

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**MODELOS DE PREDIÇÃO DE PRODUTIVIDADE DA  
CULTURA DO MILHO POR MEIO DE NDVI EM ARRANJOS  
ESPACIAIS**

**Mailson Freire de Oliveira  
Engenheiro Agrônomo**

**2017**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**  
**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**MODELOS DE PREDIÇÃO DE PRODUTIVIDADE DA  
CULTURA DO MILHO POR MEIO DE NDVI EM ARRANJOS  
ESPACIAIS**

**Mailson Freire de Oliveira**

**Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani**

**Coorientador: Prof. Dr. Cristiano Zerbato**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal)

**2017**

Oliveira, Mailson Freire de

O48m Modelos de predição de produtividade da cultura do milho por meio de NDVI em arranjos espaciais / Mailson Freire de Oliveira. -- Jaboticabal, 2017

v, 44p. : il.; 29 cm

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Veterinárias, 2017

Orientador: Carlos Eduardo Angeli Furlani

Coorientador: Cristiano Zerbato

Banca examinadora: Carlos Alessandro Chioderoli e Marcelo Boamorte Ravelli

Bibliografia

1. Agricultura de precisão. 2. Espaçamento. 3. População de plantas. 4. Sensor Óptico Ativo. 5. *Zea mays* L. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 528.7:633.15



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MODELOS DE PREDIÇÃO DE PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO MILHO POR MEIO DE NDVI EM ARRANJOS ESPACIAIS

**AUTOR: MAILSON FREIRE DE OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI**

**COORIENTADOR: CRISTIANO ZERBATO**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI  
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. MARCELO BOAMORTE RAVELLI  
Centro de Administração e Tecnologia / UNIARA - Araraquara/SP

  
Prof. Dr. CARLOS ALESSANDRO CHIODEROLI  
Departamento de Engenharia Agrícola / Universidade Federal do Ceará / Fortaleza/CE

Jaboticabal, 25 de julho de 2017

## **DADOS CURRICULARES DOS AUTORES**

**MAILSON FREIRE DE OLIVEIRA** – nascido em Parauapebas, Pará, no dia 28 de junho de 1993, filho de Marleide Freire de Oliveira e Antônio Wilson Rodrigues de Oliveira. cursou o ensino fundamental nas escolas Autonomia e Escola Municipal de Ensino Fundamental e Médio Carlos Henrique de Andrade, deste município e ensino médio na Escola de Ensino Fundamental e Médio Eduardo Angelim em Parauapebas, tendo finalizado o ensino básico e médio no ano de 2011. Ingressou no ensino superior no ano de 2011 no curso de Engenharia Agrônoma pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Câmpus de Parauapebas, obtendo o título de Engenheiro Agrônomo em março de 2016. Durante a graduação foi bolsista de iniciação científica durante três anos, sendo um ano pela pró-reitora de ensino e dois anos pelo convênio UFRA/VALE, nas áreas de Fertilidade do Solo e Manejo Integrado de Plantas Daninhas, sob orientação dos professores Dr. Eduardo do Valle Lima e Rafael Gomes Viana nas respectivas áreas. Participou do projeto Controle de Gramíneas Exóticas Invasoras na Flona de Carajás, como integrante do grupo de pesquisa Manejo Integrado de Plantas Daninhas na Amazônia. Também colaborou na execução e apresentação de trabalhos publicados em congressos e revistas científicas. Em 2016 no mês de março, iniciou no curso de Mestrado Acadêmico em Agronomia (Produção Vegetal), com concentração nas áreas de Máquinas Agrícolas e Agricultura de Precisão, pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, São Paulo, no Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola, localizado no Departamento de Engenharia Rural da UNESP. No decorrer do curso realizou pesquisas com ênfase em agricultura de precisão, principalmente sensoriamento remoto proximal em diferentes culturas: milho, amendoim, soja e café. Em julho de 2017 submeteu-se à banca examinadora para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

“O crescimento intelectual, deve ser acompanhado do crescimento espiritual e humano, caso contrário, seremos como árvores que crescem, mas não frutificam, deixando de ter um legado de frutos de amor e sabedoria”.

Mailson Oliveira

Aos meus pais, Marleide Freire de Oliveira e Antônio Wilson Rodrigues de Oliveira, que me ensinaram os maiores valores da vida, que carrego até hoje.

**DEDICO**

Ao meu irmão Wildiney Freire de Oliveira e meu  
afilhado Kayo Krysóstomo Maciel Viana Freire.

Aos meus familiares.

**OFEREÇO**



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por toda à compaixão e bondade para conosco e que em um momento singular criou o que hoje chamamos de tudo, e a partir disso nós evoluímos ao ponto de poder desfrutar das belezas de sua criação.

Aos meu pais, Marleide Freire de Oliveira e Antônio Wilson Rodrigues de Oliveira, que nunca mediram esforços, muitas vezes se sacrificando para me dar todas a condições para que eu pudesse estar aqui hoje realizando uma grande meta da minha vida e também por todo carinho, educação, amor e exemplo que sempre de deram para que eu pudesse me tornar a pessoa que sou hoje.

Ao meu irmão Wildiney Freire de Oliveira, pelo grande exemplo de humildade e genialidade que sempre me passou na vida pessoal e acadêmica.

À Renata Thaysa da Silva Santos (Baby), por estar sempre comigo me apoiando, dando carinho e sendo exemplo de dedicação e perseverança nesses quase 4 anos de namoro e que nunca me deixou desistir. Minha eterna companheira!

À Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal-SP, Brasil e de modo especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa, e as empresas JUMIL – Justino de Moraes, Irmãos S/A e Pioneer, pelo apoio no experimento.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani e meu coorientador, Prof. Dr. Cristiano Zerbato, pela confiança, oportunidade e aos grandes ensinamentos pessoais, profissionais e acadêmicos que tive a oportunidade de aprender e certamente levarei para toda a vida.

Ao prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva, pelo grande exemplo de ética e coerência profissional, e por sempre batalhar pela excelência dos membros do Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola.

Aos meus orientadores de iniciação científica, Prof. Dr. Rafael Gomes Viana, Prof. Dr. Eduardo do Valle Lima e Prof. Me. Daniel Pereira Pinheiro, que

me ensinaram todas as bases científicas e me prepararam para a entrada da pós-graduação. Meu muito obrigado!

Aos colegas e amigos do Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola (LAMMA) – Aline Alcântara, Adão Santos, André Damasceno, Danilo Tedesco, Edcarla Nicolau, Franciele Morlin, Leonardo Bernache, Luan Oliveira, Lucas Girio, Matheus Borba, Nivanda Lima, Patricia Menezes, Rafael Corrêa, Rafael Noronha, Renata Queiroz, Tadeu Sudo, Tassio Ormond e Tiago Tavares. E também a todos os estagiários que compõem o LAMMA, em especial aos parceiros João Durigan e Vinicius Sparapani. Obrigado pelos momentos vividos!

Ao Departamento de Engenharia Rural da FCAV, em especial aos funcionários Valdecir Aparício (Maranhão) e Sebastião Filho (Tiãozinho) pelos conhecimentos práticos ensinados e a todos os funcionários e professores do departamento.

Aos Brothers de apartamento, Marcelo Barbosa e Fernando Franco que me aguentam até hoje com muita paciência e parceria.

A todos que de alguma forma contribuíram para que este momento memorável se tonasse possível ficam aqui meus agradecimentos.

## SUMÁRIO

	Página
<b>RESUMO.....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>v</b>
<b>1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>6</b>
<b>2 – REVISÃO DE LITERATURA. ....</b>	<b>7</b>
2.1 Cultura do milho.....	7
2.2 Arranjos espaciais.....	8
2.3 Sensoriamento remoto e índices de vegetação .....	10
<b>3 – MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>13</b>
3.1 Localização e caracterização da área experimental.....	13
3.2 Manejo e tratos culturais utilizados.....	14
3.3 Máquinas e equipamentos utilizados.....	15
3.3.1 Trator.....	15
3.3.2 Semeadora.....	16
3.3.3 Sensor ótico ativo.....	18
3.4 Determinação da produtividade.....	19
3.5 Delineamento experimental.....	20
<b>4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>21</b>
<b>5 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>28</b>
<b>6 – REFERÊNCIAS.....</b>	<b>29</b>

## MODELOS DE PREDIÇÃO DE PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO MILHO POR MEIO DE NDVI EM ARRANJOS ESPACIAIS

**RESUMO** - Há uma necessidade do uso de ferramentas para estimativa do potencial produtivo durante o desenvolvimento da cultura do milho. Assim, o auxílio por meio sensores ópticos ativos para a geração de índices de vegetação, pode fornecer informações significativas para o conhecimento do comportamento e relação temporal destes índices com parâmetros produtivos das culturas agrícolas. Objetivou-se avaliar o comportamento temporal do NDVI e a sua relação com a produtividade da cultura do milho com o intuito de gerar modelos de predição de produtividade nas populações de plantas (55, 60 e 65 mil plantas ha<sup>-1</sup>) em espaçamento de semeadura reduzida e em linhas duplas. Foi utilizado fatorial 2 x 3 com 4 repetições, perfazendo 24 parcelas experimentais de 10 m<sup>2</sup> de área útil em blocos casualizados, realizando a leitura do NDVI em 5 épocas (30, 45, 60, 75 e 90 dias após a emergência das plantas - DAE). O espaçamento em linhas duplas aos 90 e 30 DAE para as populações de 55 e 60 mil plantas ha<sup>-1</sup>, respectivamente permitiram gerar modelos para a predição de produtividade com base no NDVI do milho, enquanto que para a população de 65 mil plantas ha<sup>-1</sup> aos 45 e 60 DAE não houve ajuste do modelo de predição de produtividade por valores próximos de NDVI para produtividades diferentes. No espaçamento reduzido a geração de modelos para a predição de produtividade foi possível nas populações de 55 e 60 mil plantas ha<sup>-1</sup> respectivamente aos 90 e 30 DAE.

