



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE ESTUDOS SOCIOAMBIENTAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

ROBERTO NUNES VIANCONI SOUTO

**Sistemas imageadores acoplados em veículo aéreo pilotado  
remotamente no monitoramento de estresse hídrico em  
cultivos de algodão em Sorriso - MT**

GOIÂNIA  
2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

## **TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES**

### **E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

#### **1. Identificação do material bibliográfico**

Dissertação       Tese       Outro\*: \_\_\_\_\_

\*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

**Exemplos:** Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

#### **2. Nome completo do autor**

Roberto Nunes Vianconi Souto

#### **3. Título do trabalho**

SISTEMAS IMAGEADORES ACOPLADOS EM VEÍCULO AÉREO REMOTAMENTE  
PILOTADO NO MONITORAMENTO DE ESTRESSE HÍDRICO EM CULTIVOS DE  
ALGODÃO EM SORRISO - MT

#### **4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)**

Concorda com a liberação total do documento  SIM       NÃO<sup>1</sup>

**[1]** Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

**a)** consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

**b)** novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;

- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Manuel Eduardo Ferreira, Professor do Magistério Superior**, em 15/12/2022, às 07:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Roberto Nunes Vianconi Souto, Discente**, em 13/07/2023, às 17:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3402778** e o código CRC **BC92FD13**.

**Referência:** Processo nº 23070.047447/2022-38

SEI nº 3402778

ROBERTO NUNES VIANCONI SOUTO

**Sistemas imageadores acoplados em veículo aéreo pilotado remotamente no monitoramento de estresse hídrico em cultivos de algodão em Sorriso - MT**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Geografia.

Área de concentração: Natureza e Produção do Espaço.

Linha de pesquisa: Análise Ambiental e Tratamento da Informação Geográfica.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira

Coorientador: Prof. Dr. Peter Zeilhofer

GOIÂNIA

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Souto, Roberto Nunes Vianconi

Sistemas imageadores acoplados em veículo aéreo pilotado remotamente no monitoramento de estresse hídrico em cultivos de algodão em Sorriso - MT [manuscrito] / Roberto Nunes Vianconi Souto. - 2022.

121 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira; co-orientador Dr. Peter Zeilhofer.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, , Programa de Pós-Graduação em Geografia, Goiânia, 2022.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Sensoriamento Remoto. 2. RPA. 3. Estresse Hídrico. 4. Cultura Agrícola. 5. Algodão. I. Ferreira, Manuel Eduardo, orient. II. Título.

CDU 911



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

**ATA DE DEFESA DE TESE**

Ata Nº 90 da sessão de Defesa de Tese de **Roberto Nunes Vianconi Souto** que confere o título de Doutor em **Geografia**, na área de concentração em **Natureza e Produção do Espaço**.

Aos três dias do mês de outubro do ano de dois mil e vinte e dois, a partir das 14:00 hora, por meio de videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada **“AVALIAÇÃO DE SISTEMAS IMAGEADORES ACOPLADOS EM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO NO MONITORAMENTO DE ESTRESSE HÍDRICO EM CULTIVOS DE ALGODÃO NO BIOMA CERRADO, MATO GROSSO”**. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor Manuel Eduardo Ferreira (IESA/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professora Doutora Abadia dos Reis Nascimento (EA/UFG), membro titular externo; Professor Doutor Cleberson Ribeiro de Jesus (UFMT), membro titular externo, Professor Doutor Leomar Rufino Alves Júnior (IFG), membro titular externo; Professora Doutora Gislaíne Cristina Luiz (IESA/UFG), membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca **fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Manuel Eduardo Ferreira, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos três dias do mês de outubro do ano de dois mil e vinte e dois.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

SISTEMAS IMAGEADORES ACOPLADOS EM VEÍCULO AÉREO REMOTAMENTE  
PILOTADO NO MONITORAMENTO DE ESTRESSE HÍDRICO EM CULTIVOS DE  
ALGODÃO EM SORRISO - MT



Documento assinado eletronicamente por **Manuel Eduardo Ferreira, Professor do Magistério Superior**, em 03/10/2022, às 18:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leomar Rufino Alves Júnior, Professor do Magistério Superior-Substituto**, em 03/10/2022, às 18:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Abadia Dos Reis Nascimento, Professor do Magistério Superior**, em 03/10/2022, às 18:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gislaine Cristina Luiz, Professora do Magistério Superior**, em 03/10/2022, às 18:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Clebson Ribeiro de Jesus, Usuário Externo**, em 05/10/2022, às 13:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3222630** e o código CRC **8BE944E5**.

---

Referência: Processo nº 23070.047447/2022-38

SEI nº 3222630

*Dedico à Analu, querida e amada filha.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. Manuel Eduardo Ferreira, respeitado, querido e admirado por todos, agradeço por ter me aceito como orientando, por todo ensinamento, pela compreensão e toda paciência comigo diante de momentos desafiadores e turbulentos neste percurso. Além da amizade nascente, espero que possamos ainda realizar muitos trabalhos em conjunto;

Ao professor Dr. Peter Zeilhofer, um dos grandes responsáveis e colaboradores da minha vida acadêmica e profissional, de quem além do respeito e admiração, tenho o usufruto da amizade. Este querido professor vem me ensinando por longa data, desde a graduação, na sequência, foi meu orientador no mestrado da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) e agora me acompanha como coorientador;

Aos membros que compuseram a banca (Dra. Gislaine Cristina Luiz, Dra. Abadia dos Reis Nascimento, Dr. Cleberson Ribeiro de Jesus, Dr. Leomar Rufino Alves Júnior) por terem aceitado o convite de participar e pelas considerações precisas e valiosas para a tese;

Ao Programa de Pós-graduação em Geografia, vinculado ao Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás, pela oportunidade de qualificação acadêmica;

Ao Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG), especialmente ao Programa de Pesquisa e Capacitação com Veículos Aéreos Não Tripulados (Pro-Vant) por todo suporte, bem como, ao pesquisador João Vítor Silva Costa pela vivência enriquecedora;

Ao CNPq, pelo financiamento do projeto “Veículo aerotransportado não-tripulado multi-rotor e sensoriamento remoto multi-sensorial para monitoramento de doenças e desequilíbrios nutricionais na cultura de algodão em Mato Grosso”, que vigorou de 2015 a 2017, através da SETEC/CNPq 017/2014-Linha PD&I, sem o qual dificilmente teria condições de realizar esta pesquisa;

Ao Instituto Mato-grossense de Algodão, parceiro e colaborador fundamental nesta jornada, que através do projeto "Monitoramento de Fitoparasitas e Estresse Hídrico, com uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas e Sensoriamento Remoto Multissensorial, na cultura de Algodão em Mato Grosso", formalizado a partir do convênio n° 004/IFMT/2018, possibilitou dar prosseguimento à pesquisa até 2020. Em nome desta instituição, agradeço de modo especial, aos pesquisadores Dr. Jean Belot e Dr. Rafael Galbieri pela atenção concedida neste período;

À Universidade Federal de Mato Grosso, pelo apoio e trabalho colaborativo junto ao IFMT, que por meio do Termo de Cooperação n° 029/FUFMT/2018, possibilitou o compartilhamento de equipamentos para aquisição de dados. De maneira especial, quero registrar a parceria do grupo de pesquisa GEOHIDRO;

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, *Campus Cuiabá-Cel. Octayde Jorge da Silva*, por todo o suporte, com disponibilização de sua estrutura física e logística. Aproveito também para agradecer aos servidores, amigos da instituição, pela torcida e amparo emocional;

Ao Laboratório de Geotecnologia Aplicada do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (GEOTEC), por ter disponibilizado equipamentos e infraestrutura. Não poderia deixar de registrar também meus agradecimentos a Robson Pereira, Paulo Moraes, Ruan Silva e Louise Logsdon, pessoas queridas com as quais tenho o privilégio de cultivar amizade genuína e sincera.

Aos meus queridos e amados Estudantes do IFMT, por serem fonte inspiradora e propulsora para a realização do trabalho, mesmo em condições adversas. Eles são alguns dos grandes motivadores para a persistência nesta jornada acadêmica;

Aos professores e também aos colegas estudantes do PPGeo, gostaria muito de agradecer a todas as pessoas queridas que conheci através do doutorado, que por receio de esquecer nomes, e com isso, cometer injustiças, não irei aqui elencá-los. Contudo, na certeza que sabem o quanto lhes tenho apreço, fica aqui o registro de minha gratidão;

De maneira especial quero registrar e reforçar o agradecimento ao grupo de trabalho que tornou-se de amigos. Aos incansáveis parceiros de campo, Robson Rogério

Dutra Pereira, Cleberson Ribeiro de Jesus e Paulo Henrique Moraes Correa. Saibam que foram grandes parceiros e fundamentais nesta empreitada;

À Luciana Pereira, amiga querida e mãe de minha filha, pelo apoio nesta jornada;

À minha mãe Luzia e ao meu pai José Roberto, pela referência. Assim como aos meus queridos irmãos Alberto e Gil, dos quais tenho grande admiração;

Ao meu amor incondicional Analu Souto, filha doce e querida, com quem tenho dívida de atenção e presença, por esse tempo de trabalho mais intenso.

## RESUMO

Com as mudanças climáticas globais, eventos extremos estão ocorrendo com maior frequência na região da Amazônia Legal. Isso afeta tanto os aspectos ecológicos quanto socioeconômicos, alterando a paisagem em vastas áreas. O aumento das queimadas e do desmatamento na região, juntamente com eventos hidrológicos irregulares, agrava as alterações climáticas, especialmente na Bacia Amazônica e em Mato Grosso, o estado por muitos anos líder em desmatamento e variação climática no país. As culturas agrícolas, como o algodão, são particularmente sensíveis a essas mudanças e ao estresse hídrico resultante. Portanto, é essencial monitorar esse indicador para entender os efeitos no território mato-grossense e na dinâmica ambiental. O uso de Sensoriamento Remoto, por meio de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS), oferece perspectivas promissoras para o monitoramento agrícola e ambiental. Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a aplicabilidade de sensores acoplados a um RPA multirrotor para detectar e monitorar o estresse hídrico no plantio de algodão. Mais especificamente, buscou-se analisar o desempenho de imageamentos por sensores térmicos e multiespectrais na detecção de estresse hídrico em um experimento de plantio de algodão. Além disso, foram avaliadas as possíveis interferências de variedades de cultivo, bem como de covariáveis como condições meteorológicas, climáticas e edáficas, sobre a produtividade da cultura, a detecção do estresse hídrico e a produtividade em si. A metodologia adotada baseou-se em intensas atividades de campo para parametrizar o estado dos plantios de algodão, considerando condições de estresse hídrico em uma área experimental no Centro de Treinamento e Difusão Tecnológica do Núcleo Regional Norte do Instituto Mato-grossense do Algodão, localizado no município de Sorriso - MT. Os procedimentos metodológicos incluíram três blocos principais: levantamentos em campo, análise do comportamento espectral de alvos em imagens multiespectrais e térmicas, e análises estatísticas. Como resultado, constatou-se que os sensores térmicos e multiespectrais possuem potencial para identificar áreas de estresse hídrico. De forma geral, o desempenho é superior no imageamento térmico. Entretanto, o sensor multiespectral mostrou uma capacidade de discriminação relativamente maior na identificação do estresse em fases iniciais do cultivo. Outro aspecto positivo do imageamento multiespectral é a sua robustez contra variações meteorológicas momentâneas, em comparação com o sensor térmico. Vale ressaltar que o modelo que combina o monitoramento com os dois tipos de sensores, térmico e multiespectral, apresentou resultados significativamente melhores.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Remoto. RPA. Estresse Hídrico. Cultura Agrícola. Algodão.

## ABSTRACT

With global climate change, extreme events are happening more frequently in the legal Amazon region. This affects both ecological and socioeconomic aspects, altering the landscape over vast areas. Increased fires and deforestation in the region, together with irregular hydrological events, exacerbate climate change, especially in the Amazon Basin and in Mato Grosso, the state that has been for many years a leader in deforestation and climate variation in the country. Crops such as cotton are particularly sensitive to these changes and the resulting water stress. Therefore, monitoring this indicator to understand its effects on Mato Grosso territory and environmental dynamics is essential. The use of remote sensing through Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) offers promising prospects for agricultural and environmental monitoring. In this context, the present research aimed to evaluate the applicability of sensors attached to a multicopter UAV to detect and monitor water stress in cotton planting. More specifically, we sought to analyze the performance of thermal and multispectral sensor imaging in the detection of water stress in a cotton planting experiment. In addition, the possible interference of crop varieties and covariates such as meteorological, climatic, and edaphic conditions on crop productivity, water stress detection, and productivity itself were evaluated. The methodology adopted was based on intensive field activities to parametrize the state of cotton plantations, considering water stress conditions in an experimental area at the Training and Technological Dissemination Center of the Northern Regional Nucleus of Mato Grosso Cotton Institute, located in the county of Sorriso - MT. The methodological procedures included three main blocks: field surveys, analysis of the spectral behavior of targets in multispectral and thermal images, and statistical analysis. As a result, it was found that thermal and multispectral sensors have the potential to identify areas of water stress. In general, the performance of thermal imaging. However, the multispectral sensor showed a relatively higher discrimination capacity in identifying stress in the early stages of the crop. Compared to the thermal sensor, another positive aspect of multispectral imaging is its strength against momentary weather variations. It is worth mentioning that the model combining monitoring with both types of sensors, thermal and multispectral, showed significantly better results.

**Keywords:** Remote Sensing. UAV. Water stress. Crop. Cotton.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Série de taxa de desmatamento corte raso na Amazônia Legal.....	26
<b>Figura 2</b> - Série de taxa de desmatamento corte raso na Amazônia Legal discriminada por estado.....	29
<b>Figura 3</b> - Procedimento metodológico da pesquisa.....	37
<b>Figura 4</b> - Localização da área de estudo.....	39
<b>Figura 5</b> - Área experimental de estresse hídrico e uma parcela.....	40
<b>Figura 6</b> - Áreas estressada e de referência do experimento.....	41
<b>Figura 7</b> - Sistema de irrigação de arrasto com autopropelido.....	42
<b>Figura 8</b> - Pontos onde houve coleta de amostras; Trado de amostra indeformada; amostra coletada em campo; separação e catalogação de amostras e; amostra sobre a balança de precisão.....	43
<b>Figura 9</b> - Distribuição dos pontos de infiltração; Instalação; Georreferenciamento do ponto e; monitoramento da infiltração do solo por anéis de infiltração na Área 1....	44
<b>Figura 10</b> - (a) Localização da Estação Meteorológica no IMA Sorriso - MT; (b) Detalhe da Estação Meteorológica.....	46
<b>Figura 11</b> - (a) Amostras colhidas no interior da parcela; (b) Detalhe de amostra colhida.....	47
<b>Figura 12</b> - Matrice 600 (a); Matrice 600-PRO (b) e; no detalhe, Gimbal Ronin-MX (c).....	49
<b>Figura 13</b> - Sensor Multiespectral MicaSense Redege.....	50
<b>Figura 14</b> - Sensor Termográfico marca Flir, modelo T-420.....	51
<b>Figura 15</b> - Planos de voo: (a) Sensor Termal - GSD 20 cm ; (b) Sensor Multiespectral - GSD 5 cm.....	52

<b>Figura 16</b> - Alvos fixados no solo (a); ponto de controle fixado com material reflexivo com GNSS Geodésico adquirindo coordenadas (b).....	56
<b>Figura 17</b> - Alvo constituído de material reflexivo para visualização nas imagens termográficas.....	57
<b>Figura 18</b> - Imagem coletada do Calibrated Reflectance Panel.....	58
<b>Figura 19</b> - Exemplo de ortomosaico da Banda 3 – Vermelho (a), da Banda 4 – NIR (b) e do NDVI (c).....	59
<b>Figura 20</b> - Implementação de SIG.....	62
<b>Figura 21</b> - Condições meteorológicas-climáticas e os sobrevoos no experimento do ano de 2018.....	67
<b>Figura 22</b> - Condições pedo-hidrológicas no experimento do ano de 2018.....	68
<b>Figura 23</b> - Signal térmico e multiespectral (NDVI) por variedade. Caixas na cor verde representam parcelas irrigadas e na cor vermelha, área de parcelas estressadas nos dias 09/05/2018 e 11/05/2018.....	71
<b>Figura 24</b> - Sinal térmico e multiespectral (NDVI) por variedade. Caixas na cor verde representam parcelas irrigadas e na cor vermelha, área de parcelas estressadas, nos dias 13/06/2018 e 12/06/2018.....	72
<b>Figura 25</b> - Signal térmico e multiespectral (NDVI) por variedade. Caixas na cor verde representam parcelas irrigadas e na cor vermelha, área de parcelas estressadas no dia 30/06/2018.....	73
<b>Figura 26</b> - Índice CWSI por variedade. Caixas na cor azul representam parcelas irrigadas e na cor laranja, áreas de parcelas estressadas no dia 09/05/2018.....	74
<b>Figura 27</b> - Índice CWSI por variedade. Caixas a cor azul representam parcelas irrigadas e na cor laranja, área de parcelas estressadas no dia 12/06/2018.....	75
<b>Figura 28</b> - Índice CWSI por variedade. Caixas na cor azul representam parcelas irrigadas e na cor laranja, área de parcelas estressadas no dia 30/06/2018.....	75

<b>Figura 29</b> - Índice NDWI por variedade. Caixas na cor azul representam parcelas irrigadas e na cor laranja, área de parcelas estressadas no dia 12/06/2018.....	76
<b>Figura 30</b> - Índice NDRE por variedade. Caixas na cor azul representam parcelas irrigadas e na cor laranja, área de parcelas estressadas no dia 12/06/2018.....	77
<b>Figura 31</b> - Relação de produtividade com as variedades.....	80

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Semeadura e irrigação no experimento.....	43
<b>Tabela 2:</b> Dados de entrada no software Cropwat 8.0 para estimativa do balanço hídrico no experimento durante 2018 com e sem irrigação.....	49
<b>Tabela 3:</b> Campanhas de campo realizadas.....	55
<b>Tabela 4:</b> Campanhas de campo realizadas.....	55
<b>Tabela 5:</b> Modelo de RL univariado, aninhado pelas 39 variedades de algodão, utilizando o CWSI do dia de 12/06/2018 como único preditor para detecção de segmentos com estresse hídrico.....	78
<b>Tabela 6:</b> Modelo de RL univariado, aninhado pelas 39 variedades de algodão, utilizando o NDVI do dia de 12/06/2018 como único preditor para detecção de segmentos com estresse hídrico.....	79
<b>Tabela 7:</b> Modelo de RL multivariado, aninhado pelas 39 variedades de algodão, utilizando o NDVI e o CWSI do dia de 12/06/2018 como preditores para detecção de segmentos com estresse hídrico.....	80

## LISTA DE SIGLAS

- CNPq** - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- COP** - Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática
- CRP** - Calibrated Reflectance Panel
- CTDTI** - Centro de Treinamento e Difusão Tecnológica do IMA
- CWSI** - Crop Water Stress Index
- FAO** - Food and Agriculture Organization of the United Nations
- GEE** - Gases de Efeito Estufa
- GNSS** - Global Navigation Satellite System
- GSD** - Ground Sample Distance
- IBGE** - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IFMT** - Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
- IMA** - Instituto Mato-grossense do Algodão
- INPE** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IPCC** - Painel Internacional de Mudanças Climáticas
- NDRE** - Normalized Difference Red Edge Index
- NDVI** - Normalized Difference Vegetation Index
- NDWI** - Normalized difference water index
- NIR** - near infrared
- PD&I** - Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
- PIB** - Produto Interno Bruto
- PRODES** - Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite
- REDD** - Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal
- RPAS** - Remotely-Piloted Aircraft System (Aeronave Remotamente Pilotadas)
- RL** - Regressão logística
- SETEC** - Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica

**SIG** - Sistema de Informação Geográfica

**UAV** - Unmanned Aerial Vehicle

**UFMT** - Universidade Federal de Mato Grosso

**UNFCCC** - United Nations Framework Convention on Climate Change

**VANT** - Veículo Aéreo Não Tripulado

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1 OBJETIVOS.....	23
1.1.1 Objetivo Geral.....	23
1.1.2 Objetivos Específicos.....	23
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>24</b>
2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A (RE)CONFIGURAÇÃO DA PAISAGEM.....	24
2.1.1 Degradação florestal e mudanças climáticas na Amazônia Legal.....	25
2.2 MUDANÇA DE COBERTURA E USO DA TERRA EM MATO GROSSO.....	28
2.2.1 A produção de Algodão no Mato Grosso e sua fragilidade diante das mudanças climáticas.....	31
2.3 SENSORIAMENTO REMOTO E MONITORAMENTO DO ESTRESSE HÍDRICO.....	33
2.3.1 Sensoriamento Remoto com uso de RPAS como possibilidade de Monitoramento de Agricultura.....	33
2.3.1.1 Índices espectrais aplicados na agricultura.....	35
2.3.1.2 Termografia aplicada na agricultura.....	36
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
3.1 OBSERVAÇÕES INICIAIS E CONCEPÇÃO METODOLÓGICA GERAL.....	38
3.2 ÁREA DE ESTUDO.....	39
3.2.1 Área experimental e suas características.....	39
3.2.1.1 Caracterização físico-geográfica da área em que o experimento está inserido.....	39

3.2.1.2 Projeto Experimental.....	40
3.3 LEVANTAMENTO DE CAMPO.....	43
3.3.1 Levantamentos biofísicos.....	43
3.3.1.1 Umidade do solo.....	44
3.3.1.2 Infiltração.....	45
3.3.1.3 Dados Metereológicos.....	46
3.3.1.4 Murchamento.....	46
3.3.1.5 Produtividade.....	47
3.3.2 Dados secundários e estimativa do estresse hídrico.....	48
3.4 CAMPANHAS DE IMAGEAMENTO E PRÉ-PROCESSAMENTO.....	50
3.4.1 Aquisição, configuração e aperfeiçoamento do Sistema RPA.....	50
3.4.2 Campanhas de imageamento com Sistema RPA.....	52
3.4.2.1 Planejamento e execução de sobrevoos.....	52
3.4.2.2 Campanhas de Campo.....	55
3.4.3. Levantamentos topográficos.....	56
3.4.3 Pré-processamento dos imageamentos e implementação de SIG.....	58
3.4.3.1 Correção geométrica e mosaicagem das Imagens multiespectrais e térmicas.....	58
3.4.3.2 Pré-processamento radiométrico e Índices Espectrais.....	59
3.4.3.2.1 Pré proc. radiométrico das imagens multiespectrais.....	59
3.4.3.2.2 Pré-processamento dados termográficos.....	61
3.4.3.3 Implementação do SIG.....	62
3.5 INTERPRETAÇÕES DAS IMAGENS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	63

3.5.1 Segmentação e extração de assinaturas espectrais.....	63
3.5.2. Análise da separabilidade espectral de parcelas irrigadas e não-irrigadas.....	64
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>67</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS-CLIMÁTICAS, EDÁFICAS, DESENVOLVIMENTO FENOLÓGICO E ESTRESSE HÍDRICO.....	67
4.2 EMISSÃO TÉRMICA E REFLECTÂNCIA ESPECTRAL EM TALHÕES IRRIGADAS E NÃO IRRIGADAS E SUA SEPARABILIDADE.....	71
4.3 COMPARATIVO ENTRE GRAU DE ESTRESSE HÍDRICO E PRODUTIVIDADE EM TALHÕES IRRIGADOS E NÃO IRRIGADOS.....	80
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>99</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Eventos climáticos extremos, como inundações e secas prolongadas, vêm ocorrendo com maior frequência em vários pontos da Terra (MARENGO *et al.*, 2014), cada vez mais acontecem incêndios florestais ou mesmo ampliações drásticas de temperatura, atingindo até mesmo cidades do hemisfério norte, tipicamente de clima temperado, e ainda que isso esteja ou não atrelado exclusivamente às atividades antrópicas, são inúmeras e variadas as situações que vêm afetando o cotidiano de milhares de pessoas. Uma das consequências destas mudanças climáticas globais apresenta-se nos eventos hidrológicos irregulares, relatados na região amazônica (SATYAMURTY *et al.*, 2013). No ritmo em que tais eventos estão surgindo, certamente mudarão a configuração da paisagem em vastas regiões, acarretando desequilíbrios e diferentes problemas, tanto em aspectos ecológicos quanto socioeconômicos.

