

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS -  
AGRONOMIA

**DETECÇÃO DE RESPOSTAS ESPECTRAIS NA SOJA CAUSADOS POR  
NEMATÓIDES POR MEIO DE SISTEMAS AÉREOS NÃO TRIPULADOS**

Autor: Victor Hugo Moraes  
Orientador: Prof. Dr. Alaerson Maia Geraldine  
Coorientadores: Prof. Dr. Gustavo Castoldi  
Dr. Lucio André de Castro Jorge

Rio Verde - GO  
Julho - 2019

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS -  
AGRONOMIA

**DETECÇÃO DE RESPOSTAS ESPECTRAIS NA SOJA CAUSADOS POR  
NEMATÓIDES POR MEIO DE SISTEMAS AÉREOS NÃO TRIPULADOS**

Autor: Victor Hugo Moraes  
Orientador: Prof. Dr. Alaerson Maia Geraldine

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração Produção Vegetal Sustentável do Cerrado.

Rio Verde - GO  
Julho - 2019

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

Moraes, Victor Hugo  
MM827d Detecção de respostas espectrais na soja  
causados por nematoides por meio de sistemas aéreos não  
tripulados / Victor Hugo Moraes; Orientador: Alaerson  
Maia Geraldine; Co-orientadores: Gustavo Castoldi e  
Lucio Andre de Castro Jorge. Rio Verde, 2019.  
73 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias -  
Agronomia) Instituto Federal Goiano, Campus Rio  
Verde, 2019.

1. sensoriamento remoto. 2. comportamento espectral. 3.  
fusão de dados. 4. *Pratylenchus brachyurus*. 5.  
*Helicotylenchus dihystera*. I. Geraldine, Alaerson Maia,  
orient. II. Castoldi, Gustavo e Jorge, Lucio André de  
Castro, Coorient. III. Título.



Repositório Institucional do IF Goiano - RIIF Goiano  
Sistema Integrado de Bibliotecas

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese  | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação                      | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização                 | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação                             | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ |   |

Nome Completo do Autor:

Matrícula:

Título do Trabalho:

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 25/09/2019  
Local Data

Victor Hugo Moraes

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

Alaerson Maia Gerablie  
Assinatura do(a) orientador(a)

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS -  
AGRONOMIA

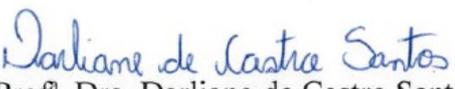
DETECÇÃO DE RESPOSTAS ESPECTRAIS NA SOJA CAUSADOS POR  
NEMATOIDES POR MEIO DE SISTEMAS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

Autor: Victor Hugo Moraes  
Orientador: Dr. Alaerson Maia Geraldine

TITULAÇÃO: Mestre em Ciências Agrárias-Agronomia- Área de Concentração em  
Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em 26 de julho de 2019

  
Prof. Dr. Pedro Rogerio Giongo  
Avaliador externo  
Universidade Estadual de Goiás

  
Profª. Dra. Darliane de Castro Santos  
Avaliadora interna  
IF Goiano – Campus Rio Verde

  
Prof. Dr. Carlos Micael Alves  
Avaliador externo  
IF Goiano – Campus Rio Verde

  
Prof. Dr. Alaerson Maia Geraldine  
Presidente da banca  
IF Goiano – Campus Rio Verde

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a **Deus**, por sempre me guiar pelos caminhos certos, iluminar cada etapa da minha vida, dando forças a todo momento para então a sonhada obtenção do título de Mestre e o mais importante: “**O conhecimento** adquirido nessa caminhada”.

Dedico este trabalho extremamente a minha filha **Ana Laura Alves Carneiro**, porque se não fosse por ela, talvez não estaria onde estou e ao meu avô **José Feliciano Carneiro** que se encontra em outro plano espiritual.

Aos meus queridos pais, **Rubens Quirino de Moraes** e **Lucélia Carneiro Moraes** que sempre me apoiaram nas minhas decisões e deram conselhos para alcançar meus objetivos sem medir esforços. À minha avó **Célia Franco Moraes**, ao meu irmão **Caio Carneiro Cassol**, ao meu padrasto **Edson Cassol**, e a todos da minha família tanto paterna quanto materna, que de alguma forma estavam presentes na minha vida.

Ao meu orientador **Alaerson Maia Geraldine** em especial, por me ajudar em qualquer dúvida que viesse a aparecer ao longo do curso, grandes ensinamentos, conselhos, tanto profissional quanto pessoal, e será lembrado para sempre, contribuindo na minha formação quanto acadêmica e profissional. Ao **Tavvs Micael Alves** que também foi orientador no desenvolvimento desse estudo, passando seus ensinamentos da melhor forma possível e colaborando também para minha formação acadêmica e profissional. Ao grande amigo **Bruno Henrique Tondato Arantes**, parceiro de todas as atividades em laboratório e em campo que foram realizadas durante o mestrado.

A todos os professores do Instituto Federal Goiano - Campus de Rio Verde e Polo de Inovação, que contribuíram para minha formação, pois esse trabalho tem um pouco de cada um.

Gostaria de agradecer a **Darliane de Castro Santos, Tavvs Micael Alves, Pedro Giongo e Lúcio André de Castro Jorge**, por terem aceitado participar da minha banca passando todos os seus ensinamentos.

A todos que ajudaram nas análises laboratoriais e avaliações em campo: **Alice Albert, Gabriel Castoldi, Gabriel Jesus, Lorena Nogueira, Lucas Freitas, Romulo Moreira Silva, Suellen Polyana Silva Cunha** e a todos os outros colegas de laboratório que sempre estiveram presentes e me ajudaram.

Agradeço especialmente ao **Laboratório de Drones e Vant's na Agricultura, Laboratório de Fitopatologia**, à **CAPES**, pela bolsa de estudos, ao **Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde**, ao **Polo de Inovação** na viabilização do desenvolvimento desse estudo, ao **Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias**.

Queria agradecer ao **Gapes, Grupo Segredo** e a todos os funcionários, por todo apoio na realização desse trabalho. Faço isso em nome de Paulo Buffon que é um de muitos agricultores que confiam nos benefícios da tecnologia aplicada no manejo de pragas e doenças na agricultura.

## BIOGRAFIA DO AUTOR

Victor Hugo Moraes Nasceu em Jatai – GO, em 03 de abril de 1992, filho de Rubens Quirino de Moraes e Lucélia Carneiro Morais. Coursou Engenharia Agrícola na Universidade Estadual de Goiás – Campus Santa Helena de Goiás, entre 2012 e 2016. Durante a graduação trabalhou na linha de pesquisa em sensoriamento remoto aplicado à agrometeorologia. Em 2017 ingressou no IF Goiano – Campus Rio Verde, no programa de pós-graduação *Strictu Sensu*, Mestrado em Ciências Agrárias – Agronomia, na linha de pesquisa em tecnologias sustentáveis em sistemas de produção e uso do solo e água, atuando no desenvolvimentos de tecnologias para o manejo de nematoides com a utilização de sensores RGB, termal e multiespectral embarcados em sistemas aéreos não tripulados.

## ÍNDICE GERAL

### Página

<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES .....</b>	<b>xiii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>13</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>15</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>21</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO I - Sensores de baixo custo para detecção de respostas espectrais de soja a três espécies de nematoides .....</b>	<b>28</b>
RESUMO .....	28
ABSTRACT.....	29
INTRODUÇÃO.....	29
MATERIAL E MÉTODOS .....	31
RESULTADOS.....	33
DISCUSSÃO.....	35
AGRADECIMENTOS.....	37
LITERATURA CITADA.....	37
<b>CAPÍTULO II - Multissensores aumenta a capacidade de estimar injúria de nematoides na soja .....</b>	<b>50</b>
ABSTRACT.....	51
KEYWORDS .....	51
1. INTRODUÇÃO.....	52
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	54
3. RESULTADOS.....	58
4. DISCUSSÕES .....	63
5. CONCLUSÕES.....	66
6. AGRADECIMENTOS .....	66
7. REFERÊNCIAS .....	66
<b>CONCLUSÃO GERAL.....</b>	<b>73</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

Página

### **CAPÍTULO I - Sensores de baixo custo para detecção de respostas espectrais de soja a três espécies de nematoides**

**Tabela 1.** Bandas espectrais individuais dos sensores RGB, índices de vegetação comuns e quatro índices de vegetação propostos para determinar a relação entre o número de nematoides e a refletância espectral da soja em Rio verde, Goiás, Brasil, 2017.....42

**Tabela 2.** Estimativas de regressão do efeito de três espécies de nematoides sobre a refletância espectral da soja em bandas espectrais individuais e índices de vegetação (IV's) obtidos a partir de sensores de baixo custo na cidade de Rio Verde, Goiás, Brasil, 2017.....43

### **CAPÍTULO II – Multissensores aumentam a capacidade de estimar injúria de *Pratylenchus brachyurus* na soja**

**Tabela 1.** Subconjunto de bandas espectrais usando fusão de dados multi-sensor baseados por seleção do Forward Model Selection para otimizar a quantificação de *P. brachyurus* no solo e na raiz, *H. dihystra* no solo e na raiz e variáveis agronômicas.....63

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Páginas
<b>CAPÍTULO I - Sensores de baixo custo para detecção de respostas espectrais de soja a três espécies de nematoides</b>	
<b>Figura 1.</b> Localização geográfica da área de estudo e pontos de amostragens no centro, 10, 20, 40 e 80 m do centro da reboleira em duas direções.....	46
<b>Figura 2.</b> Imagem aérea representativa de quatro subáreas (A-D) do mesmo campo de soja obtidas de um sistema de sensoriamento remoto RGB de baixo custo. A imagem foi classificada utilizando o Índice de Refletância Fotoquímica (PRI), observações de campo e amostras de solo e raiz de <i>Pratylenchus brachyurus</i> , <i>Heterodera glycines</i> e <i>Helicotylenchus dihystera</i> em soja. Os pontos pretos representam os pontos de amostragem de nematoides.....	47
<b>Figura 3.</b> Imagem aérea representativa de quatro subáreas (A-D) do mesmo campo de soja obtidas de um sistema de sensoriamento remoto RGB de baixo custo. A imagem foi classificada utilizando o Índice de Refletância Fotoquímica (PRI), observações de campo e amostras de solo e raiz de <i>Pratylenchus brachyurus</i> , <i>Heterodera glycines</i> e <i>Helicotylenchus dihystera</i> em soja. Os pontos de coleta representam os locais onde os nematoides foram amostrados.....	48
<b>Figura 4.</b> Correlação entre <i>Heterodera glycines</i> no solo e <i>Heterodera glycines</i> na raiz (A), <i>Heterodera glycines</i> no solo e cistos viáveis no solo (B), <i>Heterodera glycines</i> no solo e cistos inviáveis no solo (C), <i>Helicotylenchus dihystera</i> no solo e <i>Helicotylenchus dihystera</i> na raiz (D) e <i>Pratylenchus brachyurus</i> no solo e <i>Pratylenchus brachyurus</i> na raiz (E).....	49
<b>CAPÍTULO II - Multissensores aumentam a capacidade de estimar injúria de <i>Pratylenchus brachyurus</i> na soja</b>	

<b>Figura 1.</b> Localização geográfica da área de estudo e pontos de amostragens no centro, 10, 20, 40 e 80 m do centro da reboleira em duas direções.....	56
<b>Figura 2:</b> Mapa de estimativa de <i>P. brachyurus</i> no solo (a); <i>P. brachyurus</i> na raiz (b); <i>H. dihystra</i> no solo (c) e <i>H. dihystra</i> na raiz (d) usando fusão de dados multi-sensor baseados em Forward Model Selection.....	60
<b>Figura 3:</b> Mapa de estimativa de altura de planta (a); massa verde parte aérea (b); massa seca parte aérea (c); massa verde da raiz (d) e massa seca da raiz (e) usando fusão de dados multi-sensor baseados em Forward Model Selection.....	60

**LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES**

<b>Símbolo / Sigla</b>	<b>Significado</b>
NLR	Nematoide das lesões radiculares
NCS	Nematoide do cisto da soja
R	Red
G	Green
B	Blue
Red-edge	Borda vermelha
NIR1	Infravermelho próximo sensor 1
NIR 2	Infravermelho próximo sensor 2
GSD	Distância da amostra do solo
AIC	Critério de informação de Akaike
SANT	Sistema aéreo não tripulado
g	Gramas
IV's	Índices de vegetação
nm	Nanometros

## RESUMO

MORAES, VICTOR HUGO. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, julho de 2019. **Detecção de respostas espectrais na soja causados por nematoides por meio de sistemas aéreos não tripulados.** Orientador: Dr. Alaerson Maia Geraldine; Coorientadores: Dr. Gustavo Castoldi e Dr. Lucio André de Castro Jorge.

Os sistemas aéreos não tripulados têm se tornado uma ferramenta auxiliar no monitoramento dos danos causados por nematoides na soja. Os objetivos deste estudo foram analisar a relação entre o número de nematoides (*P. brachyurus*, *H. glycines*, *H. dihystera*) e a resposta espectral das plantas da cultura da soja; a distribuição radial dos nematoides em torno do foco inicial de infestação; estimar a população de *P. brachyurus*, *H. dihystera* e variáveis agronômicas através da fusão de dados de múltiplos sensores; selecionar bandas espectrais que melhor estimem a injúria causada por *P. brachyurus*, *H. dihystera* e variáveis agronômicas. Voos exploratórios iniciais nos estádios de crescimento da soja V5 e R1 foram realizados para a identificação dos problemas, com um Phantom 4, sensor RGB a 120 m de altura e sobreposições de 80%. As imagens foram ortorretificadas e dois transectos foram criados para cada zona a partir do foco inicial e posicionando radialmente pontos de amostragem adicionais a 10, 20, 40 e 80 m do centro. Nos estádios R1 e R5 da cultura da soja foram realizados simultaneamente voos e amostragens de solo e raiz das plantas de soja em todos pontos. As imagens RGB foram adquiridas com sensor do Phantom 4. As imagens multiespectrais foram adquiridas com sensores Parrot Sequoia e Sentera que capturam imagens nos espectros do visível e infravermelho próximo. Todas as imagens foram processadas no Pix4D e analisadas no software Qgis. A extração e quantificação dos nematoides no solo e raiz das plantas seguiu os métodos de extração de nematoides utilizados no laboratório. Modelos de regressão de efeitos mistos foram utilizados para

determinar a relação entre o número de nematoides e refletância espectral/índices de vegetação e o efeito da distância do centro de plantas infestadas sobre o número de nematoides. Foi realizada também fusão de dados através de modelos de regressão linear múltipla stepwise do tipo forward model selection entre as variáveis medidas (nematológicas e agronômicas) e estimadas (19 bandas espectrais). As respostas espectrais da soja a partir de sensores RGB de baixo custo possui potencial para prever lesões causadas por *H. glycines*, *Pratylenchus brachyurus* e *H. dihystra* na raiz das plantas de soja foram efetivamente detectados e estimados somente com a fusão de dados de multissensores. As variáveis agronômicas foram estimadas com bandas que atuam no espectro do visível e infravermelho próximo. É indicado o uso de protocolos de amostragem adequados, porque números mais altos de algumas espécies de nematoides foram encontrados fora das áreas que representam as plantas severamente estressadas.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, comportamento espectral, fusão de dados, *Pratylenchus brachyurus*, *Helicotylenchus dihystra*.

## ABSTRACT

MORAES, VICTOR HUGO. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, July 2019. **Detection of spectral responses in soybean caused by nematodes by unmanned aerial systems.** Advisor: Dr. Alaerson Maia Geraldine; Co-advisers: Dr. Gustavo Caltodi and Dr. Lucio André de Castro Jorge.

Unmanned aerial systems have become an auxiliary tool in monitoring nematode damage in soybeans. The objectives of this study were to analyze the relationship between the nematodes numbers (*P. brachyurus*, *H. glycines*, *H. dihystra*) and the spectral response of soybean plants; the nematodes radial distribution around the initial focus of infestation; estimate the population of *P. brachyurus*, *H. dihystra* and agronomic variables by fusion of multiple sensor data; select spectral bands that best estimate the injury caused by *P. brachyurus*, *H. dihystra* and agronomic variables. Initial exploratory flights at the V5 and R1 soybean growth stages were carried out to identify problems, with a Phantom 4, 120 m high RGB sensor and 80% overlaps. The images were orthorectified and two transects were created for each zone from the initial focus and radially positioning additional sampling points at 10, 20, 40 and 80 m from the center. In stages R1 and R5, flights and samplings of soil and root of soybean plants were carried out simultaneously. RGB images were acquired with Phantom 4 sensor. Multispectral images were acquired with Parrot Sequoia and Sentera sensors that capture images in the visible and near infrared spectra. All images were processed on Pix4D and analyzed using Qgis software. The nematodes extraction in the soil and plants root followed the methods of nematodes extraction used in the laboratory. Mixed effects regression models were used to determine the relationship between the nematodes number and spectral reflectance / vegetation indices and the effect of distance from the center of infested plants on the nematodes number. Data fusion was

also performed through stepwise multiple linear regression models of the forward model selection between the measured (nematological and agronomic) and estimated variables (19 spectral bands). Soybean spectral responses from low-cost RGB sensors have the potential to predict *H. glycines* lesions. *Pratylenchus brachyurus* and *H. dihystra* in the root of soybean plants were effectively detected and estimated only by fusion of multisensor data. Agronomic variables were estimated with bands that act in the visible and near infrared spectrum. Appropriate sampling protocols are indicated because higher numbers of some nematode species were found outside areas that represent severely stressed plants.

**Key words:** remote sensing, spectral behavior, data fusion, *Pratylenchus brachyurus*, *Helicotylenchus dihystra*.

## INTRODUÇÃO

A soja *Glycine max* (L.) Merrill é a quarta cultura mais cultivada no mundo (VOLPATO et al., 2019), sendo considerada uma das principais commodities do Brasil (RAMIRO et al., 2019). A soja é fonte de proteína e óleo para consumo tanto por seres humanos quanto por animais (BAEK et al., 2019). Dados mais recentes da Companhia Nacional de Abastecimento relata que a produção de soja no Brasil aumentou em 29% entre 2012 e 2019 (CONAB, 2019). Os EUA, Brasil, Paraguai e Argentina são responsáveis por exportar mais de 90% da produção mundial onde os maiores importadores são a China, Coreia e Japão (BROWN-LIMA et al., 2010). Dentre os principais patógenos da soja, destacam-se os nematoides parasitas de plantas encontrados no solo, que causam danos substanciais à produção de soja em todo o mundo (NIBLACK et al., 2006).

Os nematoides de maior importância econômica na cultura da soja são o nematoide das lesões radiculares (*Pratylenchus brachyurus* (Godfrey) Filipjev) considerado endoparasita migratório, e os endoparasitas sedentários sendo o nematoide do cisto da soja (*Heterodera glycines* Ichinohe) e o nematoide das galhas (*Meloidogyne* spp.) (JONES et al., 2013; PENG et al., 2016). *Pratylenchus brachyurus*, é um nematoide endoparasita migrador, pode causar sérios danos às raízes das plantas. O rendimento da soja em áreas com infestação de *P. brachyurus* pode reduzir de 50% a 85% da produção de soja (DIAS et al., 2010; RIBEIRO et al., 2010; HONG et al., 2011; NICOL et al., 2011; FRANCHINI et al., 2014), sendo muito dependentes dos níveis populacionais. Este parasita apresenta alto grau de polifagia, penetra e migra nos tecidos do córtex radicular, preferencialmente as radículas, destrói as células parasitadas através de sua movimentação ativa e liberação de enzimas e toxinas (FLIS et al., 2018). Sintomas comuns associados a esse nematoide em plantas de soja incluem reboleiras de plantas com crescimento reduzido, amarelecimento ocasional das folhas e severas

necroses nas raízes e tubérculos, limitando a absorção e transporte de água e nutrientes (CASTILLO E VOVLAS, 2007). Os sintomas causados por nematoides podem ser agravados quando as plantas estão sujeitas com a presença de camada compactada de solo, excesso ou falta de calagem e ocorrência de períodos de escassez hídrica. Apesar das reboleiras serem sintomas típicos do ataque de nematoides, podem ser facilmente confundidas com outros problemas. As necroses causadas no sistema radicular propiciam a penetração de outros organismos patogênicos como fungos (*Phytophthora* spp., *Fusarium* spp. e *Rhizoctonia solani* Kuhn) e bactérias (GOOD, 1973; BRINKMAN et al., 2005), contribuindo para o aumento dos danos à planta.

O nematoide do cisto da soja, *H. glycines* é um dos principais patógenos que reduzem o rendimento da soja (ALLEN et al. 2017). *Heterodera glycines* inibe o crescimento do sistema radicular das plantas de soja e causa amarelecimento precoce das folhas (SUBBOTIN et al., 2010). Secretam numerosos efetores das células da glândula esofágica em suas células hospedeiras através de um estilete que desencadeia alterações fisiológicas nas raízes do hospedeiro (CHEN et al., 2015; POGORELKO et al., 2015). Dependendo da gravidade de sua população, *H. glycines* causam perdas de rendimentos que variam de 15 a 100% (DHINGRA et al., 2009; DUAN, 2011), sendo necessário a utilização de ferramentas eficazes para o manejo desse nematoide (LIU et al., 2018).

