, v.118, n.3, p.221-227, 2010.

LOPES, E.C.P.; MORAES, A.; SANDINI, I.E.; KAMINSKI, T.H.; BASI, S.; PACENTCHUK, F. **Relação da leitura do clorofilômetro com teores de nitrogênio na folha de milho em sistema de integração lavoura-pecuária.** In: Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 29., 2012. **Anais...** Águas de Lindoia: ABMS, CD-ROM, 2012.

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

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP. 250 p., 2001.

MORENO J. A. *Clima do Rio Grande do Sul*, 1961.

MYNENI, R.B.; HALL, F.G.; SELLERS, P.J.; MARSHAK, A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.33, p.481-486, 1995.

NOGUEIRA, A. R. A.; SOUZA, G. B. **Manual de Laboratórios: Solo, Água, Nutrição Vegetal, Nutrição Animal e Alimentos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 313p., 2005.

PLÉNET, D.; LEMAIRE, G. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. **Plant Soil** 216: 65_82. 2000.

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

PÖLÖNEN, I.; SAARI, H.; KAIVOSOJA, J.; HONKAVAARA, E.; PESONEN, L. Hyperspectral imaging based biomass and nitrogen content estimations from light-weight UAV. **Proc. SPIE**, 2013, 8887, doi:10.1117/12.2028624.

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

QUININO, R. C.; REIS, E. A.; BESSEGATO, L. F. Using the coefficient of determination R² to test the significance of multiple linear regression. **TeachingStatistics**, v. 35, p. 84-88, 2013.

RANGO, A.; LALIBERTE, A.; HERRICK, J. E.; WINTERS, C.; HAVSTAD, K.; STEELE, C.; BROWNING, D. Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management. **Journal of Applied Remote Sensing**, Bellingham, v. 3, p. 1-15, 2009.

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

RESENDE, M. et al. **A cultura do milho irrigado**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. 317p.

REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE. **Informações técnicas para trigo e triticale – safra 2012**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 204p., 2011.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. Como a planta de milho se desenvolve. **Informações agronômicas**, Potafós, v.103, p.1-19, 2003.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. Third Symposium of ERTS, Greenbelt, Maryland, USA. NASA SP-351, V1:309-317.,1973.

SANGOI, L.; ENDER, M.; GUIDOLIN, F.A.; KONFLANZ, V.A. **Nitrogen fertilization impact on agronomic traits of maize hybrids released at different decades.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, p.757-764, 2001.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.B.; OLIVEIRA, J.B. **Embrapa: Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Brasília, 3 ed., 353 p., 2013.

SCHIPPERS J. S.; FRANCIS, D. D.; VIGIL, M.; BELOW, F. E. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 2008.

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

SCHWALBERT, R.; AMADO, T.J.C; HORBE, T.A.N; STEFANELLO, L.O.; ASSEFA, Y.; VARA PRASAD, P.V.; RICE, C.W.; CIAMPITTI, I.A. Corn Yield Response to Plant Density and Nitrogen: Spatial Models and Yield Distribution. **Agronomy Journal**, v.110, p.970-982, 2018.

SINGH, M.; KUMAR, J.; SINGH, S.; SINGH, V. P.; PRASAD, S. M. Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: a review. **REVIEWS IN ENVIRONMENTAL SCIENCE AND BIOECHOLOGY**, Dordrecht, v. 14, p. 407-426, 2015.

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

SHANAHAN, J.F.; SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D.; VARVEL, G.E.; WILHELM, W.W.; TRINGE, J.M.; SCHLEMMER, M.R.; MAJOR, D.J. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. **Agronomy Journal**, v.93, p.583-589, 2001.

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDÃO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P.; VILELA, M. F. **Sensoriamento remoto: conceitos básicos e Aplicações na agricultura de precisão.** In: BERNARDI, A. C. C. et al. *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar.* São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2014.

SILVA, P.R.F.; STRIEDER, M.L.; SILVA, R.P.C.; RAMBO, L.; SANGOI, L.; ARGENTA, G.; FORSTHOFER, E.L.; SILVA, A.A. Grain yield and kernel crude protein content increases of maize hybrids with late nitrogen side-dressing. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.62, n.5, p.487-492, 2005.

SILVA, C. G. M. **Absorção e exportação de macronutrientes em milho transgênico sob dois níveis de investimento em adubação,** Sete Lagoas, 52 p., 2016.

SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; TRIVELIN, P.C.O. Manejo de nitrogênio no milho em Latossolo Vermelho sob plantio direto com diferentes plantas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.3, p.477-486, 2006.

SILVA, M. A. D.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; OLIVEIRA, A. H.; AVANZI, J. C.; NORTON, L. D. Water erosion risk prediction in eucalyptus plantations. **#IãNCIAE!GROTECNOLOGIA**, Lavras, v. 38, p. 160-172, 2014.

SOLARI, F.; SHANAHAN, J.; FERGUSON, R.; SCHEPERS, J.; GITELSON, A. Active Sensor Reflectance Measurements of Corn Nitrogen Status and Yield Potential. **Agronomy Journal**, v.100, n.3, p.571-579, 2008.

SOUZA, R.; CARVALHO, M.; SILVA, M.D.; GOMES, S.; GUIMARAES, W.; ARAUJO, A. Leituras de Clorofila e Teores de N em fases fenológicas do milho. **Colloquium Agrariae**, Teresina, v.11, n.1, p.57-63, 2015.

SYVERTSEN, J.P.; LLOYD, J.J. Citrus. In: SCHAFFER, B., ANDERSEN, P.C. Handbook of environmental physiology of fruit crops, Volume II Sub-tropical and tropical crops. **CRC Press**, 1994, v.2, p.65-99.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS - ASCAR, 2 ed., 222 p., 2008.

TAVAKOLI¹, H.; MOHTASEBI¹, S.S.; ALIMARDANI¹, R. GEBBERS, evaluation of different sensing approaches concerning to nondestructive estimation of leaf area index (lai) for winter wheat, **international journal on smart sensing and intelligent systems** vol. 7, no. 1, march,2014..

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 174p, 1995.

VASCONCELOS, C.A.; VIANA, M.C.; FERREIRA, J.J. Acúmulo de matéria seca e de nutrientes em milho cultivado no período de inverno-primavera. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, p.1835-1845, 1998.

VIAN, A.L.; BREDEMEIER, C.; SILVA, P.R.F.; SANTI, A.L.; GIORDANO, C.P.S.; SANTOS, F.L. Limites críticos de NDVI para estimativa do potencial produtivo do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.17, n.1, p.91-100, 2018.

VON PINHO, R.G.; BORGES, I.D.; PEREIRA, J.L.A.R.; REIS, M.C. Marcha de Absorção de Macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.8, n.2, p.157-173, 2009.

WANG, W.; YAO, X.; YAO, X.F.; TIAN, Y.C.; LIU, X.J.; NI, J.; CAO, W.X.; ZHU, Y. Estimating leaf nitrogen concentration with three-band vegetation indices in rice and wheat. **Field Crops Research**, v.129, p.90-98, 2012.

WILDA, L.R.M. **Plant sensors for nitrogen monitoring and fertilization impacts on the nutrient dynamic on maize crop**. 2018. 94f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

ZHANG, C.; KOVACS, J.M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. **Precision Agriculture**, v.13, n.6, p.693–712, 2012.

6 ARTIGO 2 – ÍNDICES DE VEGETAÇÃO EM DIFERENTES ESTÁDIOS FENOLÓGICOS RELACIONADOS COM A PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE MILHO

Artigo submetido a Revista Brasileira de Ciências Agrárias.

Luiz Felipe Diaz de Carvalho¹, Telmo Jorge Carneiro Amado², José Cardoso Sobrinho³, Lúcio de Paula Amaral⁴, Luan Pierre Pott⁵, Marcieli Piccin⁶, Vinícius Freitas Pedron⁷

¹ Mestre em Geomática, Discente no Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo na UFSM, felipe@politecnico.ufsm.br

² Engenheiro Agrônomo, Bolsista do CNPq, Professor Titular, UFSM, proftelmoamado@gmail.com

³ Engenheiro Agrícola, Professor associado da UFSM, jcardosos@smaail.ufsm.br

⁴ Engenheiro Florestal, docente Departamento Engenharia Rural UFSM, amaralufsm@gmail.com

⁵ Engenheiro Agrônomo, Discente no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola na UFSM, luanpierrepot@hotmail.com

⁶ Engenheiro Agrônomo, Discente no Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo na UFSM, marcielipiccin@gmail.com

⁷ Engenheiro Agrônomo, pedron.vinicius@hotmail.com

6.1 RESUMO

Índices de vegetação (IVs) são utilizados em diversas áreas na agricultura, devido a sua possibilidade de se correlacionar com características agrônomicas das culturas e conseqüentemente com produtividade de grãos. O objetivo do estudo foi avaliar a relação entre IVs em diferentes estádios fenológicos, obtidos em duas diferentes plataformas, sendo uma composta por sensores dispostos em Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (SARP) e outra, proximal, com a produtividade de grãos na cultura do milho, em diferentes estádios fenológicos. O experimento contou com 5 tratamentos de doses diferentes de nitrogênio (N), buscando gerar variabilidade de potencial produtivo da cultura, sendo estas: 20, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹ de N, tendo sido instalado em cinco blocos ao acaso, com cinco repetições de cada tratamento. Foram realizadas leituras dos IVs; NDRE e NDVI (plataforma proximal, sensor Optrx), e NDRE, NDVI, EVI2 e GNDVI (plataforma SARP, sensor MicaSense Parrot Sequoia) nos estádios fenológicos V5, V6, V7, V9, V11 e V12. Posteriormente foi coletado material para determinação da produtividade de grãos, que possibilitou realizar as relações com os IVs avaliados. Os IVs na plataforma SARP obtiveram relações significativas com a produtividade de grãos de milho, enquanto isso não ocorreu na plataforma proximal. Nos estádios fenológicos V9, V11 e V12 ocorreram elevados valores de correlação com a produtividade de grãos com os IVs NDRE, NDVI e EVI2 embarcados em SARP. O estágio fenológico V12, apresentou maiores valores de correlação com a produtividade de grãos com NDRE (plataforma SARP), obtendo R²= 0,44.