Em uma escala mais regional, as alterações climáticas podem ser potencializadas pelo desmatamento e as queimadas (NOBRE, 2001; NOBRE *et al.*, 2007), como registrado na Amazônia Legal, por décadas, onde a cobertura vegetal nativa (Cerrado e Floresta) vem sendo transformada por atividades antrópicas, especialmente para o uso agropecuário (INPE, 2008; 2014).

Neste contexto, a produção de alimentos e fibras, em todo o mundo, poderá sofrer um impacto dramático nas próximas décadas (IPCC, 2007; 2014). Estudos indicam que as mudanças no clima, já em andamento, somadas a impactos regionais, deverão agravar o problema relativo ao déficit hídrico em cultivos agrícolas de várias regiões do mundo. Isso devido à maior irregularidade no regime de chuvas e maiores temperaturas que, ao serem combinados, podem impor às culturas um maior estresse hídrico (GRANTZ, 2006; IPCC, 2014).

Infelizmente, este quadro não está distante. Em cenário projetado para o Brasil, é possível identificar a ocorrência de *hotspots* das alterações climáticas que cobrem, entre outras regiões, toda a Bacia Amazônica e o Centro-Oeste, com ênfase para o estado de Mato Grosso, líder do índice de desmatamentos e de variação climática no país (TORRES & MARENGO, 2014).

Alguns cultivos são mais sensíveis a mudanças climáticas, especialmente no que concerne ao regime das chuvas, como é o caso do algodão (*Gossypium L.*),

uma espécie de custo financeiro maior, quando comparado a outras espécies como a soja e o milho. A cultura do algodão também possui maior fragilidade em razão de sua suscetibilidade à “pragas”, resultante do desequilíbrio ecossistêmico causado pela prática da monocultura.

Ante o exposto, o monitoramento do déficit hídrico pode contribuir consideravelmente para o entendimento deste fenômeno no território mato-grossense, e elegendo o cultivo de algodão, por ser emblemático, pois se por um lado favorece e incrementa a economia regional e nacional, por outro, devido às suas exigências, pois que demanda recursos naturais (água/solo) e o uso intensivo de agrotóxicos, acaba por ser mais oneroso ambientalmente.

Atendo-se ao monitoramento em si, o crescimento da planta e o déficit hídrico do solo podem variar espacial e temporalmente em campos de cultivos, reflexo das variações nas propriedades físico-químicas do solo e do manejo da cultura. Deste modo, pode-se presumir que o déficit hídrico tem uma característica complexa e, requer, para isto, uma abordagem que considere as interações solo-água-planta-ambiente.

No campo tecnológico, o Sensoriamento Remoto (SR) torna-se uma ferramenta essencial para mensurar o déficit hídrico da planta, estimadas a partir de índices espectrais, especialmente os de vegetação. Estes índices facilitam a obtenção e modelagem de parâmetros biofísicos das plantas, como a área foliar, biomassa e porcentagem de cobertura do solo, com destaque para a região do espectro eletromagnético do infravermelho, com importantes informações sobre a evapotranspiração das plantas (JENSEN, 2009; EPIPHANIO *et al.*, 1996).

Neste quesito, o rápido desenvolvimento de Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotada (Remotely-Piloted Aircraft System – RPAS) trouxe excelentes perspectivas para a sua adaptação em aplicações de SR na agricultura, inclusive, no acompanhamento do desenvolvimento das culturas, agricultura de precisão, monitoramento de parâmetros de fertilidade e controle de pragas (ZAKS & KUCHARIK, 2011; GÓMEZ-CANDÓN *et al.*, 2014; XIANG & TIAN, 2011).

Frente a isso, a utilização de RPAS apresenta-se muito vantajosa, pois podem ser operados de forma rápida e econômica, sem necessitar de planejamentos como campanhas de fotogrametria aérea convencional. Além disso, produzem imagens de alta resolução espacial, que permitem inclusive o registro por imagem de plantas

individuais, com possibilidade de observar padrões e heterogeneidades espaciais submétricas (LALIBERTE & RANGO, 2011).

Diante dessa contextualização, esta pesquisa se propõe a uma abordagem multissensorial de SR baseada em um RPA multirrotor, equipado com câmeras multiespectral e termográfica, para avaliar sua aplicabilidade na detecção e monitoramento de estresse hídrico em cultura algodoeira, produzida na região do médio norte do estado de Mato Grosso.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a aplicabilidade de sensores multiespectral e termográfico, transportados por Veículos Aéreos Remotamente Pilotados, na detecção e monitoramento de estresse hídrico em cultivos de algodão no estado de Mato Grosso.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar, a partir de levantamentos *in situ* e dados secundárias acoplados a técnicas de geoprocessamento, a heterogeneidade geoambiental da área do experimento para dispor de informações detalhadas que podem subsidiar a análise dos imageamentos termais e multiespectrais;
- Analisar o desempenho de imageamentos por sensores termal e multiespectral na detecção de estresse hídrico em plantio experimental de Algodão;
- Avaliar a interferência de variedades da cultura e covariáveis tais como condições meteorológicas e climáticas, edáficas sobre a produtividade da cultura, sobre a detectabilidade do estresse hídrico e a produtividade;

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A (RE)CONFIGURAÇÃO DA PAISAGEM

Ao longo dos últimos anos, evidências científicas vêm fortalecendo a teoria de que a atividade humana alterou de maneira significativa a concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera (IPCC, 2007; 2014). Assim, a acumulação desses gases tem sido apontada como a causa mais provável da elevação da temperatura e de outras mudanças climáticas observadas no final e início dos séculos XX e XXI, respectivamente (ESPINOZA *et al.*, 2014; MARENGO *et al.*, 2007; SALATI, 2001).

A magnitude do impacto será suficiente para alterar amplamente o clima neste planeta e afetar intensamente diversas regiões, países e continentes, podendo, com isto, mudar e/ou reconfigurar significativamente paisagens (GIORGI, 2006; MARENGO *et al.*, 2007; NOBRE, 2001; TORRES & MARENGO, 2013; XU *et al.*, 2009).

Neste aspecto, uma maior conscientização acerca da necessidade da mitigação das mudanças climáticas veio através da Conferência das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP 11), que aconteceu na cidade de Montreal, em 2005. No evento foi evidenciada a necessária redução das emissões globais de GEE nos países em desenvolvimento, ressaltando que, em sua maioria, eles são provenientes do desmatamento (CLARKE *et al.*, 2016).

Assim, era necessário conceber mecanismos que fossem efetivos na redução de emissões por desmatamento e degradação florestal. Logo surgiram ideias de incentivo à políticas compensatórias para projetos e/ou países que reduzissem as causas de emissão dos referidos gases, colaborando na ampliação de estoques de carbono florestal (ANGELSEN *et al.*, 2013).

Procurando estabelecer um conjunto de decisões na perspectiva de negociar ações que fossem primordiais para garantir um futuro climático mais seguro, foi firmado em 2007, na COP 13, o Plano de Ação de Bali (UNFCCC, 2022). Em vista disso, vislumbrou-se um incentivo à conservação, procurando inibir a degradação florestal e o desmatamento no intento de fomentar práticas de manejo sustentável das florestas. Com tais ações, pode ocorrer um incremento nos estoques de carbono

florestal. Surgiram, então, as políticas e incentivos para Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+) (MONTEIRO, 2020).

Para Pavan & Cenamo (2012) é importante ressaltar que os ecossistemas florestais, como o bioma amazônico, têm sido de fundamental importância para a regulação do ciclo de carbono, pois concentram um grande estoque. Por outro lado, evidências científicas enfatizam que havendo um aumento no desmatamento das florestas, há como consequência grande desequilíbrio, porque ao invés de carbono em estado regulado, o processo de degradação favorece a liberação de grande quantidade estocada. Isso faz com que o bioma perca sua função regulatória, gerando enorme impacto nas condições de estabilidade do clima global, mas principalmente, em escala regional. (MARENGO *et al.*, 2011)

Para além das tentativas de preservação, eventos climáticos extremos, tais como inundações, secas prolongadas e ondas de calor deverão ocorrer com maior frequência em todo o mundo (IPCC, 2014; MARENGO *et al.*, 2011). Como forma de atestar a afirmação, na região amazônica, durante a última década, vários eventos hidrológicos extremos têm sido descritos (MARENGO *et al.*, 2012, 2013; ESPINOZA *et al.*, 2011, 2014; SATYAMURTY *et al.*, 2013).

Como relatado anteriormente, além de mudanças causadas pelos GEE no clima global, numa escala mais regionalizada, as alterações climáticas podem ser ainda mais potencializadas pelo desmatamento e, também, por queimadas (NOBRE, 2001; NOBRE *et al.*, 2007). A Amazônia Legal, por exemplo, tem vivenciado constantemente um aumento da conversão da cobertura vegetal nativa (Cerrado e Floresta) para atividades antrópicas, especialmente de uso agropecuário (EWERS & LAURANCE, 2006; INPE, 2008, 2014; MATOS, 2016).

### **2.1.1 Degradação florestal e mudanças climáticas na Amazônia Legal**

Para Staeve (2015) a expansão do agronegócio e a degradação florestal, assim como, o desmatamento, têm sido assuntos recorrentes de uma problemática conflituosa na Amazônia Legal. Reydon *et al.* (2020) afirmam que a expansão da fronteira agrícola é resultado de uma sequência de fatores, geralmente articulados por seus atores. Entre eles vale ressaltar: (i) a ocupação de terras (principalmente as que ainda possuem vegetação nativa) públicas e/ou privadas, (ii) o extrativismo da

madeira; (iii) as queimadas com a introdução de pastagens e o início da atividade pecuarista e; (iv) a consolidação de área com o corte raso e o desenvolvimento da agricultura moderna baseada no uso de máquinas e implementos. Portanto, pode-se afirmar que atividades ilegais de mineração e extração de madeira, assim como, a agropecuária, são as atividades que corroboram para o desflorestamento na Amazônia Legal (TYUKAVINA *et al.*, 2017; WEST & FEARNSIDE, 2021)

Antes de se ter noção das possíveis consequências que o desmatamento na Amazônia pode causar, é necessário compreender a sua grandeza. Conforme assevera Porto-Gonçalves (2015):

Quando se fala da Amazônia, todas as questões parecem se tornar megalômanas. Somente no Brasil, a Amazônia abarca uma área de 4,9 milhões de km<sup>2</sup>, o que equivale a aproximadamente 54% do território brasileiro. Na América do Sul sua área abarca 8 milhões de km<sup>2</sup>. A floresta amazônica é a mais extensa floresta tropical do mundo, contendo o maior banco genético entre todos os ecossistemas do planeta. (PORTO-GONÇALVES, 2015, p. 65).

Ab'Saber (2003) descreveu a Amazônia como uma área com um extenso domínio formado por terras baixas florestadas, destacando além de sua diversidade ecossistêmica, sua expressiva rede hidrográfica. Por possuir todo este patrimônio e fonte de riqueza natural, houve a necessidade de estabelecer políticas públicas de monitoramento e mitigação do desmatamento na Amazônia (REYDON *et al.*, 2020).

Bouchardet *et al.* (2017) consideram que devido à riquíssima biodiversidade existente neste bioma, é necessário adotar medidas que preconizam sua preservação, garantindo assim, seus serviços ecossistêmicos, essenciais para o bem-estar das populações humanas.

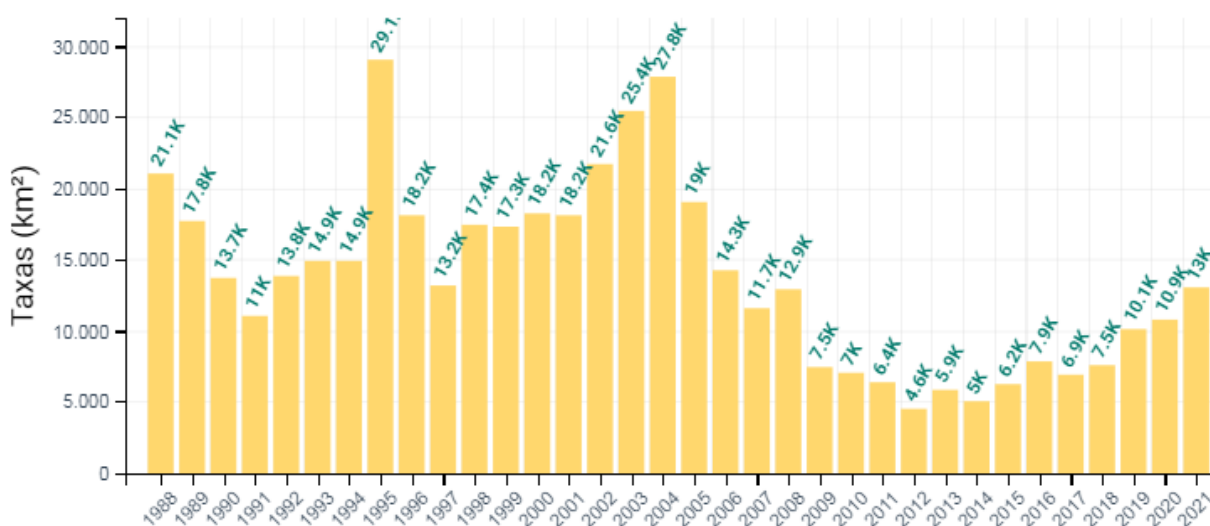
Consciente da necessidade descrita nos parágrafos anteriores, o Brasil criou e implementou, através do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), um sistema operacional de monitoramento florestal, que integra ao monitoramento do desmatamento, a degradação e o uso da terra (TYUKAVINA *et al.*, 2017). Assim, atualmente há sistemas integrados de monitoramento que buscam fiscalizar, através de técnicas de SR e Sistema de Informação Geográfica (SIG), áreas de degradação da floresta que vão desde o princípio da degradação seletiva até o corte raso (ASSIS *et al.*, 2019).

A figura 1 demonstra uma série temporal, da taxa de desmatamento para toda Amazônia Legal, registrada ininterruptamente desde 1988, de um desses programas

de monitoramento. Neste caso, trata-se do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES) (INPE, 2022a).

Ainda no final da primeira década deste século, Rivero *et al.* (2009) já afirmavam que o avanço e estabelecimento da atividade pecuarista era a maior causa do desmatamento na região. Complementando o entendimento dessa lógica do desmatamento na Amazônia, Barros *et al.* (2020) consideram que o fato do estado do Pará fomentar a pecuária em seu território, a partir da segunda metade do século passado, desencadeou o agravamento da degradação florestal.

**Figura 1** - Série de taxa de desmatamento corte raso na Amazônia Legal.



Fonte: INPE (2022b)

Sobre a questão do desflorestamento na totalidade territorial da Amazônia Legal, Azevedo *et al.* (2016) analisando o panorama de desmatamento do PRODES em 2016, constataram que em termos de perdas florestais em áreas absolutas, os estados do Pará, Mato Grosso e Rondônia foram os maiores impactados: com 3.025 km<sup>2</sup>, 1.508 km<sup>2</sup> e 1.394 km<sup>2</sup>, respectivamente. Entre outras considerações, os autores ainda concluíram que “o desmatamento não mudou o perfil em relação à categoria fundiária e tamanho de polígonos nos últimos anos, indicando uma dificuldade de indução da redução dos patamares dos últimos anos” (AZEVEDO, 2016, p. 10).

Desse modo, voltando a observar a figura 1, tomando como base o ano de 2017, nota-se um constante e progressivo aumento do desmatamento. Conforme constatado, as práticas de conservação e uso da terra na Amazônia Legal ainda

estão distantes do que preconiza Alvor *et al.* (2018) em que visa a possibilidade de conciliação e coexistência entre a produção agropecuária, primando por práticas mais sustentáveis e a conservação da biodiversidade. Neste mesmo sentido, Nobre *et al.* (2016) já comprovaram o potencial de um novo paradigma de desenvolvimento sustentável para a Amazônia, prezando por uma abordagem de inovação tecnológica, que permite a prestação de serviços e a confecção de produtos de alto valor agregado.

Contudo, para Nobre *et al.* (2016), se ações como o desmatamento, que degradam a floresta continuarem, há possibilidade de boa parte da Amazônia se transformar em um ecossistema savânico. Ou seja, se não houver significativa mudança nas atividades antrópicas, o bioma poderá chegar a um ponto de inflexão. E para que isso ocorra, basta haver uma perda de 40% de sua vegetação por desflorestamento. Em outro estudo, a partir de revisão e síntese da literatura científica pertinente, o autor argumenta que:

O desmatamento real é imenso e seus efeitos sobre o clima são bem documentados. Estudos em torres micrometeorológicas mostram que a substituição de floresta por pastagem leva, como previsto pelos modelos, a um aumento da temperatura de superfície e uma redução da evapotranspiração. Observações de satélite mostram que, durante a estação seca, como previsto pela teoria da bomba biótica, a evapotranspiração das florestas continua a ocorrer ou até aumenta, mas não nas áreas desmatadas (NOBRE, 2014, p. 22).

Neste cenário de mudanças no clima, a produção de alimentos e fibras em todo o mundo também poderá sofrer um impacto dramático nas próximas décadas (IPCC, 2007; 2014). Mudanças em decorrência de maior irregularidade no regime das chuvas, assim como, a ampliação das temperaturas, que deverão agravar o problema relativo ao déficit hídrico em cultivos agrícolas de várias regiões do planeta (VELLINGA & VERSEVELD, 2000; JAGGARD *et al.*, 2010; NICOLA *et al.*, 2012; FAHAD *et al.*, 2017). Consequentemente, a distribuição geográfica da produção agrícola no Brasil poderá sofrer uma transformação profunda (ASSAD *et al.*, 2004; ASSAD & PINTO, 2008).

## 2.2 MUDANÇA DE COBERTURA E USO DA TERRA EM MATO GROSSO

Em 2020, o Brasil, com uma produção valendo US \$135,8 bilhões, ocupou a quarta posição no ranking dos países líderes de produção agrícola. Os três primeiros

colocados foram China (US \$1,56 trilhão), Índia (US \$403,5 bilhões) e Estados Unidos (US \$307,4 bilhões), respectivamente. Entretanto, no que concerne à exportação, o Brasil ficou em segundo lugar (com valor exportado de US \$120,59 bilhões), perdendo apenas para os Estados Unidos (com uma exportação de US \$147,9 bilhões), seu maior concorrente no mercado agrícola internacional (FAO, 2020).

Martinelli *et al.* (2010) fazendo um paralelo entre a agropecuária brasileira e a estadunidense, em relação a área ocupada com esta finalidade, constatou que ao contrário dos Estados Unidos - que vem diminuindo sua área destinada à agricultura e pecuária; o Brasil vem aumentando paulatinamente, atingindo em 2007 cerca de 250 milhões de hectares. Ainda assim, bem menos que os americanos, que naquele ano, alcançaram algo em torno de 400 milhões de ha.

Segundo o IBGE, através do levantamento do Censo Agropecuário, o Brasil deu um salto ainda maior na expansão de áreas destinadas à agropecuária, chegando a expressivos 351,2 milhões de hectares em 2017. Importante salientar que no cenário de produção mundial, em 2020, o país obteve o maior volume de soja já produzido, aproximadamente 126 milhões de toneladas, sendo 84 destas, destinadas à exportação ainda em grãos. O país posicionou-se como grande protagonista no mercado da soja mundial (ARAGÃO & CONTINI, 2021; MAPA, 2021).

Nesta configuração, o estado de Mato Grosso desponta como um dos maiores produtores agropecuários, devido a sua diversidade edafoclimática e às grandes áreas subvertidas de vegetações naturais para áreas consolidadas do agronegócio mecanizado (SANO *et al.*, 2010).