**Palavras-chave:** Agricultura de precisão, Espaçamento, População de plantas, Sensor óptico ativo, *Zea mays* L.

## PREDICTION MODELS OF CORN PRODUCTIVITY BY NDVI IN SPACING ARRANGEMENTS

**ABSTRACT** –There is a need for the use of tools to estimate productive potential during corn crop development. Thus, the assistance by means of active optical sensors for the generating of vegetation indexes can provide significant information for the knowledge of the behavior and temporal relation of this index with productive parameters of the agricultural crops. It was aimed to evaluate the temporal behavior of NDVI and its relation with productivity of corn in order to generate productivity prediction models in plant populations (55, 60 and 65 thousand plants ha<sup>-1</sup>) in spacing of conventional seeding and twin rows. A factorial 2 x 3 was utilized with four replicates, with a total of 24 experimental plots of 10 m<sup>2</sup> in randomized blocks, performing reading NDVI at 5 seasons (30, 45, 60, 75 and 90 days after emergence of the plants DAE). The spacing in twin rows at 90 and 30 DAE for populations of 55 and 60 thousand plants ha<sup>-1</sup>, respectively, allowed to generate models for the prediction of productivity based on corn NDVI, while the population of 65 thousand ha<sup>-1</sup> plants at 45 and 60 DAE there was no adjustment by the prediction model of productivity by values close to NDVI for different productivities. In the conventional spacing generating models for the prediction of productivity was possible in the populations of 55 and 60 thousand plants ha<sup>-1</sup> respectively at 90 and 30 DAE.

**Keywords:** Active optical sensor, Plant population, Precision agriculture, Row spacing, *Zea mays* L.

**LISTA DE FIGURAS**

	Página
Figura 1. Imagem orbital da área experimental .....	13
Figura 2. Precipitação (mm), temperatura média (°C) e umidade (%) durante a condução do experimento.....	14
Figura 3. Trator utilizado para tracionar a semeadora.....	16
Figura 4. Regulagem da semeadora para semeadura em linhas duplas.....	17
Figura 5. Milho semeado em fileiras duplas.....	17
Figura 6. Semeadora-adubadora.....	18
Figura 7. Coletor de dados/receptor GNSS e sensor GreenSeeker® utilizados para geração do NDVI.....	19
Figura 8. Delineamento experimental blocos casualizados com parcelas dispostas em esquema fatorial 3 x 2, sendo 3 populações de plantas e 2 espaçamentos.....	20
Figura 9. Análise de regressão entre NDVI e produtividade no espaçamento de linhas duplas aos 90 DAE na população 55 mil plantas ha <sup>-1</sup> .....	22
Figura 10. Análise de regressão entre NDVI e produtividade no espaçamento de linhas duplas aos 30 DAE na população de 60 mil plantas ha <sup>-1</sup> .....	23
Figura 11. Análise de regressão entre NDVI e produtividade no espaçamento de linhas duplas aos 45 DAE na população de 65 mil plantas ha <sup>-1</sup> .....	24
Figura 12. Análise de regressão entre NDVI e produtividade no espaçamento de linhas duplas aos 60 DAE na população de 65 mil plantas ha <sup>-1</sup> .....	24
Figura 13. Análise de regressão entre NDVI e produtividade no espaçamento reduzido aos 90 DAE na população de 55 mil plantas ha <sup>-1</sup> .....	26
Figura 14. Análise de regressão entre NDVI e produtividade no espaçamento reduzido aos 30 DAE na população de 60 mil plantas ha <sup>-1</sup> .....	26

**LISTA DE TABELAS**

	Página
<b>Tabela 1.</b> Análise química e física do solo da área experimental.....	14
<b>Tabela 2.</b> Resultado das análises de variância e do teste F para avaliar o ajuste da regressão do NDVI e produtividade das populações de plantas em relação aos dias após emergência.....	21

## 1 – INTRODUÇÃO

A Agricultura de Precisão (AP) vem se destacando como uma ferramenta multidisciplinar para a gestão da variabilidade espacial e temporal das áreas agrícolas. O sensoriamento remoto se destaca na AP como estratégia de obtenção de informação de forma não destrutiva das culturas, já que para a aquisição dos dados não há contato físico entre o sensor e o alvo (cultura).

Dentre as culturas em que mais se aplicam a agricultura de precisão o milho (*Zea mays* L.) tem grande destaque na utilização do sensoriamento remoto, sendo esta ferramenta aplicada principalmente no levantamento da variabilidade espacial do vigor da cultura por meio de índices de vegetação, recomendação de nitrogênio em doses variadas utilizando sensores remotos proximais e ainda a predição de produtividade com base na reflectância da cultura.

No entanto a predição de produtividade para a cultura do milho é algo complexo, pois ela pode ser cultivada sob diversos espaçamentos e populações de plantas, fazendo com que não se tenha um modelo único de predição de produtividade baseado em sensoriamento remoto proximal.

A predição de produtividade utilizando sensores proximais se dá pela geração de modelos que expressem a relação linear entre índices de vegetação e a produtividade real da cultura. Dentre os índices de vegetação utilizados para prever a produtividade um dos mais estudados é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI).

Devido essa plasticidade de cultivo em diferentes arranjos espaciais, se faz importante o estudo da aplicação de sensores remotos proximais para predição de produtividade para cultura do milho, pois alterando o espaçamento e a população, alteram-se também os índices de vegetação e com essa alteração é possível que os modelos de predição sejam influenciados.

Neste contexto, objetivou-se avaliar o comportamento temporal do NDVI e a sua relação com a produtividade em três populações de plantas de milho sob semeadura com espaçamento entre linhas reduzido e em linhas duplas, com o intuito de gerar modelos de predição de produtividade.



## 2 – REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) têm sua origem nas Américas e é cultivado nos mais diversos ambientes e climas do planeta (WERLE et al., 2011). Ele pode ser encontrado em diversos países, sendo cultivado em países como Argentina até a Rússia. Descreve-se que a origem do milho ocorreu a partir da domesticação do teosinto a cerca de 10 mil anos atrás, na América central (SCHMITT, 2014). Devido sua grande adaptabilidade o milho se tornou uma das culturas mais importantes do mundo, podendo ser encontrado em diversos tipos de formatos e cores (SCHMITT, 2014).

O milho pertencente à família Poaceae. Possui caráter monóico e a sua morfologia característica resulta da supressão, condensação e multiplicação de diversas partes da anatomia básica das gramíneas. As propriedades vegetativas e reprodutivas da planta de milho podem ser modificadas por meio da interação com os fatores ambientais que influenciam o controle da ontogenia do desenvolvimento. No entanto, o resultado geral da seleção natural e da domesticação foi produzir uma planta anual, robusta e ereta, com um a quatro metros de altura, o que favorece a produção de grãos (MAGALHÃES et al., 2002).

O milho possui grande importância científica e econômica, devido principalmente as propriedades nutritivas encontradas em seus grãos, servindo para o emprego na alimentação animal e humana, além de fornecer matéria para indústria (SOUZA et al., 2012; TORRES et al., 2014). A principal destinação deste cereal é principalmente a alimentação de animais não ruminantes como aves e suínos, sendo destinado em torno de 70 – 80% de sua produção para esse mercado compondo em sua maioria rações (ALVES et al., 2015).

O Brasil ocupa o posto de terceiro maior produtor mundial de milho de acordo com USDA (2017), com uma produção estimada para o milho safra e safrinha em 92,83 milhões de toneladas para a safra 2016/2017, tendo lugar de destaque na balança comercial brasileira, estando atrás em produção apenas da soja que é o

grão mais produzido no país, com produção estimada de 113 milhões de toneladas para esta mesma safra (CONAB, 2017).

O milho é cultivado em todos os estados do Brasil, sendo a sua produção concentrada nas regiões sul, sudeste e centro-oeste do país, com aproximadamente 90% da produção distribuída nessas regiões (CONAB, 2017). Tamaña produção se deve principalmente a mudança nos manejos e tratos culturais, tais quais: disponibilidade de cultivares com elevado potencial produtivo, melhoria na qualidade química e física dos solos, fertilização adequada, assim como modificação no arranjo populacional de plantas (FARINELLI; PENARIOL; FORNASIERI FILHO, 2012).