Entretanto, estudos recentes indicam que algumas espécies de fitonematoides como *Helicotylenchus dihystera* (Cobb), caracterizado como ectoparasita, ainda considerado um nematoide secundário da soja no Brasil, possuem potencial para limitar o rendimento dessa cultura, uma vez que sua disseminação e densidade populacional aumentaram nas áreas de cultivo de soja (GOMES et al., 2003; KIRSH et al., 2016). O uso intensificado de terras agrícolas no Brasil pode ter um papel significativo no surgimento de patógenos secundários em culturas agrícolas (MACHADO, 2014). *Helicotylenchus dihystera*, responsável principalmente a perdas de safra de cana-de-açúcar e milho, também foi detectado em áreas de cultivo de soja no Brasil, com incidências crescentes e populações de solo (MACHADO, 2014). Estudos realizados nos estados do Acre, Mato Grosso e Goiás mostraram que o *H. dihystera* foi encontrado em 85%, 92% e 47% das amostras, respectivamente, e sua presença tem sido associada a plantas atrofiadas, mas seus danos diretos isolados de outras espécies de nematoides ainda não foram quantificados (SHARMA et al., 2001; FUNDAÇÃO RIO VERDE, 2014; MACHADO et al., 2019).

O manejo de nematoides requer identificação e integração de múltiplas práticas agronômicas, como rotação de culturas, adubação adequada, controle de plantas daninhas e aplicações de nematicida (SILVA et al., 2004; LIMA et al., 2015). Nas regiões produtoras de soja, é comum a sucessão de cultura com a cultura do milho, uma vez que o milho pode multiplicar as populações de *P. brachyurus* (FRANCHINI et al., 2011; TAVARES-SILVA et al., 2017). As populações de nematoides são tradicionalmente monitoradas por visitas intensivas a campos de produção e análises laboratoriais com custos elevados. Nesse sentido, faz-se necessário a utilização de técnicas remotas não destrutivas, que pode reduzir o número de amostragens nos campos de produção. O sensoriamento remoto surge como alternativa, em que os sistemas aéreos não tripulados (SANT), uma inovação tecnológica, complementam os métodos tradicionais de detecção e quantificação desses patógenos durante as safras agrícolas e permitem criar oportunidade para revelar a presença de nematoides não detectados pelos agricultores (ALVES et al., 2015; BAJWA et al., 2017; ALVES et al., 2019).

O uso do sensoriamento remoto aplicado a pragas e doenças de plantas é possível porque as plantas infectadas mostram comportamento espectral diferente das saudáveis (RIEDEL e BLACKMER, 1999; ZHANG et al. 2003; MARIN et al., 2018). A resposta espectral da planta tem sido utilizada para mapear e detectar as distribuições de nematoides das galhas (MARTINS e GALO, 2017), detecção de *Sclerotinia sclerotiorum* (CAO et al., 2018), pulgão da soja (ALVES et., 2015), estresse hídrico (SCHMITTER et al., 2017), avaliar o estado nutricional das plantas (MORENO-GARCIA et al., 2018; ZHENG et al., 2018) e auxiliar no desenvolvimento e implementação da agricultura de precisão (CHEMURA et al., 2016; VANEGAS et al., 2018; CAMPOS et al., 2019). As tecnologias de SANT são atualmente utilizadas para muitas aplicações que exigem imagens de alta resolução espacial, pois permitem amostragens com resoluções espaciais e temporais maiores do que as abordagens tradicionais usadas para pragas e doenças em várias culturas (ZHANG E KOVACS, 2012). Os SANT de alta resolução permitem a avaliação individual de cada planta no campo e ainda a avaliação efetiva de maior número de plantas por meio do seu comportamento espectral quando comparado ao método tradicional de amostragem (PUGH et al., 2018; SHAFIAN et al., 2018).

Os sistemas de sensoriamento remoto de baixo custo, como os sensores RGB (red, green e blue), mostraram resultados promissores para reduzir os custos de

estimativa do estresse induzido por pragas em escala agrícola (BENDIG et al., 2014; MARTINS et al., 2017; PÁDUA et al., 2018). Além disso, os índices de vegetação, caracterizados por combinações aritméticas entre bandas derivadas de sensores RGB, podem ser melhores preditores de alterações fisiológicas das plantas induzidas pela praga do que a refletância dos comprimentos de onda RGB individuais (BENDIG et al., 2014; ALVES et al., 2015; DUAN et al., 2017). Em contraste, sensores multiespectrais podem fornecer múltiplas bandas espectrais nas faixas do visível e infravermelho próximo, em que a faixa do infravermelho próximo detecta o que não é visível a olho nu (ZENG et al., 2018). Os sensores RGB e multiespectrais podem registrar o efeito dos fatores endógenos e exógenos indutores de estresse no dossel da cultura em comprimentos de onda específicos do espectro eletromagnético (RANJAN, et al., 2019).

Diferentes sensores possuem características próprias em termos de resoluções espaciais, temporais, espectrais e radiométricas (PENA et al., 2018). A fusão de dados em sensoriamento remoto, visa integrar as informações adquiridas com diferentes resoluções espaciais, temporais, espectrais e radiométricas de sensores montados em satélites, aeronaves tripuladas e não tripuladas e plataformas terrestres para produzir dados fundidos que contêm informações mais detalhadas, integrando efetivamente as vantagens de observações complementares de várias plataformas e rompendo as restrições de um único sensor (ZHANG, 2010; SCHMITT e XIANG, 2016; MING LU et al., 2017). A fusão de dados multisensores é uma tecnologia que permite combinar informações de várias fontes para formar uma imagem unificada (PENA et al., 2018).

A fusão de dados obtidos por SANT integrados com múltiplos sensores se tornaram populares nos últimos anos. A fusão de dados melhora a estimativa das características das plantas, combinando as informações espectrais, estruturais e térmicas contidas em diversos sistemas de sensores (MAIMAITIJIANG et al., 2017). A fusão de dados foi aplicada, por exemplo, na detecção da ferrugem amarela no trigo (MOSHOU et al., 2005), estimativa de biomassa de plantas (MARSHALL e THENKABAIL, 2015; TILLY et al., 2015). Índices de vegetação e altura de planta com bases em imagens RGB foram combinados para estimativa do rendimento de biomassa (BENDIG et al., 2014) e informações espectrais de um sensor multiespectral e termal do dossel de plantas foram utilizadas para estimativa da concentração de clorofila (ELARAB et al., 2015). Sendo assim, a fusão de dados multisensores que atuam nos comprimentos de ondas na faixa do visível, infravermelho próximo e distante pode melhorar a detecção e estimativa de pragas e doenças que causam injúria na cultura da soja.

## OBJETIVOS

### Geral

Determinar comprimentos de onda através de sensores de baixo custo (RGB) e multiespectrais para detecção e estimativa da população de nematoides através do comportamento espectral de plantas de soja.

### Específicos

- Analisar a relação estatística através de modelos de regressão de efeitos mistos entre o número de nematoides (*P. brachyurus*, *H. glycines*, *H. dihystera*, cistos viáveis e inviáveis) e a resposta espectral de plantas de soja;
- Analisar a distribuição radial dos nematoides (*P. brachyurus*, *H. glycines*, *H. dihystera*, cistos viáveis e inviáveis) através de modelos de regressão de efeitos mistos em torno do foco inicial de infestação;
- Estimar a população de *P. brachyurus*, *H. dihystera* e variáveis agronômicas: altura de planta, massa verde da parte aérea e da raiz e massa seca da parte aérea e da raiz, através da fusão de dados de múltiplos sensores;
- Selecionar bandas espectrais de imagens de alta resolução espacial para estimativa da injúria causada por *P. brachyurus*, *H. dihystera* e variáveis agronômicas;
- Selecionar as bandas espectrais de imagens de alta resolução espacial a partir da fusão de dados por multis-sensores para otimização de sensores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, T., BRADLEY, C., SISSON, A., BYAMUKAMA, E., CHILVERS, M., COKER, C., COLLINS, A., DAMICONE, J., DORRANCE, A., DUFAULT, N., ESKER, P., FASKE, T. GIESLER, L., & WRATHER, J. Soybean yield loss estimates due to diseases in the United States and Ontario, Canada, from 2010 to 2014. **Plant Health Progress**, v. 18, p. 19-21, 2017.

ALVES, T. M., MONN, R. D., MACRAE, I. V., & KOCK, R. Optimizing band selection for spectral detection of *Aphis glycines* Matsumurain soybean. **Pest Management Science**, v. 75, n. 4, 942-949, 2019.

ALVES, T. M., MACRAE, I. V., & KOCH, R. L. Soybean aphid (Hemiptera: Aphididae) affects soybean spectral reflectance. **Journal of Economy Entomology**, v. 108, n. 6, p. 2655-2664, 2015.

BAEK, I., KUSUMANINGRUM, D., KANDPAL, L. M., LOHUMI, S., MO, C., KIM, M. S. & CHO, B. K. Rapid measurement of soybean seed viability using kernel-based multispectral image analysis. **Sensors**, v. 19, n.2, p. 271-286, 2019.

BAJWA, S. G., RUPE, J. C., & MASON, J. Soybean disease monitoring with leaf reflectance. **Remote Sensing**, v. 9, p. 127-140, 2017.

BENDIG, J., BOLTEN, A., BENNERTZ, J., BROSCHEIT, J., EICHFUSS, S., & BARETH, G. Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV- based RGB imaging. **Remote Sensing**, v. 6, p. 10395-10412, 2014.

BRINKMAN, E. P.; DUYTS, H., & VAN DER PUTTEN, W. H. Competition between endoparasitic nematodes and effect on biomass of *Ammophila arenaria* (marram grass) as affected by timing of inoculation and plant age. **Nematology**, v. 7, n. 2, p. 169-178, 2005.

BROWN-LIMA, C., COONEY, M., & CLEARY, D. An overview of the Brazil-China soybean trade and its strategic implications for conservation. United States Agency for International Development: Washington DC, USA, 2010.

CAMPOS, J., LLOP, J., GALLART, M., GARCIA-RUIZ, F., GRAS, A., SALCEDO, R., & GIL, E. Development of canopy vigour maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process. **Precision Agriculture**, 2019.

CAO, F., LIU, F., GUO, H., KONG, W., ZHANG, C., & HE, Y. Fast detection of *Sclerotinia Sclerotiorum* on oilseed rape leaves using low-altitude remote sensing technology. **Sensors**, v. 18, n. 12, p. 1-16, 2018.

CASTILLO, P., N., & VOVLAS. *Pratylenchus* (Nematode: Pratylenchidae): Diagnosis, biology, pathogenicity and management. Leiden: Brill, 2007.

CHEMURA, A., MUTANGA, O., & DUBE, T. Separability of coffee leaf rust infection levels with machine learning methods at Sentinel-2 MSI spectral resolutions. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 5, p. 859-881, 2016.

CHEN, S., LANG, P., CHRONIS, D., ZHANG, S., DE JONG, W. S., MITCHUM, M. G., & WANG, X. In planta processing and glycosylation of a nematode *clavata3*/endosperm surrounding region-like effector and its interaction with a host *clavata2*-like receptor to promote parasitism. **Plant Physiology**, v. 167, p. 262-272, 2015.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: grãos. V.6 – Safra 2018/19- N.8 – Oitavo levantamento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acessado em 03 de junho de 2019.

DHINGRA, O. D., MENDONÇA, H. L., & MACEDO, D. M. Doenças e seu controle. In Sedyama T (ed.) Tecnologias de produção e usos da soja. Mecenas, Londrina, p. 133-155, 2009.

DIAS, W. P., GARCIA, A., SILVA, J. F. V., & CARNEIRO E G. E. S. Nematoides em soja: identificação e controle. **Embrapa Soja**, 8 p, 2010.

DUAN, Y. X. Plant Pathogenic Nematodes. Beijing: **Science Press**, 2011.

DUAN, T., CHAPMAN, S. C., GUO, Y., & ZHENG, B. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. **Field Crops Research**, v. 210, p. 71-80, 2017.

ELARAB, M., TICLAVILCA, A. M., TORRES-RUA, A. F., MASLOVA, I., & MCKEE, M. Estimating chlorophyll with thermal and broadband multispectral high resolution imagery from an unmanned aerial system using relevance vector machines for precision agriculture. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 43, p. 32-42, 2015.

FLIS, L., R., DOBOSZ, RYBARCZYK-MYDŁOWSKA, K., WASILEWSKA-NASCIMENTO, B., KUBICZ, M., & WINISZEWSKA, G. First report of the lesion nematodes: *Pratylenchus brachyurus* and *Pratylenchus delattrei* on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants in Cape Verde. **Helminthologia**, v. 55, n. 1, p. 88-94, 2018.

FRANCHINI, J. C., DEBIASI, H., DIAS, W. P., RAMOS JUNIOR, E. U., & SILVA, J. F. V. Perda de produtividade da soja em área infestada por nematoide das lesões radiculares na região médio norte do Mato Grosso. In: Bernardi, A. C. de C.; Naime, J. de M.; Resende, A.V. de; Bassoi, L. H.; Inamasu, R.Y. (Ed.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília: Embrapa, p.274-278, 2014.

FRANCHINI, J. C., COSTA, J. M., & DEBIASI, H. Rotação de culturas: Prática que confere maior sustentabilidade à produção agrícola no Paraná. **Informações Agrônomicas**, n.134, p.1-13, 2011.

FUNDAÇÃO RIO VERDE. Levantamento populacional de espécies de nematoides na cultura da soja na região do médio norte de Mato Grosso (2013–2014). 2014. Acessado em [www.fundacaorioverde.com.br/publicacoes/68](http://www.fundacaorioverde.com.br/publicacoes/68) em 03 de setembro de 2019.

GOMES, G. S., HUANG, S. P., & CARES, J. E. Nematode community, trophic structure and population fluctuation in soybean fields. **Fitopatologia Brasileira**, v. 28, n. 3, p. 258-266, 2003.

GOOD, J. M. Nematodes. In: CALDWELL, B. E. (Ed.). Soybeans: improved, production and uses. Winconsin: American Society of Agronomy, p. 527-543, 1973.

HONG, S. C., MAC GUIDWIN, A., & GRATTON, C. Soybean Aphid and Soybean Cyst Nematode Interactions in the Field and Effects on Soybean Yield. **Journal of Economic Entomology**, v. 104, n. 5, p. 1568-1574, 2011.

JONES, J. T., HAEGEMAN, A., DANCHIN, E. G. J., GAUR, H. S., HELDER, J., JONES, M. G. K., KIKUCHI, T., MANZANILLA-LOPEZ, R., PALOMARES-RIUS, J. E., WESEMAEL, W. M. L., & PERRY, R. N. Top 10 plant parasitic nematodes in molecular plant pathology. **Molecular Plant Pathology**, v. 14, n. 9, p. 946-961, 2013.

KIRSCH, V. G., KULCZYNSKI, S. M., GOMES, C. B., BISOGNIN, A. C., GABRIEL, M., BELLÉ, C., & LIMA-MEDINA, I. Caracterização de espécies de *Meloidogyne* e de *Helicotylenchus* associadas à soja no Rio Grande do Sul. **Nematropica**, v. 46, n.2, p. 197-208, 2016.

LIMA, F. S. de O., SANTOS, G. R. dos, NOGUEIRA, S. R., SANTOS, P. R. R. dos, & CORREA, V. R. Population dynamics of the root lesion nematode, *Pratylenchus brachyurus*, in soybean fields in Tocantins state and its effect to soybean yield. **Nematropica**, v. 45, p. 170-177, 2015.

LIU, D., CHEN, L., ZHU, X., WANG, Y., XUAN, Y., LIU, X., CHEN, L., & DUAN, Y. *Klebsiella pneumoniae* Sneyk Mediates Resistance Against *Heterodera glycines* and Promotes Soybean Growth. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, p. 1134-1146, 2018.

MACHADO, A. C. Z. Current nematode threats to Brazilian agriculture. **Current Agricultural Science and Technology**, v. 20, p. 26-35, 2014.

MACHADO, A. C. Z., AMARO, P. M., & SILVA, S. A. da. Two novel potential pathogens for soybean. **Plos One**, v. 14, n. 8, 2019.

MAIMAITIJIANG, M., GHULAN, A., SIDIKE, P., HARTLING, S., MAIMAITIYIMING, M., PETERSON, K., SHAVERS, E., FISHMAN, J., PETERSON, J., KADAM, S., BURKEN, J., & FRITSCHI, F. Unmanned Aerial System (SANT)-based phenotyping of soybean using multi-sensor data fusion and extreme learning machine. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 134, p. 43-58, 2017.

MARIN, D. B., ALVES, M. de C., POZZA, E. A., BELAN, L. L., & FREITAS, M. L. de. Multispectral radiometric monitoring of bacterial blight of coffee. **Precision Agriculture**, 2018.

MARSHALL, M., & THENKABAIL, P. Developing in situ non-destructive estimates of crop biomass to address issues of scale in remote sensing. **Remote Sensing**, v. 7, n. 1, p. 808-835, 2015.

MARTINS, G. D., GALO, M. de L. B. T., & VIEIRA, B. S. Detecting and mapping root-knot nematode infection in coffee crop using remote sensing measurements. **IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing**, v. 10, n. 12, p. 5395- 5403, 2017.

MING LU, CHEN, B., LIAO, X., YUE, T. YUE, H., REN, S., LI, X., NIE, Z., & XU, B. Forest types classification based on multi-source data fusion. **Remote sensing**, v. 9, p. 1153-1174, 2017.

MORENO-GARCIA, B., CASTERAD, M. A., GUILLEN, M., & QUILEZ, D. Agronomic and economic potential of vegetation indices for rice n recommendations under organic and mineral fertilization in mediterranean regions. **Remote Sensing**, v. 10, n. 12, p. 1-21, 2018.

MOSHOV, D., BRAVO, C., OBERTI, R., WEST, J., MCCARTNEY, A., & RAMON, H. Plant disease detection based on data fusion of hyper-spectral and multi-spectral fluorescence imaging using Kohonen maps. **Real-Time Imaging**, v. 11, n. 2, p. 75-83, 2005.

NIBLACK, T. L., LAMBERT, K. N., & TYLKA, G. L. A model plant pathogen from the kingdom Animalia: *Heterodera glycines*, the soybean cyst nematode. **Annual Review of Phytopathology**, v. 44, p. 283-303, 2006.

NICOL, J. M., TURNER, S. J., COYNE, D. L., den NIJS, L., HOCKLAND, S., & TAHNA MAAFI, Z. Current nematode threats to world agriculture. **Genomics and Molecular Genetics of Plant-Nematode Interactions**, p. 21-43, 2011.

PÁDUA, L., MARQUES, P., HRUSKA, J., ADÃO, T., PERES, E., MORAIS, R., & SOUSA, J. J. Multi-temporal vineyard monitoring through UAV-based RGB imagery. **Remote Sensing**, v. 10, n. 12, p. 1907-1929, 2018.

PENA, J. A., YUMIN, T., HUAQING, L., ZHAO, B., ESCALONA, J. A. G., & PINTO, J. Remote sensing data fusion to detect illicit crops and unauthorized airstrips. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, n. 3, p. 1362-1368, 2018.

PENG, D. L., PENG, H., WU, D. Q., HUANG, W. K., YE, W. X., & CUI, J. K. First Report of Soybean Cyst Nematode (*Heterodera glycines*) on Soybean from Gansu and Ningxia China. **Plant Disease**, 2016.

POGORELKO, G., JUVALE, P. S., RUTTER, W. B., HEWEZI, T., HUSSEY, R., DAVIS, E. L., MITCHUM, M. G., & BAUM, T. J. A cyst nematode effector binds to

diverse plant proteins, increases nematode susceptibility and affects root morphology. **Molecular Plant Pathology**, v. 17, p. 832-844, 2015.

PUGH, N. A., HAN, X., COLLINS, S. D., THOMASSON, J. A., COPEC, D., CHANG, A., JUNG, J. ISAKEIT, T. S. PROM, L. K., CARVALHO, G., GATES, I. T., VREE, A., BAGNALL, G. C., & ROONEY, W. L. Estimation of plant health in a sorghum field infected with anthracnose using a fixed-wing unmanned aerial system. **Journal of Crop Improvement**, v. 32, n. 6, p. 861-877, 2018.

RAMIRO, J., CIAMPI-GUILLARDI, M., CALDAS, D. G. G., MORAES, M. H. D. de, BARBIERI, M. C. G., PEREIRA, W. V. & MASSOLA JR, N. S. Quick and accurate detection of *Sclerotinia sclerotiorum* and *Phomopsis* spp. in soybean seeds using qPCR and seed- soaking method. **Journal of Phytopatology**, v. 167, p. 273–282, 2019.