Palavras-chave: NDRE. Estádio Fenológico. SARP.

VEGETATION INDEXES IN DIFFERENT PHENOLOGICAL STAGES AND GRAIN YIELD OF MAIZE

6.2 ABSTRACT

Vegetation indices (VIs) are used in several areas in agriculture, due to their possibility of being related to agronomic characters and consequently to grain yield. The objective of the study is to evaluate the relationship between VIs obtained in two different platforms (SARP and proximal) in different corn phenological stages with grain yield. The experiment had 5 treatments of different doses of nitrogen, in order to generate variability of the yield potential of corn, being: 20, 60, 120, 180 and 240 kg ha⁻¹ of N, in 4 blocks with 5 replicates each. NDRE and NDVI (proximal platform, Optrx sensor), and NDRE, NDVI, EVI2 and GNDVI (SARP platform, MicaSense Parrot Sequoia sensor) were performed at the phenological stages: V5, V6, V7, V9, V11 and V12. Subsequently grain yield was collected to perform the relationships with the evaluated IVs. The IVs in the SARP platform

obtained significant relationships with corn grain yield, however the proximal platform did not obtain significant relationships. Phenological stages V9, V11 and V12 obtained high values of grain yield correlation in VIs: NDRE, NDVI and EVI2 of the SARP platform. The phenological stage V12, presented higher correlation values with grain yield with NDRE (SARP platform) with $R = 0.44$.

Keywords: Productivity. Vegetation Index. UAV.

6.3 INTRODUÇÃO

A identificação da variabilidade espacial e temporal, dentro de um determinado local, vêm demonstrando potencial para apoiar os conceitos de gestão de culturas, atendendo grande parte das crescentes pressões ambientais, econômicas e de mercado nas terras agricultáveis (STAFFORD, 2000).

Existem diversas maneiras de se estimar a produtividade de grãos de culturas agrícolas, incluindo métodos destrutivos e outros que preservam as plantas. A respeito dos primeiros, apesar de serem considerados mais precisos, apresentam o inconveniente de serem mais onerosos e demorados de serem empregados, principalmente em grandes áreas (PANNETON e BROUILLARD, 2009). Assim, tecnologias que possuem capacidade de mensurar características que se relacionam com a produtividade de grãos são de grande valia para predição de produtividades à nível de campo. A plataforma UAV pode fornecer imagens de alta resolução espaço-temporal, e algumas das pesquisas exploratórias têm conduzido para predição de rendimento (X. ZHOU et al., 2017)

Sensores remotos tanto à nível de satélite ou embarcados em sistemas de aeronave remotamente pilotada (SARP) e sensores proximais podem auxiliar no levantamento de informações ópticas para confecção de índices de vegetação (IVs), que podem ser relacionados com a produtividade de grãos de milho (PERALTA et al., 2016; SCHWALBERT et al., 2018).

Para tanto, a seleção dos IVs mais apropriados para cada situação é passo determinante para o desenvolvimento de modelos de predição da produtividade de grãos (PERALTA et al., 2016). O índice de vegetação por diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*) (ROUSE et al., 1973) é um dos IVs mais amplamente utilizados para avaliar o crescimento e a produtividade das culturas (RAUN et al., 2011; PERALTA et al., 2016).

No entanto, existem algumas restrições relacionadas à saturação nos valores de índice de área foliar (IAF) médio e alto quando utilizado o NDVI (HABOUDANE et al., 2004; NGUY-ROBERTSON et al., 2012). Assim, a incorporação de outros IVs que possuam sensibilidade em altos valores de IAF, tais como NDRE (*Normalized Difference Red Edge*) (GITELSON; MERZLYAK, 1994; PERALTA et al., 2016), e o GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*) (GITELSON et al., 1996; SCHWALBERT et al., 2018) têm sido

utilizados para aprimorar modelos de predição (HATFIELD et al., 2008; PERALTA et al., 2016; SCHWALBERT et al., 2018).

Segundo Milani et al. (2006), a predição das condições de desenvolvimento das culturas em um determinado estágio fenológico viabiliza o manejo de sítio-específico em lavouras, como fertilizações em taxas variáveis georreferenciadas. O uso de IVs provenientes de plataformas sensoriadas (Satélites, SARP ou proximal), permitem que se realize a identificação, em tempo real e *in situ* do estado nutricional e do potencial produtivo, em diferentes estádios vegetativos da cultura do milho, que possibilita que a adubação nitrogenada possa ser ajustada e aplicada de acordo com o potencial produtivo estimado (Li et al., 2010; Vian et al., 2018).

Os IVs podem ser gerados durante todos os estádios de desenvolvimento da cultura. Apesar disso, as relações dos IVs com a produtividade de grãos em função dos estádios de desenvolvimento do milho são pouco conhecidas, sendo importantes para o desenvolvimento de algoritmos adaptados para a cultura. A correlação dos IVs com dados que reflitam o resultado final do desenvolvimento da cultura, a exemplo da produtividade de grãos, é de suma importância para predizer potenciais produtivos dentro das áreas agrícolas (SCHWALBERT et al., 2018).

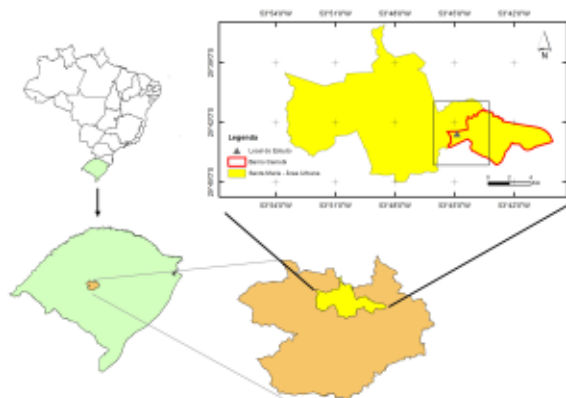
Nesse sentido, o conhecimento dos IVs para os principais estádios fenológicos da cultura do milho assume relevante papel. O objetivo deste estudo foi avaliar as correlações entre IVs obtidos em diferentes estádios fenológicos, em plataforma proximal e em SARP, com a produtividade de grãos de milho e a partir disso, criar modelos para estimativa da produtividade com base nos valores dos IVs sensoriados em distintos estádios fenológicos do milho.

6.4 MATERIAL E MÉTODOS

6.4.1 Caracterização do local de execução do experimento

O experimento foi implantado e conduzido no ano agrícola 2017/2018, na área experimental do Colégio Politécnico, localizada no campus da Universidade Federal de Santa Maria (Figura 1), na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, em latitude 29° 43' S, longitude 53° 44' O e 112 m de altitude. De acordo com a classificação climática de Alvarez et al. (2013), o clima da região é o “Cfa”, com temperaturas médias anuais de 19,3°C e precipitação média anual de mais de 1700 mm. O solo da área foi descrito e classificado como Argissolo Vermelho Eutrófico arênico (SANTOS et al., 2015), pertencente à Unidade de Mapeamento São Pedro (BRASIL, 1973; STRECK et al., 2008). A litologia da área é constituída por rochas sedimentares, da formação geológica Formação Santa Maria, que data do Triássico superior. Seu material de origem é composto por siltito argiloso (Membro Alemoa) da Formação Santa Maria, ocorrendo em relevo suave ondulado. No local, foram coletadas amostras compostas de solo, a partir de subamostras representativas, na profundidade 0-10 cm, com vistas a realização das análises químicas, para nortear a recomendação da adubação da lavoura de milho, e do enquadramento da classe textural do solo nesta faixa de cultivo (Tabela 1).

Figura 1– Localização da área experimental.



Fonte: o autor.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos inteiramente casualizados. Na área foram implantados sob pivô central, quatro blocos medindo 20 x 20m, cada qual,

totalizando 400 m² individualmente. Em cada bloco, foram distribuídos cinco tratamentos que constituíram as parcelas individuais, nas medidas de 4 x 4m, com cinco repetições cada, perfazendo uma área experimental de 1.600 m² (Figura 2).