Apesar de estar entre os maiores produtores, o Brasil não se destaca entre os países com maior nível de produtividade, a produtividade média brasileira ainda é baixa sendo estimada pela CONAB (2017) em 5,4 t ha<sup>-1</sup> estando bem abaixo do maior produtor de milho mundial os Estados Unidos da América que possui produtividade média estimada de 10,9 t ha<sup>-1</sup> (USDA, 2017), essa baixa produtividade se deve a fatores como estresse hídrico, ocorrência de doenças, manejo deficiente e cultivares não adaptadas (CEPA, 2012).

## **2.2 Arranjos espaciais**

O estudo de arranjos espaciais propicia uma melhor configuração das plantas no ambiente de produção de forma racional, permitindo a redução da competição por fatores de produção além de almejar um maior controle de plantas daninhas e ajuste ao maquinário da propriedade (BEZERRA et al., 2014).

Este tipo de estudo é complexo, pois não há uma única recomendação para todas as condições já que a densidade ideal varia de acordo com as condições ambientais assim como condições controláveis como época de semeadura, densidade de semeadura, híbrido selecionado entre outros fatores (SANGOI; SILVA 2010). No entanto, atualmente busca-se o melhor arranjo de plantas, aquele que proporcione uma distribuição uniforme na linha de semeadura, possibilitando melhor utilização da luz incidente, da água e dos nutrientes (BALEM, 2013).

Teoricamente, o melhor arranjo é aquele que proporciona distribuição uniforme de plantas por área, ou seja, equidistante entre plantas, possibilitando melhor utilização de luz, água e nutrientes (BRACHTVOGEL et al., 2012).

O arranjo de plantas pode ser manipulado por meio de alterações na população de plantas, no espaçamento entre linhas e na distribuição de plantas na linha, sendo que as variações na distância entre plantas na linha e nas entrelinhas conferem os diferentes arranjos espaciais na lavoura (ARGENTA; SILVA; SANGOI, 2001; SANGOI, 2001).

Pesquisas têm sido feitas para avaliar as diferentes respostas da cultura do milho a diferentes arranjos espaciais como a realizada por Sangoi et al. (2011) em que avaliaram o efeito de variações no arranjo espacial de plantas sobre o perfilhamento, área foliar e produtividade da cultura do milho e concluíram que a estabilidade fenotípica foi aumentada com o perfilhamento e que a redução no espaçamento de 1 m para 0,4 m entre as linhas aumenta a interceptação luminosa, porém não interferiu na produtividade da cultura.

Além da redução convencional do espaçamento entre linhas, outra forma possível de mudar o arranjo das linhas de cultivo é o sistema de cultivo de linhas aos pares, ou linhas duplas (*"TwinRows"*). O sistema *TwinRow* ou linhas duplas consiste numa forma de distribuição de plantas onde se busca aumentar a distância entre as plantas sem afetar o fenótipo das mesmas. Isto possibilita um arranjo mais eqüidistante entre os indivíduos, possibilitando melhor aproveitamento de água, luz e nutrientes melhorando assim a adaptação das culturas ao ambiente de cultivo, sendo descrito ainda como uma ferramenta disponível para se atingir o máximo potencial produtivo (BALEM, 2013; KUMAR; ASHOK; ANSHUKA, 2016; SCHMITT, 2014; TAKASU et al., 2014).

A semeadura em fileira dupla é utilizada com frequência nos Estados Unidos. Nesse arranjo de plantas, pode haver alta penetração de luz e agroquímicos no dossel, melhorando a taxa fotossintética, a sanidade e a longevidade das folhas próximas ao solo, o que, em última instância, pode maximizar a produtividade de grãos (BRUNS, 2011).

Atualmente já se desenvolvem pesquisas relacionadas à utilização do sistema de semeadura em linhas duplas para a cultura do milho no Brasil (BALEM, 2013; SCHMITT, 2014).

O trabalho desenvolvido por Schmitt (2014) avaliou a redução do espaçamento e também a utilização das linhas duplas na cultura do milho em

ambientes de alto manejo e chegou à conclusão de que a utilização de linhas duplas não influenciou significativamente o crescimento das plantas e ainda cita que o incremento da população de plantas é mais eficiente no aumento da produtividade do que a redução no espaçamento entre linha. Já a pesquisa realizada por Balem (2013) demonstra que com a utilização do espaçamento em linhas duplas se consegue um incremento significativo em produtividade.

Essa divergência se o espaçamento em linhas duplas aumenta ou não a produtividade da cultura do milho também acontece nos EUA, por exemplo, no experimento realizado por Cox et al. (2006) eles demonstraram que o espaçamento em linhas duplas foi eficiente no aumento da produtividade para a cultura do milho, no entanto, Kratochvil e Taylor (2005) apresentam dados em que as universidades da Pensilvânia e Mississipi não indicam diferenças significativas entre os espaçamentos.

### **2.3 Sensoriamento remoto e índices de vegetação**

Sensoriamento Remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres (MENESES et al., 2012).

A utilização de geotecnologias como sensoriamento remoto vem sendo utilizada de forma extensiva na Agricultura de Precisão (AP), por meio de diferentes tipos de sensores (ativo e passivo) que torna possível calcular índices de vegetação para estimar os componentes de produção de culturas agrícolas (ZERBATO et al., 2016).

Dentre os sensores remotos de cultura utilizados na AP, os sensores ativos de dossel ou *Active Crop Canopy Sensors* (ACS) tem uma grande importância para viabilizar o manejo agrônomo em sitio-especifico de culturas agrícolas em nível de talhão (SHIRATSUCHI et al., 2014).

Os ACS vêm sendo considerados por alguns como sensores remotos proximais, quando acoplados em máquinas agrícolas auto propelidas. A grande vantagem dos ACS é que eles são ativos e sua luz modulada não é influenciada

pela luz do sol, podendo ser utilizados a qualquer hora (noite ou dia). Estes sensores emulam a refletância do dossel em certos comprimentos de onda selecionados para diferenciar o conteúdo de clorofila e indiretamente a condição nutricional da planta em relação ao nitrogênio (SHIRATSUCHI, 2011).

Utilizando estes sensores é possível o diagnóstico indireto de N da planta e aplicação de fertilizantes nitrogenados em taxas variáveis em tempo real, aplicando o insumo somente onde necessário e na mesma operação, sem necessidade de um mapeamento prévio. Ou seja, o sensor embarcado diagnostica o status de N da planta por meio de Índices de Vegetação (IV) e de algoritmos específicos como os desenvolvidos por Solari et al. (2008); Dellinger, Schmidt e Beegle (2008) e Shiratsuchi et al. (2011) que calculam a dose de fertilizante nitrogenado que deve ser aplicada em tempo real (SHIRATSUCHI et al., 2014).

Os índices de vegetação nada mais são do que equações matemáticas desenvolvidas com base em comprimentos de ondas específicos do espectro eletromagnético, os quais estão relacionados com parâmetros qualitativos de campo (BARBOSA, 2006). São transformações lineares de bandas espectrais, geralmente nas faixas do vermelho (V) e infravermelho próximo (IVP) do espectro eletromagnético (EPIPHANIO et al, 1996).

Moreira (2005) afirma que os dados de reflectância dos alvos podem ser transformados em índices de vegetação, os quais foram desenvolvidos com o intuito de ressaltar o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e a outros alvos da superfície terrestre, sendo que um dos índices mais utilizados é o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) sendo este índice proposto por Rouse Junior et al (1974) conforme a equação abaixo.

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V}$$

Sendo que:

NDVI é o Índice de vegetação da diferença normalizada

IVP sendo a reflectância no infravermelho próximo

V sendo a reflectância na banda do vermelho

Neste sentido, o estudo do NDVI, Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, fornece informações que remetem ao estado nutricional e/ou sanitário da planta de milho, é um indicador da quantidade e condição da vegetação verde,

representando o vigor da cultura, sendo obtido através de combinações da refletância medidas nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Na faixa do visível há grande absorção da radiação incidente pelas clorofilas das plantas, enquanto que no infravermelho próximo há grande refletância do mesófilo das folhas. O contraste entre as duas faixas de comprimento ressalta a vegetação, permitindo uma clara identificação desta e das suas propriedades fotossintéticas (MKHABELA et al., 2011, PICOLI et al., 2009; UEBEL, 2015).

O NDVI tem sido correlacionado com o teor de nitrogênio nas plantas, conteúdo de clorofila, biomassa foliar verde, parâmetros agronômicos (produtividade, massa de grãos, entre outros) e fitopatológicos (incidência e severidade de doenças, área abaixo da curva de progresso da doença, patologia de sementes, grãos ardidos, etc.) e ainda utilizado para aplicação de nitrogênio em taxas variáveis (MA et al., 1996; RAUN et al., 2002; SHANAHAN et al., 2001; SOLARI et al., 2008; UEBEL, 2015; MOTOMIYA et al., 2012; MOLIN et al., 2010; KAPP JUNIOR; GUMARÃES; CAIRES, 2016; AMARAL; MOLIN, 2011).

Entretanto, o NDVI pode ser influenciado de várias formas, tais como, a população e espaçamento entre fileiras de plantas (BARKER; SAWYER, 2012), doses de nitrogênio (BREDEMEIR et al., 2013), pelo estágio fenológico da cultura (RISSINI; KAWAKAMI; GENÚ, 2015).