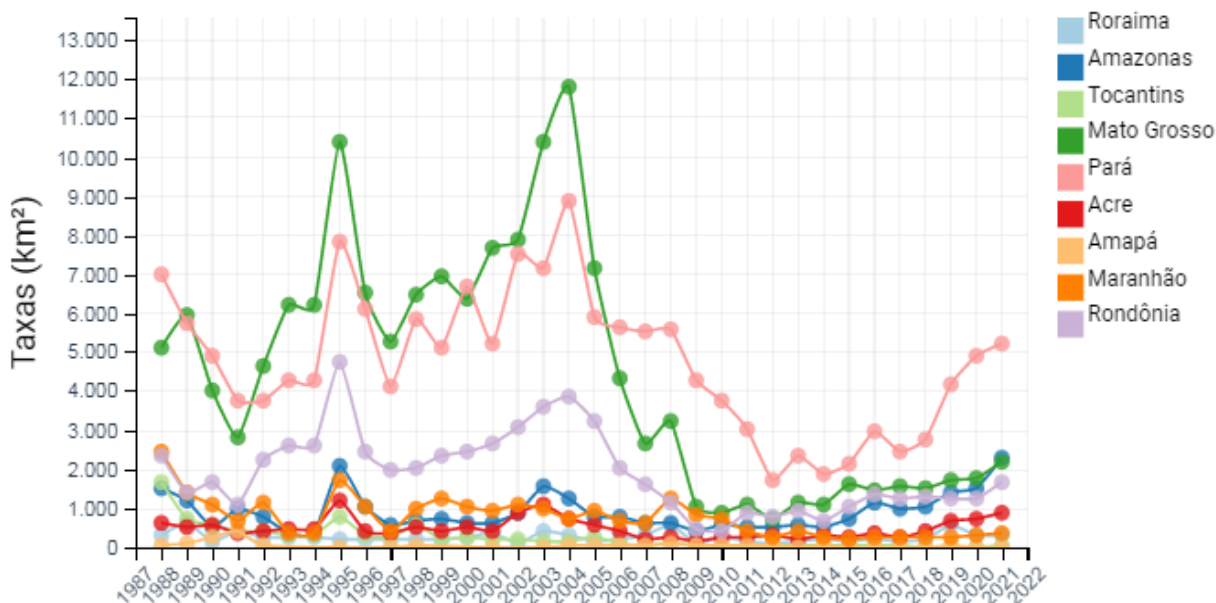
O estado se notabiliza por ter como base a atividade agropecuária, sendo referência na produção de diversos produtos agrícolas. Para se ter uma ideia, na safra 2020/21, o estado foi o maior produtor de Soja (produção de 35.947.300 toneladas, correspondendo a 26% da produção nacional), Milho (produção de 34.126.300 toneladas, correspondendo a 35,4% da produção nacional) e Algodão (produção de 1.710.600 toneladas, correspondendo a 70,1% da produção nacional). Além de ser o terceiro maior estado produtor de feijão (338,6 mil toneladas) e quarto maior de arroz (com 420,3 mil toneladas), representando respectivamente, 12,5% e 3,6% da produção nacional (CONAB, 2021).

Segundo dados do IBGE (2020), Mato Grosso também possui o maior rebanho bovino do país, com um total de 32.702.525 cabeças. Outros dados também mostram que somente para a criação de gado, a área ocupada é de aproximadamente 21 milhões de hectares (MAPBIOMAS, 2021).

Na economia estadual, em 2019, a atividade agropecuária representou 21,4% do Produto Interno Bruto (PIB), ficando apenas abaixo do setor de serviços (62,4%) e à frente da indústria (16,3%) (SEPLAG-MT, 2021).

Por outro lado, todo este resultado expressivo e de vanguarda na produção agropecuária teve um custo: o impacto ambiental através do desmatamento. Não por acaso, Mato Grosso liderou o índice como o estado que mais teve desmatamento corte raso, desde que o INPE começou a realizar o levantamento, em 1988, através do programa PRODES na Amazônia Legal. Essa liderança manteve-se até 2005, quando o estado do Pará superou os índices (Fig. 2).

**Figura 2** - Série de taxa de desmatamento corte raso na Amazônia Legal discriminada por estado.



Fonte: INPE (2022b)

Essa mudança na paisagem mato-grossense não é recente. Ela se intensifica a partir da década de 1970 do século passado, através de estímulos governamentais impulsionados pela revolução verde, com o fim de ocupar o território estadual (HIGA, 2009; BARROZO, 2017). A inovação nas práticas agrícolas, com o desenvolvimento de técnicas de calagem e adubação, tornaram os solos - antes considerados improdutivos - aptos para o cultivo, o que foi fundamental para o desenvolvimento

agropecuário do estado, que naquele momento, era mais voltado para as áreas do Cerrado (EMBRAPA, 2018).

Assim, durante o período, imensas áreas do Cerrado foram desflorestadas, principalmente nos planaltos, onde o relevo propiciava a prática de mecanização e a implementação de monoculturas (COELHO *et al.*, 2020). Consequente, impactos negativos sobre os sistemas pedológicos e hidrológicos começaram a se estabelecer na medida em que a expansão agrícola ia se consolidando (GOMES *et al.*, 2019).

Desse modo, como percebe-se, o estado de Mato Grosso convive com um paradoxo: ao mesmo tempo em que se destaca como líder na produção e comercialização de grãos, fibra e proteína animal; também se apresenta negativamente, despontando como uma das principais unidades federativas que degrada seus biomas, ou seja, o Cerrado, a Amazônia e o Pantanal (MARTINELLI *et al.*, 2010).

Todavia, a possibilidade de aumento de temperatura e o estresse hídrico, como reflexo das mudanças climáticas, podem ameaçar de certo modo a produção no Mato Grosso, levando a perdas. Atualmente, pesquisas são realizadas para estudar o efeito de altas temperaturas nas culturas agrícolas, levando em consideração o fato de que reduções substanciais na produtividade de inúmeras espécies vegetais, podem ocorrer mesmo com pequena elevação de temperatura no ambiente (COLLICHIO, 2015; STRECK & ALBERTO, 2006; ZULLO JUNIOR *et al.*, 2008).

Nesta perspectiva, Torres e Marengo (2013) afirmam ser possível identificar a ocorrência de *hotspots* climáticos que cobrem, entre outras regiões, toda a Bacia Amazônica e Centro-Oeste do Brasil. E, neste cenário de mudanças climática, o estado de Mato Grosso possui os maiores índices de ocorrência de *hotspots* climáticos encontrados no país (TORRES & MARENGO, 2013).

### **2.2.1 A produção de Algodão no Mato Grosso e sua fragilidade diante das mudanças climáticas**

Atualmente, pode-se afirmar que o Brasil é um país relevante na produção de fibras, como o algodão, sendo o quarto maior produtor do mundo, com 2.441.900 toneladas, respondendo por 10% de toda produção mundial. E a tendência é que

haverá, na próxima década, um crescimento ainda maior nas exportações dessa *commodity*, passando a ser o segundo maior exportador no mundo até 2030. (FAO, 2021a; MAPA 2021).

O estado federativo brasileiro com maior protagonismo na produção do algodão é o Mato Grosso, respondendo sozinho por 70,1% de toda a produção nacional (CONAB, 2021). Para melhor percepção, na safra 2021/22, numa área cultivada de 1,18 milhão de hectares, espera-se colher por volta de 1,93 milhão de toneladas de algodão em pluma (IMEA, 2022).

Se hoje o Brasil se destaca na produção de algodão com emprego de alta tecnologia, especialmente no uso de mecanização agrícola, pode-se dizer que nem sempre foi assim, pois entre as décadas de 80 e 90 do século passado, houve reduções na produção e nas áreas destinadas ao seu plantio. A mudança de paradigma na produção, com o que se convencionou chamar “agricultura empresarial”, foi o maior responsável por colocar o Brasil, e especialmente o Mato Grosso, como principal produtor, impulsionando inclusive a exportação do produto (FERREIRA FILHO *et al.*, 2009).

Por outro lado, é preciso atentar-se que para manter o ritmo de crescimento na produção e a produtividade, conforme já mencionado por Torres & Marengo (2014), Mato Grosso pode ser um dos estados brasileiros que mais sofrerá com as mudanças climáticas, entre elas, a alteração do regime das chuvas. Deste modo, é urgente uma ação conjunta entre o Estado e a sociedade civil organizada no sentido de equilibrar a produção agrícola e a proteção ambiental (CARAUTA *et al.*, 2021). E Mato Grosso, particularmente, necessita engajar-se nessa premissa, pois além da maior parte de seu território estar no bioma amazônico, o protagonismo da floresta amazônica, a partir de influência de sua evapotranspiração, é fundamental para manter o regime de chuvas equilibrado dentro do estado (NOBRE, 2014; TORRES & MARENGO, 2014).

Assim, o déficit hídrico é o fator climático que mais limita a produtividade na agricultura, especialmente a do algodão, pois com a limitação hídrica, o acúmulo de biomassa é influenciado linearmente pela transpiração acumulada (HAY & PORTER, 2006). O algodoeiro é sensível ao comportamento das variáveis de ambiente, sejam elas climáticas, edáficas ou bióticas (LAZZAROTTO *et al.*, 1998; BENEDICT, 1984); o seu manejo em regiões de grande umidade requer maiores cuidados, principalmente, devido à atuação de organismos patogênicos, que em função das

alterações ambientais, também podem atuar de forma diferenciada sobre seus hospedeiros (SILVA & AMARAL, 2007; PETTIGREW, 2008). Desta feita, para se ter sucesso no cultivo do algodoeiro, devem prevalecer condições climáticas que permitam à planta, em seus diferentes estádios fenológicos, crescer e se desenvolver, principalmente com relação às condições térmicas e hídricas (AMORIM NETO & BELTRÃO, 1997).

### 2.3 SENSORIAMENTO REMOTO E MONITORAMENTO DO ESTRESSE HÍDRICO

Como a água é fonte e condutora dos nutrientes mais valiosos para a vida vegetal, a sua carência ou escassez afeta diretamente a normalidade das funções fisiológicas da planta, ocasionando assim o estresse hídrico (HATFIELD & PRUEGER, 2015). Assim, uma planta pode ter seu crescimento afetado pelo estresse hídrico, tendo como possíveis implicações: a falta de um pleno desenvolvimento, a diminuição de sua área foliar e até um rendimento produtivo restrito. Ou seja, o déficit hídrico pode impactar a planta, a ponto de retardar ou acelerar seu desenvolvimento, em relação às condições climáticas normais (BLUM, 2011).

Compreender os efeitos do estresse abiótico sobre a cultura do algodão é extremamente importante (AMORIM NETO & BELTRÃO, 1992), considerando que esta é uma cultura agrícola sensível às variações de temperaturas, que podem ocorrer inclusive entre períodos de um mesmo dia num cultivo (BURKE, 2002; LOKA, 2012).

Em virtude desta dinâmica, o SR possui vantagens em relação a métodos convencionais de campo, com a possibilidade de um monitoramento simultâneo em toda área avaliada (GÓMEZ-CANDÓN, 2014).

#### **2.3.1 Sensoriamento Remoto com uso de RPAS como possibilidade de Monitoramento de Agricultura**

Produtos oriundos de SR, como mapas de parâmetros biofísicos, têm sido muito apreciados porque possibilitam uma melhor compreensão de um fenômeno em sua dimensão espacial (SEELAN *et al.*, 2003). Índices de vegetação, derivados

de imagens de SR, obtidas a partir de sensores acoplados em plataformas como satélites, aviões tripulados ou por RPAS, podem ajudar a produzir informações espaciais e temporais por meio de relações empíricas ou modeladas (HODGEN *et al.*, 2005).

Os RPAS, também chamados de Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) ou em inglês Unmanned Aerial Vehicles (UAV), entre outros nomes, são plataformas (aeronaves) multirrotores ou de asa fixa para aplicação de SR, em que se pode embarcar câmeras ópticas, multiespectrais, termográficas, hiperespectrais entre outros instrumentos e sensores (EISENBEISS, 2011; SILVA, 2020). Eles são agora amplamente utilizados pela comunidade de SR, especialmente para fornecer informações agronômicas espacialmente (TEFERA, 2022). Tais produtos são, muitas vezes, assimilados em modelagem para obter informações mais complexas sobre o estresse da cultura (BARET *et al.*, 2007; JIN *et al.*, 2017).

Contudo, para a aplicação bem sucedida de SR na agricultura, necessita-se de uma resolução espacial muito alta, com tamanho de *pixel* menor que 1(um) metro, além de acesso a bandas espectrais no visível, infravermelho próximo e termal, ou seja, necessita de sensores com boa resolução espectral, que permitam a estimativa de informações de parâmetros biofísicos, tais como a concentração de clorofila *a* e *b*, xantofilas, carotenóides, antocianinas, água e matéria seca, índice de área foliar e da temperatura da cultura (ZARCO-TEJADA *et al.*, 2008; HEIN *et al.*, 2021).

Nos últimos anos, o desenvolvimento acelerado de Sistemas RPAS vem trazendo perspectivas crescentes de sua adaptação para aplicações na agricultura, principalmente, no acompanhamento do desenvolvimento das culturas de precisão, controle de pragas, previsão de safra e o monitoramento de parâmetros edáficos determinantes do desenvolvimento dos cultivares (BARETH *et al.*, 2015; OSTOS-GARRIDO *et al.*, 2019). Quando comparado à aerofotogrametria tradicional (tripulada), os RPAS podem ser operados de forma rápida, sem necessidade de planejamentos complexos, como em campanhas de fotogrametria aérea convencional, podendo assim, coletar dados com menor custo-benefício (BENDIG *et al.*, 2014; SHI *et al.*, 2016).

Em outras palavras, pode-se dizer que entre as diversas plataformas de SR, principalmente, por produzir imagens de alta resolução espacial que permitem a observação de plantas individuais e de padrões e heterogeneidades espaciais

sub-métricas, elas possibilitam aplicações bem sucedidas de sistemas VANTs na agricultura (BERNI *et al.*, 2009; ZARCO-TEJADA *et al.*, 2012; GÓMEZ-CANDÓN *et al.*, 2016; SANTESTEBAN *et al.*, 2017).

### **2.3.1.1 Índices espectrais aplicados na agricultura**

Os índices de espectrais sempre foram um bom produto de SR para ser aplicado no monitoramento da superfície terrestre, especialmente na área ambiental, desde quando Rouse *et al.* (1973) implementaram o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) (JUSTICE *et al.*, 1998).

Logo em seguida, estes índices também foram aplicados na agricultura, alguns até melhor elaborados para tal aplicação (HUETE, 1988). Contudo, com o desenvolvimento dos RPAS e a possibilidade de adquirir imagem de alta resolução espacial e com a opcionalidade de decidir dias e locais a serem monitorados, os índices espectrais estão cada vez mais difundidos em pesquisas aplicadas na agricultura (HABOUDANE *et al.*, 2002).

Desse modo, estes índices, que na verdade são modelos matemáticos - a partir da integração de duas ou mais bandas espectrais baseados em imagens de SR, podem avaliar e caracterizar a cobertura vegetal realçando determinadas características (LOPES & REYNOLDS, 2012; POTGIETER *et al.* 2017). Neste caso, como já mencionado, os índices de vegetação são aplicados para avaliação de certos parâmetros biofísicos e características da vegetação, tais como, atividade fotossintética, percentual de cobertura do solo, biomassa, índice de área foliar e déficit hídrico (BLACKMER *et al.*, 1996; FURLANI JÚNIOR *et al.*, 1996; SWAEF, *et al.*, 2021).

Graças ao avanço da tecnologia e ao desenvolvimento de sensores, que recobrem uma gama de faixas no espectro eletromagnético, atualmente, há inúmeros índices espectrais com finalidades e funcionalidades diferentes sendo usados em diversas aplicações (ROUSE *et al.*, 1973; JUSTICE *et al.*, 1998; HUETE, 1988), dentre elas a agricultura (HABOUDANE *et al.*, 2004; ZHOU *et al.*, 2021; QIAO *et al.*, 2022).

### 2.3.1.2 Termografia aplicada na agricultura

Até o advento e aplicação de sistema RPAS, com uso de termografia para avaliar a temperatura do dossel de plantas, estudos de estresse hídrico abiótico eram realizados com pouca disponibilidade de ferramentas relativas a estudos de padrões espaciais. Assim, muitos estudos eram realizados apenas em casas de vegetação, como foi o caso de Biju *et al.* (2018), que avaliou imagens termográficas como ferramenta para identificar genótipos de lentilha tolerantes à seca. Para experimentos em campo o desafio ainda era maior, por necessitar de instrumentos paramétricos de medição de temperatura.

Para experimentos em campo, ainda sem a utilização de câmeras que geram imagens de temperatura ou o uso de RPAS, utilizava-se a tecnologia disponível, como, por exemplo, o estudo de Blum *et al.* (1989) sobre a resistência à seca do sorgo em diferentes genótipos, quando é usado um termômetro portátil para registrar a temperatura do dossel. Os valores eram capturados por uma pistola que registrava, a partir da região espectral do infravermelho, contudo, os dados de temperatura eram adquiridos em forma de ponto e não de imagens.

Foram realizados diversos estudos aplicados em outros tipos de cultivos agrícolas, que também tinham como finalidade avaliar o estresse hídrico, tais como, na batata (STARK *et al.*, 1991), na cana de açúcar (SILVA *et al.*, 2007), no sorgo (MUTAVA *et al.*, 2011), no trigo (PRADHAN *et al.*, 2014). Entre 2013 e 2015, quando o uso de RPAS ainda não estava tão disseminado como ocorre atualmente, Bai & Purcell (2018) utilizaram um balão como plataforma e acoplaram uma câmera termográfica, conseguindo assim, obter dados de varredura, ou seja, geraram imagens de um experimento a campo, com plantio de diversas variedades de soja.

Com o avanço tecnológico, os sistemas RPAS vem passando por constantes processos de inovação que resultaram numa maior automação das plataformas e sensores (COLOMINA & MOLINA, 2014; AMARASINGAM *et al.*, 2022). Também houve um processo de miniaturização dos equipamentos, especialmente dos sensores, como os termográficos, que atualmente são fabricados para serem acoplados ou já vêm integrados à plataforma. Anteriormente, existiam câmeras de uso manual que eram adaptadas às plataformas.

Desse modo, as inovações descritas acima estão facilitando a aplicação de sistema RPA, baseado no monitoramento termográfico, em estudos de culturas

agrícolas como o arroz (LIU *et al.*, 2018), o milho (HOU *et al.*, 2021), o trigo (CAO *et al.*, 2021) e a batata (EKINZOG *et al.*, 2022).

Lacerda *et al.* (2022) realizaram um estudo aplicado na cultura algodoeira que teve como objeto analisar o potencial de uso de imagens termográficas baseadas num sistema RPA. Dentre os resultados, consideraram que o sistema RPA, com uso de termografia, demonstrou potencial que visa melhorar o sistema de gestão e manejo da cultura. De modo geral, a intensificação do uso do sistema RPA para avaliar a tolerância à seca em diversos cultivos agrícolas, demonstra bons resultados (GANO *et al.*, 2021; ZHOU *et al.* 2021)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 OBSERVAÇÕES INICIAIS E CONCEPÇÃO METODOLÓGICA GERAL

No sentido de possibilitar uma visualização mais sintetizada da metodologia, com os procedimentos que foram realizados neste trabalho, a figura 3 apresenta uma panorama, de maneira linear, dividido em 5 (cinco) conjuntos de atividades distintas e complementares, sendo elas: (i) o planejamento das atividades de campo, os levantamentos de dados primários, secundários e referencial teórico; (ii) a implementação do sistema RPA e a aquisição de imagens multiespectral e termográfica; (iii) o pré-processamento das imagens, com as correções geométricas e radiométricas e o cálculo dos índices espectrais; (iv) a organização dos dados para exportação e posterior análise, implantação de um SIG para melhor interpretação das imagens e; por fim, (v) as análises estatísticas.

**Figura 3** - Procedimento metodológico da pesquisa apresentado de maneira linear.



**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Antes de dar prosseguimento à descrição da área e da metodologia de maneira mais detalhada, é importante enfatizar que o desenvolvimento dos procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa somente foram possíveis a partir de experiências adquiridas em estudos sobre a aplicabilidade de RPAS para o monitoramento de culturas de algodão, o que ocorreu entre os anos de 2015 e 2020, através de projetos em parceria do Instituto Federal de Educação, Ciência e

Tecnologia de Mato Grosso (IFMT), com a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) e o Instituto Mato-grossense do Algodão (IMA). Importante salientar que através desses projetos é que foi possível a obtenção dos dados apresentados e analisados aqui.