Figura 2 – Esquema experimental utilizado.



O milho foi semeado no dia 24 de outubro de 2017, empregando-se a variedade Pioneer 30F53 YH, com 0,5 metros de espaçamento entrelinhas e 4 sementes por metro, totalizando 80.000 plantas por hectare, na população final, após procedimento de desbaste (para fins de uniformização do número de plantas). A sua aplicação ocorreu a lanço, em cobertura, e em evento único (sem parcelamento de dose), no dia 02 de novembro, ou seja, transcorridos 8 dias pós-semeadura do milho. Na referida data, ocorreu uma precipitação de 17,4 mm (dados da estação do INMET Santa Maria), e no dia seguinte, registrou-se outro evento pluviométrico de 20,4 mm, ambos contribuindo para a incorporação e solubilizando satisfatória da uréia.

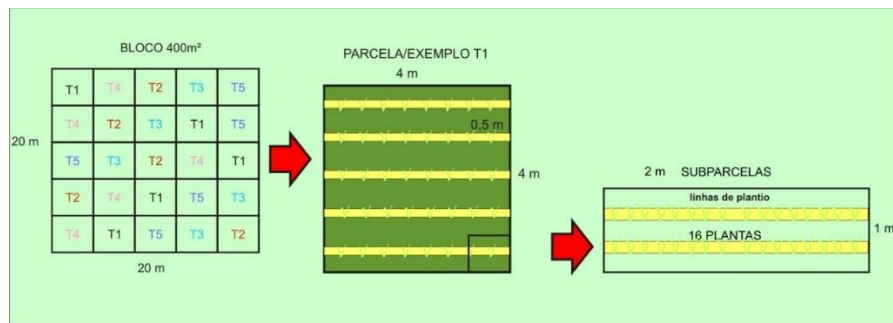
A fertilização de base consistiu em 150 kg ha⁻¹ da fórmula NPK 05-30-15. As doses de N que constituíram os tratamentos distintos de adubação nitrogenada foram fornecidas na forma de uréia (45%) complementares a adubação de base, onde: T1: 20 kg de N ha⁻¹; T2: 60 kg de N ha⁻¹; T3: 120 kg de N ha⁻¹; T4: 180 kg de N ha⁻¹; T5: 240 kg de N ha⁻¹.

6.4.2 Obtenção dos dados sensoriados via terrestre e embarcados em SARPs

Para os trabalhos de sensoriamento, procedeu-se a subdivisão das parcelas (de 16m²) em 8 repetições, cada qual, com área de 2 m² (Figura 3), e constituída por 16 plantas alvo.

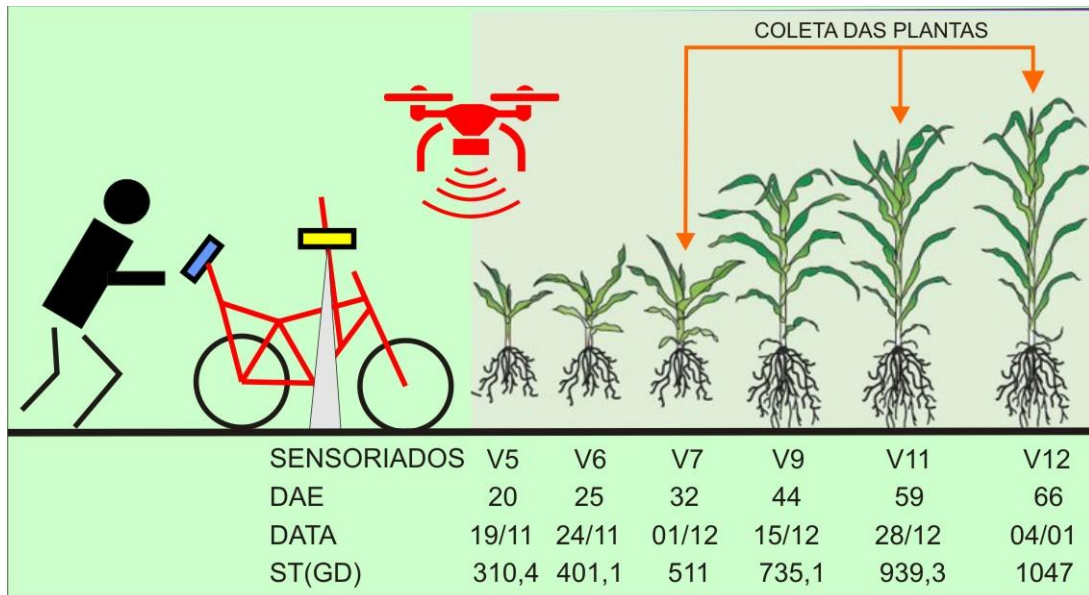
Assim, ao final, 800 repetições foram sensoriadas, tanto em procedimentos terrestres como aéreos, ambos realizados nos estádios fenológicos V5, V6, V7, V9, V11 e V12.

Figura 3 – Esquemática ilustrativa dos blocos, parcelas e repetições que constituíram a área experimental.



A obtenção das mensurações com o sensor proximal, foram realizadas com o equipamento Optrx ACS 430TM (Ag Leader), o qual utiliza as bandas espectrais do vermelho (630 ± 5 nm), infravermelho próximo (770 ± 5 nm) e a região da borda do vermelho (730 ± 5 nm). As leituras foram executadas seguindo as especificações do fabricante, sendo o sensor proximal posicionado a uma altura fixa de 0,6 m acima do dossel vegetativo. Para tanto, o dispositivo Optrx fora acoplado à uma bicicleta, que deslocada paralelamente às linhas da cultura, e conduzida manualmente pelo operador, à velocidade constante de 1 m/s, proporcionou que todas as plantas de milho das repetições fossem sensoriadas (Figura 4). Para manter esta altura regular, o instrumento de leitura foi adaptado a um braço metálico retrátil (ajustado conforme ocorrência do crescimento da cultura ao longo do ciclo produtivo), o equipamento foi conduzido manualmente pelo operador com o leitor na vertical uma velocidade de 1 m/s, a bateria com capacidade de duração de 5 horas, permitiu a operação completa sem a necessidade de recarga ou troca, facilitando a operação.

Figura 4 – Estádios de desenvolvimento do milho avaliados com sensores proximais e embarcados; DAE: dias após a emergência; data: data da leitura; ST: soma térmica em graus dia (GD).



Um SARP caracterizado por uma aeronave modelo Phantom 4 (DJI[®]), foi utilizado para os procedimentos de levantamentos aéreos. O sensor embarcado constou de uma câmera Parrot Sequoia (MicaSense[®]), capaz de registrar a reflectância no comprimento de onda da região do verde ($550 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$), vermelho ($660 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$), borda do vermelho ($735 \pm 5 \text{ nm}$) e infravermelho próximo ($790 \pm 5 \text{ nm}$), com resolução de 1.2 Mp e resolução RGB de 16 Mp, equipada com sensor de irradiância incidente.

6.4.3 Processamento das imagens obtidas pelos sensores

Não foi necessária autorização de voo no portal de Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS), pois não houve acesso ao espaço aéreo Brasileiro. A aeronave está classificada como classe 3, peso de decolagem menor ou igual a 25 kg, o voo da aeronave foi realizado em operação em linha de visada visual (VLOS) e foi realizada conforme o disposto na ICA 100/40 item 10.3.2 – operações de sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (RPAS) em áreas confinadas.

As missões de voo foram compiladas no programa Dronedeploy[®], gerando um voo automático sobre a área em estudo, a 15 metros acima do dossel da cultura, com duração de cerca de 8 minutos cada. Essas missões ocorreram sempre no horário das 15:00 h GMT, quando o sol estava no seu zênite, utilizando 80 % de recobrimento tanto na lateral quanto longitudinal.

O pixel gerado foi de 3,7 cm/ px⁻¹ no monocromático e 0,8 cm/ px⁻¹ no modo RGB. A câmera foi operada no modo automático, onde as bandas foram tratadas separadamente. Em cada missão obteve-se 177 imagens por banda adquirida, totalizando um conjunto de 885 imagens, sendo as mesmas descarregadas diretamente em computador através de cabo USB. As imagens geradas estão na extensão TIF.

O programa empregado para tratar e extrair as informações das imagens foi o PIX4D mapper Pro-Educational[®], versão 3.3.29. Em todas as etapas, após executados os processamentos das informações geradas: Georreferenciamento das imagens, ortorectificação e mosaicagem, posteriormente elaboram-se os seguintes índices: NDRE (Eq.1), NDVI (Eq.2), eEVI2 (Eq.3) e GNDVI (Eq.4) (Tabela 1). Estes processos foram realizados no software ArcGIS Desktop[®]. Para a geração dos mapas temático de produtividade foi escolhido o melhor bloco que no experimento foi o número cinco, neste bloco foi organizado no Excel as seguintes colunas: tratamentos de T1 a T1 com suas respectivas repetições, produtividade, a média do NDRE de cada tratamento, e a produtividade estimada pela equação de regressão (Figura 8), cada linha da tabela foi georreferenciada e obtidas as coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), para especializar a informação. Os mapas temáticos foram confeccionados utilizando método krigagem com a confecção de semivariograma, modelo de Gauss, utilizando o software R.