RANJAN, R., CHANDEL, A. K., KHOT, L. R., BAHLOL, H. Y., ZHOU, J., BOYDSTON, R. A., & MIKLAS, P. N. Irrigated pinto bean crop stress and yield assessment using ground based low altitude remote sensing technology. **Information Processing in Agriculture**, 2019.

RIBEIRO, N. R., DIAS, W.P., & SANTOS, J. M. dos. Distribuição de fitonematóides em regiões produtoras de soja do Estado de Mato Grosso. **Boletim de Pesquisa de Soja**, n.14, p.289-296, 2010.

RIEDEL W. E. & BLACKMER T. M. Leaf reflectance spectra of cereal aphid damage wheat. **Crop Science**, v. 39, n. 6, p. 1835–1840, 1999.

SCHMITT, M; & XIANG, Z. Data Fusion and Remote Sensing: An ever-growing relationship. **IEEE Geoscience and remote sensing magazine**, v. 4, n.4, p. 19-27, 2016.

SCHMITTER, P., STEINRUCKEN, J., ROMER, C., BALLVORA, A., LEON, J. RASCHER, U., & PLUMER, L. Unsupervised domain adaptation for early detection of drought stress in hyperspectral images. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 131, p. 65-76, 2017.

SHAFIAN, S., RAJAN, N., SCHNELL, R., BAGAVATHIANNAN M, VALASEK J., SHI Y., & OLSENHOLLER, J. Unmanned aerial systems-based remote sensing for monitoring sorghum growth and development. **Plos One**, v. 13, n. 5, 2018.

SHARMA, R. D., CAVALCANTE, M. J. B., MOURA, G. M., & VALENTIM, J. F. Fitonematoides associados às cultivares de soja no Estado do Acre. Embrapa Cerrados, **Comunicado Técnico**, v. 56, p. 1-4, 2001.

SILVA R. A., SERRANO, M. A. S., GOMES A. C., BORGES D. C., SOUZA A. A., ASMUS G. L., & INOMOTO M. M. Ocorrência de *Pratylenchus brachyurus* e *Meloidogyne incognita* na cultura do algodoeiro no Estado do Mato Grosso. **Fitopatologia Brasileira**, v. 29, n. 3, 2004.

SUBBOTIN, S. A., MUNDO-OCAMPO, M., & BALDWIN, J. G. Systematics of Cyst Nematodes (Nematoda:*Heteroderinae*), Part B. Leiden: Brill, 2010.

TAVARES-SILVA, C. A., DIAS-ARIEIRA, C. R., PUERARI, H. H., SILVA, E. J. da, & JÚNIOR, A. I. Sucessão crambe-soja no manejo de *Pratylenchus brachyurus* e *Meloidogyne javanica*. **Summa Phytopatologica**, v. 43, n. 4, p. 316-320, 2017.

TILLY, N., AASEN, H., & BARETH, G. Fusion of plant height and vegetation indices for the estimation of barley biomass. **Remote Sensing**, v. 7, n. 9, p. 17291-17296, 2015.

VANEGAS, F., BRATANOV, D., POWELL, K.; WEISS, J., & GANZALEZ, F. A novel methodology for improving plant pest surveillance in vineyards and crops using UAV- based hyperspectral and spatial data. **Sensors**, v.18, n. 1, 2018.

VOLPATO, L., ALVES, R. S., TEODORO, P. E., RESENDE, M. D. V. de, NASCIMENTO, M., NASCIMENTO, A. C. C., LUDKE, W. H., SILVA, F. L. da & BORÉM, A. Multi-trait multi-environment models in the genetic selection of segregating soybean progeny. **Plos One**, v. 14, n. 4, p. 1-22, 2019.

ZHANG, J. Multi-source remote sensing data fusion: status and trends. **International Journal of Image and Data Fusion**, v. 1, n. 1, p. 5-24, 2010.

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, M., QIN, Z., LIU, X., & USTIN, S. L. Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in California. USA using hyperspectral remote sensing. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 4, n. 4, p. 295–310, 2003.

ZHENG, H., CHENG, T., LI, D., ZHOU, X., YAO, X., TIAN, Y., CAO, W., & ZHU, Y. Evaluation of RGB, color-infrared and multispectral images acquired from unmanned aerial systems for the estimation of nitrogen accumulation in rice. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 824-840, 2018.

## **CAPÍTULO I - Sensores de baixo custo para detecção de respostas espectrais de soja a três espécies de nematoides**

(Normas de acordo com a Revista Journal of Nematology)

### *Resumo*

O sensoriamento remoto tem se tornado uma ferramenta auxiliar no monitoramento dos danos causados por nematoides na soja. Os objetivos deste estudo foram analisar a relação entre o número de nematoides e a resposta espectral das plantas de soja e a distribuição radial dos nematoides em torno do foco inicial de infestação. Um voo exploratório inicial foi realizado no estádio R1 da soja para a identificação das zonas danificadas pelos nematoides. O voo foi realizado com um Phantom 4, sensor RGB a 120 m de altura e sobreposições de 80%. A imagem foi ortorretificada e dois transectos foram criados para cada zona a partir do foco inicial e posicionando radialmente pontos de amostragem adicionais a 10, 20, 40 e 80 m do centro. Utilizando o mesmo sistema aéreo não tripulado, no estádio R5 da soja foi realizado simultaneamente um voo e amostragens de solo e raiz das plantas em 36 pontos. Foram utilizados índices de vegetação comumente utilizados na agricultura e propostos. Modelos de regressão de efeitos mistos foram utilizados para determinar a relação entre o número de nematoides e refletância espectral e o efeito da distância do centro de plantas infestadas sobre o número de nematoides. As respostas espectrais da soja a partir de sensores RGB de baixo custo possibilitam detectar lesões causadas por *H. glycines*. Números mais altos de algumas espécies de nematoides foram encontrados fora das áreas que representavam as plantas severamente estressadas. Pesquisas futuras usando outros sensores e algoritmos de aprendizado de máquina serão necessárias para prever as lesões de *P. brachyurus* e *H. dihystra*.

**Palavras-chave:** comportamento espectral, sistema aéreo não tripulado, sensoriamento remoto, agricultura de precisão.

## Low-Cost Sensors for Detection of Soybean Spectral Responses to Three Nematode Species

### *Abstract*

Remote sensing has become an auxiliary tool in monitoring nematode damage in soybeans. The objectives of this study were to analyze the relationship between the nematodes number and the spectral response of soybean plants and the nematodes radial distribution around the initial focus of infestation. An initial exploratory flight was performed at stage R1 to identify areas damaged by nematodes. The flight was performed with the Phantom 4, RGB sensor at 120 m height and 80% height. One image was orthorectified and two transects were created for each zone from the initial focus and radially positioned additional sampling points at 10, 20, 40 and 80 m from the center. Using the same unmanned aerial system, no R5 stadium was performed simultaneously on one flight and on 36-point soil and root samples. Common vegetation indices used in agriculture and in the proposed ones were used. Mixed effects regression models were used to determine the relationship between the nematodes number and spectral reflectance and the effect of center distance of infested plants on the nematodes number. As soybean spectral responses, from low cost RGB sensors, it is possible to detect lesions caused by *H. glycines*. Higher numbers of some nematode species were found in areas that represent severely stressed plants. Future research using other sensors and machine learning algorithms will be needed to predict *P. brachyurus* and *H. dihystra* lesions.

**Keywords:** spectral behavior, unmanned aerial system, remote sensing, precision agriculture.

## INTRODUÇÃO

Os nematoides parasitas de plantas são problemas economicamente importantes na cultura da soja, *Glycine max (L.)* Merrill, que podem causar perdas na

produtividade sem apresentar nenhum sintoma acima do solo por vários anos (Dias et al., 2010; Oliveira et al., 2017). Em condições de altas populações durante as fases críticas de ataque, os efeitos negativos causados por nematoides na soja podem estar diretamente associados a sistemas radiculares pouco desenvolvidos, baixa estatura, amarelamento e morte precoce da planta. Os nematoides também podem afetar indiretamente a soja por vetorização de patógenos e facilitar o dano de outros estressores bióticos e abióticos (Amorim et al., 2011). No Brasil, onde mais de 30% da soja mundial é produzida (USDA, 2018), *Heterodera glycines* (Ichinohe) e *Pratylenchus* spp. são os nematoides mais importantes que causam perdas econômicas em soja (Niblack et al., 2002; Nutter et al., 2002; Niblack et al., 2006; Koenning et al., 2010; Asmus et al., 2012; Machado et al., 2015; Bellé et al., 2017). O *Helicotylenchus dihystera* (Cobb) ainda é considerado uma praga secundária da soja no Brasil (Kirsch et al., 2016), mas estudos indicam que esse nematoide também tem potencial para limitar a produtividade das culturas (Gomes et al., 2003).

O manejo de nematoides parasitas de plantas requer identificação e integração de múltiplas práticas agrônômicas, como rotação de culturas, adubação adequada, controle de plantas daninhas e aplicações de nematicida (Silva et al., 2004; Lima et al., 2015). As populações de nematoides são tradicionalmente monitoradas por visitas intensivas a campos de produção e análises laboratoriais com custos elevados. Em contraste, informações não destrutivas obtidas por sistemas aéreos não tripulados (SANT), têm o potencial de simplificar e reduzir os custos de amostragem durante as safras agrícolas e criar oportunidade para revelar a presença de nematoides não detectados pelos agricultores.

O sensoriamento remoto tem impulsionado o desenvolvimento recente de técnicas de amostragem com resoluções espaciais e temporais maiores do que as abordagens tradicionais usadas para pragas de culturas (Nutter et al., 2002; Lee et al., 2010; Zhang e Kovacs, 2012; Martins e Galo, 2015; Alves et al., 2019). É importante ressaltar que os sistemas de sensoriamento remoto de baixo custo de alta resolução espacial embarcados em SANT como os sensores RGB (vermelho, verde e azul), mostraram resultados promissores para reduzir os custos na detecção do estresse induzido por pragas em escala agrícola (Bendig et al., 2014; Martins et al., 2017; Pádua et al., 2018). A premissa do sensoriamento remoto usando sensores RGB é que a refletância de planta mais alta é tipicamente associada a efeitos induzidos por pragas em pigmentos fotossintéticos (Riedell e Blackmer, 1999; Carter e Knapp, 2001). Além

disso, os índices de vegetação derivados de sensores RGB podem ser melhores preditores de alterações fisiológicas das plantas induzidas pela praga do que a refletância dos comprimentos de onda RGB individuais (Bendig et al., 2014; Alves et al., 2015; Duan et al., 2017).

Os objetivos deste estudo foram: (i) analisar a relação estatística entre o número de nematoides e a resposta espectral de plantas de soja; (ii) analisar a distribuição radial dos nematoides em torno do foco inicial de infestação.

## MATERIAL E MÉTODOS

*Campo de soja infestado de nematoides:* O estudo foi conduzido em um campo de soja de 196 ha no município de Rio Verde, estado de Goiás, Brasil, durante a safra de 2017/18. O campo foi selecionado por causa da infestação histórica de nematoides. A variedade de soja "BRS7380RR" (EMBRAPA, Londrina, Paraná, Brasil) foi semeada em 10 de outubro de 2017 com espaçamento de 0,45 m entre linhas e 16 plantas por metro linear. A soja foi plantada em um Latossolo vermelho distrófico em sistema de plantio direto sobre a palhada de milho da safra anterior. O manejo de plantas daninhas, a fertilização e outras práticas de manejo seguiram as práticas de produção padrão da região para a cultura da soja (Pires et al., 2005; Neis et al., 2010; Bueno et al., 2011).

*Estabelecimento dos transectos de amostragem:* Um voo exploratório inicial foi realizado no estágio de crescimento de florescimento (R1) para identificar potenciais grupos de plantas que mostravam diferenças espectrais de plantas saudáveis. O voo foi realizado com um quadricoptero SANT (Phantom 4 Advanced, DJI, Shenzhen, China) equipado com uma câmera RGB (20 MP CMOS, DJI, Shenzhen, China) a 120 m de altura e sobreposição frontal e lateral de 80% (pixel de 3,6 cm). A imagem foi ortorretificada (Pix4D 3.2.23, Pix4D SA, Lausanne, Suíça). Quatro zonas de amostragem mostrando sintomas visíveis de danos causados por nematoides foram selecionadas durante uma inspeção de campo visual. A escolha de quatro zonas foi baseada nos sintomas já conhecidos causados pelos nematoides no sistema radicular e que também o raio de amostragem não iria se sobrepor sobre outra zona. Dois transectos representando as direções aparentes da distribuição local dos nematoides foram criados para cada zona usando a imagem ortorretificada no software GIS (QGIS Development Team, Boston, EUA). Os transectos foram estabelecidos encontrando as coordenadas

geográficas do centro da zona danificada e posicionando radialmente pontos de amostragem adicionais a 10, 20, 40 e 80 m do centro (ou seja, um total de nove pontos de amostragem por zona ou 36 pontos de amostragem por campo) (Fig. 1). A localização geográfica dos pontos de amostragem foi exportada para um dispositivo GPS portátil para orientar as coletas subsequentes de solo e das raízes (Garmin eTrex® 30, Garmin Internacional, Olathe, KS). A informação obtida pela imagem do voo exploratório não foi suficiente para determinar as causas das diferenças espectrais. Portanto, amostragens e voos subsequentes foram realizados para avaliar as plantas no campo.

*Identificação de nematoides no solo e raízes:* As amostras de solo e raiz das plantas de soja foram obtidas em todos os 36 pontos de amostragem no início do estágio de enchimento de grãos de soja (estádio de crescimento R5). Três subamostras de solo (500 g cada) na camada de 0-20 cm foram coletadas com pequena enxada e homogeneizadas em um balde. Para cada ponto de amostragem, uma amostra de solo (500 g) foi obtida das subamostras homogeneizadas e armazenada em sacos plásticos com 50 g de amostras de raízes de soja. As amostras foram armazenadas a 4°C até a identificação. A extração de *P. brachyurus*, *H. glycines* e *H. dihystera* no solo e raízes secundárias foi realizada utilizando os métodos descritos por Jenkins (1964) e Coolen e D'Herde (1972). Juvenis de *H. glycines* foram extraídos do solo e raízes usando os métodos descritos por Jenkins (1964) e Alfenas e Mafia (2007), respectivamente. Cistos de *H. glycines* (viáveis e não viáveis) foram extraídos do solo usando os métodos descritos por Tihohod (2000). O número de nematoides e os cistos de *H. glycines* (viáveis e inviáveis) foram determinados para cada amostra (raízes e solo, separadamente) usando um microscópio óptico e uma câmara de contagem de Petroff-Hausser (Southey, 1970). Os nematoides foram identificados por espécie em comparação a uma coleção de referência no Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, Brasil, e chaves taxonômicas (Costa-Manso e Tenente, 1994).

*Aquisição e processamento de imagens:* Um voo foi realizado simultaneamente durante a amostragem de solo e da raiz das plantas de soja (estádio R5) usando o mesmo SANT e sensor utilizado anteriormente para estabelecer os transectos de amostragem. O voo ocorreu entre as 10 e às 15 horas e com menos de 30% de cobertura de nuvens. A sobreposição de imagens, a altura do voo e a ortorretificação foram as mesmas do primeiro voo exploratório. A refletância das bandas RGB individuais e os seus índices de vegetação derivados foram obtidos a partir de uma área de interesse de

1×1 m ao redor de cada ponto de amostragem. Portanto, cada ponto de amostragem foi representado por uma média aritmética dos valores de refletância dentro de 1 m<sup>2</sup>.

*Algoritmos de análise e classificação de dados:* Oito índices de vegetação comumente utilizados na agricultura foram derivados das bandas do sensor RGB embarcados no Phantom 4 (Tabela 1). Quatro índices de vegetação recentemente propostos também foram calculados substituindo a banda do infravermelho ausente pela faixa verde do sensor RGB (Tabela 1). Para o índice de vegetação ajustado ao solo modificado (mSAVI), o fator de correção do brilho do solo (L) de 0,5 foi considerado adequado para o estudo pois no campo havia áreas com muita vegetação sem a presença de solo exposto e áreas com baixa presença de vegetação (plantas raquíticas, cloróticas e mortas) e alto índice de solo exposto (Huete, 1988; Boegh et al., 2002). As análises foram realizadas por espécie e local de infestação (ou seja, solo ou raízes para cada espécie de nematoide). Modelos de regressão de efeitos mistos ( $\alpha = 0,05$ , R Development Core Team 2010) foram utilizados para determinar a relação entre o número de cada espécie de nematoides (variável preditora) e a refletância espectral da planta (variável resposta) em cada faixa espectral e índices de vegetação correspondentes. Modelos de regressão de efeitos mistos também foram usados para quantificar o efeito da distância do centro de plantas infestadas (x) sobre o número de nematoides (y). Para indicar a variabilidade entre as quatro subáreas, as zonas de amostragens foram incluídas como efeitos aleatórios em todos os modelos de regressão. Através dos resultados das análises estatísticas, foram plotados mapas de cada uma das zonas utilizando o índice de vegetação PRI por apresentar melhor eficiência para detecção das variáveis nematológicas.

## RESULTADOS

Nas amostras de solo, o número de nematoides variou de 0 a 355 para *P. brachyurus*, de 0 a 408 para *H. glycines* e de 0 a 1.344 para *H. dihystera*. Nas amostras de raízes, o número de nematoides variou de 117 a 3.901 para *P. brachyurus*, de 0 a 194 para *H. glycines* e de 0 a 427 para *H. dihystera*. Cistos viáveis e inviáveis de *H. glycines* variaram de 1 a 107 e de 1 a 51 cistos por amostra de solo, respectivamente.

*Sintomas da infestação de nematoides:* As respostas espectrais da soja nos diferentes locais de amostragem foram ilustradas para o índice de vegetação PRI que

apresentou modelos de regressão significativos para maior número de variáveis nematológicas (Fig. 2), como citado nos materiais e métodos. As plantas infestadas de nematoides normalmente formavam aglomerados aproximadamente circulares (Fig. 2). Plantas expostas ao solo, plantas mortas, raquíticas e cloróticas foram observadas dentro da mesma imagem em que os pixels foram classificados como severamente estressados por nematoides. As plantas de soja dentro da categoria estressada foram compostas de plantas que estavam no início da clorose e as classificadas como saudáveis não apresentaram nenhuma injúria causada no dossel pelos nematoides durante a inspeção de campo e pela análise das imagens (Fig. 2)

*Respostas espectrais da soja aos nematoides:* Com base nos valores de  $R^2$ , o melhor ajuste dos modelos de regressão significativos variou de acordo com as espécies de nematoides, local de infestação e refletância espectral de plantas das variáveis resposta (Tabela 2). Bandas espectrais individuais raramente tiveram boas relações aos números de nematoides. O número de *H. glycines* no solo foi associado a azul e PRI. Cistos viáveis e inviáveis de *H. glycines* foram associados a vermelho, verde, PRI, MPRI, MSAVI, VARI e MEVI2. Efeitos negativos de *P. brachyurus* nas raízes foram observados apenas em MPRI, MSAVI, VARI e MEVI2. O número de *H. dihystera* nas raízes e no solo não foi associado a nenhuma resposta espectral da soja. As outras combinações de espécies de nematoides e local de infestação (isto é, raiz ou solo) não mostraram associação com qualquer resposta espectral da soja (Tabela 2).

*Distribuição radial em áreas infestadas de nematoides:* A distribuição radial dos nematoides na localização aparente da infestação inicial diferiu entre as espécies de nematoides (Fig. 3). O número de *H. glycines* no solo e nas raízes foi maior na infestação inicial do ponto central (Fig. 3C, D). Por outro lado, o número de *H. dihystera* no solo foi maior nas distâncias mais distantes do centro da infestação inicial. (Fig. 3E). O número de *P. brachyurus* no solo e nas raízes foi semelhante nos pontos de amostragem em torno da infestação inicial. (Fig. 3A, B). O número de *H. glycines* no solo correlacionou-se positivamente com o número de *H. glycines* nas raízes ( $r = 0,60$ ;  $n = 36$ ;  $P < 0,001$ ), cistos viáveis ( $r = 0,52$ ;  $n = 36$ ;  $P < 0,001$ ) e cistos inviáveis ( $r = 0,33$ ;  $n = 36$ ;  $P = 0,047$ ). O número de *H. dihystera* nas raízes foi associado ao número de *H. dihystera* no solo ( $r = 0,70$ ;  $n = 36$ ;  $P < 0,001$ ) (Fig. 4). No entanto, o número de *P. brachyurus* nas raízes não foi associado ao número de *P. brachyurus* no solo ( $r = 0,15$ ;  $n = 36$ ;  $P = 0,379$ ). Em geral, números mais altos de espécies de nematoides foram tipicamente associados a números mais altos de outras espécies de nematoides.