## 3.2 ÁREA DE ESTUDO

### 3.2.1 Área experimental e suas características

#### 3.2.1.1 Caracterização físico-geográfica da área em que o experimento está inserido

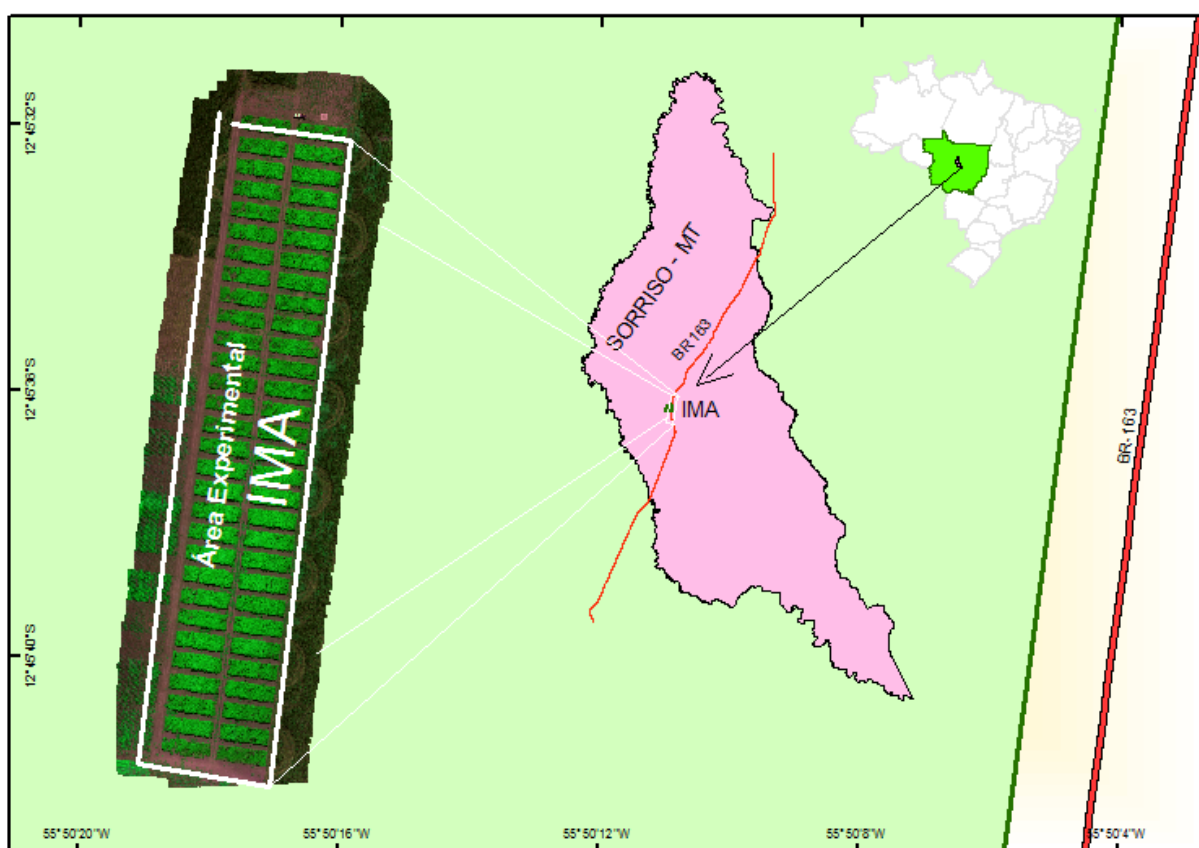
Localizada no interior do Centro de Treinamento e Difusão Tecnológica do IMA (CTDTI), entre os paralelos 12°45'31,17" S e 12°45'42,26" S e meridianos 55°50'17,88" W e 55°50'16,62" W, a área de estudo (experimento de estresse hídrico induzido), fica na circunscrição do município de Sorriso (Fig. 4), aproximadamente, a 400 km ao norte da capital de Mato Grosso, na microrregião produtora do médio norte (IMEA, 2017). Nos últimos anos, o cultivo de algodão na região vem-se expandindo. Somente no município de Sorriso, em 14 anos, a cultura teve um acréscimo na área plantada de aproximadamente 483%, pois em 2005 havia 8.519 ha, e em 2019, ela já ocupava uma área de 41.156 ha (IBGE, 2005; 2019).

Proeminente no cultivo de algodão herbáceo (em caroço) - atualmente com produção de 179 mil toneladas, o que o torna o 10° maior produtor em volume do país (IBGE, 2019b); Sorriso é reconhecido por ser o maior produtor de grãos do Brasil, respondendo por 1,1% do total da produção nacional. O município é hoje o maior produtor de milho (com 3,2 milhões ton.) e soja (com 2,1 milhões ton.) segundo dados do IBGE, de 2020.

O local do experimento está inserido na microbacia do Ribeirão Grande, tributária da bacia do rio Teles Pires, que por sua vez, compõe a bacia do rio Amazonas (SEPLAN-MT, 2000). Tendo altitude variando de 380 a 400 m, a região possui clima subtropical continental úmido, com temperatura média anual de 24°C e precipitação de 2.250 mm. Possui uma estação seca definida, com quatro meses (de maio a agosto), tendo de setembro a abril, os meses em que há precipitações, concentradas de novembro a março (MAITELLI, 2005; TARIFA, 2011).

Cabral (2014), baseada numa metodologia proposta por Latrubesse *et al.* (1998), fez um mapeamento da unidade geomorfológica para o município de Sorriso e a área de estudo se encontra classificada como “formas dissecadas com topos tabulares do Planalto Dissecado dos Parecis”. Para Mendes (1996) as unidades litoestratigráficas correspondem ao grupo parecis, com a formação Utiriti datada do Cretáceo Superior. Quanto ao solo da área experimental, este foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 1999), que têm como principal característica possuir uma boa drenagem e apresentar homogeneidade em suas propriedades ao longo do perfil, por serem muito intemperizados e profundos (IBGE, 1999).

**Figura 4** - Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2.1.2 Projeto Experimental

No projeto experimental, os genótipos foram distribuídos e divididos em dois grandes blocos (Figura 6). O primeiro bloco foi o bloco de referência, no qual houve

irrigação normalmente, sem restrição de água (Figura 5a1). O segundo bloco foi o bloco estressado, no qual a irrigação foi cortada por um período pré-determinado durante a fase de inflorescência das plantas de algodão (Figura 5a2). Cada bloco continha quatro repetições do mesmo tratamento, e os genótipos foram distribuídos espacialmente ao acaso em 39 variedades, que receberam uma numeração de 1 a 39 por questões de sigilo da instituição em relação à identidade dos materiais genéticos, sendo denominados de "tratamentos" (Figura 6).

No ano safra 2017/2018, esses 39 genótipos selecionados pelo IMA foram conduzidos. Eles foram plantados em 312 parcelas, que foram identificadas e catalogadas in situ (Figura 5c). Cada uma dessas parcelas era constituída por um conjunto de 4 linhas, com 7 metros de comprimento e espaçamento de 0,76 metros de largura cada uma (Figura 5b). Houve mudanças no desenho experimental e na configuração das parcelas a partir de reuniões do grupo de especialistas em instrumentação, Sensoriamento Remoto e agronomia. Chegou-se à conclusão de que as parcelas deveriam ter 4 linhas, em vez de duas, com o intuito de diminuir o efeito de borda nas imagens causado pelas diferentes alturas dos algodoeiros e sua projeção de sombra. Dessa forma, aumentou-se a representatividade da área amostral para cada genótipo de planta (variedade) e melhorou a relação entre pixels puros versus pixels misturados nos levantamentos de Sensoriamento Remoto.

**Figura 5** - (a) Área experimental de estresse hídrico com suas respectivas 256 parcelas; (b) Parcela em detalhe de uma variedade de algodão com suas 4 respectivas linhas de plantio; (c) No detalhe, a codificação de identificação da parcela fixada em uma das plantas.



Fonte: Elaborada pelo autor

Quanto ao plantio, no dispositivo experimental, foi realizado em 7 de março. A área foi irrigada três vezes por semana, com uma lâmina de água em torno de 15 mm a cada vez. A irrigação foi executada por um sistema mecanizado linear autopropelido LBU (Linear Barra Única) por aspersão (Figura 6c), utilizando uma mangueira de 3.020 metros. A velocidade média de deslocamento durante o ensaio foi de aproximadamente 80 metros por hora (Figura 7).

**Figura 6** - (a) Plantas não estressadas; (b) Plantas estressadas; (c) No detalhe, instrumento de irrigação (pivô arrasto) e; (d) Imagem da área do experimento demonstrando os blocos estressado e não estressado.



Fonte: Elaborada pelo autor

Quanto aos cortes de água, para submeter as plantas da metade do experimento ao estresse, o bloco estressado foi privado de irrigação a partir de 20 de maio e permaneceu sem receber água até 20 de junho de 2018. Após essa data, ambos os blocos foram irrigados conjuntamente até o final de julho, período em que entraram em maturação até serem colhidos no início de setembro do mesmo ano.

No que se refere à adubação e manejo do ensaio, foram realizadas aplicações uniformes em todo o experimento para garantir a igualdade de parâmetros nos dois blocos e nas diferentes variedades. Além disso, foram adotadas medidas de controle de plantas daninhas e pragas em todo o ensaio.

**Figura 7** - Sistema de irrigação de arrasto com autopropelido.



Fonte: Elaborada pelo autor

**Tabela 1:** Semeadura e irrigação no experimento.

<i>Ano</i>	<i>Data semeadura</i>	<i>Interrupção de Irrigação</i>	<i>retomada da irrigação</i>	<i>Dias sob estresse</i>
2018	07/03	20/05	20/06	31

### 3.3 LEVANTAMENTO DE CAMPO

Os dados adquiridos neste estudo foram utilizados para fornecer suporte à compreensão dos dados de Sensoriamento Remoto (SR) e do fenômeno de estresse hídrico. Como mencionado anteriormente, os levantamentos foram realizados in loco na área experimental do CTDI. No entanto, com o objetivo de enriquecer ainda mais o trabalho, também foram obtidos dados secundários para auxiliar na estimativa de modelos de estresse hídrico.

#### 3.3.1 Levantamentos biofísicos

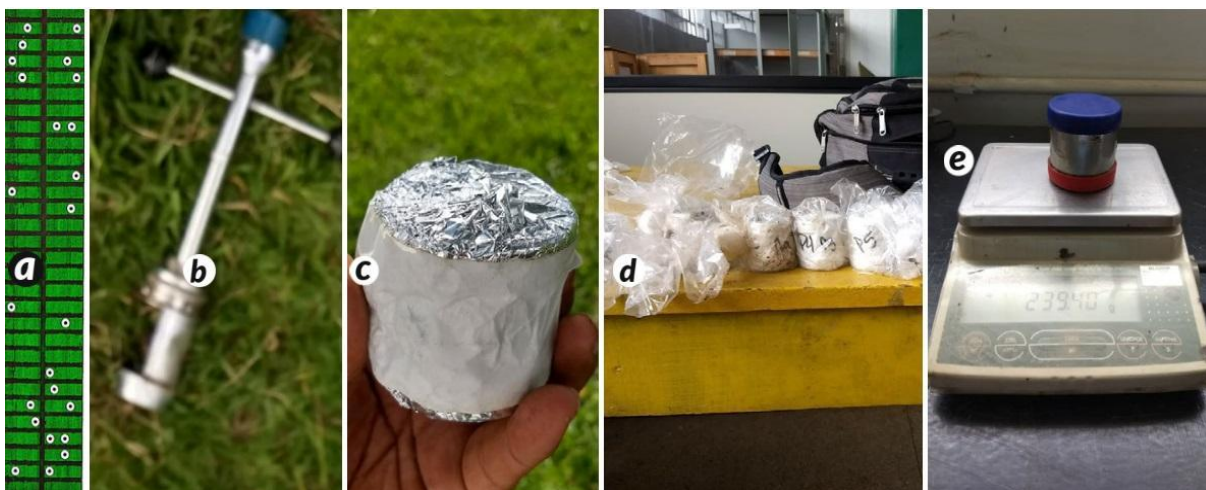
Com o objetivo de criar um ambiente controlado, a implementação deste experimento teve como objetivo monitorar de forma sistemática o comportamento fisiológico e a produtividade das variedades da cultura, buscando estabelecer correlações com suas características de reflectância espectral e emissão térmica.

Nesta área, o estresse hídrico foi induzido e, para isso, o plantio foi realizado em uma época mais tardia, fora do período de chuvas intensas, de modo que a floração ocorresse no final de maio e início de junho. Essa estratégia é adotada propositalmente pelo IMA para permitir o cultivo irrigado e, assim, ter um maior controle nos cálculos do balanço hídrico.

### 3.3.1.1 Umidade do solo

As características físicas do solo exercem uma influência direta e indireta no desenvolvimento das plantas. Por isso, é essencial conhecer e caracterizar o solo para tomar decisões precisas e concisas. Com o objetivo de avaliar a umidade do solo, foram realizadas coletas de amostras indeformadas em algumas parcelas da área 1, entre os dias 12 e 15 de junho de 2018 (Figura 8).

**Figura 8** - (a) Pontos onde houve coleta de amostras; (b) Trado de amostra indeformada; (c) amostra coletada em campo; (d) separação e catalogação de amostras e; (e) amostra sobre a balança de precisão.



**Fonte:** Elaborada pelo autor

As coletas foram realizadas seguindo a lógica dos pontos de controle centrais, em que amostras de 100 cm<sup>3</sup> foram retiradas nos primeiros 5 cm do solo utilizando um trado de amostra indeformada fabricado pela SONDATERRA®. Cada amostra foi cuidadosamente colocada em uma cápsula, que foi coberta com papel alumínio, etiquetada e armazenada em um saco plástico lacrado. Para preservar a temperatura, as amostras foram colocadas em uma caixa térmica resfriada.

Em seguida, as amostras foram transportadas para o Laboratório de Solos do IFMT Campus Cuiabá, onde passaram por processos de separação, catalogação, pesagem e reembalagem. Posteriormente, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Geografia Física do Departamento de Geografia - UFMT (LAGEF), onde foram secas em estufa. Após a secagem, as amostras foram novamente pesadas no Laboratório de Solos do IFMT.

### 3.3.1.2 Infiltração

No dia 31 de agosto de 2018, foi realizado um ensaio de medição da infiltração e condutividade não-saturada em 12 locais específicos do experimento. Para realizar essa medição, foram utilizados os anéis de infiltração concêntricos da SONDATERRA®, estrategicamente posicionados entre as linhas de algumas variedades (Figura 9).

Os anéis de infiltração concêntricos são dispositivos que permitem quantificar a taxa de infiltração da água no solo e estimar sua condutividade não-saturada. Nesse ensaio, a água foi aplicada dentro do anel de infiltração e, em seguida, foram registrados o tempo necessário para que a água infiltrasse completamente no solo e a quantidade de água infiltrada.

Essas medições são importantes para avaliar a capacidade de infiltração do solo e sua capacidade de retenção de água, o que tem impacto direto no manejo da irrigação e no desenvolvimento das plantas. Os resultados obtidos a partir desse ensaio forneceram informações valiosas sobre a taxa de infiltração e a condutividade não-saturada do solo nas áreas de estudo.

**Figura 9** - (a) Distribuição dos pontos de infiltração; (b) Instalação; (c) Georreferenciamento do ponto e; monitoramento da infiltração do solo por anéis de infiltração na Área 1.



Fonte: Elaborada pelo autor

### **3.3.1.3 Dados Meteorológicos**

A obtenção destes dados foi proveniente de uma Estação Meteorológica Automática (Fig. 10), com conjunto de sensores movidos a energia solar, de propriedade de uma empresa particular. A aquisição dos dados só foi possível devido ao IMA ter uma parceria com a referida empresa, que prontamente disponibilizou informações de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade média do vento, precipitação, entre agosto de 2017 a julho de 2018, e agosto de 2018 a julho de 2019.

Também foi possível obter, junto ao IMA, dados diários de precipitação, dos anos de 2015 a 2019. Entretanto, esses dados foram aferidos, em um pluviômetro manual, instalado próximo ao experimento.

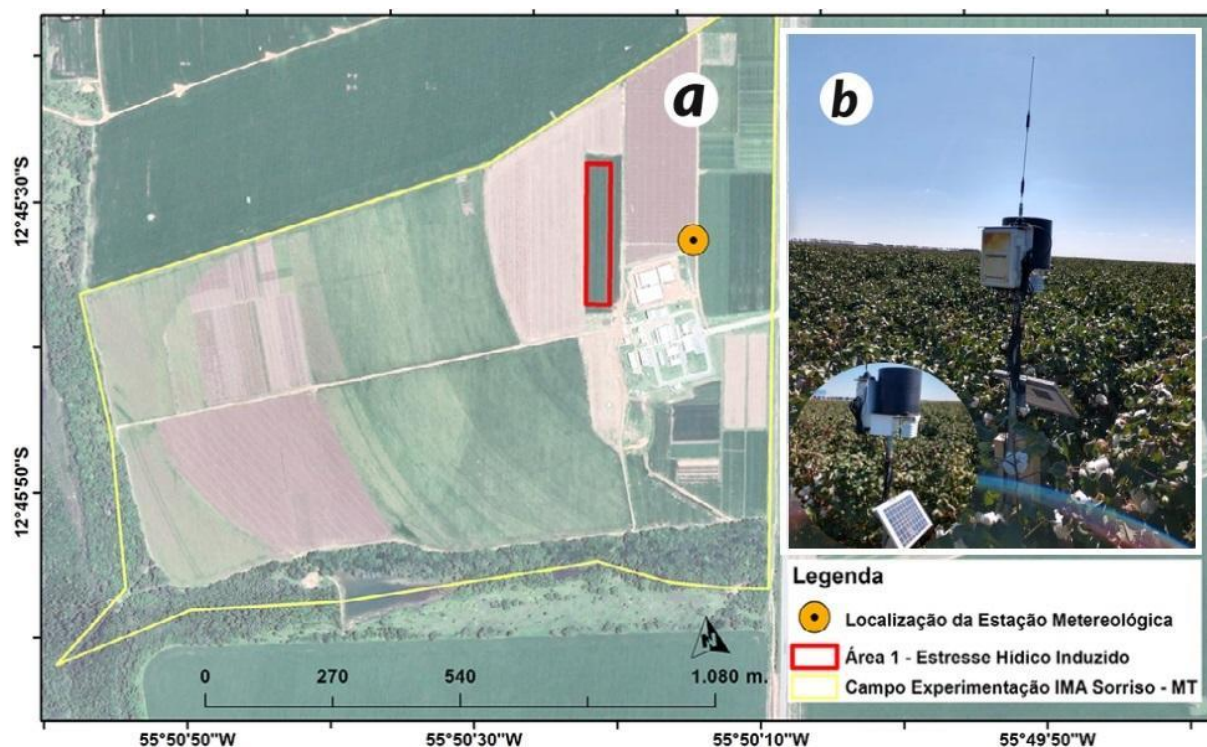
### **3.3.1.4 Murchamento**

A avaliação por murchamento no algodão é uma técnica utilizada para determinar o nível de estresse hídrico nas plantas. O murchamento ocorre quando as plantas não recebem água suficiente para suas necessidades, resultando em uma diminuição da turgescência das folhas e em um aspecto murchado ou flácido. Essa condição é uma resposta adaptativa das plantas ao estresse hídrico, em que reduzem a perda de água através da transpiração para preservar a hidratação e a sobrevivência.

Durante as avaliações de murchamento, observa-se visualmente o estado das plantas, verificando se há sinais de murchamento nas folhas e na parte aérea das plantas. Essa avaliação pode ser subjetiva, pois depende da capacidade do observador em identificar os sintomas de murchamento, e os resultados podem variar devido a fatores como a variabilidade genética das plantas, condições ambientais e estágio de desenvolvimento das plantas.

No contexto do estudo, as avaliações visuais de murchamento foram realizadas entre os dias 14 e 15 de junho de 2018 por um pesquisador do IMA. No entanto, foi observada uma relativa alta variabilidade nos resultados, indicando que os sintomas de murchamento podem variar entre as plantas e dificultar a obtenção de dados consistentes em uma única avaliação.

**Figura 10** - (a) Localização da Estação Meteorológica no IMA Sorriso - MT; (b) Detalhe da Estação Meteorológica.



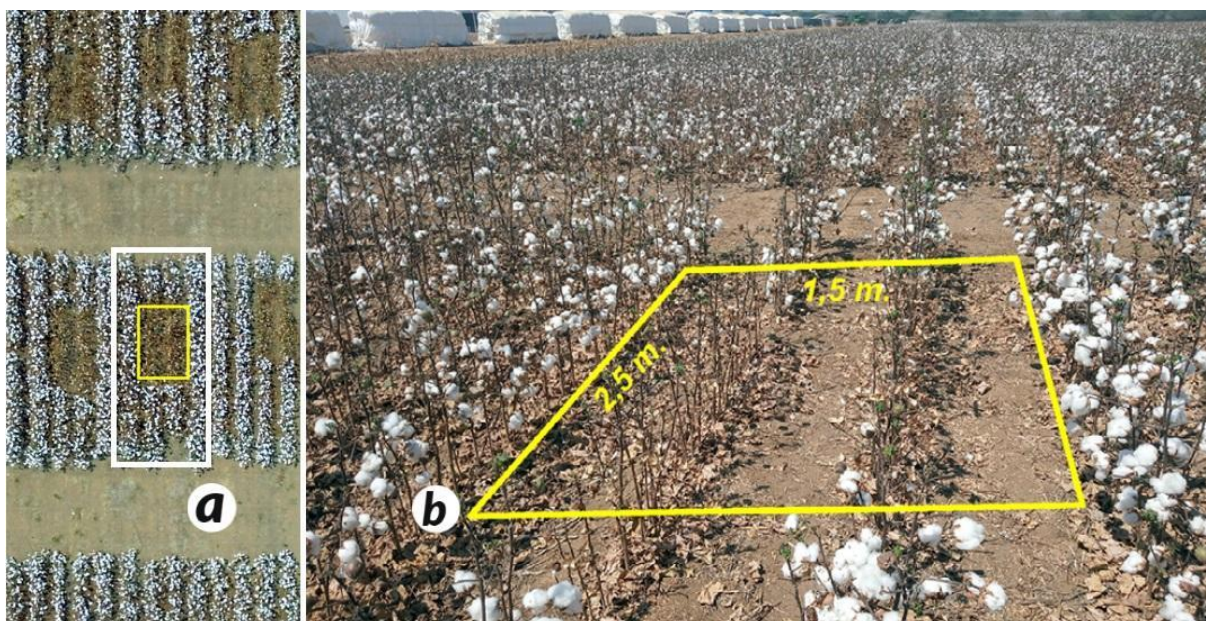
Fonte: Elaborado pelo autor

Para superar essa variabilidade e obter dados mais confiáveis, foi sugerido que as avaliações de murchamento fossem repetidas em horários diferentes e ao longo de vários dias consecutivos. Essa abordagem permitiria capturar a variabilidade temporal e reduzir os efeitos de fatores aleatórios. Infelizmente, devido à falta de disponibilidade de um técnico qualificado para realizar essas repetições, não foi possível executar essa estratégia no presente estudo.

### 3.3.1.5 Produtividade

Para obter dados de produtividade, foi decidido realizar a colheita manual, o que permitiu coletar apenas uma amostra por parcela, utilizando um retângulo de 2,5 x 1,5 metros (Figura 11). Essa abordagem proporcionou resultados individuais de peso (em kg) e produtividade (em @/ha) por amostra/parcela, permitindo a avaliação das 39 variedades divididas em dois blocos: estressado e não estressado.