Tabela 1 – Índices de vegetação (IVs) e suas respectivas equações determinantes.

	Índice	Equação
(1)	NDRE	$(R_{IVP} - R_{BV}) / (R_{IVP} + R_{BV})$
(2)	NDVI	$(R_{IVP} - R_V) / (R_{IVP} + R_V)$
(3)	EVI2	$2.4 (R_{IVP} - R_V) / (R_{IVP} + 2.4R_V + 1)$
(4)	GNDVI	$(R_{IVP} - R_G) / (R_{IVP} + R_G)$

R= reflectância. IVP = infravermelho próximo, BV = borda do vermelho, V = vermelho, G = verde.

6.4.4 Colheita e beneficiamento do milho

O processo de colheita e beneficiamento foi realizado de forma manual, sendo a coleta e embalagem das espigas, assim como a quantificação da produtividade, executadas individualmente. Após a colheita que totalizou 1600 m², foi efetuada a debulha mecanizada,

utilizando um debulhador acoplado a um trator. A determinação da leitura da umidade dos grãos ocorreu antecedendo a debulha de cada bloco/tratamento, fazendo uso de equipamento da marca agrológic, modelo AL-101, com balança acoplada.

6.4.5 Análises dos dados

Testou se a normalidade dos dados usando o Shapiro teste, os dados que não apresentaram normalidade foram submetidos a rotina Box-Cox nos parâmetros avaliados. Detectou-se que a maioria dos dados são não normais, mas devido a abundância dos dados mais de 3.000,00 informações (big data), foi realizada a análise de correlação e equação da reta, onde foi testada a normalidade do resíduo da análise de variância, que discriminou a normalidade e o R^2 nos parâmetros avaliados, cujos gráficos estão inseridos.

As leituras de IVs com a produtividade foram relacionadas através da análise de correlação de Pearson, $P < 0,05$. Para gerar os mapas temáticos, utilizou-se um pacote de ferramentas do software Excell (MICROSOFT OFFICE, 2013), onde calculou-se uma equação de regressão para estimar a produtividade.

Esta equação foi determinada da seguinte forma: em V12 foram isolados os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5 dos 4 blocos, onde considerando-se o índice NDRE e a produtividade, formou-se um conjunto de 543 observações do índice. Destas amostras, foram separadas 271 amostras, com vistas à geração da equação pelas médias de T1, T2, T3, T4 e T5 e da produtividade. Buscando validar o modelo, foram usadas as 272 amostras restantes, obtendo-se, novamente, as médias dos tratamentos e da produtividade, possibilitando testar a equação.

6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produtividade de grãos do experimento obteve média de 7.529 Mg ha⁻¹, obtendo variação entre os tratamentos de 4855 até 9663 Mg ha⁻¹ (Figura 5). Atribui-se essa discrepância de produtividade de grãos ao efeito dos tratamentos com diferentes doses de N dispostos no experimento.

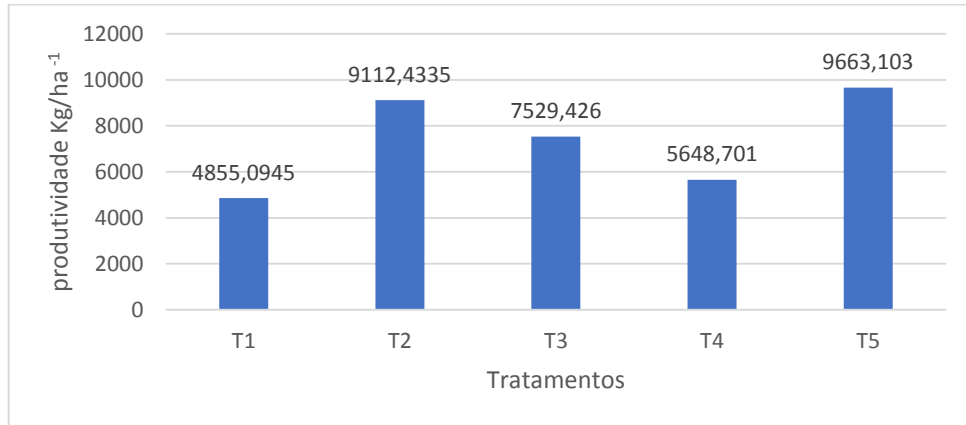
A expectativa média de produtividade do milho, no Estado do RS, para a safra agrícola de 2018/2019, sob condição de irrigação é de cerca 14.800 Mg ha⁻¹, e atualmente, entre os dois sistemas de cultivo (irrigado e sequeiro), admite dois cultivos anuais (safra e safrinha), abrangendo cerca de 397 municípios, ocupando uma área de aproximadamente 367.124 ha, com registros de produtividade de cerca de 6.455 Mg.ha⁻¹ para a condição de sequeiro, na safra 2017/2018 (EMATER/RS, 2019). De acordo com esta fonte, para 2019, estima-se que a produção de sequeiro atinja patamares superiores a 5.500.000 Mg, com produtividade de cerca de 7.350 Mg ha⁻¹. No cenário Nacional, atribui-se que, a diminuição da média ponderada da produção na safra 2018/2019, em relação à safra anterior e a safra histórica, decorreu da falta de chuvas no mês janeiro.

Nos cenários de dependência das condições meteorológicas, dentre outras, específicas das áreas de cultivo, a capacidade de predizer a produtividade da cultura do milho, de forma rápida e utilizando métodos não destrutivos, em tempo real, baseados no Sensoriamento Remoto é tendência crescente, de grande aplicabilidade nas tomadas de decisão (BOLTON e FRIEDL, 2013; ZHAO et al., 2007).

Neste trabalho, no que tange os resultados obtidos nos tratamentos T3 e T4 (Figura 5), existia a expectativa de que acompanhassem certa tendência de crescimento, acompanhando a relação das doses de N aplicado (RAUN et al., 2008). A não verificação destes resultados, pode ser justificada por prováveis distúrbios fisiológicos, decorrentes da salinização da rizosfera, devido ao excesso de N aplicados em uma dose única.

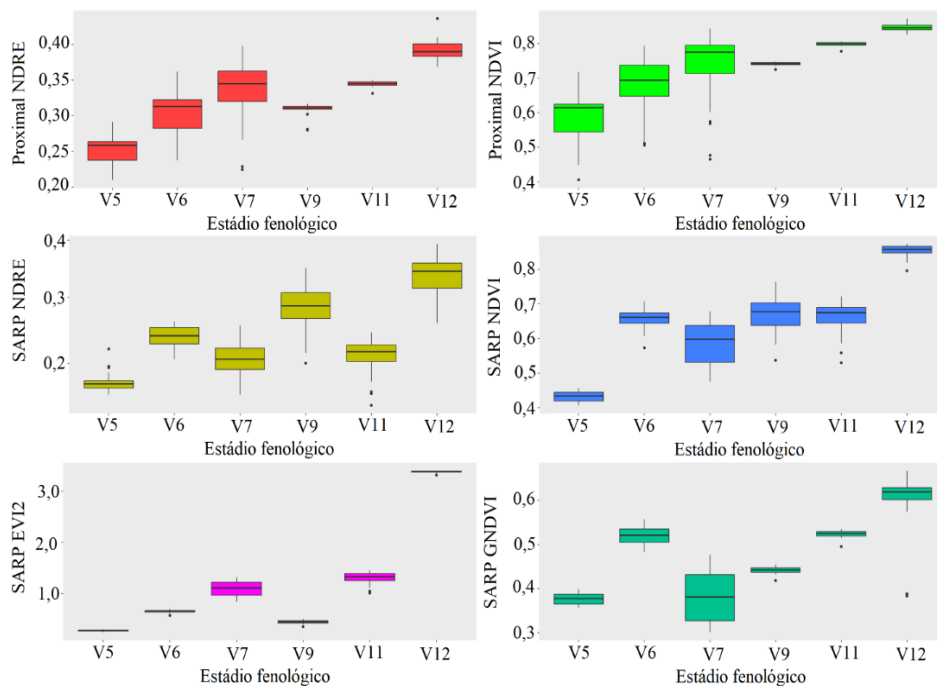
O fato do tratamento T2 ter apresentado produtividade semelhante ao T5, pode estar associado à expressão da eficiência dos híbridos modernos atingirem boas produtividades, mesmo submetidos à baixas doses de N (CASTLEBERRY et al., 1984; CARLONE e RUSSELL 1987; SANGOI et al., 2002; ECHARTE et al., 2008. CIAMPITTI e VYN, 2011; ZHANG et al., 2014), e também o T5 em função da dose de N aplicado não atingiu o seu potencial produtivo esperado, ficando abaixo do esperado.

Figura 5 – Produtividade de grãos de milho em relação aos tratamentos de diferentes doses de N com barras de erro padrão, cultivado na safra agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.