## DISCUSSÃO

O presente estudo mostrou relações significativas entre a refletância espectral de plantas a partir de um sensor RGB de baixo custo e o número de nematoides nas raízes e no solo (Tabela 2). As alterações espectrais das plantas nos comprimentos de onda RGB podem ser atribuídas aos efeitos negativos causados pelos nematoides através de alterações biofísicas e bioquímicas como redução de biomassa e pigmentos fotossintéticos (Gupta e Badarinath, 1992; Huete et al., 1999; Barton, 2012; Mahajan et al., 2014).

Observações de campo de plantas atrofiadas e mortas (ou seja, maior exposição ao solo) foram associadas significativamente com índices de vegetação usando a faixa espectral vermelha na equação, pois o comprimento de onda na faixa do vermelho representam regiões de absorção da energia pelos pigmentos, e essas plantas apresentam alto grau de clorose (Bajwa et al., 2017). Índices de vegetação comuns derivados de sensores RGB foram melhores para entender a população das espécies de nematoides nas raízes e no solo do que as bandas espectrais individuais (Tabela 2). No entanto, os quatro índices de vegetação modificados não melhoraram muito o ajuste do modelo ( $R^2$ ) ou a significância das inclinações em comparação com os índices de vegetação comumente utilizados (Tabela 2).

O número de *P. brachyurus* não foi associado ao número de outros nematoides, mas *H. glycines* foram correlacionadas com *H. dihystera*, sendo que houve aumento na população de *H. dihystera* e diminuição na população de *H. glycines* na medida que as amostragens foram distanciando da infestação central. No entanto, *H. glycines* foi responsável pela maioria das respostas espectrais de soja significativas e corroborou com outros estudos mostrando que esse nematoide é uma das espécies mais severas limitadoras de rendimento da soja (Mendes e Machado, 1992; Melakeberhan e Dey, 2003; Silva et al., 2003).

Como o *H. glycines* causa clorose nas plantas de soja, quanto mais altos os sintomas visíveis, melhor será a precisão de detecção de doenças de plantas através de sensores de alta resolução (Sankran et al., 2014). *Heterodera glycines* mesmo com populações mais baixas, possui a capacidade de apresentar danos às plantas de soja, quando não existem níveis de infestação leve, pois qualquer número de cistos diferente de zero, pode ser prejudicial para a cultura (Mendes e Machado, 1992). As flutuações populacionais entre *P. brachyurus* e *H. glycines* não seguiram o mesmo padrão (Fig.

3A, B, C, D) devido essas espécies serem endoparasitas. Estabelecer as tendências da competição entre ambos sob condições controladas poderá fornecer uma base para compreensão dos processos físicos e fisiológicos pelos quais as espécies de nematoides competem umas com as outras (Melakeberhan e Dey, 2003).

Maior dano no centro dos aglomerados infestados de nematoides foi enfatizado por uma associação negativa significativa com o PRI, um índice de vegetação tipicamente usado para prever a eficiência fotossintética da planta (Strachan et al., 2002; Stylinski et al., 2002; Zhou e Wang, 2003). Efeitos negativos de *P. brachyurus* na soja são possíveis (Bellé et al., 2017), mas teve efeitos insignificantes na refletância da soja com sensores RGB de baixo custo (Tabela 2).

As plantas parasitadas por *P. brachyurus* não tiveram mudanças em seu comportamento espectral por esse nematoide causar maior dano na diminuição do crescimento das plantas (Inomoto et al., 2001; Castillo e Vovlas, 2007), sendo necessários outros sensores que atuam em outros comprimentos de onda e algoritmos de classificação de imagens para melhor detecção. Quanto mais altos os sintomas visíveis, melhor a precisão da detecção de doenças (Sankaran et al., 2010). Relações não significativas entre *H. dihystera* e todas as bandas espectrais e índices de vegetação indicaram que centenas de nematoides nas raízes e no solo não causaram necessariamente mudanças no comportamento espectral da soja, sendo também necessário o uso de outros sensores que atuam por exemplo em comprimentos de onda específicos ou na faixa do infravermelho próximo e distante.

As respostas espectrais da soja a partir de sensores RGB de baixo custo têm potencial para prever a lesão de nematoides, especialmente o nematoide de cisto de soja *H. glycines*. Pesquisas futuras usando outros sensores espectrais e algoritmos avançados de aprendizado de máquina serão necessárias para prever as lesões de *P. brachyurus* e *H. dihystera* usando resposta espectral da soja e análises adicionais como anatômicas e fisiológicas são importantes para caracterizar qual estrutura foliar está sendo afetada por cada espécie de nematoide e qual banda espectral também está sendo afetada. Distinguir plantas saudáveis de plantas infestadas de nematoides usando imagens de sensoriamento remoto pode minimizar a amostragem de campo e ajudar os agricultores a aplicar métodos de controle localizados. Ecologicamente e economicamente importante para o manejo de nematoides, este estudo também indicou a necessidade de protocolos de amostragem adequados, porque números mais altos de algumas espécies de nematoides

podem ser encontrados fora das áreas que representam as plantas severamente estressadas.

### AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela concessão da bolsa a Victor Hugo Moraes. Ao Polo de Inovação, Laboratório de Drones e Vant's na Agricultura, Laboratório de Fitopatologia e toda equipe da Fazenda Segredo pelo total suporte na condução desse estudo.

### LITERATURA CITADA

- Alfenas, A. C., and Mafía, R. G. 2007. Métodos em fitopatologia. Viçosa. Editora UFV.
- Amorim, L., Rezende, J. A. M., and Bergamin Filho, A. 2011. Manual de fitopatologia: Princípios e conceitos. São Paulo. Agronômica Ceres.
- Alves, T. M., MacRae, I. V., and Koch, R. L. 2015. Soybean aphid (Hemiptera: Aphididae) affects soybean spectral reflectance. *Journal of Economic Entomology* 108: 2655-2664.
- Alves, T. M., Moon, R. D., MacRae, I. V., and Koch, R. L. 2019. Optimizing band selection for spectral detection of *Aphis glycines* Matsumura in soybean. *Pest Management Science* 75: 942-949.
- Asmus, G. L., Teles, T. S., Anselmo, J., and Rosso, G. T. 2012. Raças de *Heterodera glycines* na região Nordeste de Mato Grosso do sul. *Tropical Plant Pathology* 37: 146-148.
- Bajwa, S. G., Rupe, J. C., and Mason, J. 2017. Soybean disease monitoring with leaf reflectance. *Remote Sensing* 9: 127-140.
- Barton, C. V. 2012. Advances in remote sensing of plant stress. *Plant Soil*, 354: 41–44.
- Bellé, C., Kuhn, P. R., Kaspary, T. E., and Schmitt, J. 2017. Reação de cultivares de soja a *Pratylenchus brachyurus*. *Revista Agrarian* 10: 136-140.
- Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, J., Broscheit, J., Eichfuss, S., and Bareth, G. 2014. Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV- based RGB imaging. *Remote Sensing* 6: 10395-10412.

- Boegh, E., Soegaard, H., and Thomsem, A. 2002. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. *Remote Sensing of Environment* 79: 2674-2677.
- Bueno, A. de F., Batistela, M. J., Bueno, R. C. O. de F., França-Neto, J. de B., Nishikawa, M. A. N., and Libério-Filho, A. 2011. Effects of integrated pest management, biological control and prophylactic use of insecticides on the management and sustainability of soybean. *Crop Protection* 30: 937-945.
- Carter, G. A., and A.K. Knapp. 2001. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany* 88: 677-684.
- Castillo, P., N., Vovlas. 2007. *Pratylenchus* (Nematode: Pratylenchidae): Diagnosis, biology, pathogenicity and management. Leiden: Brill.
- Coolen, W. A., and D'Herde, C. J. 1972. A method for the quantitative extraction of nematodes from plant tissue. Merelbeke. State Agriculture Research Centre.
- Costa-Manso, E., and Tenente, R. V. 1994. Extração e identificação de fitonematóides. *RAPP* 3: 265-291.
- Dias, W. P., Freitas, V. M., Ribeiro, N. R., Moita, A. W., Homechin, M., Parpinelli, N. M. B., Carneiro, R. M. D. G. 2010. Reação de genótipos de soja a *Meloidogyne enterolobii* e *M. ethiopica*. *Nematologia Brasileira* 34: 220-225.
- Dodds, W. K., Jones, J. R., and Welch, E. B. 1998. Suggested classification of stream trophic state: distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus. *Water Research* 32: 1455-1462.
- Duan, T., Chapman, S. C., Guo, Y., and Zheng, B. 2017. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. *Field Crops Research* 210: 71-80.
- Gamon, J. A., Serrano, L., and Surfus, J. S. 1997. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia* 122: 492-501.
- Gitelson, A. A., Gritz, Y., and Merzlyak, M. N. 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology* 160: 271-282.
- Gomes, G. S., Huang, S. P., Cares, J. E. 2003. Nematode community, trophic structure and population fluctuation in soybean fields. *Fitopatologia Brasileira* 28: 258-266.
- Gupta, R. K., and Badarinath, K. V. S. 1992. *Physics of remote sensing in space technology and geography*. Pp. 47-83, Hyderabad: NRSA.
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25: 295-309.

- Huete, A., Justice, C., and Leeuwen, W. V. 1999. MODIS vegetation index (MOD 13): algorithm theoretical basis document. Washington: National Aeronautics and Space Administration.
- Inomoto, M. M., Goulart, A. M. C., Machado, A. C. Z., and Monteiro, A. R. 2001. A. R. Effect of population densities *Pratylenchus brachyurus* on the growth of cotton plants. *Fitopatologia. Brasileira* 26: 192-196.
- Jenkins, W. R. 1964. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. *Plant Disease Reporter* 48: 692-695.
- Kirsch, V. G., Kulczynski, S. M., Gomes, C. B., Bisognin, A. C., Gabriel, M., Bellé, C., Lima-Medina, I. 2016. Caracterização de espécies de *Meloidogyne* e de *Helicotylenchus* associadas à soja no Rio Grande do Sul. *Nematropica* 46: 197-208.
- Koenning, S. R. & Wrather, J. A. 2010. Suppression of soybean yield potential in the continental United States from plant diseases estimated from 2006 to 2009. *Plant Health Progress*.
- Lee W. S., Alchanatis, V., Yang C., Hirafuji, M., Moshou, D., and Li, C. 2010. Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture* 74: 2-33.
- Lima, F. S. de O., Santos, G. R. dos, Nogueira, S. R., Santos, P. R. R. dos, and Correa, V. R. 2015. Population dynamics of the root lesion nematode, *Pratylenchus brachyurus*, in soybean fields in Tocantins state and its effect to soybean yield. *Nematropica* 45: 170-177.
- Machado, A. C. Z., Siqueira, K. M. S., Ferraz, L. C. C. B., Inomoto, M. M., Bessi, R., Harakava, R., and Oliveira, C. M. G. 2015. Characterization of Brazilian populations of *Pratylenchus brachyurus* using morphological and molecular analyses. *Tropical Plant Pathology* 40:102–110.
- Martins, G. D., Galo, M. L. B. T., and Vieira, B. S. 2017. Detecting and mapping root-knot nematode infection in coffee crop using remote sensing measurements. 2017. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 10: 5395-5403.
- Martins, G. D., and Galo, M. L. B. T. 2015. Caracterização espectral da cana-de-açúcar infectada por nematoides *Migdolus fryanus* por espectrorradiometria de campo. *Boletim de Ciências Geodésicas* 4: 783-796.
- Mahajan, G. R., Sahoo, R. N., Pandey, R. N., Gupta, V. K., Kumar, D. 2014. Using hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulfur and potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Precision Agriculture* 15: 499-522.
- Melakeberhan, H., and Dey, J. 2003. Competition between *Heterodera glycines* and *Meloidogyne incognita* or *Pratylenchus penetrans*: independent infection rate measurements. *Journal of Nematology* 35: 1-6.

- Mendes, M. L., and Machado, C. C. 1992. Levantamento preliminar da ocorrência do nematoide do cisto da soja (*Heterodera glycines* Ichinohe) no Brasil. Londrina. Embrapa Soja, Comunicado Técnico 53.
- Neis, L., Paulino, H. B., Souza, E. D. de, Reis, E. F. dos, and Pinto, F. A. 2010. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região sudoeste de Goiás. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34: 409-416.
- Niblack, T. L., Arelli, P. R., Noel, G. R., Opperman, C. H., Orf, J. H., Schmitt, D. P., Shannon, J. G., and Tylka, G. L. 2002. A revised classification scheme for genetically diverse populations of *Heterodera glycines*. *The Journal of Nematology* 34: 279-288.
- Niblack, T. L., Lambert, K. N., and Tylka, G. L. 2006. A model plant pathogen from the Kingdom Animalia: *Heterodera glycines*, the soybean cyst nematode. *Annual Review of Phytopathology* 44: 283-303.
- Nutter, F. W. Junior, Tylka, G. L., Guan, J., Moreira, A. J. D., Marett, C.C., Rosburg, T. R., Basart, J. P., and Chong, C. S. 2002. Use of remote sensing to detect soybean cyst nematode-induced plant stress. *Journal of Nematology* 34: 222-231.
- Oliveira, C. M. de, Souza Junior, I. T., Araújo Filho, J. V. de, Freitas, M. A. de, Petrofeza, S. 2017. Morphological, biochemical, and molecular characterization of *Meloidogyne* spp. populations from Brazilian soybeans production regions. *Ciência Rural* 47: 1-4.
- Pádua, L., Marques, P., Hruska, J., Adão, T., Peres, E., Morais, R., and Sousa, J. J. 2018. Multi-temporal vineyard monitoring through UAV-based RGB imagery. *Remote Sensing* 10: 1907-1929.
- Pires, F. R., Menezes, C. C. E., Procópio, S. O., Barroso, A. L. L., Menezes, J. F. S., Leonardo, L. M., Sousa, J. P. G., Vieira, A. B., and Zanatta, J. F. 2005. Potencial competitivo de cultivares de soja em relação às plantas daninhas. *Planta Daninha* 23: 575-581.
- R Development Core Team, R. 2010. R: A language and environment for statistical computing, R Found. Stat. Comput., R Foundation for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Riedell, W. E., and T. M. Blackmer. 1999. Leaf reflectance spectra of cereal aphid damage wheat. *Crop Science* 39: 1835–1840.
- Sankaran, S.; Mishra, A.; Ehsani, R.; Davis, C. 2010. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Computers and Electronics in Agriculture* 72: 1-13.
- Silva, J. F. V., Garcia, A., Dias, W. P., Asmus, G. L. and Carneiro, G. E. S. 2003. Manejo integrado de nematoides na cultura da soja. *Fitopatologia Brasileira* 28: 30-34.

- Silva R. A., Serrano, M. A. S., Gomes A. C., Borges D. C., Souza A. A., Asmus G. L., Inomoto M. M. 2004. Ocorrência de *Pratylenchus brachyurus* e *Meloidogyne incognita* na cultura do algodoeiro no Estado do Mato Grosso. *Fitopatologia Brasileira* 29:337.
- Southey, J. F. 1970. *Laboratory methods for work with plant and soil nematodes*. London. Ministry of Agriculture Fisheries and Food.
- Strachan, I. B., Pattey, E., and Boisvert, J. B. 2002. Impact of nitrogen and environmental conditions on corn as detected by hyperspectral reflectance. *Remote Sensing of Environment* 80: 213-224.
- Stylinski, C. D., Gamon, J. A., and Oechel, W. C. 2002. Seasonal patterns of reflectance indices, carotenoid pigments and photosynthesis of evergreen chaparral species. *Oecologia* 131: 366-374.
- Tihohod, D. 2000. *Nematologia agrícola aplicada*. Jaboticabal. Funep.
- USDA – United States Department of Agriculture, 2018. Available in: <[www.nass.usda.gov/ Data\\_and\\_Statistics/Quick\\_Stats](http://www.nass.usda.gov/Data_and_Statistics/Quick_Stats)> Accessed on January 5, 2019.
- Yang, Z., Willis, P., and Mueller, R. 2008. Impact of band-ratio enhanced AWIFS image to crop classification accuracy. Pp. 41-51 *in* W. T. Pecora, Memorial Remote Sensing Symposium.
- Zhang, C., and Kovacs, J. M. 2012. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture* 13: 693-712.
- Zhou, Q. F., and Wang, J. H. 2003. Leaf and spike reflectance spectra of rice with contrasting nitrogen supplemental levels. *International Journal of Remote Sensing* 24: 1587-1593.

**Tabela 1.** Tabela 1. Bandas espectrais individuais dos sensores RGB, índices de vegetação comuns derivados e quatro índices de vegetação propostos para determinar a relação entre o número de nematoides e a refletância espectral da soja em Rio verde, Goiás, Brasil, 2017.

<b>Bandas espectrais e índices de vegetação</b>	<b>Equação</b>	<b>Literatura Citada</b>
Red (R)	RED	-
Green (G)	GREEN	-
Blue (B)	BLUE	-
Chlorophyll and Nitrogen Index (ChNRGB)	$((G-R)/2)-(B/2)$	Dodds et al., 1998
Photochemical Reflectance Index (PRI)	$(B-G)/(B+G)$	Gamon et al., 1997
Modified Photochemical Reflectance Index (MPRI)	$(G-R)/(G+R)$	Yang et al., 2008
Visible Atmospherically Resistant Index (VARI)	$(G-R)/(G+R-B)$	Gitelson et al., 2003
Modified Enhanced Vegetation Index 1 (MEVI)	$2.5 \times ((G-R)/(G+6 \times R - 7.5 \times B) + 1)$	in study
Modified Enhanced Vegetation Index 2 (MEVI2)	$2.4 \times ((G-R)/(G+R+1))$	in study
Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI)	$((L+0.5) \times (G-R))/(1+G+R)$	in study

**Tabela 2.** Estimativas de regressão do efeito de três espécies de nematoides sobre a refletância espectral da soja em bandas espectrais individuais e índices de vegetação (IV's) obtidos a partir de sensores de baixo custo na cidade de Rio Verde, Goiás, Brasil, 2017.

<b>Espécies de nematoide (local de infestação)</b>	<b>Banda individual e IV's</b>	<b>Equação da regressão</b>	<b>Anova</b>
<i>Heterodera glycines</i> juvenil (solo)	RED	$102.4250 + 0.0200 \times n$	$F = 0.394; P = 0.535; R^2 = 0.007$
	GREEN	$122.2600 + 0.0100 \times n$	$F = 0.237; P = 0.630; R^2 = 0.004$
	BLUE	$94.4960 - 0.0500 \times n$	$F = 6.735; P = 0.014*; R^2 = 0.100$
	PRI	$-0.1280 - 0.0003 \times n$	$F = 9.859; P = 0.004*; R^2 = 0.100$
	MPRI	$0.0960 - 0.0001 \times n$	$F = 0.413; P = 0.525; R^2 = 0.007$
	MSAVI	$0.1440 - 0.0001 \times n$	$F = 0.414; P = 0.525; R^2 = 0.007$
	VARI	$0.1750 - 0.0002 \times n$	$F = 1.006; P = 0.324; R^2 = 0.020$
	MEVI	$0.1530 + 0.0030 \times n$	$F = 0.339; P = 0.565; R^2 = 0.006$
	MEVI2	$0.2300 - 0.0001 \times n$	$F = 0.414; P = 0.525; R^2 = 0.007$
	CHNRGB	$-37.3330 + 0.0200 \times n$	$F = 2.121; P = 0.155; R^2 = 0.030$
<i>Heterodera glycines</i> juvenil (raiz)	RED	$101.1320 + 0.1000 \times n$	$F = 3.957; P = 0.056; R^2 = 0.100$
	GREEN	$121.5910 + 0.0500 \times n$	$F = 2.352; P = 0.135; R^2 = 0.090$
	BLUE	$93.4350 - 0.0500 \times n$	$F = 2.346; P = 0.136; R^2 = 0.090$
	PRI	$-0.1300 - 0.0005 \times n$	$F = 10.196; P = 0.003*; R^2 = 0.300$
	MPRI	$0.1010 - 0.0003 \times n$	$F = 5.522; P = 0.025*; R^2 = 0.200$
	MSAVI	$0.1500 - 0.0004 \times n$	$F = 5.527; P = 0.025*; R^2 = 0.200$
	VARI	$0.1820 - 0.0006 \times n$	$F = 6.893; P = 0.013*; R^2 = 0.200$
	MEVI	$0.3240 - 0.0009 \times n$	$F = 0.009; P = 0.923; R^2 = 0.001$
	MEVI2	$0.2400 - 0.0007 \times n$	$F = 5.527; P = 0.025*; R^2 = 0.200$
	CHNRGB	$-36.4820 + 0.0001 \times n$	$F = 0.001; P = 0.994; R^2 = 0.001$
<i>Heterodera glycines</i> cistos viáveis (solo)	RED	$97.3560 + 0.3000 \times n$	$F = 9.277; P = 0.005*; R^2 = 0.700$
	GREEN	$119.1380 + 0.2000 \times n$	$F = 7.623; P = 0.010*; R^2 = 0.600$
	BLUE	$92.4200 - 0.0040 \times n$	$F = 0.004; P = 0.952; R^2 = 0.001$
	PRI	$-0.1240 - 0.0009 \times n$	$F = 6.342; P = 0.017*; R^2 = 0.600$
	MPRI	$0.1100 - 0.0008 \times n$	$F = 10.549; P = 0.003*; R^2 = 0.700$
	MSAVI	$0.1640 - 0.0010 \times n$	$F = 10.550; P = 0.003*; R^2 = 0.700$

	VARI	$0.200 - 0.0020 \times n$	$F = 10.756; P=0.003^*; R^2 = 0.700$
	MEVI	$0.2250 + 0.0040 \times n$	$F = 0.040; P = 0.843; R^2 = 0.008$
	MEVI2	$0.2630 - 0.0020 \times n$	$F = 10.550; P=0.003^*; R^2 = 0.700$
	CHNRGB	$-35.3200 - 0.0600 \times n$	$F = 1.652; P = 0.208; R^2 = 0.300$
<i>Heterodera</i>	RED	$93.2220 + 0.700 \times n$	$F = 12.091; P=0.002^*; R^2 = 0.900$
<i>glycines</i>	GREEN	$116.4720 + 0.4000 \times n$	$F = 10.632; P =0.003^*; R^2 =0.900$
cistos	BLUE	$91.7700 + 0.0400 \times n$	$F = 0.068; P = 0.796; R^2 = 0.060$
inviáveis	PRI	$-0.1170 - 0.0020 \times n$	$F = 4.962; P = 0.033^*; R^2 = 0.800$
(solo)	MPRI	$0.1210 - 0.0020 \times n$	$F = 12.956; P=0.001^*; R^2 = 0.900$
	MSAVI	$0.1800 - 0.0030 \times n$	$F = 12.950; P=0.001^*; R^2 = 0.900$
	VARI	$0.2200 - 0.0040 \times n$	$F = 12.401; P=0.001^*; R^2 = 0.900$
	MEVI	$-0.0680 + 0.0300 \times n$	$F = 0.379; P = 0.542; R^2 = 0.300$
	MEVI2	$0.2880 - 0.0040 \times n$	$F = 12.950; P=0.001^*; R^2 = 0.900$
	CHNRGB	$-34.2430 - 0.200 \times n$	$F = 2.700; P = 0.110; R^2 = 0.700$

Tabela 2. Continuação...