Além do NDVI existem ainda outros índices de vegetação que podem ser correlacionados com parâmetros biofísicos das culturas agrícolas como o GNDVI (*Green normalized difference vegetation index*) que possui relação com a produtividade do milho em estádios mais avançados de desenvolvimento (SHANAHAN, 2001) e o NDRE (*Normalized difference Red Edge*) que é relacionado à produtividade de milho no estágio fenológico V6 (SHARMA et al., 2015). O GNDVI e NDRE são difíceis de se realizar pesquisas devido à escassez de sensores remotos proximais que captam essas reflectâncias para estarem sendo aplicados a campo.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e caracterização da área experimental

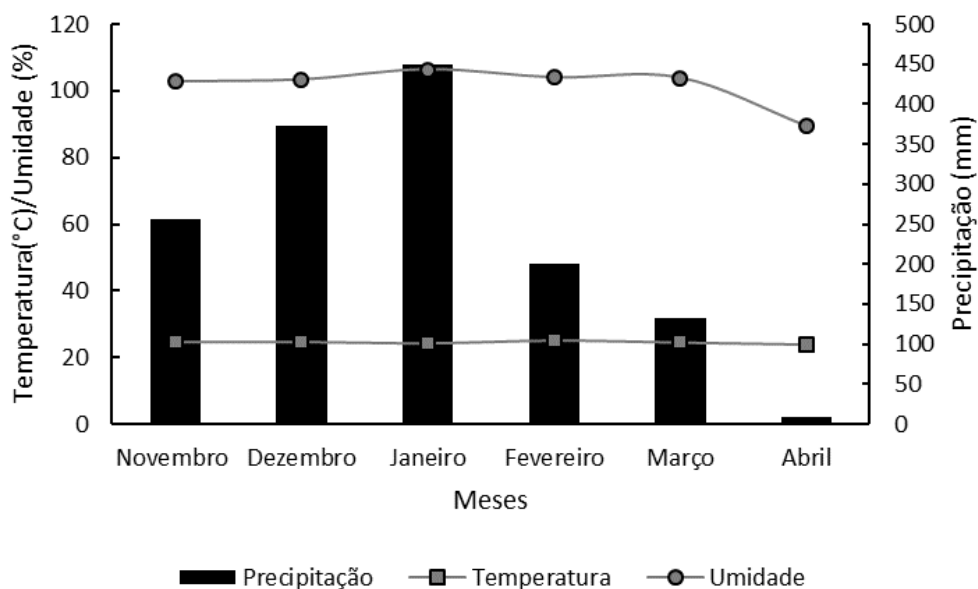
O experimento foi conduzido na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE-UNESP/Jaboticabal), no estado de São Paulo, localizada em torno das coordenadas 21°14' S e 48°16' W (Figura 1), com altitude média de 568 m e declividade média de 4%. O solo da área foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico, A moderado, textura argilosa e relevo suave ondulado (EMBRAPA, 2013).



**Figura 1.** Imagem orbital da área experimental. Fonte: Digital Globe

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é classificado como Aw, definido como tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno, com temperatura média anual em torno de 22,2°C. A amplitude térmica anual apresenta-se com temperatura média no mês mais frio em torno de 18°C e a temperatura mais quente em torno de 32°C. Esta região apresenta precipitação pluviométrica média anual de 1424 mm.

Durante a condução do experimento a temperatura média foi de 24,8; 24,7 e 24,0 °C, já a umidade foi de 73,0; 76,35 e 72,2 % e precipitação de 430,9; 460,3 e 135,7 mm para as estações da primavera, verão e outono respectivamente.



**Figura 2.** Precipitação (mm), temperatura média (°C) e umidade (%) durante a condução do experimento.

### 3.2 Manejo e tratos culturais utilizados

As características químicas e físicas do solo da área onde foi realizado o experimento estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 2. Análise química e física do solo da área experimental.

M.O.	pH	P	C.T.C.	Ca	Mg	K	Sat. Bases	Areia	Silte	Argila
CaCl <sub>2</sub>										
g dm <sup>-3</sup>		mg dm <sup>-3</sup>		mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>				%		
27	5,2	20	58,4	23	11	4,1	65	52	21	27



Para a semeadura utilizou-se sementes do híbrido simples recomendado para a região, cultivar P3456H da Pioneer®, este híbrido possui ciclo precoce, arquitetura de planta moderna, folhas eretas indicado para áreas de alto potencial produtivo, tolerante as principais doenças do milho, possuindo como característica principal a tecnologia herculex que lhe confere proteção contra as principais lagartas e tolerância a herbicidas a base de glufosinato de amônio. A semeadura foi realizada na safra 15/16 no mês de novembro, em área cultivada há 16 anos no Sistema Plantio Direto. Para a semeadura em espaçamento reduzido (0,45 m) foram distribuídas 3,7; 3,4; 3,1 sementes por metro para se atingir as populações de 65, 60 e 55 mil plantas ha<sup>-1</sup> respectivamente para as linhas em espaçamento duplo (duas linhas espaçada de 0,45m e estas espaçadas de 0,90m para as outras) utilizou-se a densidade de semeadura de 5,5; 5,1; 4,7 sementes por metro para se atingir as populações de 65, 60 e 55 mil plantas ha<sup>-1</sup> respectivamente. A adubação foi aplicada de acordo com boletim técnico 100 do estado de São Paulo, sendo 350 kg ha<sup>-1</sup> de adubo formulado 08-28-16 no sulco de semeadura. No estágio V4 22 dias após a semeadura da cultura foi realizada a adubação de cobertura com 120 kg de KCl ha<sup>-1</sup> e 300 kg de Uréia ha<sup>-1</sup> para produtividade esperada de 10 – 12 toneladas conforme o boletim 100 do estado de São Paulo.

Três dias após a semeadura foram aplicados 1,2 L ha<sup>-1</sup> de Paraquat (200g L<sup>-1</sup>) para eliminação das plantas daninhas germinadas, e após esse período foi aplicado 2,0 L ha<sup>-1</sup> de Atrazina para eliminação das plantas latifoliadas.

### **3.3 Máquinas e equipamentos utilizados**

#### **3.3.1 Trator**

Foi utilizado o trator da Massey Ferguson modelo MF 7370 com potência de 125 kW (170 cv) no motor, rotação de 2000 rpm, Trator (4x2 TDA), trabalhando na marcha L3, utilizado para realizar a semeadura do milho (Figura 3).

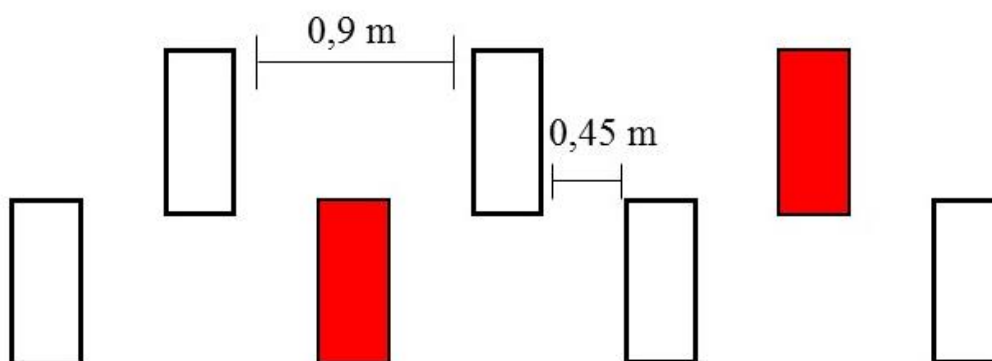


**Figura 3.** Trator utilizado para tracionar a semeadora. Fonte: O autor

### **3.3.2 Semeadora**

Utilizou-se para a operação de semeadura o protótipo de semeadora-adubadora da marca Jumil, modelo 3070 Exacta Air (Figura 6), com sistema pneumático de distribuição de semente; pneus 650x16E, 10 lonas; marcador de linha hidráulico; sistema distribuidor de adubo Fertisystem; disco de corte liso de 17", hastes sulcadoras para adubo, unidades semeadoras pantográficas com discos duplos desencontrados; controlador de profundidade com bandas paralelas; espaçamento mínimo entre linhas de 0,45m.

Para o espaçamento reduzido utilizou-se sete linhas de semeadura espaçadas de 0,45m e para o espaçamento de linhas duplas foram eliminadas duas linhas, conforme esquema da Figura 4, e na Figura 5 observa-se o milho semeado em fileiras duplas.



**Figura 4.** Regulagem da semeadora para semeadura em linhas duplas.



**Figura 5.** Milho semeado em fileiras duplas. Fonte: O autor





**Figura 6.** Semeadora-adubadora. Fonte: O autor

### **3.3.3 Sensor óptico ativo**

O NDVI foi avaliado em cinco épocas (30, 45, 60, 75 e 90 dias após a emergência das plantas), com o auxílio de um sensor óptico ativo terrestre (GreenSeeker®), emitindo radiação eletromagnética na banda do vermelho a  $660 \pm 12$  nm e do infravermelho próximo em  $770 \pm 12$  nm, isso faz com que o sensor seja independente da iluminação ambiente (Figura 7).