Com relação aos IVs, obteve-se diferentes comportamentos em função dos estádios de desenvolvimento da cultura do milho, para NDRE e NDVI através de sensor proximal e os índices. A sensibilidade dos IVs em cada estágio fenológico variou de forma heterogênea, quanto a capacidade de detecção da variabilidade das condições de desenvolvimento da cultura, refletindo-se nas relações com a produtividade de grãos.

Figura 6 – Boxplot dos índices de vegetação nos diversos estádios fenológicos da cultura do milho. Ano agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.

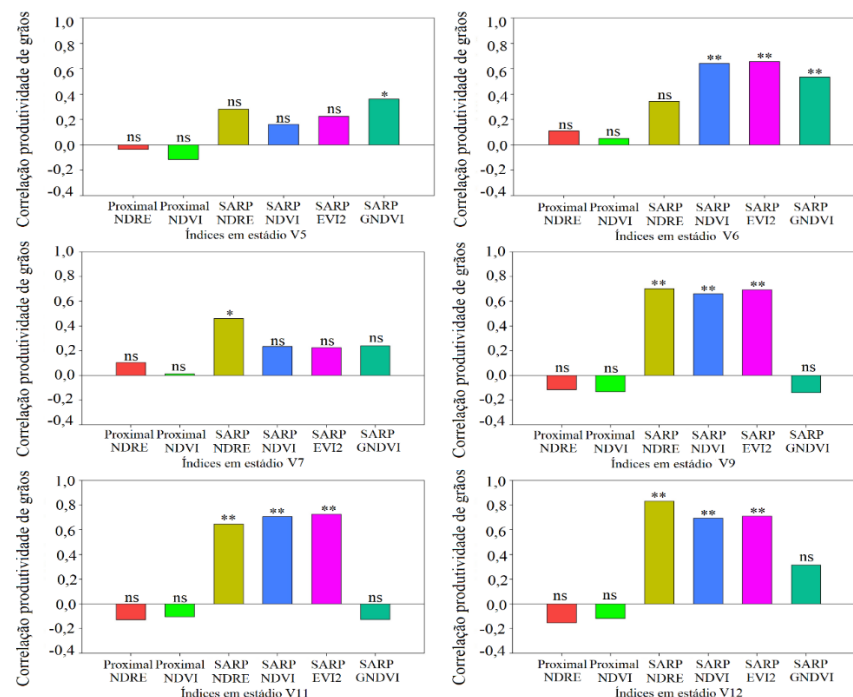


Tanto para os IVs captados através do sensor proximal, como os embarcados na plataforma SARP, os valores sofreram incrementos nítidos ao longo dos estádios fenológicos, da mesma forma que relatado por X. Zhou et al. (2017). No entanto, apenas aqueles obtidos pela SARP, tiveram a sensibilidade em distinguir comportamentos diferenciados nos estádios V7 e V9 (Figura 6).

De forma geral, os IVs da plataforma SARP obtiveram valores variados de correlação, conforme o índice em questão e de acordo com os estádios fenológicos. A correlação da produtividade de grãos do milho com as leituras dos IVs nos diferentes estádios fenológicos da cultura (Figura 7) evidenciou que se destacaram os estádios de desenvolvimento mais tardios, isto deve-se a resposta a biomassa (GITELSON et al, 2013).

A exemplo disso, em V12, os valores das correlações foram mais expressivos, obtendo-se para índices NDRE, NDVI e EVI2 da plataforma SARP coeficientes de correlação de 0,83, 0,69 e 0,70, respectivamente. Estes resultados estão de acordo com os esperados, considerando que estudos anteriores apontam que índices de vegetação compostos da banda do infravermelho próximo (NDVI) e da borda do vermelho (NDRE) apresentam alta correlação com a produtividade (X. ZHOU et al., 2017).

Figura 7 – Correlação da produtividade de grãos de milho, com as leituras dos IVs, em diferentes estádios fenológicos. Ano agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS. Legenda: ns= não significativo. *= P<0.05, **= P<0.01.



Com relação aos resultados obtidos para os estádios iniciais da cultura, temos que, em V5, apenas o GNDVI obteve correlação significativa com a produtividade de grãos. Isto pode ser atribuído à forte associação do comprimento de onda verde ao teor de clorofila das plantas e, portanto, ao status de N. Resultado deste trabalho mostra que os valores lidos para este índice, nesse período, foram consoantes com a indicação de disponibilidade de N na cultura de acordo com observado por (FOX e WALTHALL, 2008; HUNT et al., 2013).

Considerando que o GNDVI é calculado similarmente ao NDVI, diferenciando-se apenas pela substituição da faixa do vermelho pela faixa no comprimento de onda verde, admite-se que o índice também mantém estreita relação com a proporção de radiação fotossinteticamente absorvida. Desta forma, o GNDVI pode ser linearmente correlacionado com Índice de Área Foliar (LAI) e com a biomassa, sendo, portanto, mais sensível à detecção das alterações na quantificação da clorofila (GITELSON, 2006).

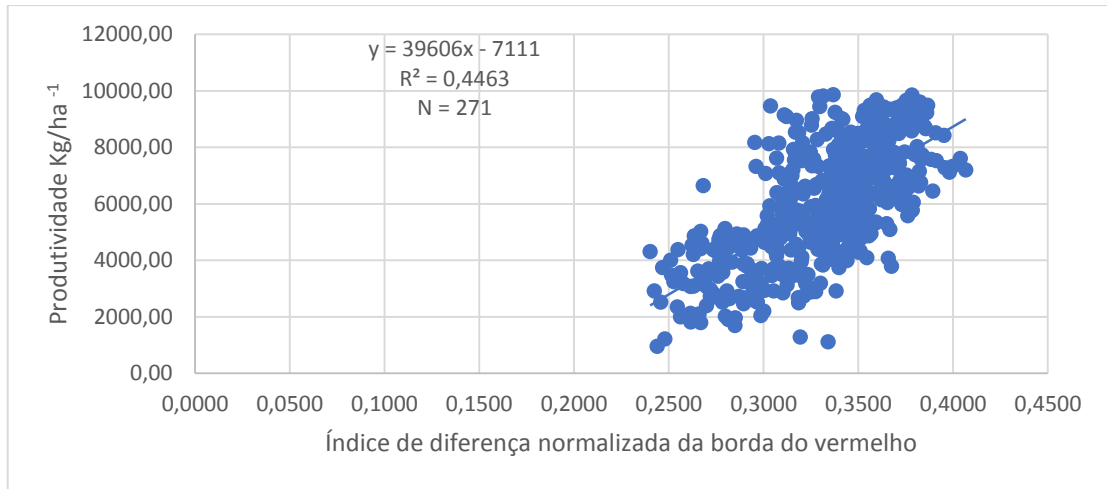
Já para o estádio V6, os IVs NDVI, EVI2 e GNDVI da plataforma SARP obtiveram correlações significativas. Nos estádios fenológicos posteriores, o GNDVI não se correlacionou com a produtividade de grãos, ainda que se atribua a sua utilização em relações estabelecidas a partir da variabilidade de mapas de colheita de milho (SHANAHAN et al., 2001).

No estádio V7, apenas NDRE da plataforma SARP obteve relações significativas com a produtividade de grãos. Enquanto isso, nos estádios fenológicos V9, V11 e V12, apenas os IVs NDRE, NDVI e EVI2 destacaram-se com altas correlações com a produtividade de grãos. Destes, o NDRE da plataforma SARP no estádio V12 obteve maiores valores de correlação, com $R=0.83$.

Já com relação aos IVs NDRE e NDVI do sensor proximal, as relações com a produtividade de grãos, nas condições testadas, não foram significativas, para nenhum estádio fenológico. Vian et al. (2018), utilizando o sensor proximal GreenSeeker, determinou classes de potencial produtivo em diferentes estádios de desenvolvimento do milho, de V3 à V8. No entanto, ainda se fazem necessárias verificações das relações entre os valores de NDVI e produtividade de grãos, para estabelecimento das classes de limites críticos de NDVI (MILANI et al., 2006; VIAN et al., 2018).

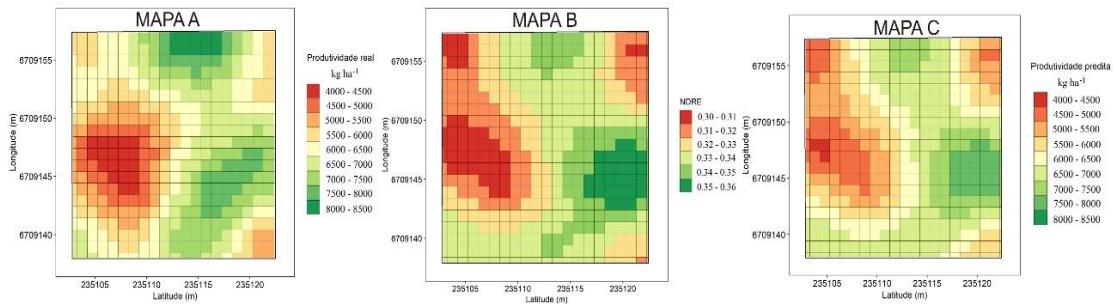
Na sequência da realização das análises de correlação entre produtividade e os distintos IVs testados, nos diferentes estádios da cultura do milho, elegeu-se o índice com maior correlação com a produtividade de grãos, gerando-se uma equação de regressão, e a partir dela, um modelo estimador da produtividade para posterior confecção dos mapas (Figura 8).