Espécies de nematoide (local de infestação)	Banda individual e IV's	Equação da regressão		Anova
		Equação da regressão	Anova	
<i>Pratylenchus</i>	RED	$104.7130 - 0.0300 \times n$	$F = 0.517; P = 0.478; R^2 = 0.020$	
<i>brachyurus</i>	GREEN	$123.7560 - 0.0200 \times n$	$F = 0.709; P = 0.406; R^2 = 0.020$	
(solo)	BLUE	$91.9620 + 0.0090 \times n$	$F = 0.097; P = 0.758; R^2 = 0.003$	
	PRI	$- 0.1500 + 0.0002 \times n$	$F = 1.736; P = 0.197; R^2 = 0.050$	
	MPRI	$0.0900 + 0.0001 \times n$	$F = 0.602; P = 0.444; R^2 = 0.020$	
	MSAVI	$0.1350 + 0.0001 \times n$	$F = 0.601; P = 0.444; R^2 = 0.020$	
	VARI	$0.1600 + 0.0002 \times n$	$F = 0.666; P = 0.421; R^2 = 0.020$	
	MEVI	$0.7910 - 0.0100 \times n$	$F = 2.198; P = 0.148; R^2 = 0.060$	
	MEVI2	$0.2160 + 0.0002 \times n$	$F = 0.601; P = 0.444; R^2 = 0.020$	
	CHNRGB	$- 36.4510 - 0.0006 \times n$	$F = 0.001; P = 0.972; R^2 = 0.001$	
<i>Pratylenchus</i>	RED	$106.6910 - 0.0030 \times n$	$F = 1.027; P = 0.319; R^2 = 0.001$	
<i>brachyurus</i>	GREEN	$123.1990 - 0.0005 \times n$	$F = 0.048; P = 0.828; R^2 = 0.001$	
(raiz)	BLUE	$89.7990 + 0.0030 \times n$	$F = 1.548; P = 0.223; R^2 = 0.001$	
	PRI	$- 0.1530 + 0.0001 \times n$	$F = 1.247; P = 0.273; R^2 = 0.001$	

	MPRI	$0.0760 + 0.0001 \times n$	$F = 5.303; P = 0.028^*; R^2 = 0.001$
	MSAVI	$0.1130 + 0.0001 \times n$	$F = 5.302; P = 0.028^*; R^2 = 0.001$
	VARI	$0.1320 + 0.0001 \times n$	$F = 5.156; P = 0.030^*; R^2 = 0.001$
	MEVI	$-0.2300 + 0.0005 \times n$	$F = 0.959; P = 0.335; R^2 = 0.001$
	MEVI2	$0.1820 + 0.0001 \times n$	$F = 5.302; P = 0.028^*; R^2 = 0.001$
	CHNRGB	$-36.6600 + 0.0002 \times n$	$F = 0.017; P = 0.896; R^2 = 0.001$
<i>Helicotylenchus</i>	RED	$105.3810 - 0.0070 \times n$	$F = 0.479; P = 0.494; R^2 = 0.001$
<i>dihystera</i>	GREEN	$123.9330 - 0.0040 \times n$	$F = 0.404; P = 0.529; R^2 = 0.001$
(solo)	BLUE	$90.8250 + 0.0050 \times n$	$F = 0.673; P = 0.418; R^2 = 0.001$
	PRI	$-0.1570 + 0.0001 \times n$	$F = 2.695; P = 0.111; R^2 = 0.004$
	MPRI	$0.0860 + 0.0001 \times n$	$F = 1.069; P = 0.309; R^2 = 0.002$
	MSAVI	$0.1290 + 0.0001 \times n$	$F = 1.068; P = 0.309; R^2 = 0.002$
	VARI	$0.1510 + 0.0001 \times n$	$F = 1.223; P = 0.277; R^2 = 0.002$
	MEVI	$0.9090 - 0.0020 \times n$	$F = 1.378; P = 0.249; R^2 = 0.002$
	MEVI2	$0.2060 + 0.0001 \times n$	$F = 1.068; P = 0.309; R^2 = 0.002$
	CHNRGB	$-36.1420 - 0.0010 \times n$	$F = 0.076; P = 0.785; R^2 = 0.001$
<i>Helicotylenchus</i>	RED	$105.4820 - 0.0300 \times n$	$F = 1.024; P = 0.319; R^2 = 0.010$
<i>dihystera</i>	GREEN	$124.3810 - 0.020 \times n$	$F = 1.495; P = 0.231; R^2 = 0.020$
(raiz)	BLUE	$92.6740 - 0.0040 \times n$	$F = 0.064; P = 0.802; R^2 = 0.001$
	PRI	$-0.1490 + 0.0001 \times n$	$F = 1.165; P = 0.289; R^2 = 0.010$
	MPRI	$0.0860 + 0.0001 \times n$	$F = 2.282; P = 0.141; R^2 = 0.020$
	MSAVI	$0.1280 + 0.0001 \times n$	$F = 2.269; P = 0.142; R^2 = 0.020$
	VARI	$0.1510 + 0.0002 \times n$	$F = 2.476; P = 0.126; R^2 = 0.020$
	MEVI	$0.7930 - 0.0060 \times n$	$F = 1.839; P = 0.185; R^2 = 0.020$
	MEVI2	$0.2060 + 0.0002 \times n$	$F = 2.269; P = 0.142; R^2 = 0.020$
	CHNRGB	$-36.8450 + 0.0040 \times n$	$F = 0.174; P = 0.680; R^2 = 0.002$

---

\*significativo ao nível de 5%; n = número de nematoides.

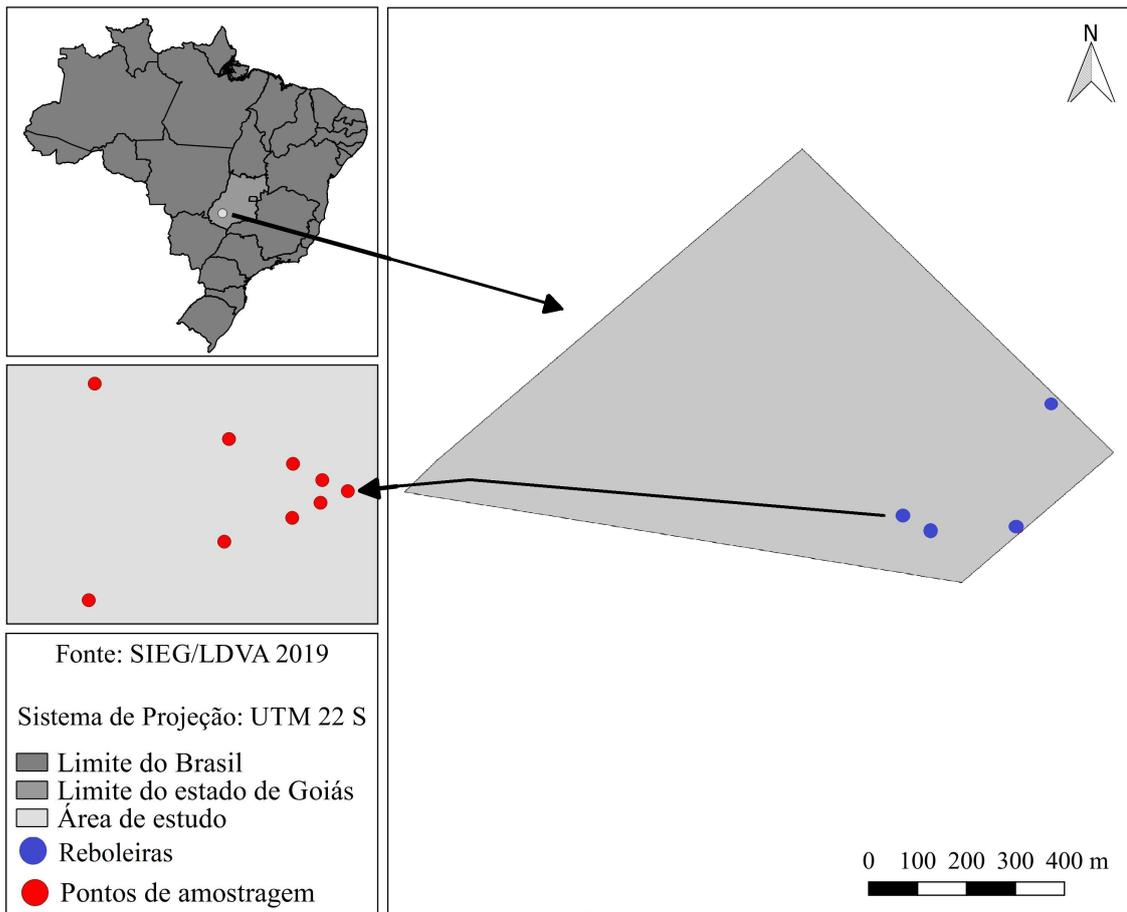
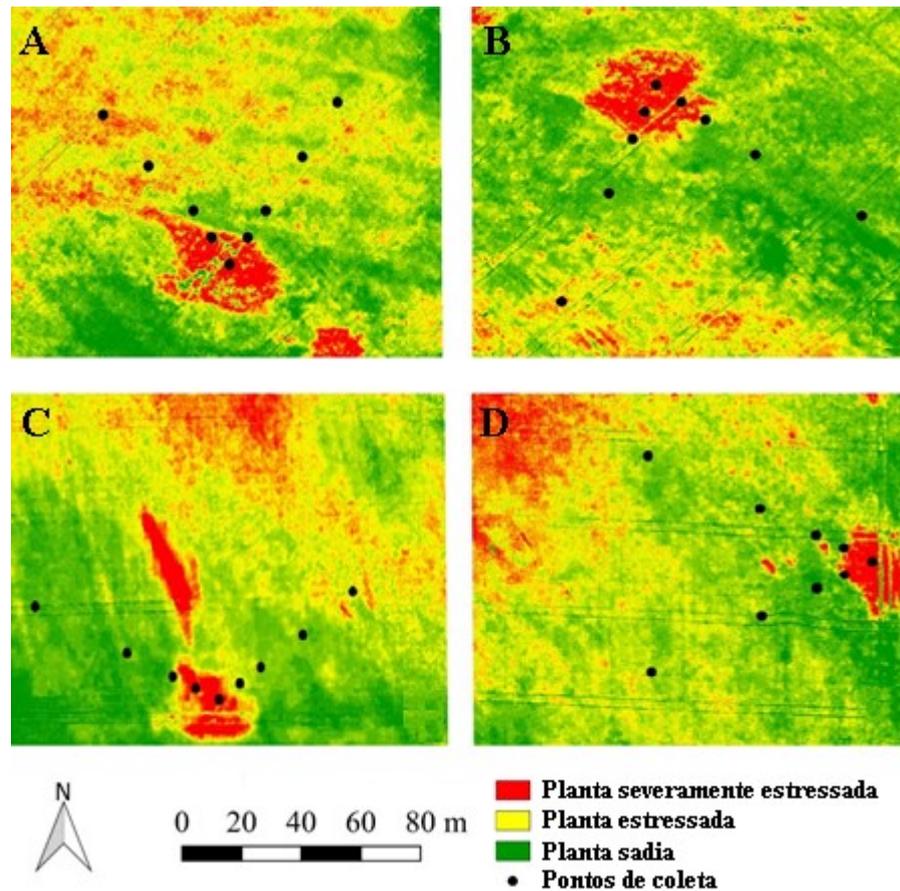
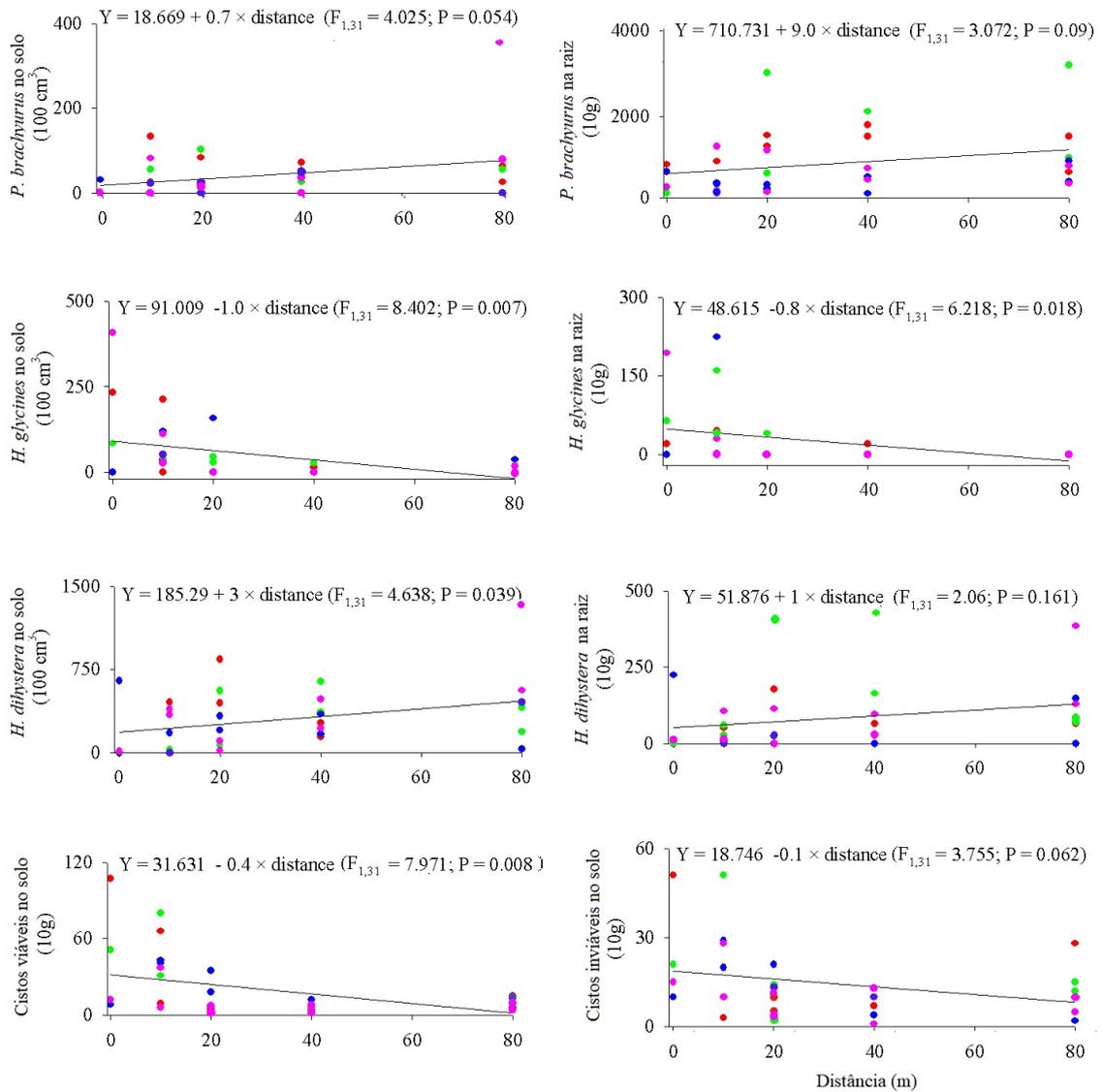


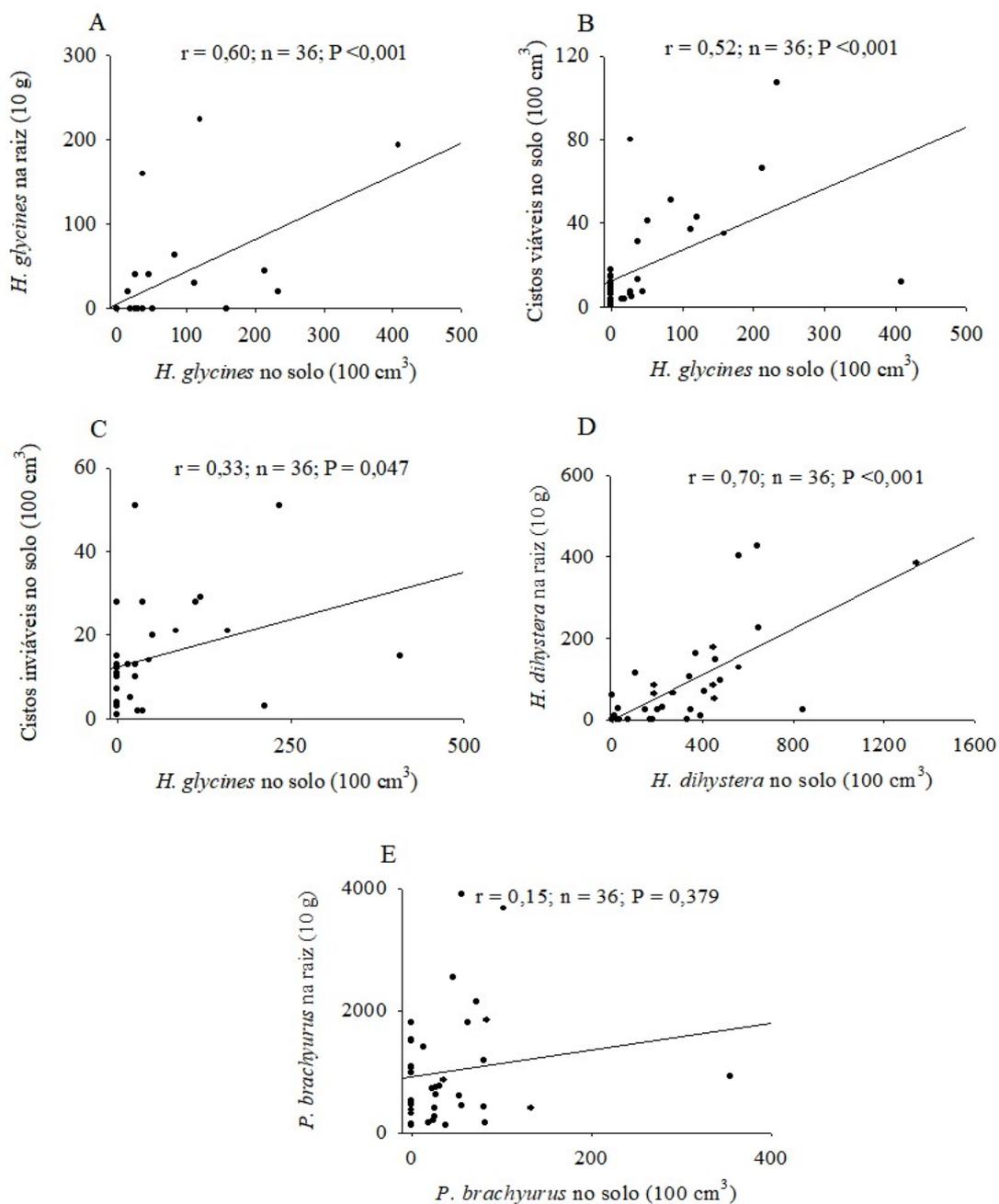
Figura 1. Localização geográfica da área de estudo e pontos de amostragens no centro, 10, 20, 40 e 80 m do centro da reboleira em duas direções.