**Figura 11** - (a) Amostras colhidas no interior da parcela; (b) Detalhe de amostra colhida.



**Fonte:** Elaborado pelo autor

É importante ressaltar que a escolha de colher um fragmento/amostra no interior da parcela foi uma decisão metodológica. Essa decisão foi tomada com o objetivo de correlacionar de forma mais precisa esses dados com os dados espectrais obtidos pelo Sistema RPA, buscando minimizar possíveis efeitos de contaminação nos dados espectrais causados pelas bordas das parcelas.

Essa abordagem metodológica visa garantir a confiabilidade e a representatividade dos dados de produtividade, permitindo uma análise mais precisa das relações entre os dados de produtividade e os dados espectrais obtidos pelo Sistema RPA.

### 3.3.2 Dados secundários e estimativa do estresse hídrico

Para quantificação das condições hídricas no experimento e estimativa da intensidade do estresse hídrico no bloco das parcelas não irrigadas, foi utilizado o aplicativo Cropwat 8.0 (FAO, 2021b), que permite o cálculo das demandas hídricas das culturas e sua irrigação com base em dados pedológicos e climatológicos.

Para alimentação do Cropwat, foi utilizada a base de dados Climwat 2.0 (disponível em <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/climwat-for-cropwat>), que disponibiliza dados climatológicos para mais de 5.000 estações globalmente.

Utilizou-se a estação mais próxima do experimento, localizada na cidade de Vera (MT), a uma distância de 78 km a nordeste do experimento, com características geoambientais similares (relevo, altitude, uso e cobertura do solo).

Para o cálculo do balanço hídrico, são consideradas as seguintes variáveis:

- Média da temperatura diária mínima em °C;
- Umidade média relativa em %;
- Velocidade média do vento em km/dia;
- Insolação média em horas por dia;
- Radiação solar média em MJ/m<sup>2</sup>/dia;
- Precipitação mensal em mm/mês;
- Precipitação efetiva mensal por mês em mm/mês;
- Evapotranspiração de referência calculada pelo método Penman-Monteith em mm/dia.

Para determinação do balanço hídrico no experimento durante o ano de 2018, foram inseridos os dados de precipitação diária medidos pela estação meteorológica da IMA, juntamente com as informações fornecidas sobre o manejo de irrigação no bloco de parcelas de controle irrigadas.

**Tabela 2:** Dados de entrada no software Cropwat 8.0 para estimativa do balanço hídrico no experimento durante 2018 com e sem irrigação.

<b>CONJUNTO DE DADOS</b>	<b>FONTE</b>	<b>CARACTERÍSTICA DOS DADOS</b>
<i>Dados climatológicos (Temperaturas mínimas e máximas, Umidade relativa)</i>	<i>BD CLIMWAT</i>	<i>referente da estação de Vera-MT</i>
<i>Dados pluviométricos</i>	<i>Estação meteorológica ImaMT ao lado do experimento</i>	<i>lâmina diária precipitada</i>
<i>Características pedológicas</i>	<i>BD CLIMWAT</i>	<i>Latossolo vermelho-amarelo</i>
<i>Fases fenológicos das variedades de algodão / período do plantio</i>	<i>Corpo técnico ImaMT</i>	<i>número de dias após semeio</i>
<i>Manejo de irrigação</i>	<i>Corpo técnico ImaMT</i>	<i>ca. 12 mm.dia (parcelas sem estresse)</i>

### 3.4 CAMPANHAS DE IMAGEAMENTO E PRÉ-PROCESSAMENTO

#### 3.4.1 Aquisição, configuração e aperfeiçoamento do Sistema *RPA*

Os sistemas de Sensoriamento Remoto (SR) com plataformas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS) são complexos e altamente especializados, exigindo componentes eletrônicos e mecânicos sofisticados para a realização de levantamentos aéreos com diferentes tipos de sensores (WATTS et al., 2012; COLOMINA & MOLINA, 2014).

Neste estudo, os sistemas utilizados foram adquiridos em 2017, por meio de um projeto financiado pela SETEC-CNPQ, no âmbito da chamada 017/2014. Foram utilizados dois hexacópteros da marca DJI, sendo um deles o modelo Matrice 600 e o outro o Matrice 600-PRO. No Matrice 600-PRO, foi implementado um sistema de estabilização de câmera (Gimbal) da marca Ronin-MX (Figura 12) (WATTS et al., 2012).

Para a captura dos dados de reflectância, foi adquirido um sensor multiespectral da marca MicaSense, modelo RedEdge de 5 canais/bandas. A Figura 13 apresenta o sensor RedEdge e algumas de suas características (MICASENSE, 2017) (COLOMINA & MOLINA, 2014).

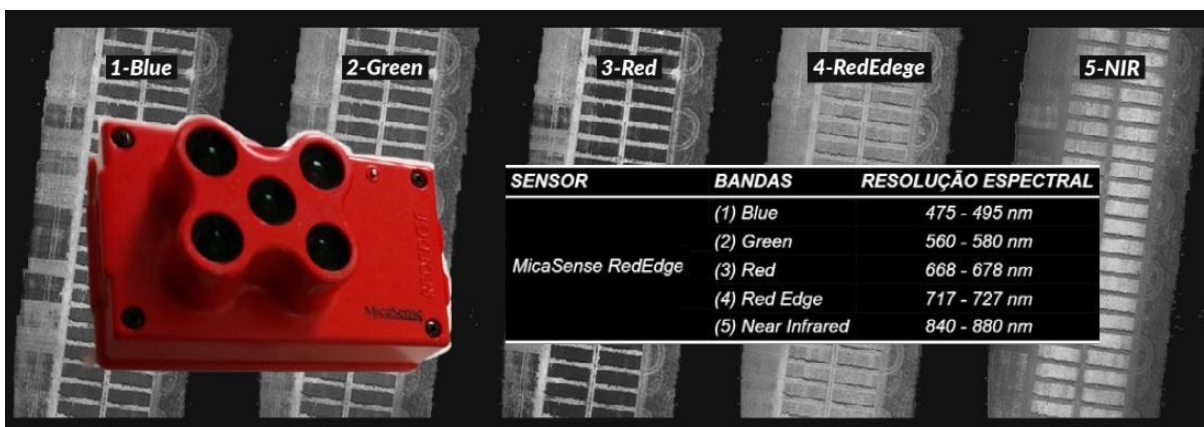
**Figura 12** - Matrice 600 (a); Matrice 600-PRO (b) e; no detalhe, Gimbal Ronin-MX (c).



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Esses equipamentos e sensores foram selecionados com base em sua capacidade de capturar imagens de alta resolução espacial e espectral, permitindo a obtenção de dados precisos para o estudo do estresse hídrico em cultivos de algodão. A combinação do Matrice 600-PRO com o Gimbal Ronin-MX proporciona estabilidade e precisão no posicionamento da câmera, garantindo imagens de alta qualidade. O sensor RedEdge, por sua vez, permite a aquisição de dados multiespectrais que são fundamentais para a análise das condições de estresse hídrico nas plantas.

**Figura 13** - Sensor Multiespectral MicaSense Rededge.



Fonte: Elaborada pelo autor

Também foi implementado o monitoramento termográfico com a utilização de um sensor da marca Flir, modelo T-420 (Fig. 14), com resolução 320 x 240 *pixels* e registro na faixa espectral de 7,5 a 13  $\mu\text{m}$  (FLIR, 2013). Vale ressaltar que esse sensor foi disponibilizado através da parceria com o grupo de pesquisa GeoHidro-UFMT.

A implementação, configuração e aperfeiçoamento deste sistema foi realizada por pesquisadores e colaboradores (com expertise na área de eletrônica) do projeto “Monitoramento de Fitoparasitas e Estresse Hídrico, com uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas e SR Multissensorial, na cultura de Algodão em Mato Grosso”, uma parceria entre o IFMT, IMA e a UFMT nos anos de 2018 e 2019, na qual esta pesquisa/tese esteve inserida.

**Figura 14** - Sensor Termográfico marca Flir, modelo T-420.



Fonte: Elaborado pelo autor

O emprego do RPA Multirrotor iniciou-se ainda no segundo semestre de 2017, com levantamentos exploratórios numa área próxima à cidade de Campo Verde. Essas aquisições de imagens, multiespectrais e termal, serviram para implementar a metodologia de aquisição de imagens por aerolevante não tripulado. Desse modo, foi possível fazer levantamentos sistemáticos no ano de 2018 que resultaram no fornecimento de dados para esta pesquisa.

### **3.4.2 Campanhas de imageamento com Sistema RPA**

#### **3.4.2.1 Planejamento e execução de sobrevoos**

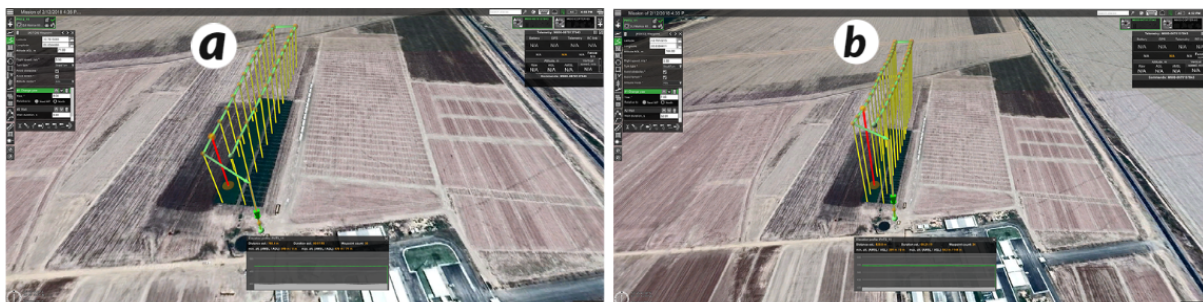
As plataformas dos RPAs utilizadas neste estudo foram controladas por meio do programa de controle de sobrevoos UGCS (Unmanned Ground Control Software, 2017). Esse software permitiu a definição precisa das trajetórias de voo, velocidade e elevação das plataformas (Figura 15).

No entanto, é importante ressaltar que algumas imagens coletadas foram afetadas pela presença de sombras de nuvens, devido a condições climáticas desfavoráveis. Essa interferência foi mitigada pela quantidade significativa de aquisições realizadas ao longo do período de estudo. No entanto, para garantir resultados estatisticamente robustos e representativos, é fundamental evitar a presença de nuvens durante as aquisições, especialmente ao analisar informações relacionadas à temperatura das plantas.

Com o objetivo de minimizar possíveis efeitos de sombreamento entre as plantas causados pela inclinação do sol, os sobrevoos foram programados para serem realizados entre as 10h00 e as 14h00, levando em consideração o horário local. Essa faixa de horário foi selecionada para aproveitar a iluminação solar adequada e obter imagens mais claras e nítidas.

No ano de 2018, foram estabelecidos horários específicos para os sobrevoos com os diferentes sensores. O sensor multiespectral foi operado por volta das 10h00 da manhã, enquanto o sensor termográfico foi utilizado por volta do meio-dia. No entanto, devido a alguns contratemplos, como problemas de configuração que afetaram a decolagem das plataformas, alguns voos foram atrasados e realizados até as 14h00. Ressalta-se que cada resolução espacial (GSD) foi mapeada em um voo independente, garantindo a precisão e a qualidade dos dados obtidos.

**Figura 15** - Planos de voo: (a) Sensor Termal - GSD 20 cm ; (b) Sensor Multiespectral - GSD 5 cm.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os planos de voo foram cuidadosamente elaborados, considerando diferentes resoluções espaciais para o sensor termográfico, incluindo 5, 10 e 20 cm de GSD. Por sua vez, o sensor multiespectral manteve uma resolução espacial constante de 5 cm. Essas variações na resolução espacial permitiram capturar detalhes específicos do dossel vegetal e obter informações mais precisas sobre as características espectrais e térmicas das plantas.

É importante mencionar algumas limitações e considerações específicas dos equipamentos utilizados. O sensor termográfico, devido às suas configurações e funcionalidades, apresenta um desafio em relação ao pré-processamento automatizado, especialmente na etapa de mosaico das imagens. Além disso, a ausência de capacidade de georreferenciamento durante o voo demanda a necessidade de um registro manual das imagens. O sensor Flir T420, embora tenha

vido adaptado para uso em RPAs, possui uma resolução de câmera relativamente baixa (320 x 240 pixels), limitando a obtenção de imagens de alta resolução espacial da área de estudo.

Por outro lado, o sensor multiespectral da marca MicaSense, modelo RedEdge, oferece uma resolução mais alta de 1280 x 960 pixels, permitindo uma maior riqueza de detalhes espectrais. Quanto às plataformas utilizadas, as versões Matrice 600 e 600-PRO da marca DJI se destacam por sua capacidade de carga de até 5,5 kg e pela autonomia de voo de aproximadamente 20 a 25 minutos, garantindo um desempenho satisfatório durante as coletas de dados.

### 3.4.2.2 Campanhas de Campo

Ao longo de 2018 foram realizadas muitas campanhas de campo, conforme pode ser visualizado sucintamente na tabela 3.

**Tabela 3:** Campanhas de campo realizadas

<i>Aquisição dados SR</i>	<i>N° Campos</i>	<i>Sobrevoos</i>	<i>Multiespectral</i>	<i>Termal</i>				
				<i>Total</i>	<i>5 cm</i>	<i>10 cm</i>	<i>15 cm</i>	<i>20 cm</i>
<i>2018</i>	<i>5</i>	<i>17</i>	<i>6</i>	<i>11</i>	<i>2</i>	<i>7</i>	<i>0</i>	<i>2</i>

**Tabela 4:** Campanhas de campo realizadas

<i>CAMPO</i>	<i>DATA</i>	<i>SENSOR</i>	<i>GSD (cm)</i>
<i>1</i>	<i>10/03/2018</i>	<i>Termal</i>	<i>10</i>
	<i>10/03/2018</i>	<i>Multiespectral</i>	<i>5</i>
	<i>11/03/2018</i>	<i>Termal</i>	<i>10</i>
<i>2</i>	<i>09/05/2018</i>	<i>Termal</i>	<i>10</i>
	<i>09/05/2018</i>	<i>Termal</i>	<i>20</i>
	<i>11/05/2018</i>	<i>Multiespectral</i>	<i>5</i>
<i>3</i>	<i>12/06/2018</i>	<i>Termal</i>	<i>10</i>
	<i>12/06/2018</i>	<i>Termal</i>	<i>20</i>
	<i>12/06/2018</i>	<i>Multiespectral</i>	<i>5</i>
	<i>13/06/2018</i>	<i>Termal</i>	<i>10</i>
	<i>13/06/2018</i>	<i>Multiespectral</i>	<i>5</i>
<i>4</i>	<i>29/06/2018</i>	<i>Termal</i>	<i>5</i>
	<i>29/06/2018</i>	<i>Termal</i>	<i>10</i>
	<i>30/06/2018</i>	<i>Termal</i>	<i>5</i>
	<i>30/06/2018</i>	<i>Termal</i>	<i>10</i>
	<i>30/06/2018</i>	<i>Multiespectral</i>	<i>5</i>

Na área do experimento, as datas foram definidas a partir de um planejamento em conjunto com pesquisadores do IMA. Para isso, foram realizadas reuniões, geralmente entre os meses de dezembro e janeiro, com o intuito de ajustar os arranjos experimentais das cultivares, caso fosse necessário, e também para definir as possíveis datas de campanhas de campo.

Conforme pode ser observado na coluna GSD (cm) da Tabela 4, as imagens termográficas no ano de 2018 tiveram uma maior resolução espacial, inclusive, há um voo, do dia 26/06/2018, que proporcionou imagens termográficas com 5 cm de GSD. Entretanto, não foi viável dar continuidade na aquisição com esta resolução, porque houve “buracos” no imageamento. Ou seja, algumas áreas dentro do experimento ficaram sem registro do sensor. Deste modo, ainda nesse mesmo ano, a resolução que foi priorizada foi a de 10 cm para imagens termográficas.

De modo geral, o sensor termográfico deu maior trabalho para a aquisição das imagens, isso se deve a sua maior complexidade. Além dos fatores limitantes da configuração da câmera, a cobertura de nuvens na área de estudo foi um dos maiores desafios a ser superado nessas campanhas.

Com o sensor multiespectral as aquisições foram relativamente mais “tranquilas”, pois não houve dificuldades de aquisição com cobertura de nuvens, visto que os sobrevoos eram realizados por volta das 10h00 da manhã e as campanhas realizadas em meses, que na área de estudo, estavam fora do período chuvoso.

### **3.4.3. Levantamentos topográficos**

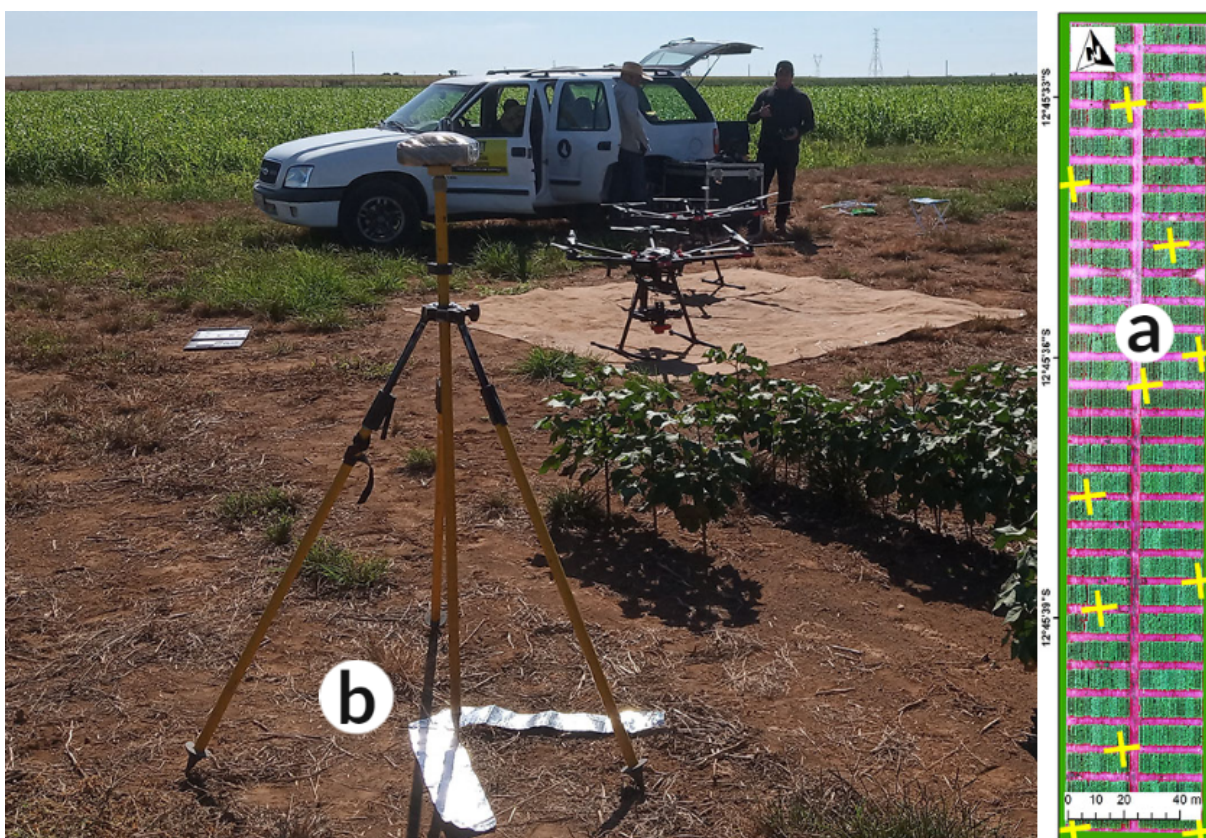
Com o intuito de espacializar e organizar os dados em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), foi realizado um conjunto de coleta de informações para suportar esse propósito. Entre esses dados, destaca-se a implantação de alvos pré-sinalizados e a coleta de Precisas de Pontos de Controle (GCP, do inglês Ground Control Points) nesses alvos utilizando receptores GNSS Geodésicos. Essa coleta foi essencial não apenas para implementar o SIG por meio de dados vetoriais, mas também para a correção geométrica e registro das imagens geradas pelo sistema RPA.

Conforme mencionado anteriormente, esses pontos foram previamente distribuídos e sinalizados em toda a área (Figura 16a) com o objetivo de realizar a pós-verificação da precisão e correção dos ortomosaicos produzidos pelas plataformas aéreas. Para atender às demandas dos sensores multiespectral e termal, foi elaborado e adaptado um tipo alternativo de alvo pré-sinalizado com base em modelos sugeridos por Wolf (2004).

O objetivo foi garantir uma boa reflexão para as faixas do sensor óptico, além de proporcionar um contraste de temperatura adequado para o sensor termográfico, facilitando a visualização e registro das imagens. O material ideal encontrado para atender a essa necessidade específica foi um produto utilizado na construção civil como isolante térmico. Esse material possui uma face duplamente aluminizada, o que impede a transmissão de calor e reflete mais de 95% da radiação incidente (Figura 17).

A manta foi fixada no solo em forma de V (Figura 16b), com um piquete de madeira de 3x3 cm exatamente no vértice interno do alvo. Cada alvo fixado foi dimensionado com três vezes mais tamanho do que o pixel pretendido, levando em consideração a resolução espacial (GSD) desejada.

**Figura 16** - Alvos fixados no solo (a); ponto de controle fixado com material reflexivo com GNSS Geodésico adquirindo coordenadas (b).