Figura 8 – Modelo gerado para estimar a produtividade em V12, a partir do índice NDRE do sensor embarcado com a equação e coeficiente de determinação.



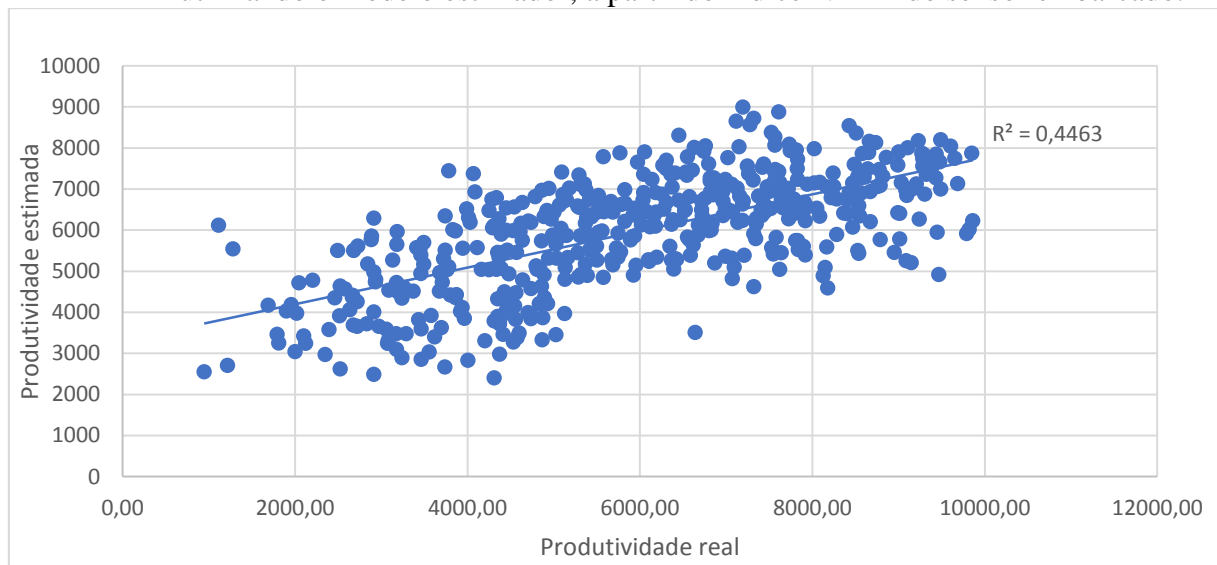
Assim, o modelo estimador foi gerado para o estádio V12, utilizando o índice NDRE do sensor embarcado (Figura 8), onde foi obtido um coeficiente de determinação considerado útil, conforme (QUININO e BESSEGATO, 2013). Realizando uma análise subjetiva do coeficiente de correlação, com valor de $R^2 = 0,4463$, podemos afirmar que possui uma relação ligeira a substancial, de acordo com proposto por Fernandes (2011). Na figura 9, pode-se observar a similaridade dos mapas temáticos de NDRE da plataforma SARP, no estádio V12, com a produtividade de grãos do milho. Uma vez estabelecidas as relações entre IVs com a produtividade de grãos, torna-se possível utilizar modelos, com base na caracterização da variabilidade espacial da produtividade de grãos, mesmo em estágios que antecedem à colheita do milho. Essas relações dos IVs com a produtividade de grãos assumem, portanto, importante papel nas tomadas de decisões que impactam na produtividade, principalmente em zonas que possuam diferentes potenciais produtivos, contribuindo para que os resultados possam ser maximizados (LI et al., 2010; VIAN et al., 2018).

Figura 9 – Mapa temático de NDRE da plataforma SARP estádio V12, mapa temático da produção real (A), mapa temático do índice de vegetação (B) e mapa temático da produtividade prevista pelo estimador do índice (C) do bloco 5 da área experimental.



Após a análise dos mapas temáticos, foram realizadas comparações entre a produtividade calculada e a produtividade prevista com o modelo estimador, utilizando os valores médios dos tratamentos e suas repetições (Figura 10). Nesta etapa, foi possível identificar valor elevado do coeficiente de correlação entre estas variáveis.

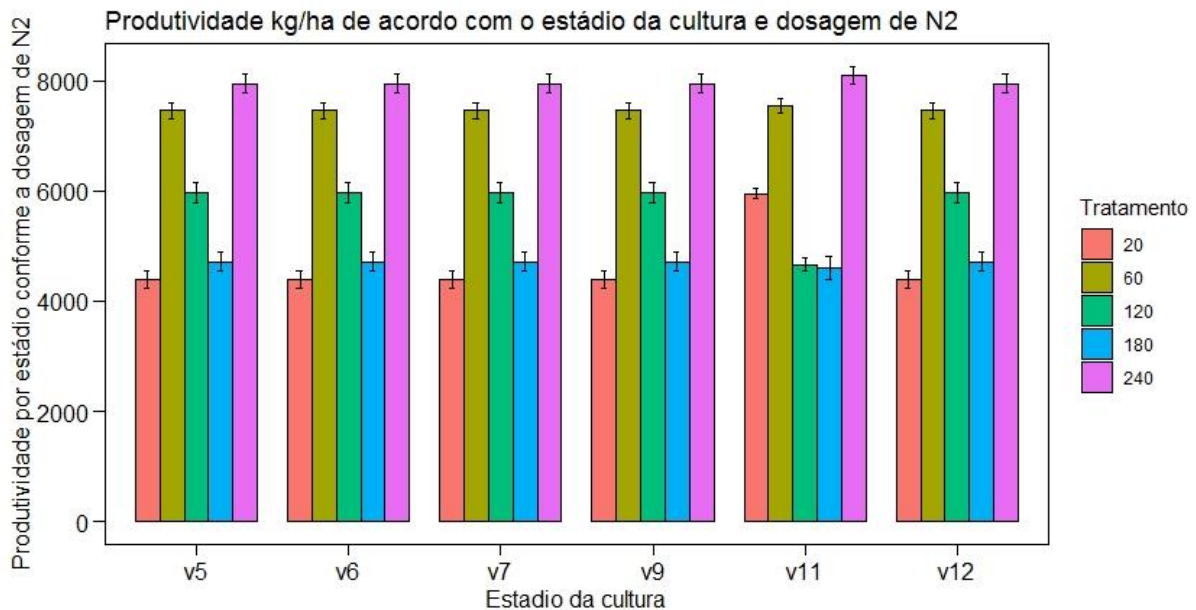
Figura 10 – Comparação entre a produtividade real e a estimada como potencial, em V12, utilizando o modelo estimador, a partir do índice NDRE do sensor embarcado.



Os desempenhos da produtividade mensurada na colheita, relacionada com os diferentes tratamentos de doses distintas de N (Figura 11), apresentaram comportamentos semelhantes em V5, V6, V7, V9 e V12, sendo que em todos eles, o padrão de produtividade refletiu resposta às quantidades de N aportadas. No entanto, isso não foi verificado no estádio V11, onde ocorreu alteração significativa no padrão de comportamento, em que a produtividade de T3 foi muito semelhante à obtida para T4. Esse resultado demonstra que, neste estádio, o milho não

conseguiu acompanhar o padrão de resposta esperado para este tratamento. Atribui-se tal modificação no desempenho produtivo, ao período de estresse hídrico que a lavoura foi submetida, nesta etapa do seu desenvolvimento.

Figura 11 – Relação da produtividade com os tratamentos nos diferentes estádios fenológicos avaliados.



Durante o verão, os raios solares atingem mais diretamente o hemisfério sul, de forma que, os dias tornam-se maiores do que as noites, sendo a quantidade de energia solar que chega na superfície do solo, neste período, promovendo aquecimento mais intenso. Tendo sido o Sensoriamento no estágio fenológico V11, realizado no dia 28 de dezembro (iniciando as 9:00 h da manhã e terminando perto das 13:00 h), consideramos as condições meteorológicas compreendidas até aquele período, obtidas pela estação climatológica da UFSM do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para melhor entendimento do fenômeno ocorrido.

O milho foi semeado dia 24 de outubro, tendo sua emergência ocorrida em 30 de outubro. Após a semeadura não ocorreram chuvas e a radiação acumulada foi de 56.029,75 KJ/m², até primeiro evento pluviométrico ser registrado nos dias 03 e d 04 de novembro, com valores acumulados, respectivamente, 17,4 mm e 20,4 mm. Até o final daquele mês, ocorreu acúmulo de 73,6 mm, e o registro da última chuva antes das leituras em V11 (ocorrida em 28 de dezembro), ocorreram dia 24 de dezembro. No entanto, no dia da leitura em V11, e nos dias que a antecederam, foram registradas temperaturas bastante elevadas.