**Figura 2.** Imagem aérea representativa de quatro subáreas (A-D) do mesmo campo de soja obtidas de um sistema de sensoriamento remoto RGB de baixo custo. A imagem foi classificada utilizando o Índice de Refletância Fotoquímica (PRI), observações de campo e amostras de solo e raiz de *Pratylenchus brachyurus*, *Heterodera glycines* e *Helicotylenchus dihystera* em soja. Os pontos de coleta representam os locais onde os nematoides foram amostrados.



**Figura 3.** Número de três espécies de nematoides amostradas no centro e radialmente em torno de quatro subáreas dentro do mesmo campo de soja na cidade de Rio Verde, Estado de Goiás, Brasil, 2017; (A) *P. brachyurus* no solo, (B) *P. brachyurus* na raiz, (C) *H. glycines* no solo, (D) *H. glycines* na raiz, (E) *H. dihystra* no solo, (F) *H. dihystra* na raiz, (G) Cisto viável no solo e (H) cisto inviável no solo. Linhas sólidas representam valores previstos a partir de modelos de regressão linear simples entre a distância e o número de nematoides, considerando um termo para as subáreas como efeito aleatório.



**Figura 4.** Correlação entre *Heterodera glycines* no solo e *Heterodera glycines* na raiz (A), *Heterodera glycines* no solo e cistos viáveis no solo (B), *Heterodera glycines* no solo e cistos inviáveis no solo (C), *Helicotylenchus dihystera* no solo e *Helicotylenchus dihystera* na raiz (D) e *Pratylenchus brachyurus* no solo e *Pratylenchus brachyurus* na raiz (E).

## **CAPÍTULO II - Multissensores aumentam a capacidade de estimar a injúria de nematoides na soja**

(Normas de acordo com a Revista Computers and Electronics in Agriculture).

Resumo: Os sistemas aéreos não tripulados têm se tornado uma ferramenta auxiliar na detecção e estimativa dos danos causados por nematoides na soja. Esse estudo teve por objetivo estimar a população de *P. brachyurus*, *H. dihystera* e variáveis agronômicas através da fusão de dados de múltiplos sensores; selecionar bandas espectrais que melhor estimem a injúria causada por *P. brachyurus*, *H. dihystera* e selecionar as bandas a partir da fusão de dados por multissensores para otimização de sensores. Um voo exploratório inicial foi realizado em um campo de soja no estádio V5 para a identificação das reboleiras de nematoides. O voo foi realizado com um Phantom 4, sensor RGB a 120 m de altura e sobreposições de 80%. A imagem foi ortorretificada e dois transectos foram criados para cada zona a partir do foco inicial e posicionando radialmente pontos de amostragem adicionais a 10, 20, 40 e 80 m do centro. No estádio R1 da soja foi realizado simultaneamente voos e amostragens de solo e raiz das plantas de soja em todos os 45 pontos. As imagens multiespectrais foram adquiridas com sensor Parrot Sequoia embarcado no Phantom 4 e sensor Sentera embarcado em um quadricoptero Inspire 2. Todas as missões foram realizadas em uma altitude de voo de 40 m com sobreposição frontal e lateral de 80%. As imagens foram processadas no Pix4D e analisadas no software Qgis. A extração e quantificação de *Pratylenchus brachyurus* e *Helicotylenchus dihystera* no solo e raízes seguiram os métodos de extração e quantificação de nematoides utilizados no laboratório. A fusão de dados foi realizada por meio de modelos de regressão linear múltipla stepwise do tipo forward model selection entre as variáveis medidas (nematológicas e agronômicas) e estimadas (19 bandas espectrais). *Pratylenchus brachyurus* e *H. dihystera* na raiz podem ser efetivamente detectados e estimados usando a fusão de dados de multissensores

utilizando bandas na faixa do visível. As variáveis agronômicas avaliadas precisaram de bandas que atuam no comprimento de onda do visível e infravermelho próximo para sua estimativa. A altura de planta pode ser uma variável resposta da injúria causada por *P. brachyurus*. A abordagem de fusão de dados multisensores de bandas espectrais baseadas em SANT pode ajudar a definir modelos para estimar as variáveis analisadas, reduzindo o custo de amostragens em campo.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, aprendizado de máquina, comportamento espectral, sistema aéreo não tripulado, *Pratylenchus brachyurus*, *Helicotylenchus dihystera*.

### **Multi-sensor increases ability to estimate nematode injury in soybean**

**Abstract:** Unmanned aerial systems have become an auxiliary tool in detecting and estimating nematode damage in soybeans. This study aimed to estimate the population of *P. brachyurus*, *H. dihystera* and agronomic variables by merging data from multiple sensors; select spectral bands that best estimate the injury caused by *P. brachyurus*, *H. dihystera* and select the bands from multi-sensor data fusion for sensor optimization. An initial exploratory flight was performed on a soybean field at stage V5 to identify nematode shoots. The flight was performed with a Phantom 4, 120 m high RGB sensor and 80% overlap. The image was orthorectified and two transects were created for each zone from the initial focus and radially positioning additional sampling points at 10, 20, 40 and 80 m from the center. At soybean R1 stage, flights and soil and root sampling of soybean plants were performed simultaneously at all 45 points. Multispectral images were acquired with Parrot Sequoia sensor embedded in the Phantom 4 and Sentera sensor embedded in an Inspire 2 quadcopter. All missions were performed at a flight altitude of 40 m with 80% front and side overlap. The images were processed on Pix4D and analyzed using Qgis software. The extraction and quantification of *Pratylenchus brachyurus* and *Helicotylenchus dihystera* in soil and roots followed the nematodes extraction and quantification methods used in the laboratory. Data fusion was performed using stepwise multiple linear regression models of forward model selection between measured (nematological and agronomic) and estimated variables (19 spectral bands). *Pratylenchus brachyurus* and *H. dihystera* in root can be effectively detected and estimated using the fusion of multisensor data using bands in the visible range. The

evaluated agronomic variables required bands that act on the visible and near infrared wavelength for their estimation. Plant height may be a variable response to the injury caused by *P. brachyurus*. The SANT-based multisensor spectral band data fusion approach can help to define models for estimating the analyzed variables, reducing the field cost sampling.

**Keywords** – remote sensing, machine learning, spectral behavior, unmanned aerial system, nematodes, *Pratylenchus brachyurus*, *Helicotylenchus dihystera*.

## 1. Introdução

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, *Glycine max* (L.) Merrill com cerca de 114.313 mil toneladas produzidas na safra 2018/19 (CONAB, 2019). Entre os principais patógenos de solo capazes de causar perdas significativas na soja, os fitonematoides possuem grande importância no país. *Pratylenchus* spp. e *Heterodera glycines* (Ichinohe) são os nematoides mais importantes causando perdas econômicas na soja (Koenning et al., 2010; Oliveira et al., 2011; Machado et al., 2015; Bellé et al., 2017). Entretanto, estudos recentes indicam que algumas espécies de fitonematoides como *Helicotylenchus dihystera* (Cobb), ainda considerado um nematoide secundário da soja no Brasil, possuem potencial para limitar o rendimento dessa cultura (Gomes et al., 2003; Kirsch et al., 2016).

*Pratylenchus brachyurus* (Godfrey) Filipjev, conhecido como nematoide das lesões radiculares é um nematoide endoparasita migrador, por isso mesmo, pode causar sérios danos às raízes das plantas. Este parasita destrói as células parasitadas através de sua movimentação ativa e liberação de enzimas e toxinas no córtex radicular (Flis et al., 2018). Sintomas comuns associados a esse nematoide em plantas de soja incluem reboleiras de plantas com crescimento reduzido, amarelecimento ocasional das folhas e severas necroses nas raízes e tubérculos, limitando a absorção e transporte de água e nutrientes (Castillo e Vovlas, 2007), reduzindo até 50% o rendimento da soja em áreas com alta infestação de *P. brachyurus* (Dias et al., 2010; Ribeiro et al., 2010; Hong et al., 2011; Franchini et al., 2014).

Altas populações de *P. brachyurus* estão associadas à sucessão de cultura onde, na entressafra da soja, as áreas são semeadas com milho que é uma cultura conhecida como boa hospedeira desse nematoide (Mainardi e Armus, 2015). Processos adequados

de identificação e integração de diversas práticas agronômicas, como utilização de cultivares resistentes, fertilização apropriada, rotação de culturas e aplicação de nematicidas químicos e biológicos (Mello et al., 2006; Lima et al., 2015; Debiasi et al., 2016; Homiak et al., 2017) são requeridos para reduzir efetivamente as populações de nematoides. As populações de nematoides são tradicionalmente monitoradas por visitas intensivas a campos de cultivo e análises laboratoriais que, por vezes, são onerosas (Ortiz et al., 2010). Nesse sentido, faz-se necessário a utilização de técnicas remotas não destrutivas, que reduz as amostragens, pois um dos objetivos do sensoriamento remoto é o direcionamento de zonas que estão sendo afetadas por pragas e doenças.

O sensoriamento remoto surge como alternativa, em que sistemas aéreos não tripulados (SANT), uma inovação tecnológica, complementam os métodos tradicionais de detecção e quantificação desses patógenos (Alves et al., 2015; Bajwa et al., 2017; Alves et al., 2019). Fornece a capacidade de detecção a distribuição espacial de pragas e doenças relativamente rápida e precoce usando métodos baseados na refletância do dossel (Sankaran et al., 2010; Mahlein et al., 2010). Entretanto, ainda é escasso na literatura o uso dessa ferramenta em estudos de monitoramento e estimativa de *P. brachyurus* e *H. dihystra*.

Os SANT permitem amostragens com maior resolução espacial e temporal do que as abordagens tradicionais usadas para pragas e doenças em várias culturas (Zhang e Kovacs, 2012). Eles permitem ainda avaliação efetiva de maior número de plantas por meio do seu comportamento espectral quando comparado ao método tradicional de amostragem (Pugh et al., 2018; Shafian et al., 2018). A resposta espectral da planta também tem sido utilizadas para mapear e detectar as distribuições de nematoides das galhas (Martins e Galo, 2017), detecção de *Sclerotinia sclerotiorum* (Cao et al., 2018), pulgão da soja (Alves et al., 2015), estresse hídrico (Schmitter, et al., 2017), avaliar o estado nutricional das plantas (Moreno-Garcia et al., 2018; Zheng et al., 2018) e auxiliar no desenvolvimento e implementação da agricultura de precisão (Chemura et al., 2016; Vanegas et al., 2018; Campos et al., 2019).

O uso do sensoriamento remoto aplicado a pragas e doenças de plantas é possível porque plantas infectadas mostram comportamento espectral diferente das saudáveis (Riedell e Blackmer, 1999; Zhang et al. 2003; Marin et al., 2018). Diferentes sensores possuem características próprias em termos de resoluções espaciais, temporais, espectrais e radiométricas (Pena et al., 2018). A fusão de dados em sensoriamento remoto, visa integrar as informações adquiridas com diferentes resoluções espaciais,

temporais, espectrais e radiométricas de sensores montados em satélites, aeronaves tripuladas e não tripuladas e plataformas terrestres para produzir dados fundidos que contêm informações mais detalhadas, integrando efetivamente as vantagens de observações complementares de várias plataformas e rompendo as restrições de um único sensor (Zhang, 2010; Schmitt e Xiang, 2016; Ming Lu et al., 2017). A fusão de dados obtidos por SANT integrados com múltiplos sensores se tornaram populares nos últimos anos. A fusão de dados multisensores é uma tecnologia que permite combinar informações de várias fontes para formar uma imagem unificada (Pena et al., 2018), melhorando a estimativa das características das plantas, combinando as informações espectrais, estruturais e térmicas contidas em diversos sistemas de sensores (Maimaitijiang et al., 2017). A fusão de dados foi aplicada, por exemplo, na detecção da ferrugem amarela no trigo (Moshou et al., 2005) e na estimativa de biomassa de plantas (Marshall e Thenkabail, 2015; Tilly et al., 2015).

É evidente que, a partir desses estudos, com a fusão de dados, as estimativas de nematoides e variáveis agronômicas podem ser melhoradas e otimizadas, fazendo-se uso de informações obtidas a partir do sensoriamento remoto. No entanto, ainda não existem trabalhos utilizando a fusão de dados para estimativas de *P. brachyurus* e *H. dihystra* parasitando plantas de soja. Os objetivos desse estudo foram: (i) estimar a população de *P. brachyurus*, *H. dihystra* e variáveis agronômicas através da fusão de dados de múltiplos sensores; (ii) selecionar bandas espectrais que melhor estimem a injúria causada por *P. brachyurus*, *H. dihystra* e as variáveis agronômicas, e (iii) selecionar as bandas a partir da fusão de dados por multissensores para otimização de sensores.

## **2. Material e Métodos**

### **2.1. Caracterização da área experimental**

O estudo foi conduzido em um campo de soja de 120 ha próximo à cidade de Rio Verde, estado de Goiás, Brasil, durante a safra de 2018/19. O campo foi selecionado pelo histórico de infestação do solo por *P. brachyurus*. Sementes da variedade de soja MONSOY 7198 (Monsanto, Santa Helena de Goiás, Brasil) foram semeadas em 08 de outubro de 2018 em um Latossolo vermelho distrófico sobre a palhada de milho da safra anterior. Essa cultivar possui ciclo de 115 dias, porte ereto, altura média de 1,10 m, população de 260 mil plantas ha<sup>-1</sup> e com resistência apenas para

nematoide do cisto da soja. Os tratos culturais e práticas de manejo seguiram as práticas de produção padrão da região produtora de soja (Pires et al., 2005; Neis et al., 2010; Bueno et al., 2011).

## 2.2. Estabelecimento dos pontos de amostragem

As reboleiras foram selecionadas através de um voo exploratório inicial realizado com um quadricóptero SANT (Phantom 4 Advanced, DJI, Shenzhen, China) equipado com um sensor RGB (20 MP CMOS, DJI, Shenzhen, China) a 120 m de altura e sobreposições laterais e frontais de 80% no estádio V5 da soja. As imagens foram ortorretificadas no software Pix4D 3.2.23 (Pix4D SA, Lausanne, Suíça). Através da imagem aérea, foram selecionadas todas as reboleiras que existiam na área. Os pontos centrais de cada reboleira foram demarcados no software Qgis (QGIS Development Team, Boston, EUA) e exportados para o GPS (Global Positioning System) Garmin eTrex® 30 (Garmin Internacional, Olathe, KS) para realização de uma visita em campo, verificando se havia mesmo sintomas provocados nas raízes das plantas por *P. brachyurus*. Foram selecionadas cinco reboleiras e nove pontos de amostragem por reboleira: no centro, 10 m, 20 m, 40 m e 80 m do centro da reboleira em duas direções (Figura 1). A escolha de cinco reboleiras foram baseadas nos sintomas causados pelos nematoides no sistema radicular e que também o raio de amostragem não fosse sobrepor sobre outra zona.

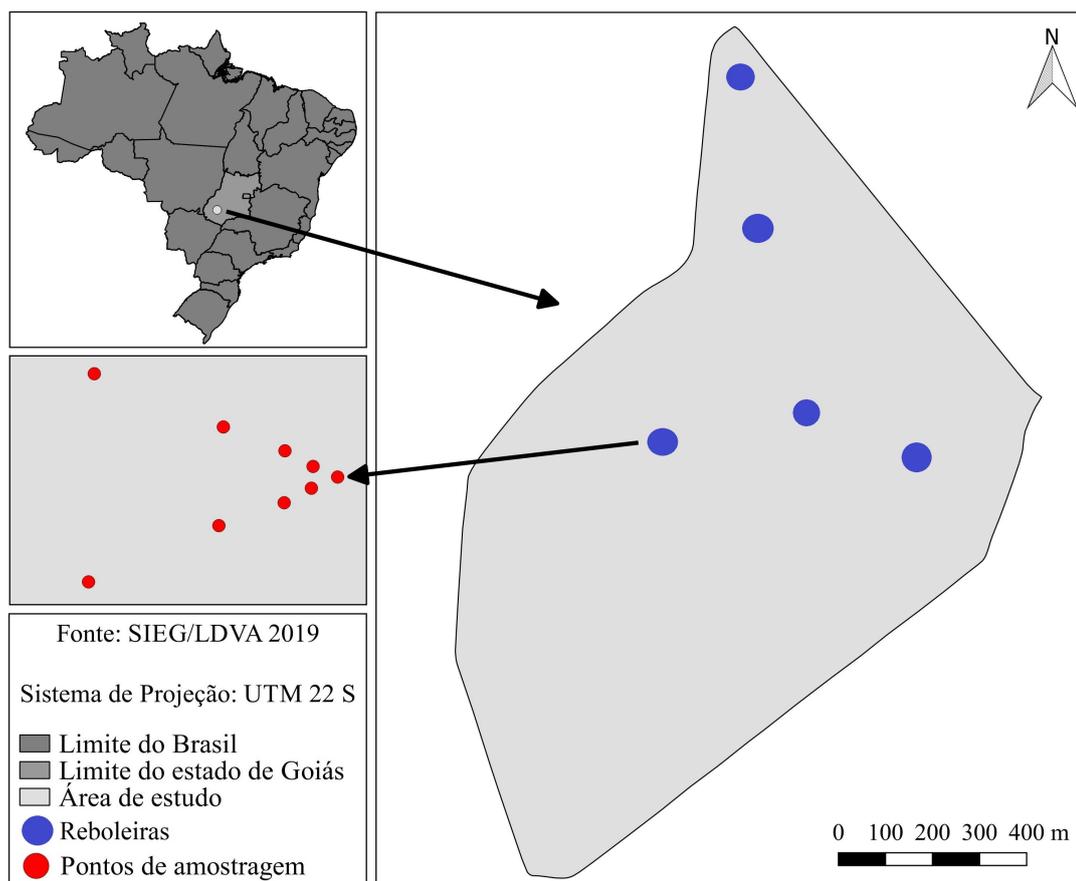


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo e pontos de amostragens no centro, 10, 20, 40 e 80 m do centro da reboleira em duas direções.

### 2.3. Identificação de nematoides no solo e na raiz e avaliações agrônômicas

Amostragens de solo e raiz das plantas de soja foram obtidas em todos os 45 pontos no início do estágio de florescimento das plantas de soja (estádio de crescimento R1) com auxílio de GPS. Três subamostras (500 g cada) na camada de 0-20 cm foram coletadas com uma pequena enxada e homogêneas em um balde. Para cada ponto de amostragem, uma amostra de solo (500 g) foi obtida das subamostras homogêneas e armazenada em sacos plásticos com 50 g de amostras de raízes das plantas de soja. A extração e quantificação de *P. brachyurus* e *H. dihystra* no solo e raízes foi realizada usando os métodos descritos por Jenkins (1964) e Coolen e D'Herde (1972). As amostras foram armazenadas a 4°C até a identificação. O número de nematoides foram determinados para cada amostra (raízes e solo, separadamente) usando um microscópio óptico e a câmara de contagem de Petroff-Hausser (Southey, 1970). Os nematoides foram identificados por espécie em comparação a uma coleção de referência no Laboratório de Nematologia do Instituto Federal Goiano, Rio Verde,

Brasil e características taxonômicas (Costa-Manso e Tenente, 1994). Em cada ponto de amostragem foi realizado a coleta de seis plantas para avaliação da massa verde da parte aérea e raiz, massa seca da parte aérea e raiz e altura de planta. A massa seca da parte aérea e raiz foi determinada em estufa com circulação de ar a 65°C até atingir o peso constante.

#### 2.4. Aquisição de imagens e processamento

Em novembro de 2018, quando as plantas de soja estavam no estágio inicial de florescimento R1, foram realizadas as atividades de campo e voos, simultaneamente, das 10 às 15 horas. As imagens RGB foram adquiridas com sensor do Phantom 4. As imagens multiespectrais foram adquiridas com sensor Parrot Sequoia (green, red, red-edge, nir) (MicaSense Inc., Seattle, WA) embarcado no Phantom 4 e com sensor Sentera (586, 615, 661, 775, 825 nm, Red-edge (695 a 705 nm), Red (680 a 690 nm), NIR1 e NIR2, ambos de 730 a 740 nm) (Sentera, Inc., Minneapolis, MN) embarcado em um quadricoptero Inspire 2. Todos os comprimentos de onda do sensor Sentera específicos (586 nm, 615 nm, 661 nm, 775 nm, 825 nm) e demais são de banda estreita. As missões de voos foram planejadas utilizando o aplicativo DroneDeploy para o sensor RGB embarcado no Phantom 4 e Sequoia, e o FieldAgent (Sentera, Inc., Minneapolis, MN) para o Inspire 2 que embarcava o sensor Sentera. Todas as missões foram realizadas em uma altura de voo de 40 m com sobreposição frontal e lateral de 80% para garantir boa qualidade do mosaico na etapa de processamento. Essa altura de voo permitiu obter pixels (GSD) na imagem de 1 cm para o sensor RGB Phantom 4, 3 cm para Sentera e 4 cm para Sequoia. Durante os voos, foram utilizados discos brancos de 30 cm de diâmetro, que foram distribuídos em todos os pontos de amostragem, para garantir a criação precisa da área de interesse na imagem nos pontos de amostragens. Todas as imagens obtidas pelos sensores foram processadas no Pix4D e analisadas no software Qgis. O valor do número digital dos pixels das bandas RGB e multiespectrais foram obtidos a partir do desenho de uma área de interesse de 1,00 x 0,25 m em cada ponto de amostragem. Foi utilizado um método de classificação supervisionada, para eliminação dos pixels que representavam solo e sombra, deixando apenas os pixels referentes ao dossel das plantas. Cada ponto de amostragem foi representado por uma média aritmética dos valores de número digital dos pixels dentro de 0,25 m<sup>2</sup>. Para

realizar uma fusão de dados precisa, todas as imagens foram georreferenciadas, obtendo entre as imagens, uma alta precisão geométrica.