**Figura 7.** Coletor de dados/receptor GNSS e sensor GreenSeeker® utilizados para geração do NDVI.

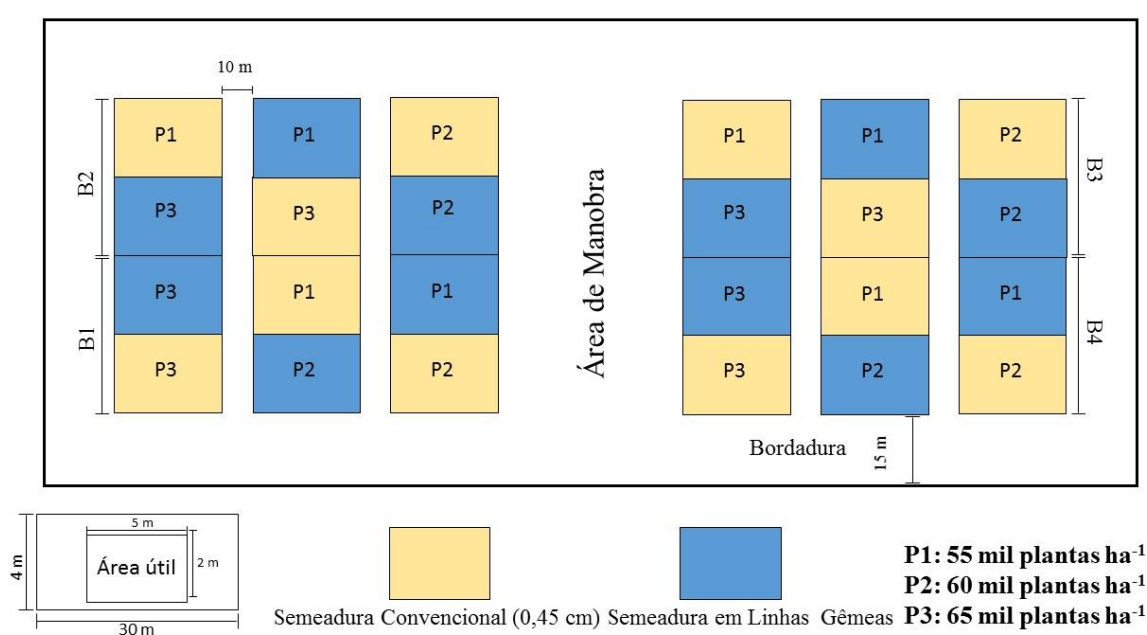
O aparelho foi posicionado a altura aproximada de 1,0 m acima do dossel. As leituras foram realizadas de forma manual à velocidade aproximada de  $1 \text{ m s}^{-1}$  em toda área útil da parcela, com largura útil captada pelo sensor de 0,9 m, nas cinco épocas de coleta, sendo as coletas realizadas por volta das 10h. O sensor foi acoplado ao coletor de dados/receptor GNSS Nomad Trimble® para o armazenamento dos dados georreferenciados.

### 3.4 Determinação da produtividade

Para determinação de produtividade foram coletadas todas as espigas da área útil de  $10 \text{ m}^2$  de cada parcela e trilhadas com auxílio de trilhadora estacionária mecânica. Os grãos foram separados, pesados e os valores corrigidos para 13% de umidade e extrapolados para  $\text{kg ha}^{-1}$ .

### 3.5 Delineamento experimental

O experimento foi realizado utilizando dois espaçamentos (reduzido - 0,45m e linhas duplas intercalado – duas linhas de 0,45m por uma de 0,90m) e três populações de plantas (55, 60 e 65 mil plantas  $ha^{-1}$ ), compondo um fatorial 2 x 3 com 4 repetições (Figura 5), perfazendo um total de 24 parcelas experimentais de 30 x 4 m ( $120 m^2$ ) sendo  $10 m^2$  de área útil em delineamento em blocos casualizados (Figura 8).



**Figura 8.** Delineamento experimental blocos casualizados com parcelas dispostas em esquema fatorial 3 x 2, sendo 3 populações de plantas e 2 espaçamentos.

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Anderson Darling, demonstrando que os mesmos apresentaram comportamento normal. Os resultados foram submetidos à análise de regressão a 5% de probabilidade pelo teste F, com o auxílio do programa estatístico AgroEstat (BARBOSA; MALDONATO, 2014).

#### 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o espaçamento em linhas duplas, as populações de 55 mil plantas ha<sup>-1</sup> o coeficiente da regressão foi significativo, sendo aos 90 DAE com coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) de 0,74. No entanto para população de 65 mil plantas ha<sup>-1</sup>, as leituras do NDVI foram significativas com a produtividade aos 45 e 60 DAE, com os respectivos coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) 0,83 e 0,72. (Tabela 1)

Nas linhas duplas na população de 60 mil plantas ha<sup>-1</sup> o teste F foi significativo somente aos 30 DAE com R<sup>2</sup> de 0,89. Porém, no espaçamento reduzido houve significância de 0,85 para coeficiente de determinação na população de 55 mil plantas ha<sup>-1</sup> aos 90 DAE e 0,78 para a população de 60 mil plantas ha<sup>-1</sup> aos 30 DAE (Tabela 2).

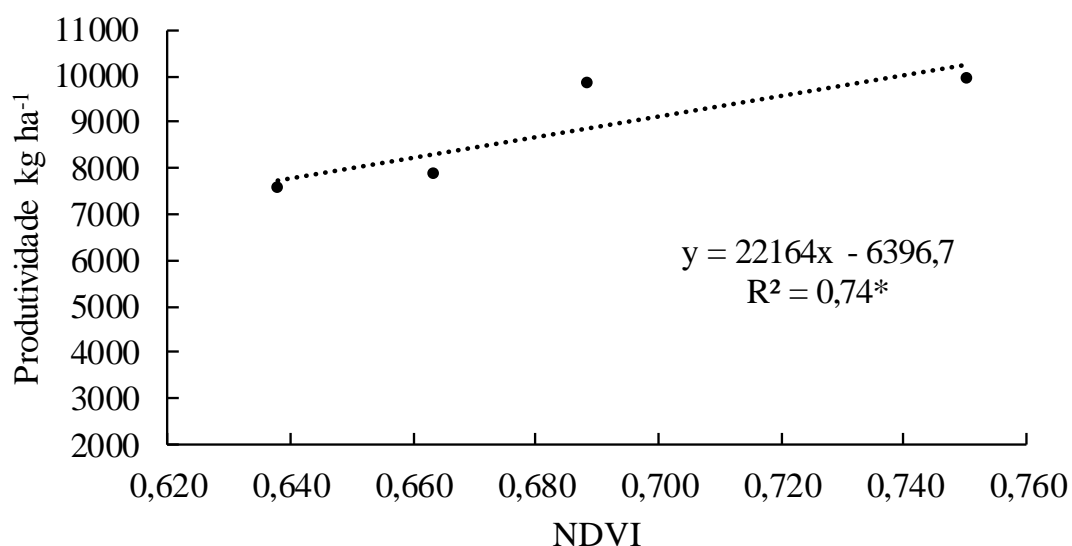
**Tabela 2.** Resultado das análises de variância e do teste F para avaliar o ajuste da regressão do NDVI e produtividade das populações de plantas em relação aos dias após emergência.

Dias Após Emergência (DAE)	População (mil plantas ha <sup>-1</sup> )					
	Linhas duplas			Reduzido		
	55	60	65	55	60	65
Coeficiente de Determinação (R <sup>2</sup> )						
30	0,56 <sup>ns</sup>	0,89*	0,35 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,78*	0,33 <sup>ns</sup>
45	0,01 <sup>ns</sup>	0,44 <sup>ns</sup>	0,83*	0,00 <sup>ns</sup>	0,18 <sup>ns</sup>	0,26 <sup>ns</sup>
60	0,41 <sup>ns</sup>	0,39 <sup>ns</sup>	0,72*	0,05 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,56 <sup>ns</sup>
75	0,46 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,62 <sup>ns</sup>
90	0,74*	0,04 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,85*	0,06 <sup>ns</sup>	0,36 <sup>ns</sup>

\* - significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ns - não significativo

Povh et al. (2008) não alcançaram modelos de ajuste de relação entre NDVI e produtividade na cultura do milho devido à saturação do NDVI na população de 65 mil plantas ha<sup>-1</sup> em espaçamento de 0,8 m. Porém, quando utilizado as linhas duplas na população de 55 mil plantas houve um ajuste significativo de 74% aos 90 DAE (Figura 9).

Este contraste de resultados é explicado pela diferença de populações utilizadas, já que o experimento de Povh et al. (2008) utilizaram 65 mil plantas ha<sup>-1</sup> e não conseguiram ajustes que explicassem de forma coerente a produtividade devido a saturação do NDVI, uma vez que de acordo com Sangoi et al. (2005) com o incremento da população de plantas de milho tem-se o aumento do índice de área foliar. Esse aumento de área foliar aumenta a reflectância da cultura e conseqüentemente o NDVI o que pode ocasionar a saturação do índice.



**Figura 9.** Análise de regressão entre NDVI e produtividade no espaçamento de linhas duplas aos 90 DAE na população 55 mil plantas ha<sup>-1</sup>.