No dia das coletas dos dados no estádio V11, a temperatura média foi de 26,01 C° e máxima de 30,5 C°. Considerando estas temperaturas elevadas, a precipitação deficitária, e a ocorrência de ventos de cerca de 7,6 km/h⁻¹ por dia, verificou-se um estresse hídrico de 214,8 mm sobre a cultura em que foi estabelecido esse estudo (Apêndice 1).

Há que se considerar que, apesar de conduzido em uma área sob pivot, problemas técnicos na funcionalidade de sistema de irrigação, ocorridos no momento crítico, implicou nos prejuízos apontados, e possivelmente, nos desempenhos observados nos valores das correlações obtidas em V11.

A seleção mais apropriada de IVs é de suma importância para o desenvolvimento de modelos de predição de variabilidade do potencial e conseqüentemente na produtividade de grãos de milho (PERALTA et al., 2016). Essa variabilidade do potencial produtivo deve ser estimada durante o desenvolvimento vegetativo, para que ocorra direcionamento do manejo, buscando a maximização da produtividade de grãos (GROHS et al., 2009; VIAN et al., 2018). Com a possibilidade de utilização dos sensores em SARP, esta tecnologia pode ser adaptada à diversas escalas de cultivo, desde pequeno até grande produtor (ZHANG e KOVACS, 2012).

Diante do exposto, temos que, neste cenário da agricultura moderna, que demanda acesso rápido às informações que norteiam tomadas de decisão, aliando-se a utilização de cultivares com maior expectativa de produtividade e tecnologias de detecção das demandas nutricionais das plantas, os IVs revelam-se importantes aliados. Esse trabalho verificou a pertinência da viabilidade do uso dos IVs na predição da produtividade, permitindo inferir que os sensores embarcados carregam diversas vantagens em relação aos terrestres, possibilitando, inclusive, aliar de forma viável, sua aplicabilidade ao uso conjunto com o estimador de produtividade.

6.6 CONCLUSÕES

Os IVs mensurados através da plataforma SARP obtiveram relações significativas com a produtividade de grãos de milho, o que não foi verificado nos IVs provenientes da plataforma proximal.

Nos estádios fenológicos V9, V11 e V12 foram registrados altos valores de correlações com a produtividade de grãos nos IVs NDRE, NDVI e EVI2 da plataforma SARP.

Dentre os estádios fenológicos quantificados, o mais tardio (V12) apresentou melhores valores de correlação com a produtividade de grãos ($R^2= 0,44$), utilizando o índice NDRE (plataforma SARP).

O estágio mais precoce para a estimativa da produtividade, com as maiores correlações, foi observado em V6, utilizando os índices NDVI, GNDVI e EVI2 da plataforma embarcada.

Não se recomenda sensoriar plantas sob estresse hídrico.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A.; et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p.711–728, 2013.
- ARCGIS, ArcGIS. **An Overview of Map Projections**. Fevereiro de 2009. Disponível em. Acessado em 15 de dezembro de 2018. 2009.
- BENDER, R.R.; et al. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. **Agronomy Journal**, v.105, p.161-170, 2013. DOI: 10.2134/agronj2012.0352
- BOLTON, D.K., FRIEDL, M.A.. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. **Agric. For. Meteorol.** 173, 74–84, 2013.
- BRASIL. Ministério de Agricultura. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. Recife**, 431 p., 1973.
- CARLONE, M.R.; RUSSELL, W.A. Response to plant densities and nitrogen levels for four maize cultivars from different eras of breeding. **Crop Sci.** 27:465–470, 1987.
- CASTLEBERRY, R.M., CRUM, C.W. & KRULL, F. Genetic yield improvement of U.S. maize cultivars under varying fertility and climatic environments. **Crop Sci.** 24:33–36, 1984.
- CIAMPITTI, I.A.; VYN, T.J. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. **Field Crops Res.** 121:2–18, 2011.
- CONAB. Observatório Agrícola. Cultivos de verão, safra 2108/2019. **Boletim Monitoramento Agrícola**, Brasília, v. 08, n.1, Jan, 2019, p. 1-27. ISSN: 2318-3764 Disponível em: <file:///C:/Users/Filipi%20pro%20campo/Downloads/BoletimZdeZMonitoramentoZVeraoZJanZ2019_1.pdf>. Acesso em: 23 de maio de 2019.
- ECHARTE, L., ROTHSTEIN, S.; TOLLENAAR, M. The response of leaf photosynthesis and dry matter accumulation to nitrogen supply in an older and a newer maize hybrid. **Crop Sci.** 48:656–665, 2008.
- EMATER/RS. Estimativa da Área de plantio, produção e produtividade. **Acompanhamento da safra de verão 2018/2019**. Gerência de Planejamento Núcleo de Informações e Análises Março de 2019. Disponível em :<http://www.emater.tche.br/site/arquivos_pdf/safra/safraTabela_27032019.pdf>. Acesso em: 23 de maio de 2019.
- FOX, R. H.; WALTHALL, C. L. Crop monitoring technologies to assess nitrogen status. In J. S. Schepers, &W. R. Raun (Eds.), **Nitrogen in agricultural systems, agronomy monograph 49** (pp. 647e674). Madison, USA: ASA, CSSA, SSSA, 2008
- GITELSON, A.; MARZLYAK, M.N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features

and relation to chlorophyll estimation. **Journal of Plant Physiology**, v.143, n.3, 286-292, 1994.

GITELSON, A.A.; KAUFMAN, Y.J.; MARZLYAK, M.N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v.58, n.3, p.289-298, 1996.

GITELSON, A.A., KEYDAN, G. P.; MERZLYAK, M.N. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves. **Geophysical research letters**, vol 33, 2006.

GITELSON, A.A, et al. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. **Geophysical Research Letters**, vol 30, 2013.

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.

HABOUDANE, D. et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v.90, p.337-352, 2004.

HATFIELD, J.L. et al. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. **Agronomy Journal**, 100(Supplement_3), S-117, 2008.

HUNT, E. R., et al. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 21, 103e112, 2013.

LEOTTI, V. B; BIRCK, A. R.; RIBOLDI, J. Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorov-smirnov, AndersonDarling, Cramer-Von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação. **11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agrônômica e a 50ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS)**. Anais. Londrina, PR, Brasil. 2005.

LI, Y.; CHEN, D.; WALKER, C.N.; Angus, J.F. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. **Field Crops Research**, v.118, n.3, p.221-227, 2010.

MICROSOFT OFFICE. **Editor de planilhas Excel**, versão 2013, Sistema Operacional Windows 10.

MILANI, L. et al. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.28, n.4, p.591-598, 2006.

MORENO J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**, 1961.

NGUY-ROBERTSON, A. et al. Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. **Agronomy Journal**, v.104, p.1336-1347, 2012.

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

PERALTA, R.N. Mid-season high-resolution satellite imagery for forecasting site-specific corn yield. **Remote Sensing**, v.8, n.10, p.848, 2016.

PIX4D. **Pix4dmapper Software Manual Pix4D Support. Lausanne**, Suíça: Pix4D SA.2013b. Disponível em: <<https://support.pix4d.com/forums/22655307-Manual>>.

QUININO, R. C.; REIS, E. A.; BESSEGATO, L. F. Using the coefficient of determination R2 to test the significance of multiple linear regression. **TeachingStatistics**, v. 35, p. 84-88, 2013.

R CORE TEAM (2015). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

RAUN, W., et al. Ramp calibration strip technology for determining midseason nitrogen rates in corn and wheat. **Agron. J.** 100, 1088–1093, 2008.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L. Independence of yield potential and crop nitrogen response. **Precision agriculture**, v.12, n.4, p.508-518, 2011.

ROUSE, J.W. **Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation**. Texas A&M University: College Station, TX, USA, pp. 1–137, 1973.

SANGOI, L., et al. Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density. **Field Crops Res.** 79:39–51, 2002.

SANTOS, H.G., et al. **Embrapa: Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3ª ed, Brasília. 353p., 2013.

SCHWALBERT, R.A. et al. Forecasting maize yield at field scale based on high-resolution satellite imagery. **Biosystems Engineering**, v.171, p.179-192, 2018.

SHANAHAN, J.F. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. **Agronomy Journal**, v.93, p.583-589, 2001.

SILVA, C.G.M et al. Exportação de macro nutrientes por híbridos de milho cultivados em ambientes com diferentes níveis de investimento tecnológico. **XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 2015.

STAFFORD, J.V. Implementing precision agriculture in the 21st century. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.76, n.3, p.267–275, 2000.

VIAN, A.L., et al. Limites críticos de NDVI para estimativa do potencial produtivo do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.17, n.1, p.91-100, 2018.

X. ZHOU et al. Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. Volume 130, p. 246-255, 2017.

ZANZARINI et al. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.6, p.608–614, 2013.

ZHAO, D. et al. Canopy reflectance in cotton for growth assessment and lint yield prediction. **Eur. J. Agron.** 26, 335– 344, 2007.

ZHANG, C.; KOVACS, J.M. The application of small-unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. **Precision Agriculture**, v.13, n.6, p.693–712, 2012.