## 2.5. Análise estatística

Modelos de regressão linear múltiplo foram utilizados para simular sensores através da fusão das bandas espectrais. Foi utilizado um total de 19 bandas espectrais: Red<sub>Phantom</sub>, Green<sub>Phantom</sub>, Blue<sub>Phantom</sub>, Green<sub>sequoia</sub>, Red<sub>sequoia</sub>, Red-edge<sub>sequoia</sub>, NIR<sub>sequoia</sub>, Red<sub>sentera</sub>, Green<sub>sentera</sub>, Blue<sub>sentera</sub>, 586 nm<sub>sentera</sub>, 615 nm<sub>sentera</sub>, 661 nm<sub>sentera</sub>, 775 nm<sub>sentera</sub>, 825 nm<sub>sentera</sub>, Red-edge<sub>sentera</sub>, Red<sub>sentera</sub> NIR1<sub>sentera</sub> e NIR2<sub>sentera</sub>. A fusão das bandas espectrais foi escolhida com base nos valores do critério de informação de Akaike (AIC) e na significância dos coeficientes de regressão ( $\alpha = 0,05$ , R Development Core Team 2010). Foi utilizada a regressão múltipla stepwise do tipo forward model selection, pois é um tipo de regressão que começa vazia e vai adicionando das variáveis que contribuem para a melhoria do modelo. Essa parte das análises estatísticas foi realizada para selecionar um subconjunto de bandas não redundantes que funcionariam juntas para otimizar a estimativa de *P. brachyuris*, *H. dihystera* e as variáveis agrônômicas: altura de planta, massa verde da parte aérea e raiz e massa seca da parte aérea e raiz. A primeira variável adicionada ao modelo foi a banda com menor valor de P. Bandas adicionais foram selecionadas pela adição das demais bandas, uma de cada vez. Variáveis adicionais foram mantidas no modelo se o novo modelo fosse estatisticamente diferente do modelo mais simples (valor de P menor do que o do modelo anterior).

## 3. Resultados

Nas amostras de solo (100 cm<sup>3</sup> de solo), o número de nematoides variou de 0 a 121 para *P. brachyurus* e de 26 a 984 para *H. dihystera*. Nas amostras de raízes (10 g de raiz) variou de 73 a 1768 para *P. brachyurus* e de 0 a 968 para *H. dihystera*. De acordo com as análises de populações de nematoides realizadas por Lima et al. (2015) em outros campos de estudo, a população de *P. brachyurus* encontrada nas amostras deste estudo comparada com as populações encontradas por esses autores foram consideradas como alta.

As respostas espectrais da soja e a flutuação populacional de nematoides variaram em toda localização do campo infestado por nematoides (Figura 2). A fusão das bandas dos sensores foi eventualmente associada à injúria causada por nematoides e variáveis agronômicas avaliadas. Plantas cloróticas observadas nos pixels da imagem foram classificadas como severamente estressadas pelos nematoides. Plantas com início de sintomas de injúria causada pelos nematoides foram classificadas como estressadas. Nas categorias de plantas saudáveis, não foram observados sintomas visíveis de danos causados por nematoides. Os mapas das Figuras 2 e 3 foram plotados conforme os modelos apresentados na Tabela 1.

No centro da reboleira, (Figura 2) houve maiores sintomas causados por *P. brachyurus* e *H. dihystra*. Quando compara a Figura 2 com a Figura 3, no centro da reboleira houve maior quantidade de plantas com pequeno porte e plantas que apresentaram menor biomassa. Em relação à geometria das áreas que apresentaram alta população de *P. brachyurus* (solo e raiz das plantas), observa-se com maior nitidez no mapa (Fig. 2a, b). As altas populações de *H. dihystra* não foram muito bem visíveis nos mapas, por ser ainda considerado um nematoide secundário e pela importância das análises de imagens em nível de pixels e não visualmente (Fig. 2c, d). As linhas transversais que cortam o talhão (Figuras 2 e 3) são os rastros dos implementos agrícolas.

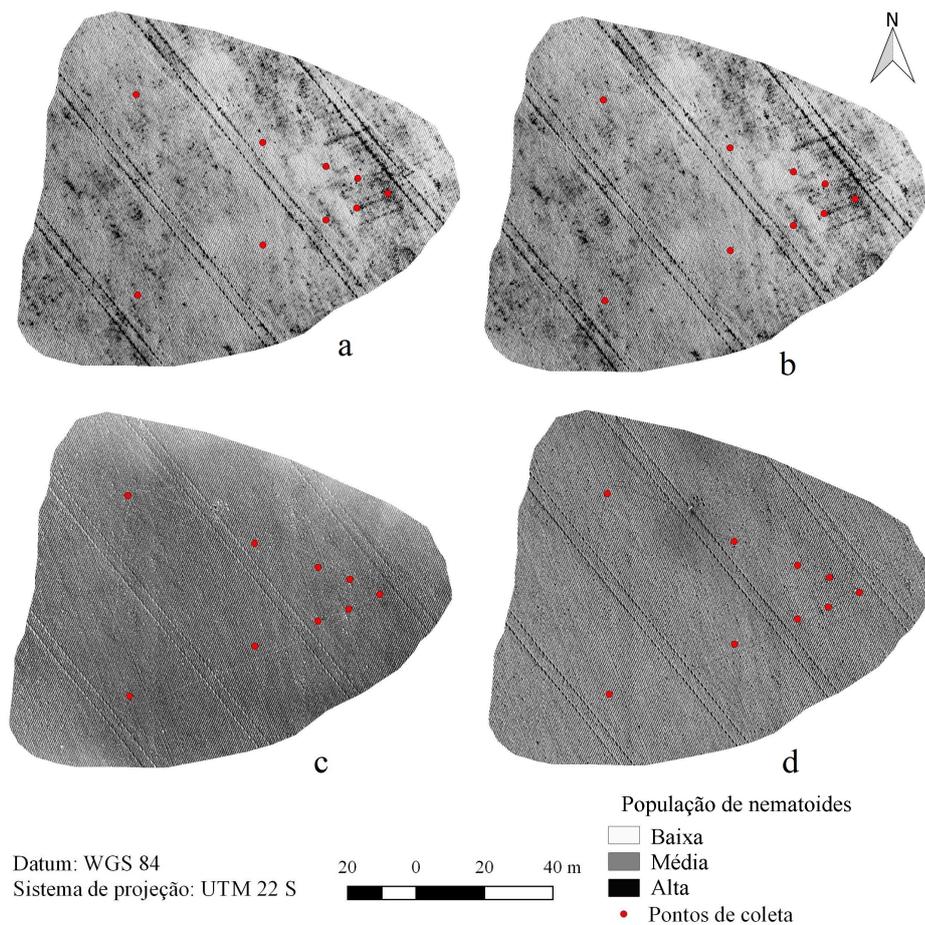


Figura 2: Mapa de estimativa de *P. brachyurus* no solo (a); *P. brachyurus* na raiz (b); *H. dihystra* no solo (c) e *H. dihystra* na raiz (d) usando fusão de dados multissensor baseados em Forward Model Selection.

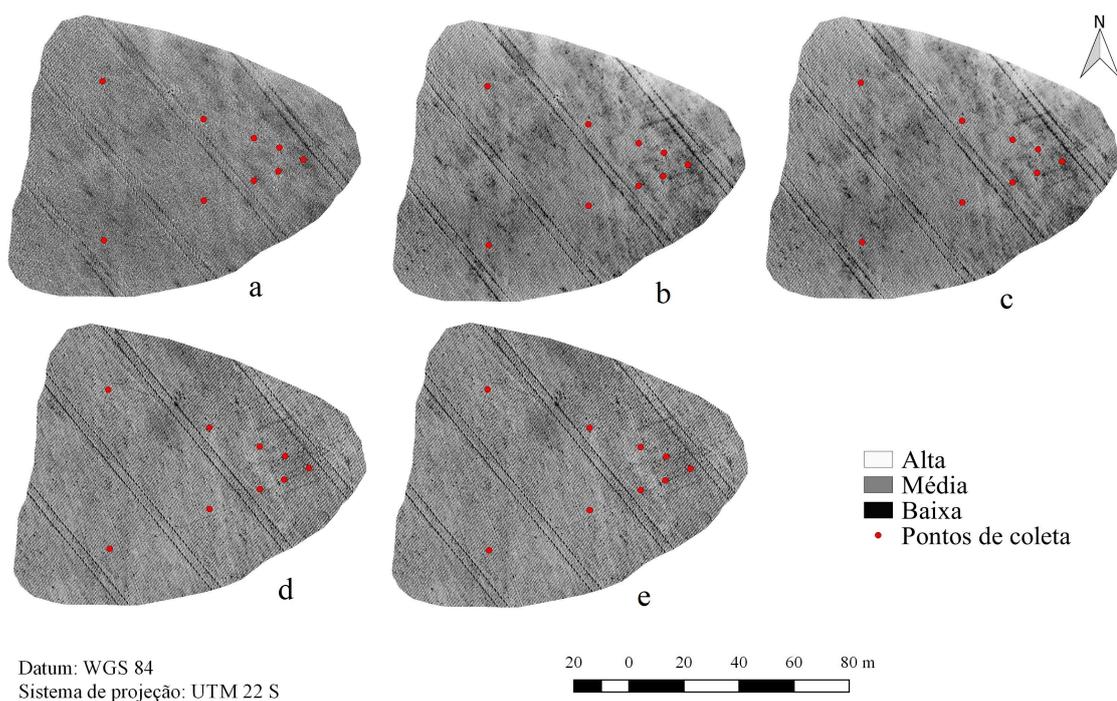


Figura 3: Mapa de estimativa de altura de planta (a); massa verde parte aérea (b); massa seca parte aérea (c); massa verde da raiz (d) e massa seca da raiz (e) usando fusão de dados multissensor baseados em Forward Model Selection.

### 3.1. Fusão de bandas espectrais para simulação de sensores

A fusão das bandas espectrais baseada no forward model selection (Tabela 1) levou os modelos com valores de P mais baixos e  $R^2$  mais altos do que os respectivos modelos de banda única. As variáveis nematológicas como *P. brachyurus* no solo e raiz necessitaram de menores combinações de bandas espectrais (Tabela 1). Quando a seleção do modelo foi para estimar variáveis agronômicas altura de planta, massa verde e seca da parte aérea, a seleção do modelo forward incluiu mais bandas espectrais (Tabela 1).

### 3.2. Variáveis nematológicas

O modelo de estimativa de *H. dihystera* na raiz foi obtido através da fusão de dados dos sensores do Phantom, Sentera e Sequoia (Tabela 2). Somente com a primeira banda adicionada no modelo (banda vermelha do Phantom) obteve  $R^2$  de 0.08. Quando houve a fusão das bandas o valor de  $R^2$  aumentou para 0.32. Esse modelo foi melhor ajustado no espectro do visível e infravermelho próximo. O modelo de *H. dihystera* no solo foi composto somente pela banda green do sensor sentera, atuando somente na faixa do visível do espectro eletromagnético (Tabela 1). Quanto menor a refletância na faixa do green, maior foi a população de *H. dihystera* no solo encontrada.

Para a estimativa de *P. brachyurus* no solo, houve a fusão da combinação das bandas blue (Phantom) e 661 nm, que atua na faixa do red (Sentera). O aumento na refletância na faixa espectral de 661 nm fez com que a população de *P. brachyurus* no solo diminuísse, em que altas populações de *P. brachyurus* no solo não causou mudança no comportamento espectral de plantas de soja, estando a planta sem nenhum sintoma de injúria. O primeiro modelo (Tabela 1) apresentou  $R^2$  de 0.06 e quando houve a fusão dos dados multissensores o valor de  $R^2$  aumentou para 0.12 (Tabela 1). A primeira banda constituinte desse modelo foi a banda Blue (Phantom). Quando foram adicionadas outras bandas ao modelo (661 nm), houve aumento no valor do  $R^2$ . (Tabela 1).

Para estimativa de *P. brachyurus* na raiz, o modelo foi constituído pelas bandas Red (Sequoia) e por 586 nm (Sentera) que está na faixa entre verde e vermelho, ambos atuando no espectro do visível, apresentando  $R^2$  de 0.15. O modelo para estimativa da população de *P. brachyurus* na raiz demonstrou que se aumentar a refletância das bandas, há o aumento da população do nematoide.

### 3.2. Variáveis agronômicas

O modelo de altura de planta apresentou  $R^2$  de 0,60 com a fusão de dados das bandas da Sentera e Phantom (Tabela 1), selecionando bandas espectrais que atuam no espectro do visível e infravermelho próximo. A altura de planta pode ser compreendida como a variável que melhor pode ser utilizada para o entendimento do efeito causado por *P. brachyurus* na planta. A altura de planta diminuiu com o aumento da refletância na faixa do visível (Red) e diminuição da refletância na banda do infravermelho próximo (Tabela 2 e Figura 3).

Os modelos de massa verde e seca da parte aérea ( $R^2$  de 0.40 e 0.36) respectivamente apresentaram modelos semelhantes, com a combinação dos mesmos comprimentos de onda do sensor Sentera, atuando na faixa do visível e Red-edge (Tabela 1). A energia refletida no comprimento de onda do red aumentou com a diminuição da massa verde das plantas de soja, e plantas que possuem algum tipo de estresse refletem mais energia nessa faixa espectral.

Os modelos para estimativa da massa verde e seca da raiz demonstraram eficiência com a fusão dos dados dos três sensores e com a combinação de bandas que atuam no espectro do visível red-edge e infravermelho próximo. A energia refletida no comprimento de onda do infravermelho próximo aumentou na medida que houve o aumento da massa verde das raízes.

Os modelos resultantes da fusão de dados multisensores conseguiram inferir que houve aumento da energia refletida no comprimento de onda do vermelho com o aumento da população de *P. brachyurus* na raiz e diminuição da altura e massa verde e seca da parte aérea e raiz das plantas de soja.

**Tabela 1.** Subconjunto de bandas espectrais usando fusão de dados multissensor baseados por seleção do Forward Model Selection para otimizar a quantificação de *P. brachyurus* no solo e na raiz, *H. dihystra* no solo e na raiz e variáveis agronômicas.

Variável	Modelo de regressão	Valor P	R <sup>2</sup>
<i>H. dihystra</i> no solo	$N = 1487.9450 - 8.3400 \times \text{Green Sentera}$	0.006*	0.14
<i>H. dihystra</i> na raiz	$N = -740.69 - 4.10 \times \text{RedPhantom} + 3.21 \times \text{661 nm} - 7.79 \times \text{NIR2} + 9.59 \times \text{GreenPhantom} - 0.01 \times \text{GreenSequoia} - 3.87 \times \text{BluePhantom} + 9.96 \times \text{BlueSentera}$	0.003*	0.32
<i>P. brachyurus</i> no solo	$N = -3.32 + 0.042 \times \text{BluePhantom} - 0.36 \times \text{661nm}$	0.023*	0.12
<i>P. brachyurus</i> na raiz	$N = 1388.45 + 0.01 \times \text{RedSequoia} - 8.84 \times \text{586nm}$	0.014*	0.15
Altura de planta	$N = 34.15 - 0.04 \times \text{RedSentera} + 0.07 \times \text{661nm} + 0.18 \times \text{RededgeSentera} - 0.18 \times \text{RedPhantom} + 0.31 \times \text{GreenPhantom} - 0.44 \times \text{BlueSentera} - 0.14 \times \text{775 nm} + 0.10 \times \text{NIR2}$	< 0.01*	0.60
Massa verde aérea	$N = 446.51 - 2.34 \times \text{RedSentera} + 1.36 \times \text{RedEdgeSentera} + 1.52 \times \text{661nm} - 1.57 \times \text{586nm}$	< 0.001*	0.40
Massa seca aérea	$N = 72.41 - 0.36 \times \text{RedSentera} + 0.22 \times \text{RedEdgeSentera} + 0.24 \times \text{661nm} - 0.24 \times \text{586nm}$	< 0.001*	0.36
Massa verde raiz	$N = -0.52 + 0.17 \times \text{NIR1} - 0.0005 \times \text{GreenSequoia} - 0.0003 \times \text{RedEdgeSequoia} + 0.34 \times \text{GreenPhantom} - 0.12 \times \text{BluePhantom}$	< 0.001*	0.35
Massa seca raiz	$N = -0.99 + 0.05 \times \text{NIR1} - 0.0001 \times \text{GreenSequoia} - 0.0001 \times \text{RedEdgeSequoia} + 0.12 \times \text{GreenPhantom} - 0.04 \times \text{BluePhantom}$	< 0.001*	0.34

\*significativo ao nível de 5%; N = número de nematoides.

#### 4. Discussões

Melhorias recentes no sensoriamento remoto e na agricultura de precisão criaram oportunidades para aumentar a eficiência na exploração de nematoides, otimizando a diminuição de amostragem no campo e o uso de nematicidas, podendo minimizar as perdas de rendimento nos sistemas de produção agrícola (Nutter et al.,

2002; Martins e Galo, 2015; Bajwa et al., 2017; Martins et al., 2017). O presente estudo avaliou a estimativa de nematoides e variáveis agronômicas afetadas por eles através da fusão de dados multissensores. A fusão das bandas espectrais ótimas para quantificar os nematoides variaram com a espécie analisada e com seu local de infestação (solo ou raiz). A dispersão desse nematoide em grande parte do campo, pode estar associada ao uso de máquinas agrícolas, água, animais e trabalhadores rurais (Jain et al., 2019).

Este estudo demonstrou que dados obtidos a partir do sensoriamento remoto com a fusão de dados multissensores podem ser utilizados para a estimativa da população de nematoides e variáveis agronômicas em questão com os três sensores utilizados neste trabalho. Modelos estatísticos utilizando a fusão de dados dos multissensores explicaram maior variabilidade do que quando as bandas espectrais estavam isoladas (Tabela 1). Os modelos resultantes de cada variável estudada podem ser utilizados para elaboração de novos sensores podendo atender à necessidade dos produtores para detecção e estimação e posteriormente ser realizado o controle de nematoides. O modelo de estimativa de *P. brachyurus* no solo pode estar relacionado às cascatas de sinalização ativadas por toda a planta, desde a interação desses parasitas com o sistema radicular até o dossel das plantas, afetando o comportamento espectral da planta em relação ao comprimento de onda azul (Taiz e Zeiger, 2013).

O efeito da injúria causada por *P. brachyurus* na refletância da planta em comprimentos de onda na faixa do visível, pode estar associado com mudanças na arquitetura do dossel e coloração das folhas. Essas mudanças ocorrem por conta dos sintomas de murcha nas horas mais quentes do dia (Lopes et al., 2017), devido os nematoides afetarem a distribuição espacial das atividades enzimáticas no sistema radicular (Razavi et al., 2017), causando ferimentos e raízes necrosadas (Homiak et al., 2017). Tanto os modelos para estimativa de *P. brachyurus* no solo quanto na raiz foram melhor ajustados com as bandas e comprimentos de ondas de banda larga e estreita que atuam na faixa do visível do espectro eletromagnético. Isso pode ser explicado pela injúria causada por *P. brachyurus* nas folhas apresentando características cloróticas (Martins et al., 2017). A adequação do espectro visível para detectar doenças em culturas agrícolas é recorrente em sensoriamento remoto (Apan et al., 2004; Sancho-Adamson et al., 2019). Assim, nas condições desse estudo, as bandas espectrais na faixa do visível foram melhores para quantificar *P. brachyurus*. Já para *H. dihystra* na raiz foi necessário também a utilização de bandas espectrais que atuam no infravermelho próximo. A estimativa das variáveis agronômicas, também necessitaram de bandas

espectrais que atuam no infravermelho próximo. Estes resultados reforçaram que variáveis que causam pouca mudança no comportamento espectral na faixa do visível, é necessário comprimentos de onda na faixa do infravermelho próximo.