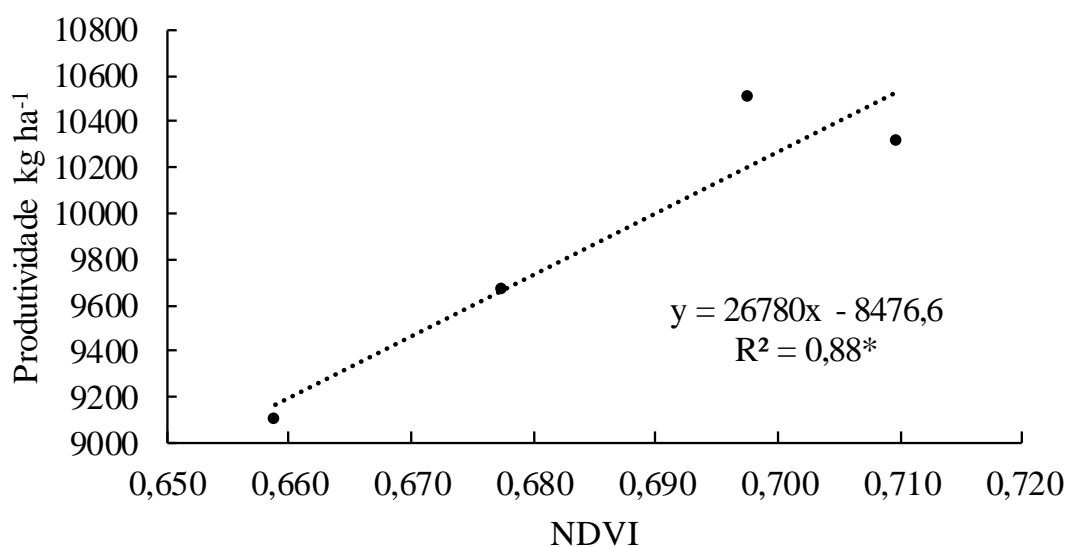
A saturação do NDVI ocorre a partir da estabilização do acúmulo de biomassa da cultura do milho (ZANZARINI et al., 2013), explicada pela reflectância no infravermelho próximo em comparação com o vermelho (GITELSON et al., 2002). O processo de normalização torna o NDVI insensível a variações na reflectância no infravermelho próximo, quando esta é maior que no vermelho (GITELSON, 2004).

O espaçamento em linhas duplas possibilita um arranjo mais equidistante entre os indivíduos, melhorando o aproveitamento de água, luz e nutrientes para se atingir o máximo potencial produtivo (BALEM et al., 2014; SINGH; ASHOK; ANSHUKA, 2016; TAKASU et al., 2014).

Na população de 60 mil plantas ha<sup>-1</sup> em linhas duplas gerou um modelo de

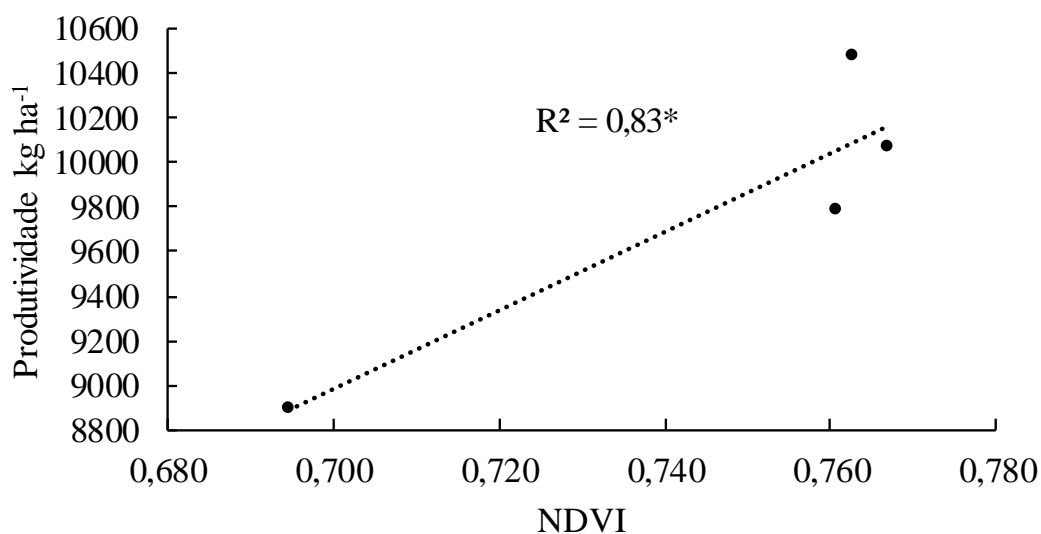


ajuste entre NDVI e produtividade com maior assertividade ( $R^2=0,88$ ) do que para 55 mil plantas  $ha^{-1}$  ( $R^2=0,74$ ) e de forma mais precoce (30DAE) com um maior acúmulo de biomassa no início do ciclo da cultura para a maior população em relação à menor (Figura 10).



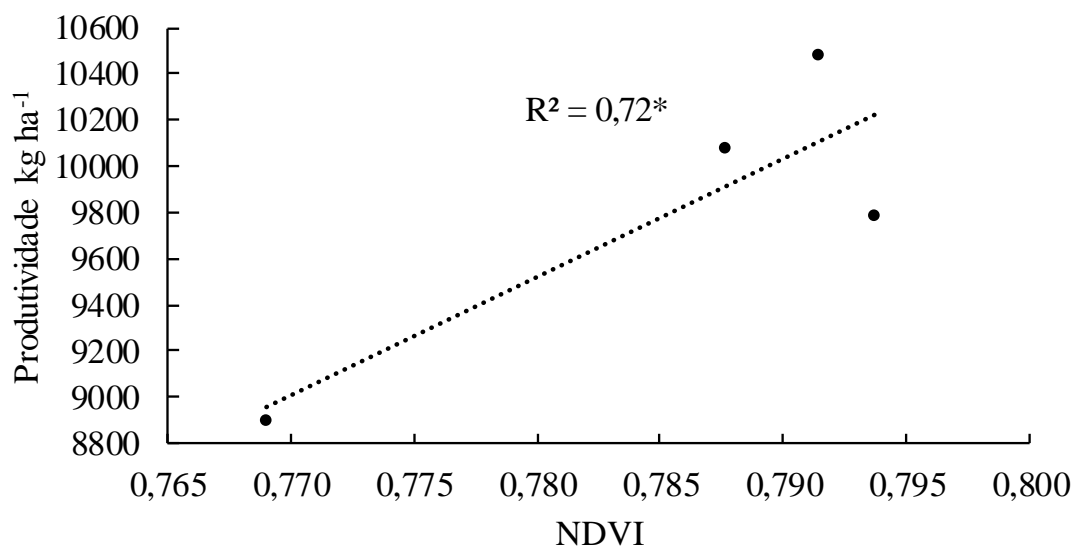
**Figura 10.** Análise de regressão entre NDVI e produtividade no espaçamento de linhas duplas aos 30 DAE na população de 60 mil plantas  $ha^{-1}$ .

O sensor indicou valores do NDVI semelhantes para as três produtividades diferentes nas leituras do NDVI agrupadas em um lado do gráfico na população de 65 mil plantas  $ha^{-1}$  tanto aos 45 quanto aos 60 DAE no espaçamento de linhas duplas (Figuras 11 e 12), não sendo possível gerar um modelo confiável de previsão de produtividade para esta população.



**Figura 11.** Análise de regressão entre NDVI e produtividade no espaçamento de linhas duplas aos 45 DAE na população de 65 mil plantas ha<sup>-1</sup>.

Os resultados apresentados para população de 65 mil plantas ha<sup>-1</sup> corroboram com Povh et al. (2008) que não conseguiram gerar um modelo de predição da produtividade, apesar do ajuste da regressão ter sido significativo, explicado pelas diferentes produtividades em relação aos valores próximos de NDVI, ocasionados devido à grande quantidade de biomassa produzida pela cultura.



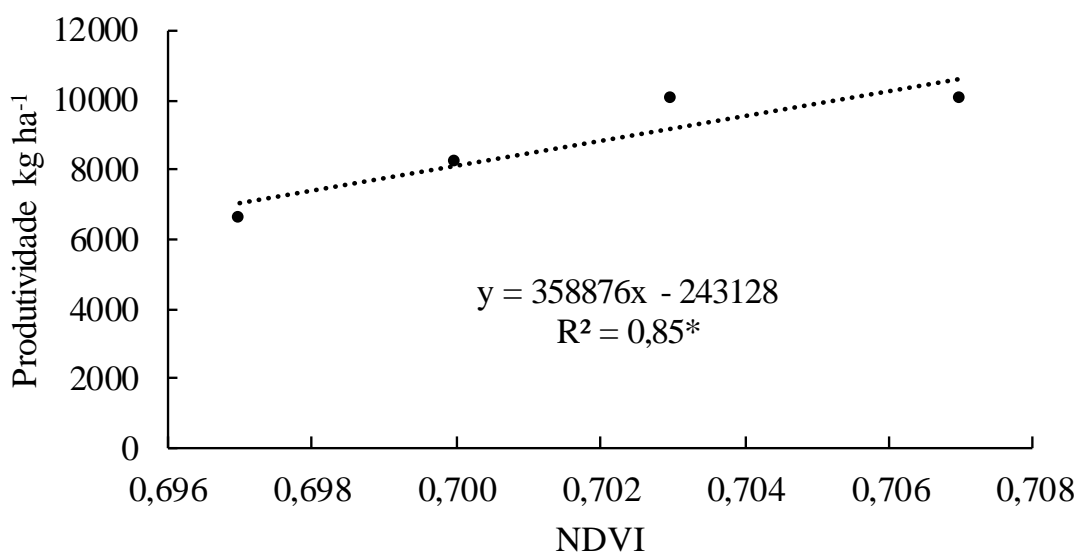
**Figura 12.** Análise de regressão entre NDVI e produtividade no espaçamento de linhas duplas aos 60 DAE na população de 65 mil plantas ha<sup>-1</sup>.