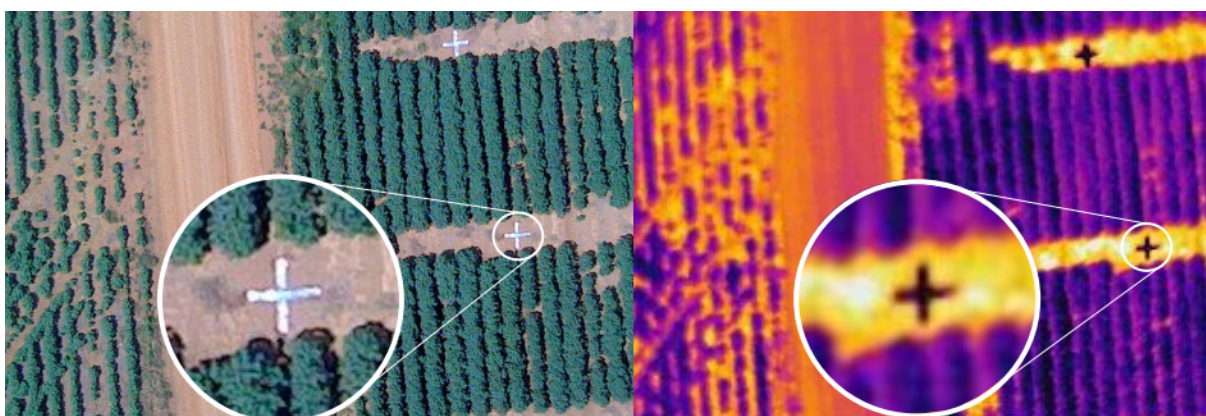


Fonte: Elaborada pelo autor

Para obter as coordenadas, foram utilizados pares de receptores GNSS Geodésicos, como os modelos Topcon HiPer II e Prexiso G4/G5. As coordenadas de

base foram determinadas por meio do método PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), utilizando uma estação de monitoramento contínuo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O tempo de ocupação da base variou de 6 a 8 horas para cada campanha de campo que envolvia a coleta de pontos com GNSS. O tempo de coleta com o Rover em cada ponto foi de, no mínimo, 10 minutos.

**Figura 17** - Alvo constituído de material reflexivo para visualização nas imagens termográficas.



Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.4.3 Pré-processamento dos imageamentos e implementação de SIG

#### 3.4.3.1 Correção geométrica e mosaicagem das Imagens multiespectrais e térmicas

Esta etapa inclui procedimentos de processamento das imagens para correções geométricas (para imagens multiespectrais e termal) e radiométricas (para imagens multiespectrais). Com isso, buscou-se evitar conclusões errôneas na comparação de séries temporais de imagens (influência das condições atmosféricas e ângulos de visada sobre a reflectância espectral da cultura agrícola).

Apesar de possuir sistema eletrônico de compensação na base das câmeras, a relativa instabilidade do RPA multirrotor (instabilidade por rajadas de vento) pode causar distorções geométricas e radiométricas nas imagens multiespectrais e termais.

As correções geométricas foram realizadas a partir de coordenadas, com uso de GNSS geodésico, em pontos de controle adquiridos *in loco*. Sendo assim, foram

feitos os registros (georreferenciamento) das imagens e projetadas no sistema de projeção plana, neste caso, Projeção *UTM* Fuso 21S, com *Datum* Sirgas 2000.

### 3.4.3.2 Pré-processamento radiométrico e Índices Espectrais

#### 3.4.3.2.1 Pré processamento radiométrico das imagens multiespectrais

Após a coleta de dados em campo, foi realizada uma seleção manual das imagens das 5 bandas da câmera Micasense/RedEdge (MICASENSE, 2021) para descartar imagens com distorção visual e com cobertura de nuvens.

Posteriormente, fez-se a inserção das imagens no programa de aerofotogrametria *Pix4D Mapper* (PIX4D, 2021). Como já mencionado no item anterior, foi definido o sistema de projeção cartográfico para SIRGAS 2000 21S.

Em seguida, foram utilizadas as imagens do *Calibrated Reflectance Panel* (CRP – em português Painel Calibrador de Refletância) para correção radiométrica e calibração das imagens de cada banda, conforme a figura 18.

**Figura 18** - Imagem coletada do *Calibrated Reflectance Panel*.



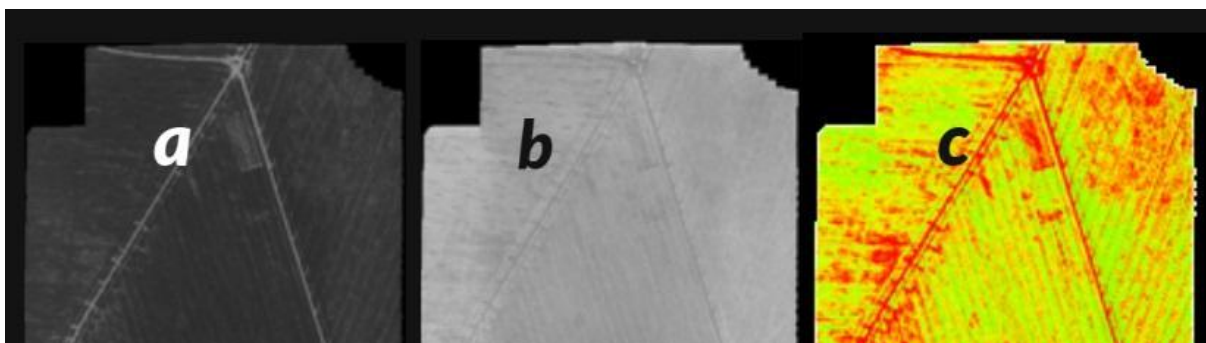
**Fonte:** Elaborada pelo autor

Além de selecionar as regiões do CRP da figura 14, foram inseridos os valores de reflectância média do painel de cada banda: Azul = 0,57; Verde = 0,57; Vermelho = 0,56; NIR = 0,50 e RedEdge = 0,55. Também foi utilizada a informação do sensor de irradiação solar integrado à RedEdge para complementar a correção radiométrica. Antes de iniciar o processamento, são inseridos os pontos de controle com correção centimétrica por PPK.

O processamento do *Pix4D Map* foi dividido em 3 fases: (i) Processamento Inicial; (ii) Nuvem de Pontos e Mesh e; (III) Modelo Digital do Terreno, Ortomosaico e Índices de Vegetação. Primeiramente, realizou-se a fase (i) para indexar as imagens

das bandas aos pontos de controle. Após obter um mosaico prévio com correção geométrica adequada em escala centimétrica, iniciou-se o processamento da fase (ii) e (iii) com índices espectrais de vegetação (Fig. 19).

**Figura 19** - Exemplo de ortomosaico da Banda 3 – Vermelho (a), da Banda 4 – NIR (b) e do NDVI (c).



**Fonte:** Elaborada pelo autor

Foram calculados e comparados, de acordo com a sua capacidade na identificação do estresse hídrico, três Índices Espectrais de Vegetação:

- Normalized difference vegetation index (NDVI) (Tucker, 1979):  

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$
- Normalized difference red edge index (NDRE) (Herrmann *et al.*, 2010)  

$$\text{NDRE} = (\text{NIR} - \text{RE}) / (\text{NIR} + \text{RE})$$
- Normalized Difference Water Index (NDWI) (GAO, 1996)  

$$\text{NDWI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

Onde:

NIR - Refletância na faixa do infravermelho próximo

RED - Refletância na faixa do vermelho

RE - Refletância na faixa da borda vermelha

SWIR - Refletância na faixa do infravermelho de ondas curtas

### 3.4.3.2.2 Pré-processamento dados termográficos

Para os dados de termografia, depois da aquisição das imagens com sobrevoos, os procedimentos de pré-processamento foram realizados em etapas, tais como: (i) análise visual e seleção; (ii) conversão de formato de arquivo; (iii) georreferenciamento (registro) e o mosaicamento das imagens.

Primeiramente, utilizou-se o *software* FLIR *Tools*, versão 5.13 (FLIR, 2016), para visualizar e analisar a qualidade das imagens, selecionando as melhores para as próximas etapas. A versão gratuita do Flir *Tools*, que foi utilizada, somente permite a visualização das imagens, portanto, não possibilita a exportação dos dados no formato que seria necessário para trabalhar posteriormente, no caso, o *geotiff*.

Para converter os dados do formato nativo (Flir) para o formato *geotiff*, utilizou-se o programa de SIG *Arcgis*. Após este procedimento, com o mesmo *software* (*ArcMap*) (ESRI, 2015) foi realizado o registro das imagens (georreferenciamento).

Dependendo da resolução espacial das imagens, neste caso, com as termográficas, a partir de GSD 15 cm, foi possível realizar mais um procedimento, o mosaicamento através do *Pix4D Map*. Este processo permite realizar a junção das imagens capturadas por enquadramento e “transformá-la” numa imagem (ou cena) de toda a área, gerando assim, um produto que otimiza os processamentos seguintes, especialmente no que tange à celeridade.

Como se observa de modo geral, os dados de termografia são mais complexos para trabalhar, se comparados aos dados multiespectrais. Isso é resultado da configuração do sensor utilizado nesta pesquisa. Entretanto, implementou-se um sistema de procedimento híbrido, mais célere e confiável. Ainda assim, existe um conjunto de dados termográficos (os com resolução espacial de 10 e 5 cm) que deve ser processado manualmente.

A estimativa do status hídrico de cultivares a partir de SR Termal é comumente conduzida a partir da utilização do índice de estresse hídrico (*Crop Water Stress Index - CWSI*), que é uma fração da temperatura do dossel entre linhas de base seca (superior) e úmida (inferior) sob condições ambientais (COHEN *et al.*, 2015) (Eq. 1):

$$CWSI = \frac{T_{canopy} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}}$$

onde  $T_{canopy}$  é a temperatura do dossel estimado por imageamento térmico,  $T_{wet}$  é a temperatura de uma folha em estado de transpiração plena e  $T_{dry}$  a temperatura de uma folha sem transpiração.

De acordo com as recomendações de Cohen *et al.* (2015),  $T_{wet}$  foi estimado a partir da média dos 5% de pixels mais frios da respectiva imagem e  $T_{dry}$  a partir da temperatura do ar + 5°C durante o sobrevoo. Os dados da temperatura do ar foram obtidos da grade global de Reanálise MERRA-2 (M2I1NXLFO) da área do experimento, disponível pelo portal <<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>>.

### 3.4.3.3 Implementação do SIG

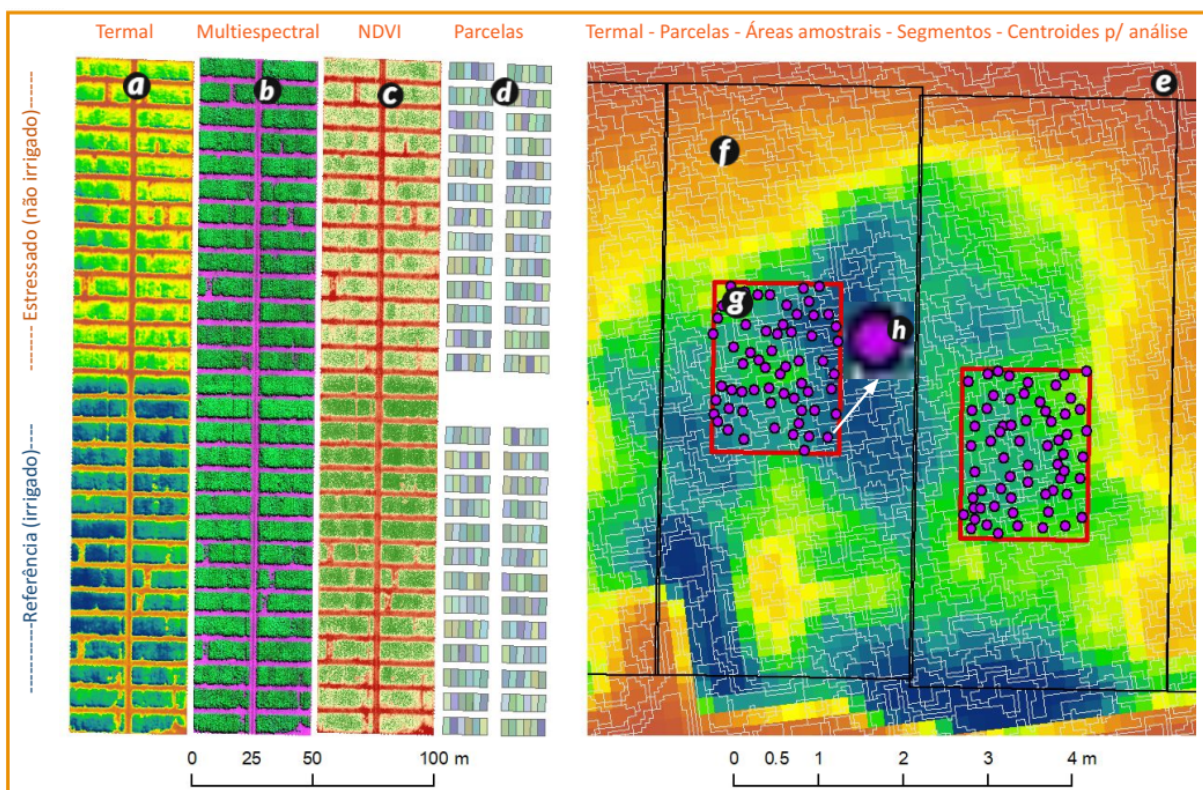
A necessidade de implementar um ambiente de sistema de informação geográfico foi devido ao grande volume e diversidade de dados e informações, contidas e/ou associadas ao experimento. Imerso ao volume de dados e informações, estão os de própria aquisição por SR (imagens multiespectrais e termais) e de outros aspectos, tais como, físicos (umidade, infiltração, meteorológico, entre outros) e agrônômicos (número de variedade de plantas e suas características, produtividade). Além de informações associadas às métricas e a caracterização do experimento, existem informações relevantes que podem auxiliar na compreensão do monitoramento.

Sendo assim, sabendo da necessidade de implementar um SIG, a efetivação do mesmo foi realizada com auxílio da ferramenta *software* ArcGis. Desta maneira, os dados primários ou informações foram transformados em dados de estrutura matricial e/ou vetorial, para serem processados, analisados e propiciar a extração de informações para uma melhor compreensão do fenômeno de estresse hídrico.

A Figura 20 demonstra de forma exemplar os dados de entrada pré-processados (mosaicados) e a sequência do seu processamento num ambiente SIG, onde: (a) e (b) são dados matriciais, ou seja, imagens oriundas de sensor termográfico e multiespectral, respectivamente; (c) é um produto oriundo das bandas vermelho e infravermelho, o NDVI; em (d) tem-se um arquivo vetorial com

informações associadas (atributos) por cada parcela do experimento; (e) é a parcela que já foi melhor descrita no item 3.4.3.2 e, em cores claras, uma segmentação por crescimento de regiões. Por fim em (f) tem-se o recorte amostral para colheita da pluma e a extração dos valores espectrais, para posterior avaliação estatística.

**Figura 20** - Implementação de SIG.



Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.5 INTERPRETAÇÕES DAS IMAGENS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS

#### 3.5.1 Segmentação e extração de assinaturas espectrais

Análises estatísticas exploratórias e de inferência, como efetuadas neste estudo, partem do pressuposto da independência das amostras. É conhecimento consolidado que isso não pode ser assumido para pixels adjacentes de imagens de SR. Desta forma, foi efetuada, para cada conjunto de imagem multiespectral e termal de uma determinada campanha, uma segmentação prévia e extraídos os valores espectrais do centróide de cada segmento para futura análise das assinaturas

multiespectrais e termiais. Nas duas áreas de estudo, as segmentações foram conduzidas a partir do NDVI da primeira imagem considerada em cada ano/ciclo, utilizando o módulo de segmentação do software ArcMap após testes empíricos extensivos, como liminares 10 para o detalhamento espectral (*spectral detail*), 20 para o detalhamento espacial (*spatial detail*) e um número de n pixels como tamanho mínimo de cada segmento.

Conforme descrito no item 3.3.1.5, para análise da produtividade por variedade em condições sem e com estresse hídrico, no fim de cada ciclo do cultivo, foram colhidas as plumas dentro de cada parcela. Porém, nesse procedimento *in situ*, não foram amostradas as parcelas completas, mais subáreas, consideradas as mais representativas dentro das respectivas parcelas (Fig. 11). Assim, foram utilizados somente os segmentos dessas áreas amostrais (Fig. 20g).

Para incluir nas análises estatísticas somente segmentos com cobertura vegetal completa e excluir interferências de eventuais efeitos de sombreamento ou clareiras no plantio, foram considerados somente os segmentos que tiveram no primeiro imageamento valores do NDVI acima de 0,74 (09/05/2018).

### **3.5.2. Análise da separabilidade espectral de parcelas irrigadas e não-irrigadas**

Após a extração das assinaturas espectrais dos segmentos de cada variedade de algodão, os dados foram organizados em uma planilha eletrônica e associados a informações obtidas por meio de trabalhos de campo, como a produtividade da parcela, bem como outros atributos relevantes para a caracterização das amostras, incluindo a condição de irrigação (irrigado ou não-irrigado) e o número da parcela.

Para investigar a separabilidade espectral entre os segmentos irrigados e não irrigados das 39 variedades de algodão, foram utilizados os índices espectrais CWSI (Crop Water Stress Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDRE (Normalized Difference Red Edge) e NDWI (Normalized Difference Water Index). Esses índices são indicadores sensíveis às condições de estresse hídrico nas plantas, refletindo mudanças na absorção e refletância da radiação eletromagnética pelos tecidos vegetais. Dessa forma, eles fornecem informações valiosas sobre o estado hídrico das plantas de algodão.

A análise exploratória da separabilidade entre os segmentos irrigados e não irrigados foi conduzida por meio de boxplots. Essa análise permitiu visualizar as diferenças nas distribuições dos índices espectrais entre os segmentos de cada variedade, facilitando uma avaliação preliminar da capacidade dos índices em discriminar o estresse hídrico nas amostras de algodão. Com base nos boxplots, foi possível identificar padrões de comportamento dos índices espectrais para os segmentos irrigados e não irrigados, evidenciando possíveis diferenças significativas entre as condições de irrigação.

Além disso, foram desenvolvidos modelos de regressão logística para quantificar de forma mais precisa o desempenho na separação dos segmentos irrigados e não irrigados em datas representativas. A regressão logística é uma técnica estatística amplamente utilizada para modelar a probabilidade de ocorrência de um evento binário, como a classificação de um segmento como irrigado ou não irrigado. Neste estudo, a variável dependente foi codificada como "0" para segmentos irrigados e "1" para segmentos não irrigados.

A regressão logística permitiu estimar os parâmetros do modelo que relacionam os índices espectrais às probabilidades de um segmento ser classificado como irrigado ou não irrigado. A probabilidade de um segmento estar sob estresse hídrico foi calculada usando a seguinte equação matemática:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-A}}$$

em que P representa a probabilidade do evento (estresse hídrico), "e" é a constante de Euler (aproximadamente igual a 2,71) e A é uma função linear composta por uma constante e os índices espectrais multiplicados por seus coeficientes correspondentes. Essa abordagem permite estimar a probabilidade de cada segmento estar sob estresse hídrico com base em suas características espectrais.

Considerando que diferentes variedades de algodão podem responder de maneira distinta ao estresse hídrico, foram utilizados modelos de regressão logística aninhada (Nested Logistic Regression). Esses modelos incorporam uma codificação numérica específica para cada variedade, permitindo a incorporação da variação intrínseca das variedades no processo de classificação. Dessa forma, a análise se torna mais refinada e ajustada às características individuais de cada variedade, aprimorando a capacidade de separação entre segmentos irrigados e não irrigados.

A análise de regressão logística aninhada permitiu avaliar como as diferentes combinações dos índices espectrais influenciaram a probabilidade de um segmento ser classificado como irrigado ou não irrigado. Ao ajustar os coeficientes do modelo, foi possível quantificar o impacto de cada índice espectral na separação entre as classes. Os resultados obtidos forneceram informações sobre a relevância relativa dos índices espectrais para a discriminação do estresse hídrico nas diferentes variedades de algodão.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS-CLIMÁTICAS, EDÁFICAS, DESENVOLVIMENTO FENOLÓGICO E ESTRESSE HÍDRICO

A organização e compilação de dados meteorológicos, climáticos e pedológicos, tanto primários quanto secundários, desempenham um papel fundamental na compreensão das respostas espectrais obtidas por meio do monitoramento por sensoriamento remoto (SR) e na avaliação da separabilidade entre cultivos irrigados e não-irrigados em condições de estresse hídrico. Neste contexto, este item tem como objetivo ampliar a compreensão dos fenômenos que podem influenciar os resultados do experimento em questão.