A banda do vermelho foi afetada pelo *P. brachyurus* devido esse nematoide atacar o sistema radicular, fazendo com que a planta perca a alta capacidade de absorção de água e nutrientes via xilema. Essa deficiência na absorção de água e nutrientes vai ser responsável pela degradação dos pigmentos responsáveis por absorver a grande parte da energia no comprimento de onda do vermelho, resultando na maior parte dessa energia ser refletida do que absorvida. Mesmo com a fusão das bandas espectrais, os modelos ainda apresentaram valor de  $R^2$  baixo pela alta variabilidade dos nematoides nos campos (Machado et al., 2015) como também falhas nas análises e momento de coleta.

Existem variáveis como a altura de planta que são diretamente afetadas pela população de *P. brachyurus*. Altura de plantas pode ser utilizada para o monitoramento desse nematoide em conjunto com o sensoriamento remoto pois plantas parasitadas por *P. brachyurus* causam diminuição do crescimento (Inomoto et al., 2001; Castillo e Vovlas, 2007). Outras espécies de nematoides como *Heterodera glycines* também podem ser estimadas por meio das faixas do espectro verde e vermelho (Bajwa et al., 2017).

As variáveis agronômicas explicaram as maiores variabilidades ocorridas pelos nematoides. Resultados semelhantes para estimativa da biomassa de plantas de soja também foram encontrados por Maimaitijiang et al. (2017) que trabalharam com a estimativa de biomassa verde e seca da soja utilizando a fusão de dados de multissensores e máquina de aprendizagem extrema. Outros resultados na estimativa da biomassa verde e seca e altura de planta também foram encontrados em outros trabalhos (Bendig et al., 2014; Zarco-Tejada et al., 2014; Schirrmann et al., 2016). A banda red-edge foi utilizada na fusão de bandas no modelo de todas as variáveis agronômicas estimadas. Alguns pesquisadores descrevem que a integração de informações com o comprimento de onda red-edge produz resultados com melhor exatidão do que alguns índices de vegetação (Adelabu et al., 2014).

Os efeitos observados neste estudo de campo usando imagens obtidas por SANT podem extrapolar para a obtenção do comportamento espectral das plantas registrados por outros sensores embarcados em sistemas aéreos não tripulados (Hillnhutter et al., 2011; Huang et al., 2016; Navrozidis et al., 2018). No entanto, esta

abordagem foi utilizar as informações dos sensores como se todos eles estivessem em uma caixa com um único sensor, podendo simular a criação de um novo sensor através das bandas com melhor desempenho neste estudo. Pesquisas futuras serão necessárias para validar os modelos otimizados pela fusão de dados neste estudo com outras cultivares de soja, campos diferentes e coletas de covariáveis que possam explicar melhor a variabilidade dos dados em campo.

## 5. Conclusões

As populações de *P. brachyurus* e *H. dihystra* na raiz foram estimadas usando a fusão de dados de multissensores quando seus efeitos já estavam perceptíveis nas bandas na faixa do visível. As variáveis agrônômicas avaliadas precisaram de bandas que atuam no comprimento de onda do visível e infravermelho próximo para sua estimativa. A altura de planta pode ser uma variável resposta da injúria causada por *P. brachyurus*. Esta abordagem de fusão de dados multissensores de bandas espectrais baseadas em SANT pode ajudar a definir modelos para estimar as variáveis analisadas, podendo reduzir o custo de amostragens em campo. Os modelos resultantes podem ser utilizados para elaboração e validação de novos sensores para detecção e estimativa das variáveis aqui estudadas em campos de soja.

## 6. Agradecimentos

À CAPES, pela concessão da bolsa a Victor Hugo Moraes. Ao Polo de Inovação, Laboratório de Drones e Vant's na Agricultura, Laboratório de Fitopatologia e toda equipe da Fazenda Segredo pelo total suporte na condução desse estudo.

## 7. Referências

- Adelabu, S., Mutanga, O., Adam, E. 2014. Evaluating the impact of red-edge band from Rapideye image for classifying insect defoliation levels. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 95, 34-42.
- Alves, T. M.; Macrae, I. V.; Koch, R. L. 2015. Soybean Aphid (Hemiptera: Aphididae) Affects Soybean Spectral Reflectance. J. Econ. Entomol. 108, 2655-2664.

- Alves, T. M., Monn, R. D., MacRae, I. V., and Kock, R. 2019. Optimizing band selection for spectral detection of *Aphis glycines* Matsumurain soybean. *Pest Manag Sci.* 75, 942-949.
- Apan, A., Held, A., Phinn, S., Markley, J. 2004. Detection of sugarcane orange rust disease using Eo-1 Hyperion hyperspectral imagery. *Int. J. Remote Sens.* 25, 489–498.
- Bajwa, S. G., Rupe, J. C., and Mason, J. 2017. Soybean disease monitoring with leaf reflectance. *Remote Sens.* 9, 127-140.
- Bellé, C., Kuhn, P. R., Kaspary, T. E., and Schmitt, J. 2017. Reação de cultivares de soja a *Pratylenchus brachyurus*. *Rev. Agra.* 10, 136-140.
- Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Gnyp, M.L., Bareth, G., 2015. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 39, 79-87.
- Bueno, A. de F., Batistela, M. J., Bueno, R. C. O. de F., França-Neto, J. de B., Nishikawa, M. A. N., and Libério-Filho, A. 2011. Effects of integrated pest management, biological control and prophylactic use of insecticides on the management and sustainability of soybean. *Crop Prot.* 30, 937-945.
- Cao, F., Liu, F., Guo, H., Kong, W., Zhang, C., He, Y. 2018. Fast Detection of *Sclerotinia Sclerotiorum* on Oilseed Rape Leaves Using Low-Altitude Remote Sensing Technology. *Sensors* 18, 4464-4479.
- Campos, J., Llop, J., Gallart, M., Garcia-Ruiz, F., Gras, A., Salcedo, R., Gil, E. 2019. Development of canopy vigour maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process. *Prec. Agric.*
- Castillo, P., N., Vovlas. 2007. *Pratylenchus* (Nematode: Pratylenchidae): Diagnosis, biology, pathogenicity and management. Leiden: Brill.
- Chemura, A., Mutanga, O., Dube, T. 2016. Separability of coffee leaf rust infection levels with machine learning methods at Sentinel-2 MSI spectral resolutions. *Prec. Agric.*
- Coolen, W. A., and D'Herde, C. J. 1972. A method for the quantitative extraction of nematodes from plant tissue. Ghent: State Agriculture Research Centre, 77 p.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: grãos. V.6 – Safra 2018/19- N.8 – Oitavo levantamento. Disponível em:

<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>.

Acessado em 03 de junho de 2019.

- Costa Manso, E., Tenente, R. V. 1994. Extração e identificação de fitonematóides. RAPP 3, 265-291.
- Debiasi, H., Franchini, J. C., Dias, V. P., Ramos Junior, E. U., Balbinot Junior, A. A. 2016. Práticas culturais na entressafra da soja para o controle de *Pratylenchus brachyurus*. Pesq. Agropec. Bras. 51, 1720-1728.
- Dias, W. P., Garcia, A., Silva, J. F. V., Carneiro E G. E. S. 2010. Nematoides em soja: identificação e controle. Londrina, Embrapa Soja, 8p.
- Flis, L., R. Dobosz, Rybarczyk-Mydłowska, K., Wasilewska-Nascimento. B., Kubicz, M., Winiszewska, G. 2018. First report of the lesion nematodes: *Pratylenchus brachyurus* and *Pratylenchus delattrei* on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants in Cape Verde. Helminthologia 55, 88-94.
- Franchini, J. C.; Debiasi, H.; Dias, W. P.; Ramos Junior, E. U.; Silva, J. F. V. 2014. Perda de produtividade da soja em área infestada por nematoide das lesões radiculares na região médio norte do Mato Grosso. In: Bernardi, A. C. de C.; Naime, J. de M.; Resende, A.V. de; Bassoi, L. H.; Inamasu, R.Y. (Ed.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília: Embrapa, 274-278.
- Godfrey, G. H. 1929. A destructive root disease of pineapples and other plants due to *Tylenchus brachyurus* n. sp. Phytopathology 19, 611-629.
- Gomes, G. S., Huang, S. P., Cares, J. E. 2003. Nematode community, trophic structure and population fluctuation in soybean fields. Fitopatol. Bras. 28, 258-266.
- Hillnhutter, C., Mahlein, A. K., Oerke, E. C. 2011. Remote sensing to detect plant stress induced by *Heterodera schachtii* and *Rhizoctonia solani* in sugar beet fields. Field Crops Res. 122, 70-77.
- Homiak, J. A., Dias-Arieira, C. R., Couto, E. A. A., Kath, J., Abe, V. H. F. 2017. Seed treatments associated with resistance inducers for management of *Pratylenchus brachyurus* in soybean. Phytoparasitica 45, 243-250.
- Hong, S. C., Mac Guidwin, A., and Gratton, C. 2011. Soybean aphid and soybean cyst nematode interactions in the field and effects on soybean yield. J. Econ. Entomol. 104, 1568-1574.
- Huang, Y., Thomson, S. J., Brand, H. J., Reddy, K. N. 2016. Development and evaluation of low-altitude remote sensing systems for crop production management. Int. J. Agric. & Biol. Eng. 9, 1-11.

- Inomoto, M. M., Goulart, A. M. C., Machado, A. C. Z., and Monteiro, A. R. 2001. A. R. Effect of population densities *Pratylenchus brachyurus* on the growth of cotton plants. *Fitopatol. Bras.* 26, 192-196.
- Jain, S., Poromarto, S., Osorno, J. M., McClean, P. E. and Nelson, B. D. 2019. Genome wide association study discovers genomic regions involved in resistance to soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*) in common bean. *Plos One* 14, 1-17.
- Jenkins, W. R. 1964. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. *Plant Dis. Rep.* 48, 692-695.
- Koenning, S. R. & Wrather, J. A. 2010. Suppression of soybean yield potential in the continental United States from plant diseases estimated from 2006 to 2009. *Plant Health Prog.*
- Kirsch, V. G., Kulczynski, S. M., Gomes, C. B., Bisognin, A. C., Gabriel, M., Bellé, C., Lima-Medina, I. 2016. Caracterização de espécies de *Meloidogyne* e de *Helicotylenchus* associadas à soja no Rio Grande do Sul. *Nematropica* 46, 197-208.
- Lima, F. S. de O., Santos, G. R. dos, Nogueira, S. R., Santos, P. R. R dos, Correa, V. R. 2015. Population dynamics of the root lesion nematode, *Pratylenchus brachyurus*, in soybean fields in Tocantins State and its effect to soybean yield. *Nematropica* 45, 170-177.
- Lopes, A. P. M., Ragazzi, M., Puerari, H. H., Ferreira, J. C. A., and Dias-Arieira, C. R. 2017. Manejo de *Pratylenchus brachyurus* e soja usando tratamento de sementes e indutor de resistência. *Nematropica* 47, 1-7.
- Machado, A. C. Z., Siqueira, K. M. S., Ferraz, L. C. C. B., Inomoto, M. M., Bessi, R., Harakava, R., and Oliveira, C. M. G. 2015. Characterization of Brazilian populations of *Pratylenchus brachyurus* using morphological and molecular analyses. *Trop. Plant Pathol.* 40, 102–110.
- Mahlein, A. K., Steiner, U., Dehne, H. W., Oerke, E. C. 2010. Spectral signatures of sugar beet leaves for the detection and differentiation of diseases. *Precis. Agric.* 11, 413-431.
- Maimaitijiang, M., Ghulan, A., Sidike, P., Hartling, S., Maimaitiyiming, M., Peterson, k., Shavers, E., Fishman, J., Peterson, J., Kadam, S., Burken, J., and Fritschi, F. 2017. Unmanned Aerial System (SANT)-based phenotyping of soybean using multi-sensor data fusion and extreme learning machine. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 134, 43-58.

- Mainardi, J. T., Asmus, G. L. 2015. Danos e potencial reprodutivo de *Pratylenchus brachyurus* em cinco espécies vegetais. Rev. Agric. Neotrop. 2, 38-47.
- Marin, D. B., Alves, M. de C., Pozza, E. A., Belan, L. L., Freitas, M. L. de. 2018. Multispectral radiometric monitoring of bacterial blight of coffee. Prec. Agric.
- Marshall, M., Thenkabail, P. 2015. Developing in situ non-destructive estimates of crop biomass to address issues of scale in remote sensing. Remote Sens. 7, 808-835.
- Martins, G. D., Galo, M. de L. B. T., Vieira, B. S. 2017. Detecting and mapping root-knot nematode infection in coffee crop using remote sensing measurements. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 10, 5395-5403.
- Martins, G. D.; Galo, M. de L. B. T. 2015. Caracterização espectral da cana-de-açúcar infectada por nematoides e *Migdolus Fryanus* por espectrorradiometria de campo. Bol. Cienc. Geod. 21, 783-796.
- Mello, A. F. S., Machado, A.C.Z., Inomoto, M. M. 2006. Potencial de controle da erva-de-Santa-Maria sobre *Pratylenchus brachyurus*. Fitopatol. Bras. 31, 513-516.
- Ming Lu, Chen, B., Liao, X., Yue, T. Yue, H., Ren, S., Li, X., Nie, Z., Xu, B. 2017. Forest types classification based on multi-source data fusion. Remote sens. 9, 1153-1174.
- Moreno-Garcia, B., Casterad, M. A., Guillen, M., Quilez, D. 2018. Agronomic and economic potential of vegetation indices for rice n recommendations under organic and mineral fertilization in mediterranean regions. Remote Sens, 10.
- Moshou, D., Bravo, C., Oberti, R., West, J., McCartney, A., and Ramon, H. 2005. Plant disease detection based on data fusion of hyper-spectral and multi-spectral fluorescence imaging using Kohonen maps. Real-Time Imag. 11, 75-83.
- Navrozidis, I., Alexandrilis, T. K., Dimitrakos, A., Lagopodi, A. L., Moshou, D., Zalidis, G. 2018. Identification of purple spot disease on asparagus crops across spatial and spectral scales. Comput. Electron. Agric. 148, 322-329.
- Neis, L., Paulino, H. B., Souza, E. D. de, Reis, E. F. dos, and Pinto, F. A. 2010. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região sudoeste de Goiás. Rev. Bras. Ciênc. Solo 34, 409-416.
- Nutter, F. W., Tylka, G. L., Guan, J., Moreira, A. J. D., Marett, C. C., Rosburg, T. R., Basart, J. P., Chong, C. S. 2002. Use of remote sensing to detect soybean cyst nematode-induced plant stress. J. Nematol. 34, 222-231.
- Oliveira, M. G., Grutzmacher, A. D., Cunha, U, S. da, Roggia, S. 2011. Dinâmica populacional de ácaros fitófagos e predadores associados à soja em cultivos de várzea e coxilha. Rev. Bras. Agrociênc. 17, 211-220.

- Ortiz, B. V., Goovaerts, P., Vellidis, G., Gullivan, D. 2010. Geostatistical modeling of the spatial variability and risk areas of southern root-knot nematodes in relation to soil properties. *Geoderma* 156, 243-252.
- Pena, J. A., Yumin, T., Huaqing, L., Zhao, B., Escalona, J. A. G., Pinto, J. 2018. Remote sensing data fusion to detect illicit crops and unauthorized airstrips. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 1362-1368.
- Pugh, N. A., Han, X., Collins, S. D., Thomasson, J. A., Copec, D., Chang, A., Jung, J., Isakeit, T. S. Prom, L. K., Carvalho, G., Gates, I. T., Vree, A., Bagnall, G. C., and Rooney, W. L. 2018. Estimation of plant health in a sorghum field infected with anthracnose using a fixed-wing unmanned aerial system. *J. Crop. Improv.* 32, 861-877.
- Pires, F. R., Menezes, C. C. E., Procópio, S. O., Barroso, A. L. L., Menezes, J. F. S., Leonardo, L. M., Sousa, J. P. G., Vieira, A. B., and Zanatta, J. F. 2005. Potencial competitivo de cultivares de soja em relação às plantas daninhas. *Planta Daninha* 23, 575-581.
- R Development Core Team, R. 2010. R: Uma linguagem e ambiente para computação estatística, R Found. Stat. Comput., R Foundation for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Áustria.
- Razavi, B. S., Hoang, D. T. T., Blagodatskaya, E., and Kuzyakov, Y. 2017. Mapping the footprint of nematodes in the rhizosphere: cluster root formation and spatial distribution of enzyme activities. *Soil Biol. Biochem.* 115, 213-220.
- Ribeiro, N. R., Dias, W. P., Santos, J. M. dos. 2010. Distribuição de fitonematóides em regiões produtoras de soja do Estado de Mato Grosso. *Bol. Pesq. Soja* 14, 289-296.
- Riedell W. E., Blackmer T. M. 1999. Leaf reflectance spectra of cereal aphid damage wheat. *Crop Sci.* 39, 1835–1840.
- Sankaran, S., Mishra, A., Ehsani, R., Davis, C. 2010. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Comput. Electron. Agric.* 72, 1-13.
- Sancho-Adamson, M., Trillas, M. I., Bort, J., Fernandez-Gallego, J. A., Romanyà, J. 2019. Use of RGB vegetation indexes in assessing early effects of verticillium wilt of olive in asymptomatic plants in high and low fertility scenarios. *Remote Sens.* 11, 607-624.

- Schirrmann, M., Giebel, A., Gleiniger, F., Pflanz, M., Lentschke, J., Dammer, K.-H., 2016. Monitoring agronomic parameters of winter wheat crops with low-cost UAV imagery. *Remote Sens.* 8, 706-724.
- Schmitt, M; Xiang, Z. 2016. Data Fusion and Remote Sensing: An ever-growing relationship. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 4, 19-27.
- Schmitter, P., Steinrucken, J., Romer, C., Ballvora, A., Leon, J. Rascher, U., Plumer, L. 2017. Unsupervised domain adaptation for early detection of drought stress in hyperspectral images. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 131, 65-76.
- Shafian, S., Rajan, N., Schnell, R., Bagavathiannan M, Valasek J., Shi Y., Olsenholler, J. 2018. Unmanned aerial systems-based remote sensing for monitoring sorghum growth and development. *Plos One* 13.
- Southey, J. F. 1970. Laboratory methods for work with plant and soil nematodes. London: Ministry of Agriculture Fisheries and Food 5: 148p.
- Taiz, L., Zeiger, E. 2013. *Fisiologia vegetal*. 5. ed., Artmed, 918 p.
- Tilly, N., Aasen, H., Bareth, G., 2015. Fusion of plant height and vegetation indices for the estimation of barley biomass. *Remote Sens.* 7, 17291-17296.
- Vanegas, F., Bratanov, D., Powell, K., Weiss, J., Ganzalez, F. 2018. A novel methodology for improving plant pest surveillance in vineyards and crops using UAV- based hyperespectral and spatial data. *Sensors* 18, 260-281.
- Zarco-Tejada, P.J., Diaz-Varela, R., Angileri, V., Loudjani, P., 2014. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *Eur. J. Agron.* 55, 89-99.
- Zhang, J. 2010. Multi-source remote sensing data fusion: status and trends. *International Journal of Image and Data Fusion*, 1, 5-24.
- Zhang, M., Qin, Z., Liu, X., Ustin, S. L. 2003. Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in California. USA using hyperspectral remote sensing. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 4, 295–310.
- Zhang, C., Kovacs, J. M. 2012. The application of small-unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Prec. Agric.* 13, 693-712.
- Zheng, H., Li, W., Jiang, J., Liu, Y., Cheng, T., Tian, Y., Zhy, Y., Cao, W., Zhang, Y., Yao, X. 2018. A comparative assessment of different modeling algorithms for estimating leaf nitrogen content in winter wheat using multispectral images from an unmanned aerial vehicle. *Remote Sens.* 10, 2026-2041.

## CONCLUSÃO GERAL

Este estudo mostrou que as respostas espectrais da soja a partir de sensores RGB de baixo custo detectaram a injúria causada por nematoides, especialmente o nematoide de cisto de soja *H. glycines*. Através do uso de sensores multiespectrais e algoritmos avançados de aprendizado de máquina foi possível prever a injúria causada por *P. brachyurus* e *H. dihystra* usando a resposta espectral da soja.

As variáveis agronômicas avaliadas precisaram de bandas que atuam no comprimento de onda do visível e infravermelho próximo para sua estimativa. A altura de planta foi uma variável resposta da injúria causada por *P. brachyurus*. Esta abordagem de fusão de dados multissensores de bandas espectrais baseadas em SANT pode ajudar a definir modelos para detecção e estimação das variáveis analisadas. Os modelos resultantes podem ser utilizados para elaboração e validação de novos sensores para detecção e estimativa das variáveis aqui estudadas em campos de soja.

Distinguir plantas saudáveis de plantas infestadas por nematoides usando imagens de sensoriamento remoto pode minimizar a amostragem de campo e ajudar os agricultores a aplicar métodos de controle localizados. Ecologicamente e economicamente importante para o manejo de nematoides, este estudo também indicou a necessidade de protocolos de amostragem adequados, porque números mais altos de algumas espécies de nematoides podem ser encontrados fora das áreas que representam as plantas severamente estressadas.