A não linearidade das características biofísicas como biomassa e índice de área foliar, podem prejudicar a geração de um modelo de previsão (MYNENI et al., 1995). Uma alternativa seria trabalhar com comprimentos de onda na banda do verde (reflectância maior que o vermelho) e reduzindo a diferença entre a reflectância no visível e infravermelho próximo (POVH et al., 2008).

Estudos têm sido desenvolvidos avaliando uma região espectral chamada *Red-edge*, como alternativa para substituição do NDVI, situando-se entre 680-740 nm nas bandas do vermelho e infravermelho próximo (KANKE et al., 2016). Os índices baseados nessa faixa do espectro eletromagnético são mais eficazes em comparação aos índices que utilizam a banda do vermelho para a predição de produtividade.

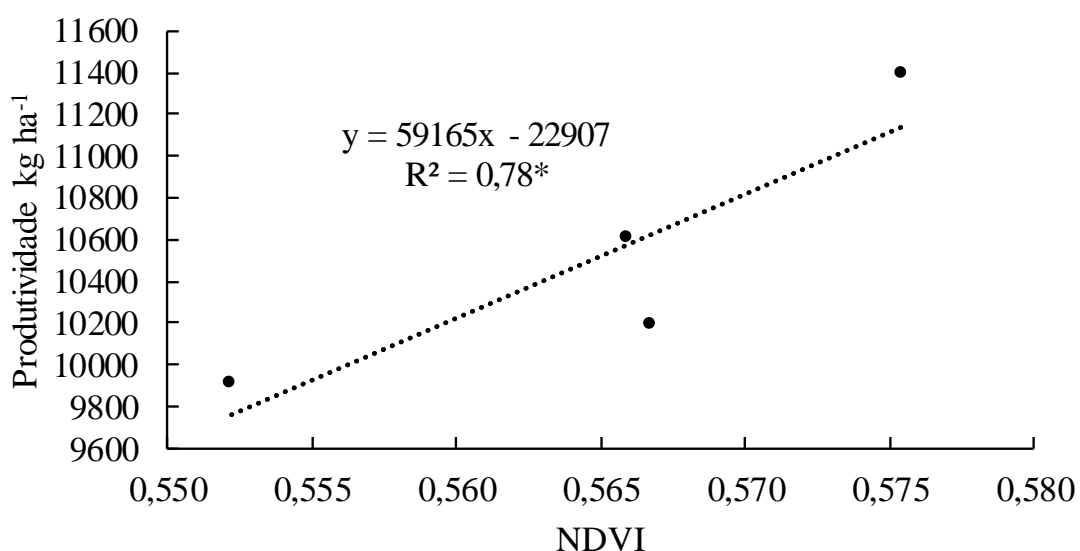
Os resultados foram satisfatórios para o NDVI apenas nas fases iniciais de desenvolvimentos, sendo que ao se aproximar da maturidade este índice começa a ter um desempenho inferior aos índices utilizando a banda do *Red-edge* na cultura do arroz (CAO et al., 2016) e na soja (PENG; GITELSON et al., 2012).

Aos 90 DAE foi possível gerar um modelo de predição de produtividade no espaçamento reduzido na população de 55 mil plantas ha<sup>-1</sup> (Figura 13) sendo mais tardio que na população de 60 mil plantas ha<sup>-1</sup> aos 30 DAE (Figura 14), atribuído ao rápido acúmulo de biomassa para a maior população chegando mais rápido ao ponto de maior relação entre a produtividade e o NDVI.



**Figura 13.** Análise de regressão entre NDVI e produtividade no espaçamento reduzido aos 90 DAE na população de 55 mil plantas ha<sup>-1</sup>.

Para população de 60 mil plantas ha<sup>-1</sup> no espaçamento reduzido, gerou-se um modelo de predição de produtividade aos 30 DAE (Figura 14), esta data mostrou-se igual ao espaçamento de linhas duplas só que com um coeficiente de determinação menor ( $R^2$  0,78) demonstrando que para essa população independente do espaçamento adotado é possível gerar modelo de predição na mesma data.



**Figura 14.** Análise de regressão entre NDVI e produtividade no espaçamento reduzido aos 30 DAE na população de 60 mil plantas ha<sup>-1</sup>.

De forma geral para as populações de 55 e 60 mil plantas  $\text{ha}^{-1}$  o comportamento da produtividade em função do NDVI foi o mesmo nos dois espaçamentos utilizados, sendo observado que a medida em que o NDVI aumentou a produtividade seguiu a mesma tendência de forma linear, o que demonstra que independente do espaçamento utilizado seja reduzido ou em linhas duplas a predição da produtividade foi possível nas mesmas datas ao 90 DAE para 55 mil plantas  $\text{ha}^{-1}$  e 30 DAE para 65 mil plantas  $\text{ha}^{-1}$ .

Indicando que a partir da população de 65 mil plantas  $\text{ha}^{-1}$  deve-se buscar outras alternativas de predição de produtividade, as quais pode-se adotar a mudança de índice de vegetação, destacando-se o GNDVI e o NDRE que utilizam bandas de maior reflectância em comparação com a banda do vermelho, diminuindo a diferença entre o infravermelho próximo e a banda utilizada para geração do índice.

Os resultados obtidos nesse experimento servem de subsídio para o desenvolvimento de algoritmos para a determinação de doses de nitrogênio variadas, já que Raun et al. (2005) relataram que é necessário o estabelecimento de modelos de predição de produtividade para o desenvolvimento de algoritmo para a determinação de doses de nitrogênio que maximizam a produtividade da cultura.

## 5 – CONCLUSÕES

Foi possível gerar modelos para a predição de produtividade com base no NDVI da cultura do milho semeado em linhas duplas e de forma reduzida aos 90 e 30 DAE para as populações de 55 e 60 mil plantas ha<sup>-1</sup> respectivamente.

O modelo de predição de produtividade da cultura do milho para população de 65 mil plantas ha<sup>-1</sup> semeado em linhas duplas aos 45 e 60 DAE foi comprometido por valores próximos de NDVI para produtividades diferentes.

## 6 – REFERÊNCIAS

- ALVES, B. M.; FILHO, A. C.; BURIN, C.; TOEBE, M.; SILVA, L. P. da. Divergência genética de milho transgênico em relação à produtividade de grãos e à qualidade nutricional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 5, p. 884–891, 2015.
- AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P. Sensor óptico no auxílio à recomendação de adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 12, p. 1633–1642, 2011.
- ARGENTA, G.; SILVA, P.; SANGOI, L. Arranjo de plantas em milho: análise do estado-da-arte. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 6, p. 1075–1084, 2001.
- BALEM, Z. **Avaliação de espaçamento convencional e linhas gêmeas sob densidade populacional para cultura do milho**. 2013. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.
- BALEM, Z.; MODOLO, A. J.; TREZZI, M. M.; VARGAS, T. de O.; BAESSO, U. M.; BRANDELERO, E. M.; TROGELLO, E. Conventional and twin row spacing in different population densities for maize (*Zea mays* L.). **African Journal of Agricultural Research**, Victoria Island, v. 9, n. 23, p. 1787–1792, 2014.
- BARBOSA, J. C.; MALDONADO JUNIOR, W. **AgroEstat - Sistema para Análises Estatísticas de Ensaios Agronômicos**. Versão 1.1.0.712. Jaboticabal, 2014.
- BARBOSA, K. M. N. **Monitoramento espacial de biomassa carbono orgânico da vegetação herbácea de várzea na Amazônia Central**. 2006. 131 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- BARKER, D. W.; SAWYER, J. E. Using active canopy sensing to adjust nitrogen application rate in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, n. 4, p. 926–933, 2012.
- BEZERRA, F. T. C.; DUTRA, A. S.; BEZERRA, M. A. F.; FILHO, A. F. D. O.; BARROS, G. D. L. Comportamento vegetativo e produtividade de girassol em função do arranjo espacial das plantas. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 2, p. 335–343, 2014.
- BRACHTVOGEL, E. L.; PEREIRA, F. R. da S.; CRUZ, S. C. S.; ABREU, M. L. de; BICUDO, S. J. População, arranjo de plantas uniforme e a competição intraespecífica em milho. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**, Boa Vista, v. 6, n. 1, p. 75–83, 2012.
- BREDEMEIER, C.; VARIANI, C.; ALMEIDA, D.; ROSA, A. T. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 7, p. 1147–1154, 2013.