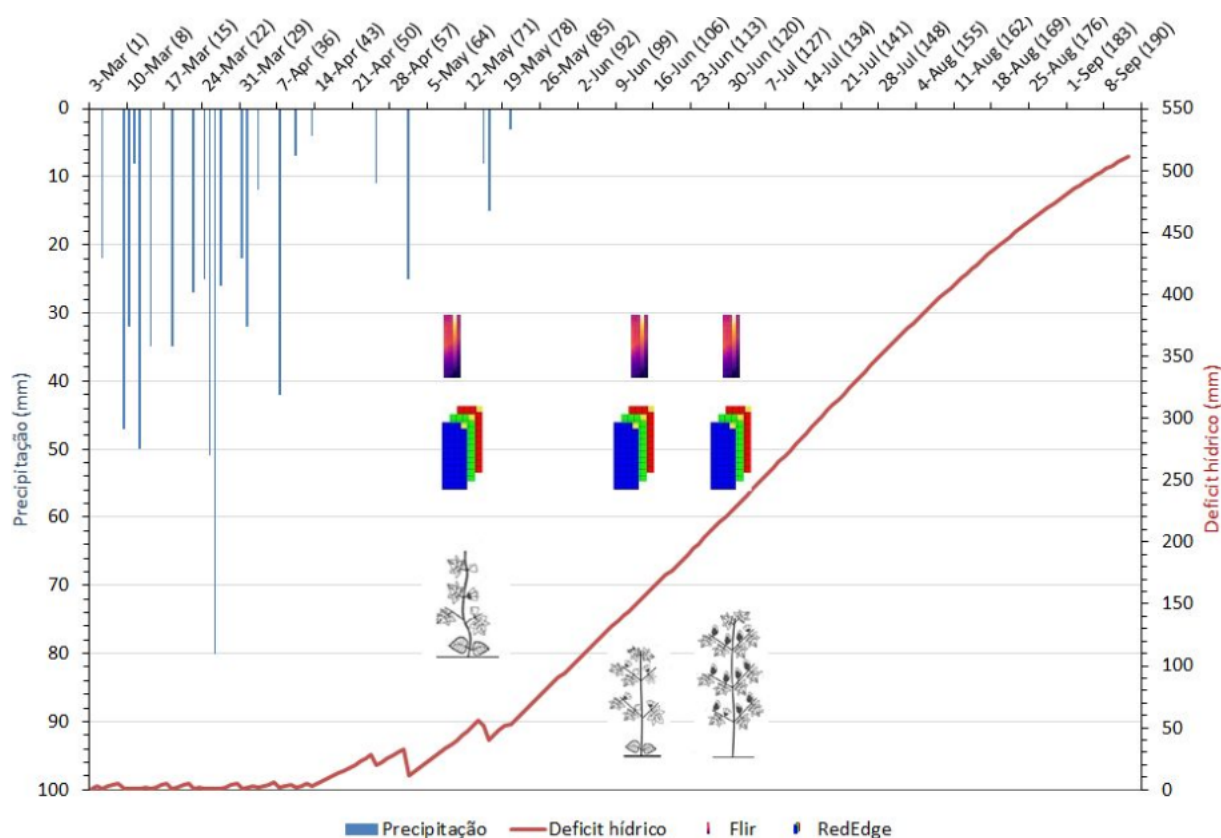
A figura 21, resultado de uma modelagem utilizando o programa cropwat (FAO, 2021b), fornece uma visão panorâmica que auxilia na compreensão básica da interação entre os fenômenos bióticos e abióticos do experimento. No eixo x, são apresentados intervalos de dias/mês, e entre parênteses, o número de dias após a semeadura. Os dados de precipitação e deficiência hídrica são representados nos eixos y, à esquerda e à direita, respectivamente, em milímetros. Em datas estratégicas, estão representadas três barras na cor roxa, que indicam as datas dos sobrevoos com câmera termográfica. Logo abaixo, há três conjuntos de três barras nas cores azul, verde e vermelho, simbolizando o imageamento multiespectral. Na parte inferior da figura, há três ilustrações de pés de algodão, representando o plantio monitorado por SR.

Ao analisar os dados de precipitação na figura 21, é possível observar que ocorreram episódios meteorológicos não previstos após a primeira campanha de campo (realizada de 9 a 11 de maio). Foram registradas chuvas nos dias 15, 16 e 20 de maio, com volumes de 8 mm, 15 mm e 3 mm, respectivamente. Esses eventos climáticos afetaram o cronograma do experimento e podem comprometer o monitoramento, uma vez que o estresse hídrico pode ser reduzido ou até mesmo comprometido devido à disponibilidade de água proveniente das chuvas. Para ilustrar melhor, o corte da irrigação ocorreu em 20 de maio, no entanto, três dias depois, ocorreu a última chuva mencionada anteriormente, conforme pode ser observado na figura abaixo. Em decorrência desse episódio, a retomada da irrigação

(conforme Tabela 1) só ocorreu em 20 de junho, 28 dias após a ocorrência da última chuva.

Essas informações são relevantes para compreender a dinâmica do estresse hídrico ao longo do experimento e ressaltam a importância de considerar fatores meteorológicos imprevistos que podem afetar as condições de cultivo e, conseqüentemente, os resultados obtidos por meio do monitoramento por sensoriamento remoto.

**Figura 21** - Condições meteorológicas-climáticas e os sobrevoos no experimento do ano de 2018.

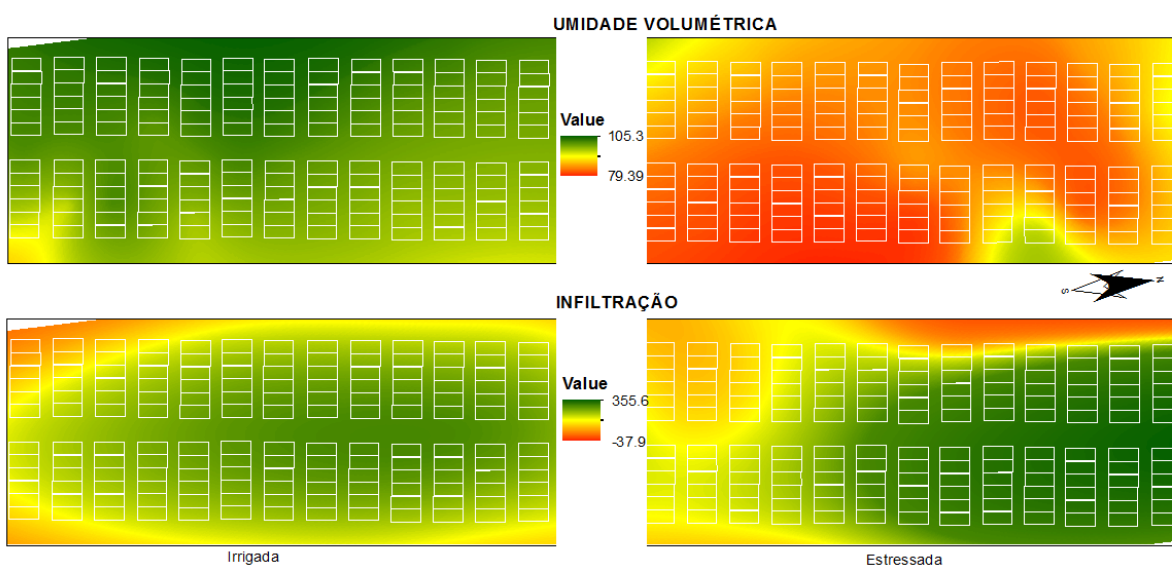


**Fonte:** Elaborada pelo autor

Durante o período de 12 a 15 de junho de 2018, foi realizada a coleta de amostras indeformadas de solo, que posteriormente foram espacializadas e apresentadas na figura 22 como umidade volumétrica. Nesse momento, a parte da área experimental submetida ao estresse hídrico estava sem água há 20 dias, tanto proveniente de chuvas quanto de irrigação. Houve uma chuva no dia 20 de maio, com um volume de apenas 3 mm, e cerca de 4 dias antes dessa data, ocorreu uma

chuva mais expressiva de aproximadamente 23 mm. No entanto, mesmo com essas chuvas, é possível observar na figura 22, especificamente na representação da umidade volumétrica, uma distinção entre os dois grandes blocos. O lado esquerdo, correspondente à área com irrigação, apresenta valores de umidade volumétrica superiores em comparação ao lado direito, que estava sob condições de estresse hídrico.

**Figura 22** - Condições pedo-hidrológicas no experimento do ano de 2018.



**Fonte:** Elaborada pelo autor

No entanto, mesmo com essa distinção visual clara da umidade no nível macro, uma análise mais detalhada e em escala ampliada revela a presença de locais pontuais com baixa umidade na área irrigada, assim como locais pontuais na área estressada com valores de umidade consideráveis. Isso indica uma falta de homogeneidade na distribuição da umidade no solo. Essa heterogeneidade na umidade do solo pode ter impacto nas respostas espectrais, como índices de vegetação e temperatura, resultando em aparentes inconsistências nos dados. No entanto, essas diferenças podem ser atribuídas às características distintas de umidade volumétrica presentes no solo em diferentes locais da área experimental.

Essas observações ressaltam a importância de considerar a variabilidade espacial da umidade do solo ao analisar as respostas espectrais obtidas por meio do sensoriamento remoto. A presença de pontos com diferentes níveis de umidade no solo pode influenciar as medições de índices de vegetação e temperatura, levando a resultados aparentemente inconsistentes. Portanto, é fundamental levar em conta a

heterogeneidade do solo ao interpretar e analisar os dados espectrais, a fim de obter uma compreensão mais precisa e confiável das condições de estresse hídrico e suas consequências na vegetação monitorada.

Na figura 22, também é importante destacar a informação relacionada à infiltração do solo, pois ela desempenha um papel relevante na compreensão dos dados de sensoriamento remoto (SR). Observa-se que a infiltração não é homogênea em toda a área experimental, mas apresenta um padrão distinto. Nas bordas da área, aparentemente, os valores de infiltração são menores, enquanto nas áreas centrais, em ambos os blocos, os valores são maiores.

Esses dados de infiltração do solo são relevantes para auxiliar na compreensão do fenômeno do estresse hídrico no cultivo de algodão. Eles ajudam a contextualizar possíveis inconsistências e discrepâncias observadas nas parcelas das diferentes variedades. Vale ressaltar que cada tratamento (variedade) do experimento possui quatro parcelas em cada bloco, distribuídas aleatoriamente. Portanto, é possível que uma mesma variedade tenha parcelas localizadas em áreas com baixa e alta infiltração do solo, o que pode influenciar o comportamento fisiológico das plantas.

Essas variações na infiltração do solo dentro da área experimental podem resultar em diferentes disponibilidades de água para as plantas, o que afeta diretamente o desenvolvimento vegetativo e, conseqüentemente, as respostas espectrais observadas nas parcelas das variedades. Ao considerar a distribuição heterogênea da infiltração do solo, é possível obter uma compreensão mais abrangente dos efeitos do estresse hídrico nas plantas de algodão e nas medições de sensoriamento remoto.

Portanto, ao analisar os resultados do experimento e relacioná-los com os produtos de sensoriamento remoto, é fundamental levar em consideração os dados de infiltração do solo. Essas informações permitem uma interpretação mais precisa e confiável das respostas espectrais, levando em conta as variações na disponibilidade de água e as características específicas de cada parcela das variedades de algodão. Essa abordagem aprimorada contribui para uma compreensão mais profunda dos efeitos do estresse hídrico nas plantas e para uma análise mais robusta dos dados de SR, ampliando nosso conhecimento sobre o monitoramento e o manejo adequado do cultivo de algodão em condições de estresse hídrico.

## 4.2 EMISSÃO TÉRMICA E REFLECTÂNCIA ESPECTRAL EM TALHÕES IRRIGADAS E NÃO IRRIGADAS E SUA SEPARABILIDADE

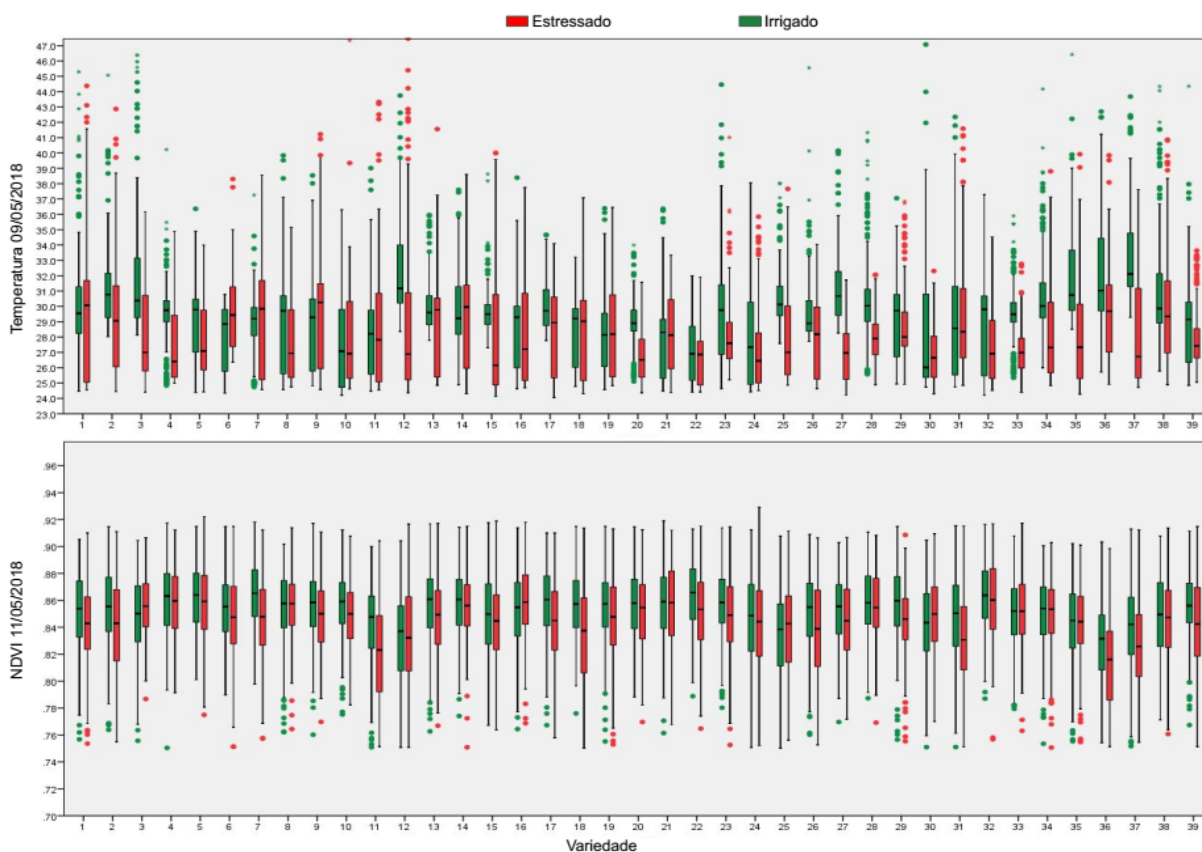
Durante os levantamentos realizados in situ, não foram conduzidas medições de indicadores de estresse hídrico utilizando métodos pedológicos ou em plantas diferenciadas por variedade. Isso significa que as estimativas do grau de estresse, obtidas por meio de imageamento termal para as diferentes variedades, não puderam ser validadas por um conjunto de dados independentes. No entanto, é importante ressaltar que estudos anteriores têm demonstrado a eficiência da emissão térmica como um método para estimar o estresse hídrico em culturas agrícolas.

Ao analisar os dados dos dias 09/05/2018 (imageamento termal) e 11/05/2018 (imageamento multiespectral, NDVI) (Fig. 23), em que havia disponibilidade hídrica consistente no solo, não foram observadas diferenças significativas entre as assinaturas espectrais. As temperaturas nas parcelas variaram de 23°C a 47°C, enquanto os valores do NDVI variaram de 0,70 a 0,96. Esses resultados sugerem que, nessas condições de disponibilidade hídrica, as respostas espectrais das variedades de algodão não apresentaram diferenças significativas.

Ao analisar os dados dos dias 13/06/2018 (imageamento termal) e 12/06/2018 (imageamento multiespectral, NDVI) (Fig. 24), em uma situação de estresse hídrico expressivo, observam-se diferenças significativas entre as assinaturas espectrais. O sinal multiespectral apresenta diferenças estatisticamente robustas, com medianas mais baixas nas parcelas irrigadas, indicando uma resposta mais fraca das plantas nessa condição. Por outro lado, o sinal térmico apresenta uma dispersão mais expressiva, indicando temperaturas mais elevadas nas parcelas não irrigadas, o que é consistente com o estresse hídrico.

No entanto, é importante mencionar que os dados térmicos apresentaram um sinal inferior ao esperado, possivelmente devido a eventos de chuva que ocorreram três dias consecutivos antes do imageamento, acumulando um volume total de 26 mm. Essa precipitação recente pode ter influenciado as temperaturas registradas nas parcelas, diminuindo as diferenças térmicas entre as áreas irrigadas e não irrigadas. Por outro lado, o sinal multiespectral, que é mais influenciado pelo desenvolvimento fenológico das plantas, sofreu pouca interferência desses eventos de precipitação.

**Figura 23** - Signal térmico e multiespectral (NDVI) por variedade. Caixas na cor verde representam parcelas irrigadas e na cor vermelha, área de parcelas estressadas nos dias 09/05/2018 e 11/05/2018.

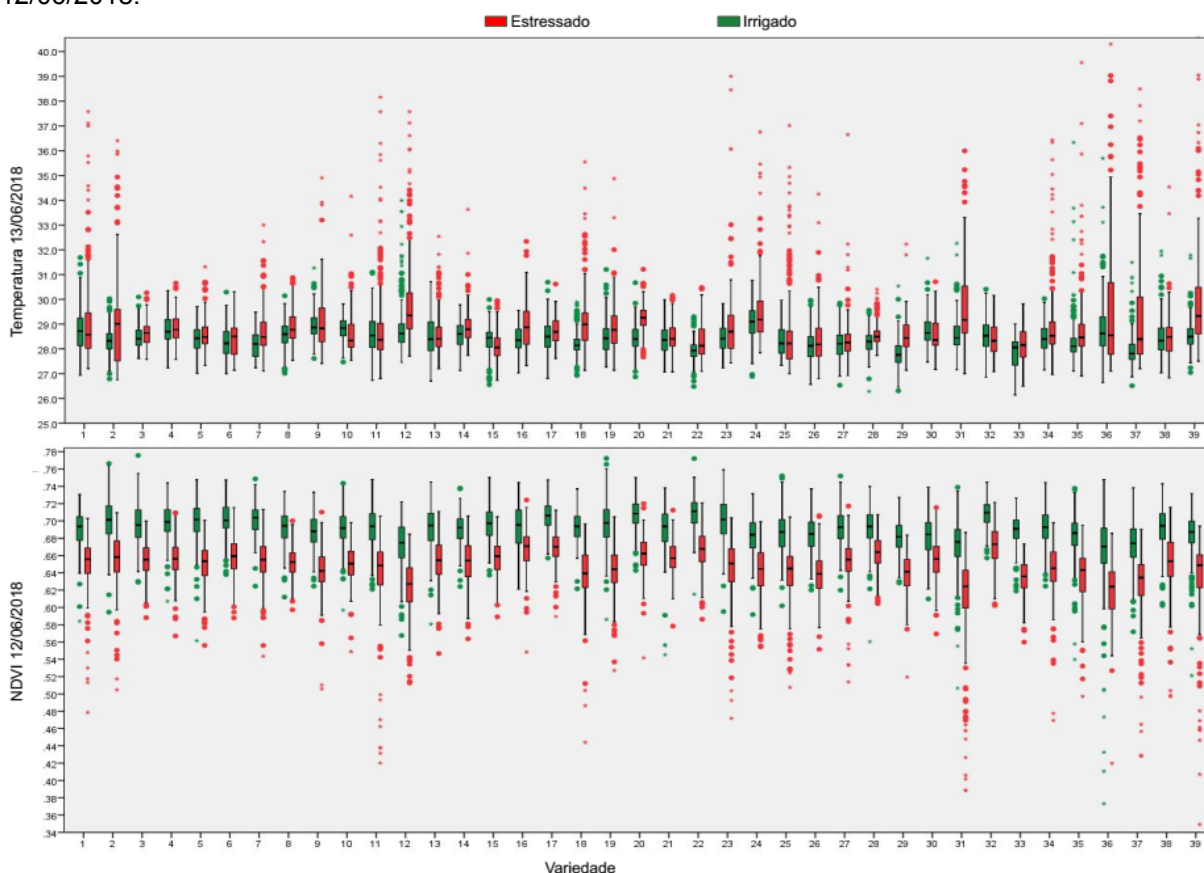


**Fonte:** Elaborada pelo autor

Na fase fenológica de estresse hídrico persistente em 30/06, os sinais térmicos e multiespectrais mostram as tendências esperadas. As medianas da emissão térmica são superiores nas parcelas não-irrigadas, enquanto os valores do NDVI são inferiores (Fig. 25), o que indica um maior estresse hídrico nessas áreas.

No entanto, ao observar a Figura 26, que utiliza o CWSI como índice, percebe-se que não há uma separabilidade consistente entre as áreas com e sem estresse. Algumas variedades, como as de número 03, 08, 24, 27, 28, 30, 33, 34 e 35, apresentam valores de temperatura normalizada por esse índice maiores na área destinada ao estresse. Por outro lado, há variedades como a 07, 09 e 23 que possuem um valor de índice maior atribuído a elas na área destinada ao estresse. Esses resultados podem ser explicados pelo fato de que, no dia 09 de maio de 2018, ainda não havia ocorrido a restrição da irrigação na área, o que causou uma condição de estresse inconsistente.

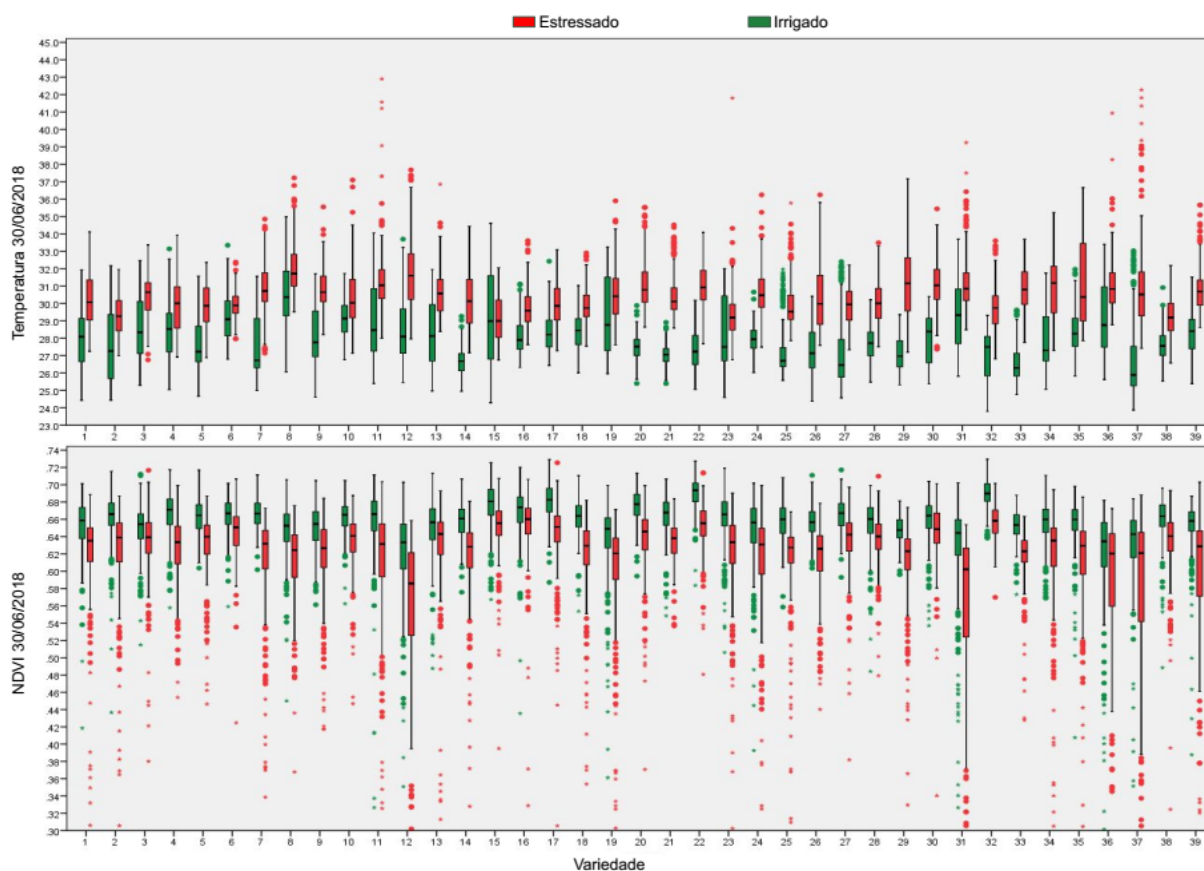
**Figura 24** - Signal térmico e multiespectral (NDVI) por variedade. Caixas na cor verde representam parcelas irrigadas e na cor vermelha, área de parcelas estressadas, nos dias 13/06/2018 e 12/06/2018.