ZHANG, R. Changes of grain yield and nitrogen use efficiency of maize hybrids released in different eras in Shaanxi Province. **Acta Agron. Sin.** 40:915–923, 2014.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste trabalho de pesquisa permitiu inferir, no primeiro artigo que os índices de vegetação expressaram seu potencial como ferramenta de detecção do estado nutricional da cultura do milho. A sua aplicação soa como proposta promissora em um futuro próximo, possibilitando a tomada de decisão em tempo real e intervenções durante o ciclo da cultura, favorecendo maiores incrementos na produtividade.

Dentre os índices, percebeu-se que aqueles que operam com o comprimento de onda na faixa do vermelho e verde são úteis para a tomada de decisões nos estádios iniciais da cultura, enquanto aqueles que operam no comprimento do infravermelho próximo e na borda do vermelho são melhor indicados para fazê-lo em estádios intermediários e avançados. Dentre esses, necessário destacar especialmente o NDRE, em razão do seu potencial de monitoramento da cultura até praticamente o período da colheita.

Situações de estresse da cultura, a exemplo do estresse hídrico ocorrido em V11, neste estudo, podem comprometer os valores dos IVs, trazendo prejuízos a sua interpretação, e conseqüente, uso na predição da produtividade.

As aeronaves remotamente pilotadas, cada vez mais presentes na agricultura, mostraram-se muito eficientes. Elas têm ganhado amplo espaço no mercado, em razão do pequeno tamanho da plataforma e das facilidades de aquisição. Além disso, trazem como vantagens, melhor resolução espacial, temporal e facilidade de manuseio, também são ferramentas capazes de embarcar sensores que avaliam a vegetação no visível, infravermelho e termal o que permite formas versáteis de avaliação do estado nutricional e sanitário das culturas. Os sensores proximais ainda apresentam custo elevado e morosidade no monitoramento das culturas quando comparados com SARP. Isto revela sua provável senescência nas futuras operações agrícolas, devido as referidas limitações diante das novas tecnologias disponíveis.

No segundo artigo a abordagem buscou relacionar os IVs com a produtividade da cultura do milho, onde o a plataforma SARP, obtiveram relações significativas com a produtividade de grãos de milho. Já para a plataforma proximal não foi possível estabelecer estas relações. Percebe-se também que alguns estádios fenológicos apresentam melhores valores de correlação com a produtividade na plataforma SARP, permitindo estimar a produtividade com bom nível de confiança, tendo sido considerado o melhor estádio o V12 e o melhor índice para a estimativa o NDRE. Foi possível determinar o estádio fenológico mais precoce para a estimativa da produtividade da cultura do milho.

Os índices de vegetação de maneira geral são muito afetados pelo estresse hídrico, isso revelou importante informação através da pesquisa, evidenciou-se decremento dos seus valores mesmo em estádios mais avançados, o que poderia conduzir a ideia errônea com a saturação dos índices de vegetação.

Como sugestão para trabalhos futuros aponta-se as seguintes considerações:

- O desenvolvimento e difusão de tecnologias que permitam maiores facilidades e acessibilidade à utilização dos SARPs, aliados aos sistemas de captura dos IVs, devem ser incentivadas e promovidas;

- Novos índices de vegetação, mais estreitamente direcionados aos estádios fenológicos da cultura do milho, podem ser desenvolvidos;

- O estabelecimento de relações entre índices de vegetação e sensores termais podem ser utilizadas para avaliar o estágio nutricional das plantas de milho;

- Relações entre produtividade e sensores termais devem ser exploradas;

- O desenvolvimento de estudos que promovam o sensoriamento de plantas submetidas a diferentes estresses (hídrico, fitoxidade, desfolhamento, nematoides) avaliando suas respostas quanto aos diferentes índices de vegetação.

8 REFERÊNCIAS

- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob Sistema de Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.1, p.241-248, 2002.
- BARNES, E.M.; CLARKE, T.R.; RICHARDS, S.E. et al. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. In: MADISON, WI. **5th international conference on precision agriculture**. 2000.
- BRASIL. Ministério de Agricultura. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 431p.
- CIAMPITTI, I.A.; VYN, T.J.. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. **Field Crops Res.** 121:2–18, 2011.
- CQFS-RS/SC, Comissão de Química e Fertilidade do Solo. Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina; SBCS-NRS: Brasil, 10 ed., Porto Alegre, 376p., 2016.
- EISENBEISS, H. **UAV Photogrammetry**. Doctor of sciences, University of Technology Dresden, Germany, 2009.
- EITEL et al., **Remote Sensing of Environment**, Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland Volume 115, páginas 3640-3646, 2011.
- FOX, R. H., & WALTHALL, C. L. Crop monitoring technologies to assess nitrogen status. In J. S. Schepers, & W. R. Raun (Eds.), **Nitrogen in agricultural systems, agronomy monograph 49** (pp. 647e674). Madison, USA: ASA, CSSA, SSSA, 2008.
- GITELSON, A. A. Wide Dynamic Range Vegetation Index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. **Journal of Plant Physiology**, Muenchen, v. 161, n. 2, p. 165–173, 2004.
- HORBE, T. A. N.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O.; ALBA, P. J. Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. **Precision Agriculture**, New York, v. 14, n. 4, p. 450-465, 2013.
- HUNT, E.R.J.; HIVELY, W.D.; DAUGTRY, C.S.T.; MCCARTY, G.W. Remote sensing of crop leaf area index using unmanned airborne vehicles. In Proceedings of the Pecora 17 **Conference, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, Denver, Colorado, 18–20 November, 2008.
- KAPPES, C.; ANDRADE J.A.C.; ARF, O.; OLIVEIRA, A.C.; ARF, M.V.; FERREIRA, J.P. Desempenho de híbridos de milho em diferentes arranjos espaciais de plantas. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.2, p.334-343, 2011.

LOPES, E.C.P.; MORAES, A.; SANDINI, I.E.; KAMINSKI, T.H.; BASI, S.; PACENTCHUK, F. **Relação da leitura do clorofilômetro com teores de nitrogênio na folha de milho em sistema de integração lavoura-pecuária**. In: Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 29., 2012. **Anais...** Águas de Lindoia: ABMS, CD-ROM, 2012.

LUCIEER et al. **Progress in Physical Geography Earth and Environment**. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography, 2013.

MOURTZINIS, S.; ARRIAGA, F. J.; BALKCOM, K. S.; ORTIZ, B. V.. **Agronomy journal**, Corn Grain and Stover Yield Prediction at R1 Growth Stage. 2013.

NEBIKER, S; ANNEN, A; SCHERRER, M; OESCH, D. A light-weight multispectral sensor for micro uav – Opportunities for very high resolution airborne remote sensing. **The International Archives of the Photogrammetry**, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing, 2008.

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

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

ROUSE, J.W.;HAAS, R.H.;SCHELL,J.A.;DEERING,D.W.,1973. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. Third Symposium of ERTS, Greenbelt, Maryland, USA. NASA SP-351, V1:309-317.

SANTOS, R.D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Embrapa Solos, 7.ed., 102p., 2015.

SCHEPPERS J. S.; FRANCIS, D. D.; Vigil, M.; BELOW, F. E. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 2008.

SCHWALBERT, R.A. et al. Forecasting maize yield at field scale based on high-resolution satellite imagery. **Biosystems Engineering**, v.171, p.179-192, 2018.

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

SHANAHAN, J.F.; SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D.; VARVEL, G.E.; WILHELM, W.W.; TRINGE, J.M.; SCHLEMMER, M.R.; MAJOR, D.J. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. **Agronomy Journal**, v.93, p.583-589, 2001.

SOLARI, F.; SHANAHAN, J.; FERGUSON, R.; SCHEPERS, J.; GITELSON, A. Active Sensor Reflectance Measurements of Corn Nitrogen Status and Yield Potential. **Agronomy Journal**, v.100, n.3, p.571-579, 2008.

STAFFORD, J.V. Implementing precision agriculture in the 21st century. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.76, n.3, p.267–275, 2000.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 174p, 1995.

STEFFEN, C. A. Introdução ao Sensoriamento Remoto. 2019. INPE: Divisão de Sensoriamento Remoto. Disponível em:<
<http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm#vania>>. Acesso em: 24 de ago. de 2019.

VERGER A. et al, **Remote Sensing of Environment**, Green area index from an unmanned aerial system over wheat and rapeseed crops. Volume 152 paginas 654-664, 2014.

ZHANG, C.; KOVACS, J.M. The application of small-unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. **Precision Agriculture**, v.13, n.6, p.693–712, 2012.

9 APÊNDICE A

Tabela 1 – Estimativa do déficit hídrico da cultura do milho, no estágio V11, no ano agrícola 2017/2018, em Santa Maria, RS.

MÊS/DIAS	PRECIPITAÇÃO mm	RADIAÇÃO ACUMULADA KJ/m ²
OUTUBRO (02)	0	56.029,75
NOVEMBRO (30)	73,6	915.448,00
DEZEMBRO (28)	71,6	711.457,8
IRRIGAÇÃO PIVOT	5	
TOTAL (60)	150,2	1.682.935,55
MÉDIA PERÍODO	2,50	28.048,95
ETPE 6mm/dia	360	
DÉFICIT	214,8	