BRUNS, H. A. Comparisons of single-row and twin-row soybean production in the Mid-South. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, n. 3, p. 702-708, 2011.

CAO, Q.; MIAO, Y.; SHEN, J.; YU, W.; YUAN, F.; CHENG, S.; HUANG, S.; WANG, H.; YANG, W.; LIU, F. Improving in-season estimation of rice yield potential and responsiveness to topdressing nitrogen application with Crop Circle active crop canopy sensor. **Precision Agriculture**, New York, v. 17, n. 2, p. 136–154, 2016.

CEPA (CENTRO DE SOCIOECONÔMICA E PLANEJAMENTO AGRÍCOLA). **Dados e informação**. 2012 (Santa Catarina). Disponível em: <<http://cepa.epagri.sc.gov.br/>>. Acesso em: 11 mar. 2017.

CONAB (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO). **Milho: Acompanhamento da safra brasileira**. Brasília, DF, maio. 2017. v. 4, n 8, safra 2016/2017, oitavo levantamento, 144p. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_05\\_12\\_10\\_37\\_57\\_boletim\\_graos\\_maio\\_2017.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_05_12_10_37_57_boletim_graos_maio_2017.pdf)>. Acesso em: 25 abril 2017. Brasília: Conab, 2017.

COX, W. J.; HANCHAR, J. J.; KNOBLAUCH, W. A.; CHERNEY, J. H. Growth, yield, quality, and economics of corn silage under different row spacings. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 1, p. 163-167, 2006.

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

EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2013. 353 p.

EPIPHANIO, J. C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

FARINELLI, R.; PENARIOL, F. G.; FORNASIERI FILHO, D. Características agronômicas e produtividade de cultivares de milho em diferentes espaçamentos entre linhas e densidades populacionais. **Científica**, Jaboticabal, v. 40, n. 1, p. 21–27, 2012.

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.



KANKE, Y.; TUBAÑA, B.; DALEN, M.; HARRELL, D. Evaluation of red and red-edge reflectance-based vegetation indices for rice biomass and grain yield prediction models in paddy fields. **Precision Agriculture**, New York, v. 17, n. 5, p. 507-530, 2016.

KAPP JUNIOR, C.; GUIMARÃES, A. M.; CAIRES, E. F. Use of active canopy sensors to discriminate wheat response to nitrogen fertilization under no-tillage. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 36, n. 5, p. 886–894, 2016.

KRATOCHVIL, R. J.; TAYLOR, R. W. Twin-row corn production: an evaluation in the mid-Atlantic Delmarva region. **Crop Management**, Sant Paul, v. 4, n. 1, p. 623-635, 2005.

KUMAR, S. N.; ASHOK, T.; ANSHUKA, S. Development and testing of twin row drum planter for maize. **Global Journal of Multidisciplinary Studies**, [S.l.], v. 5, n. 2, p. 198–205, 2016.

MA, B. L.; MORRISON, M. J.; DWYER, L. M. Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 915- 920, 1996.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; CARNEIRO, N. P.; PAIVA, E. **Fisiologia do Milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. 23 p. (Circular Técnica, 22).

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. D.; ROSA, A. N. D. C. S.; SANO, E. E.; SOUZA, E. B. D.; BAPTISTA, G. M. D. M.; BRITES, R. S. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB/CNPq, 2012.

MKHABELA, M. S.; BULLOCK, P.; RAJ, S.; WANG, S.; YANG, Y. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 151, n. 3, p. 385-393, 2011.

MOLIN, J. P.; FRASSON, F. R.; AMARAL, L. R. do; POVH, F. P.; SALVI, J. V. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1345–1349, 2010.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 320 p.

MOTOMIYA, A. V. D. A.; MOLIN, J. P.; MOTOMIYA, W. R.; BISCARO, G. A. Diagnose nutricional com o uso de sensor óptico ativo em algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1159–1165, 2012.

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**, Piscataway, v. 33, n. 2, p. 481-486, 1995.

PENG, Y.; GITELSON, A. A. Remote estimation of gross primary productivity in soybean and maize based on total crop chlorophyll content. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 117, p. 440–448, 2012.

PICOLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 68, p. 789-795. 2009.

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

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.

RAUN, W. R.; SOLIE, J. B.; STONE, M. L.; MARTIN, K. L.; FREEMAN, K. W.; MULLEN, R. W.; ZHANG, H.; SCHEPERS, J. S.; JOHNSON, G. V. Optical Sensor-Based Algorithm for Crop Nitrogen Fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36, p. 2759–2781, 2005.

RISSINI, A. L. L.; KAWAKAMI, J.; GENÚ, A. M. Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, n. 6, p. 1703–1713, 2015.

ROUSE JUNIOR, J. W.; HAAS, R. H.; DEERING, D. W.; SCHELL, J. A.; HARLAN, J. C. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. Greenbelt: NASA, 1974. 371 p.

SANGOI, L. Understanding plant density effects on maize growth and development: an important issue to maximize grain yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 159–168, 2001.

SANGOI, L.; AMEILDA, M. L.; GRACIETTI, M. A.; HORN, D.; SCHWEITZER, C.; SCHMITT, A.; BIANCHET, P. Rendimento de grãos, produção e distribuição de massa seca de híbridos de milho em função do aumento da densidade de plantas. **Revista Brasileira Agrociência**, v. 11, n. 1, p. 35-31, 2005.

SANGOI, L.; SCHWEITZER, C.; SILVA, P. R. F. da; SCHMITT, A.; VARGAS, V. P.; CASA, R. T.; SOUZA, C. A. de. Perfilamento, área foliar e produtividade do milho sob diferentes arranjos espaciais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 6, p. 609–616, 2011.

SANGOI, L.; SILVA, P. R. F. **Arranjo de plantas e desempenho agrônômico do milho**. A Cultura do milho em Santa Catarina, Florianópolis. [S.l.: s.n.], 2010. p. 115-162.

SCHMITT, A. **Arranjo de plantas para maximizar o desempenho agrônômico do milho em ambientes de alto manejo**. 2014. 226p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

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**, Madison, v. 93, p. 583-589, 2001.

SHARMA, L.; BU, H.; DENTON, A.; FRANZEN, D. W. Active-Optical Sensors Using Red NDVI compared to Red Edge NDVI for prediction of corn grain yield in North Dakota, U.S.A. **Sensors**, Basel, v. 15, n. 11, p. 27832–27853, 2015.

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. de C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2014.

SHIRATSUCHI, L. S.; VILELA, M. F.; FERGUSON, R. B.; SHANAHAN, J. F.; ADAMCHUK, V. I.; RESENDE, A. V.; HURTADO, S. M. C.; CORAZZA, E. J. Desenvolvimento de um algoritmo baseado em sensores ativos de dossel para recomendação da adubação nitrogenada em taxas variáveis. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (Org.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa, 2011. p. 184-188.

SINGH, N. K.; ASHOK, T.; ANSHUKA, S. Development and testing of twin row drum planter for maize. **Global Journal of Multidisciplinary Studies**, [S.l.], v. 5, n. 2, p. 198 - 205 2016.

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

SOUZA, J. A. de; BUZETTI, S.; TARSITANO, M. A. A.; VALDERRAMA, M. Lucratividade do milho em razão das fonte , doses e épocas de aplicação de nitrogênio. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 3, p. 321–329, 2012.

TAKASU, A. T.; RODRIGUES, R. A. F.; GOES, R. J.; HAGA, K. I.; ARF, O.; GITTI D. C. Características agrônômicas da cultura do milho em função do preparo de solo e arranjo espacial de plantas. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 6, n. 21, p. 340–345, 2014.

TORRES, F. E.; SOUZA, L. C. F.; ANDRADE, L. H. L.; PEDROSO, F. F.; MATOSO, A. O.; TORRES, L. D.; BENETT, C. G. S.; BENETT, K. S. S. Influência da cobertura do solo e doses de nitrogênio na cultura do milho safrinha. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Dois Irmãos, v. 9, n. 1, p. 36–41, 27, 2014.

UEBEL, J. D. **Avaliação de fungicidas no controle de doenças foliares, grãos ardidos e efeito no NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) em híbridos de milho**. 2015. 119 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

USDA (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE). **World agricultural production**. Washington, DC, 2016. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>>. Acesso em: 28 de março, 2017.

WERLE, A. J. K.; NICOLAY, R. J.; SANTOS, R. F.; BORSOI, A.; SECO, D. Avaliação de híbridos de milho convencional e transgênico (Bt), com diferentes aplicações de inseticida em cultivo safrinha. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 4, n. 1, p. 150-159, 2011.

ZANZARINI, F. V.; PISSARRA, T. C. T.; BRANDÃO, F. J. C.; TEIXEIRA, D. D. B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat / ETM + com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 6, p. 608–614, 2013.

ZERBATO, C.; ROSALEN, D. L.; FURLANI, C. E. A.; DEGHAID, J.; VOLTARELLI, M. A. Agronomic characteristics associated with the normalized difference vegetation index (NDVI) in the peanut crop. **Australian Journal of Crop Science**, Lismore, v. 10, n. 5, p. 758–764, 2016.