**Fonte:** Elaborada pelo autor

Portanto, pode-se afirmar que esses resultados não satisfazem a necessidade de estabelecer uma separabilidade clara entre as áreas com e sem estresse. É importante ressaltar que, se ambas as áreas tivessem a mesma quantidade de água disponível até aquele momento, seja por meio de precipitação ou irrigação, os resultados poderiam ser mais distintos. No entanto, um sobrevoo realizado nesse momento pode ser oportuno para analisar as discrepâncias nas respostas espectrais. Como mencionado anteriormente, várias parcelas apresentam diferenças significativas em termos de temperatura. Portanto, seria relevante analisar o comportamento dessas variedades em relação a outros levantamentos, como umidade e infiltração no solo, para obter uma compreensão mais completa da situação.

**Figura 25** - Signal térmico e multiespectral (NDVI) por variedade. Caixas na cor verde representam parcelas irrigadas e na cor vermelha, área de parcelas estressadas no dia 30/06/2018.

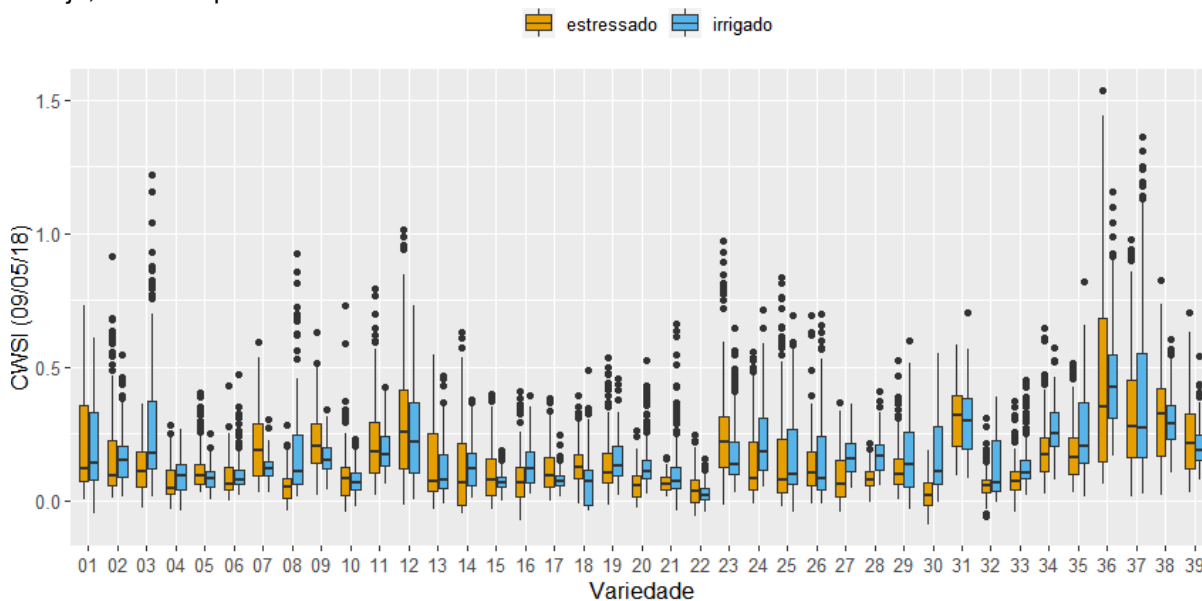


**Fonte:** Elaborada pelo autor

Ao analisar os dados de 2018 nos dias 12 e 30 de junho, fica evidente que houve uma distinção clara entre as áreas com variedades sob estresse hídrico e aquelas que foram mantidas sob irrigação. Comparando os resultados obtidos nessas duas datas, é possível observar uma separabilidade muito mais pronunciada na Figura 28 em relação à Figura 27.

Além disso, vale ressaltar uma característica adicional que pode ser observada entre esses dias e relacionada ao CWSI. Apesar das proporções adequadas, há um certo padrão na separabilidade das variedades. Um exemplo disso são as variedades de 09 a 15, que não mantêm uma dinâmica de comportamento consistente em termos de valores, mas apresentam padrões distintos em sua forma.

**Figura 26** - Índice CWSI por variedade. Caixas na cor azul representam parcelas irrigadas e na cor laranja, áreas de parcelas estressadas no dia 09/05/2018.

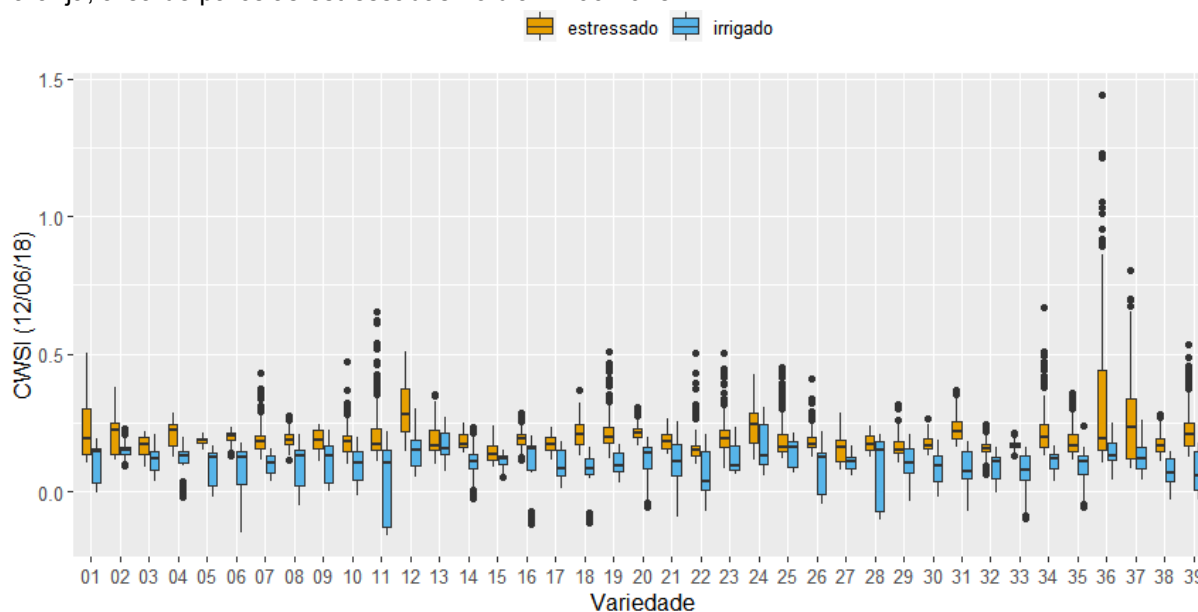


**Fonte:** Elaborada pelo autor

Essas observações reforçam a importância de considerar não apenas os valores numéricos dos índices espectrais, mas também a forma como eles se comportam ao longo do tempo. Essas diferenças na dinâmica de comportamento podem fornecer informações valiosas sobre a resposta das plantas ao estresse hídrico e auxiliar na identificação e caracterização das variedades mais suscetíveis ou resilientes.

Portanto, ao analisar os dados dos dias 12 e 30 de junho, é possível constatar uma separabilidade mais significativa entre as áreas com e sem estresse, além de identificar padrões distintos de comportamento entre as variedades. Essas informações são fundamentais para uma compreensão mais abrangente do impacto do estresse hídrico nas plantas de algodão e podem contribuir para a tomada de decisões e manejo adequado dessas áreas.

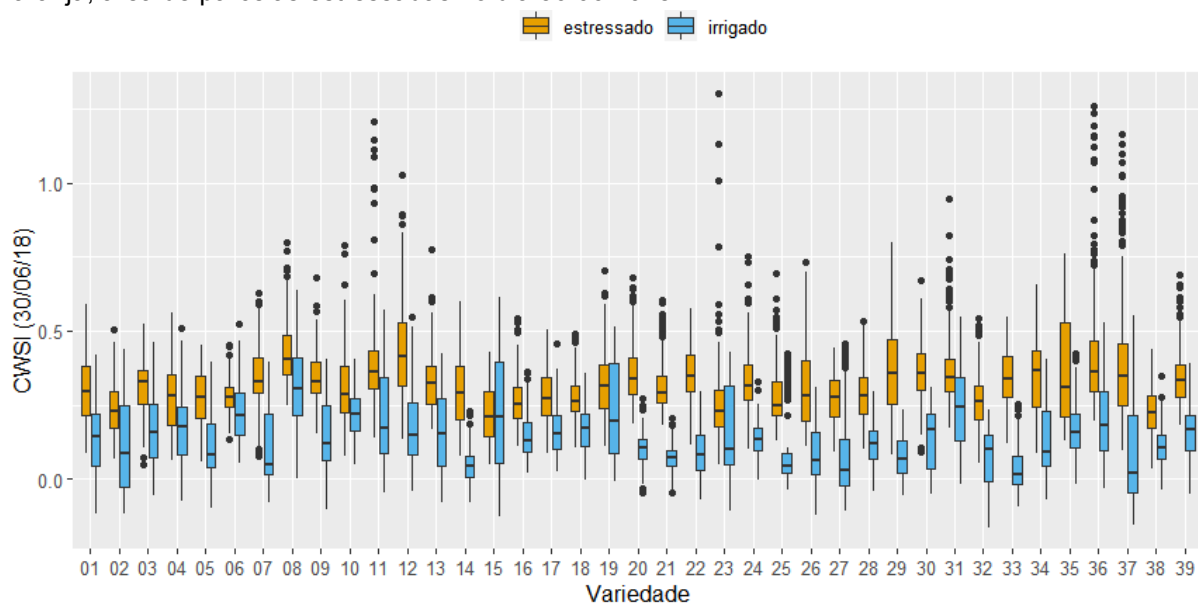
**Figura 27** - Índice CWSI por variedade. Caixas na cor azul representam parcelas irrigadas e na cor laranja, área de parcelas estressadas no dia 12/06/2018.



Fonte: Elaborada pelo autor

Ao analisar o comportamento das variedades, tanto na área de referência quanto na área estressada, é possível observar uma separabilidade entre elas. No entanto, ao considerar os dados dos índices espectrais analisados, como o NDWI apresentado na Figura 29, nota-se que ele não apresenta um desempenho melhor do que o NDVI (Figura 24), CWSI (Figura 27) e NDRE (Figura 30). Essas últimas figuras demonstram uma maior amplitude na diferenciação entre a área irrigada e a área estressada.

**Figura 28** - Índice CWSI por variedade. Caixas na cor azul representam parcelas irrigadas e na cor laranja, área de parcelas estressadas no dia 30/06/2018.



Fonte: Elaborada pelo autor

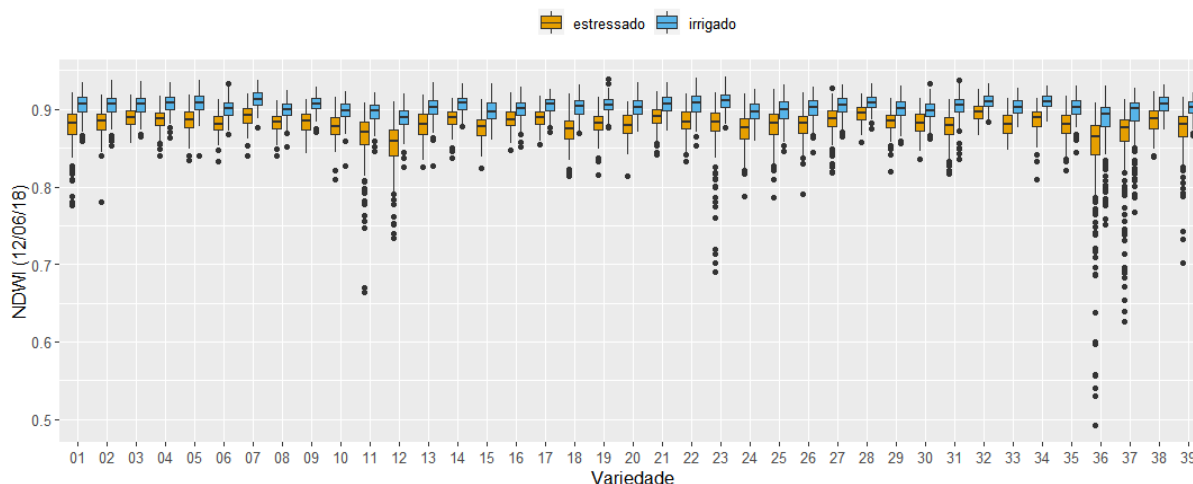
O NDRE, assim como os outros índices espectrais mencionados, mostra uma ótima separabilidade para o conjunto de dados do dia 12/06. Ao observar os boxplots na Figura 30, é possível notar uma consistência e clareza na distinção entre as áreas irrigadas e estressadas.

Esses resultados reforçam a importância de escolher adequadamente os índices espectrais para avaliar o estresse hídrico nas plantas de algodão. Enquanto alguns índices, como o NDVI e o CWSI, demonstram ser mais eficazes na diferenciação das áreas, outros, como o NDWI, podem apresentar resultados menos distintos. Portanto, é essencial considerar a sensibilidade e a capacidade dos índices espectrais em capturar as variações causadas pelo estresse hídrico.

A partir dessas análises, é possível concluir que o NDRE se destaca como um índice que proporciona uma separabilidade clara entre as áreas irrigadas e estressadas no dia 12/06. Essa consistência nos resultados fortalece a confiança na utilização desse índice como uma ferramenta eficaz para avaliar o estresse hídrico em plantações de algodão.

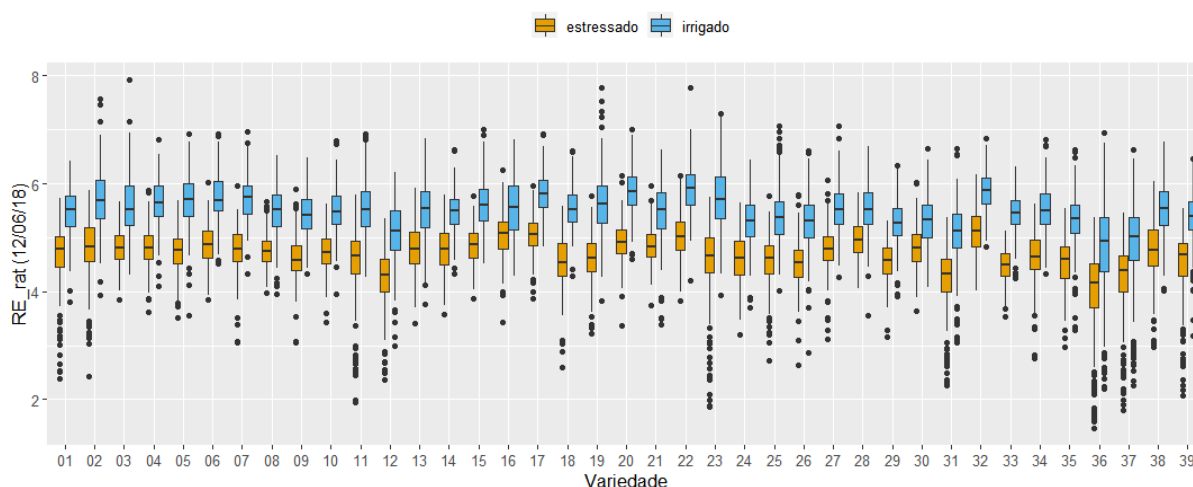
Dessa forma, ao realizar a seleção dos índices espectrais mais adequados para análise, é possível obter informações valiosas sobre a resposta das plantas ao estresse hídrico, contribuindo para a tomada de decisões no manejo das áreas cultivadas e a implementação de estratégias de irrigação mais eficientes.

**Figura 29** - Índice NDWI por variedade. Caixas na cor azul representam parcelas irrigadas e na cor laranja, área de parcelas estressadas no dia 12/06/2018.



**Fonte:** Elaborada pelo autor

**Figura 30** - Índice NDRE por variedade. Caixas na cor azul representam parcelas irrigadas e na cor laranja, área de parcelas estressadas no dia 12/06/2018.



Fonte: Elaborada pelo autor

A seguir, apresentam-se os resultados de três modelos de regressão logística (RL) aninhados para as campanhas de voo multiespectral e termal realizadas nos dias 12/06 e 13/06. Esses modelos foram utilizados para melhor identificar o estresse hídrico nas áreas cultivadas. Ao analisar os boxplots, observou-se uma maior capacidade de identificação do estresse hídrico por meio desses modelos.

No comparativo entre os modelos, utilizando o CWSI como única variável explanatória na Tabela 5, constatou-se que esse modelo apresentou um poder preditivo ligeiramente superior em relação ao modelo com o NDVI. Todas as métricas de desempenho utilizadas mostraram resultados melhores em comparação com o modelo univariado do NDVI. O Pseudo- $R^2$  do modelo com o CWSI foi de 0,49 em comparação com 0,40 do modelo com o NDVI. O AIC (Critério de Informação de Akaike) foi de 16814,52 para o modelo com o CWSI, enquanto para o modelo com o NDVI foi de 18539,34. Além disso, a acurácia geral do modelo com o CWSI foi de 0,764, enquanto para o modelo com o NDVI foi de 0,755.

**Tabela 5:** Modelo de RL univariado, aninhado pelas 39 variedades de algodão, utilizando o CWSI do dia de 12/06/2018 como único preditor para detecção de segmentos com estresse hídrico.

	<i>Est.</i>	<i>S.E.</i>	<i>z val.</i>	<i>p</i>
<i>(Intercept)</i>	4,44	0,08	57,09	0
<i>CWSI_0612</i>	-29,36	0,49	-59,75	0

*Pseudo-R<sup>2</sup> (Cragg-Uhler) = 0.49, AIC = 16814.52, Acurácia geral = 0.7644252*

Esses resultados indicam que o modelo de regressão logística aninhado, utilizando o CWSI como variável explanatória, apresenta um desempenho um pouco melhor na identificação do estresse hídrico em comparação com o modelo que utiliza apenas o NDVI. O CWSI, como um índice que considera tanto a temperatura quanto o teor de umidade das plantas, pode fornecer informações mais robustas para a detecção do estresse hídrico.

Essas análises reforçam a importância de utilizar modelos estatísticos adequados para a identificação e avaliação do estresse hídrico em culturas agrícolas. Ao considerar múltiplas variáveis, como o CWSI, é possível obter resultados mais precisos e confiáveis na detecção desse estresse. Essas informações são valiosas para auxiliar os agricultores no manejo adequado da irrigação e no desenvolvimento de estratégias eficientes para lidar com o estresse hídrico nas plantações de algodão.

**Tabela 6:** Modelo de RL univariado, aninhado pelas 39 variedades de algodão, utilizando o NDVI do dia de 12/06/2018 como único preditor para detecção de segmentos com estresse hídrico.

	<i>Est.</i>	<i>S.E.</i>	<i>z val.</i>	<i>p</i>
<i>(Intercept)</i>	<i>-76,07</i>	<i>1,24</i>	<i>-61,53</i>	<i>0</i>
<i>NDVI_0612</i>	<i>85,16</i>	<i>1,38</i>	<i>61,61</i>	<i>0</i>

*Pseudo-R<sup>2</sup> (Cragg-Uhler) = 0,40, AIC = 18539,34, Acurácia geral = 0,7551043*

Os resultados dos dois modelos univariados são confirmados pelo modelo multivariado (Tab. 7), utilizando simultaneamente o NDVI e o CWSI como preditores, sendo a estatística Wald (*z. val.*), em termos absolutos, superior para o CWSI (-46.74) em relação ao NDVI (39,84). Todas as métricas de desempenho aumentam, indicando que os índices termal (CWSI) e multiespectral (NDVI) possuem informação complementar. Estes aumentos indicam que o uso sinérgico de bandas termais e multiespectrais podem melhorar fortemente a previsibilidade do estresse hídrico.

**Tabela 7:** Modelo de RL multivariado, aninhado pelas 39 variedades de algodão, utilizando o NDVI e o CWSI do dia de 12/06/2018 como preditores para detecção de segmentos com estresse hídrico.

	<i>Est.</i>	<i>S.E.</i>	<i>z val.</i>	<i>p</i>
<i>(Intercept)</i>	-50.04	1,36	-36,86	0
<i>NDVI_0612</i>	60	1,51	39,84	0
<i>CWSI_0612</i>	-23,88	0,51	-46,74	0

*Pseudo-R<sup>2</sup> (Cragg-Uhler) = 0,57, AIC = 14844.32, Acurácia geral = 0,8153573*

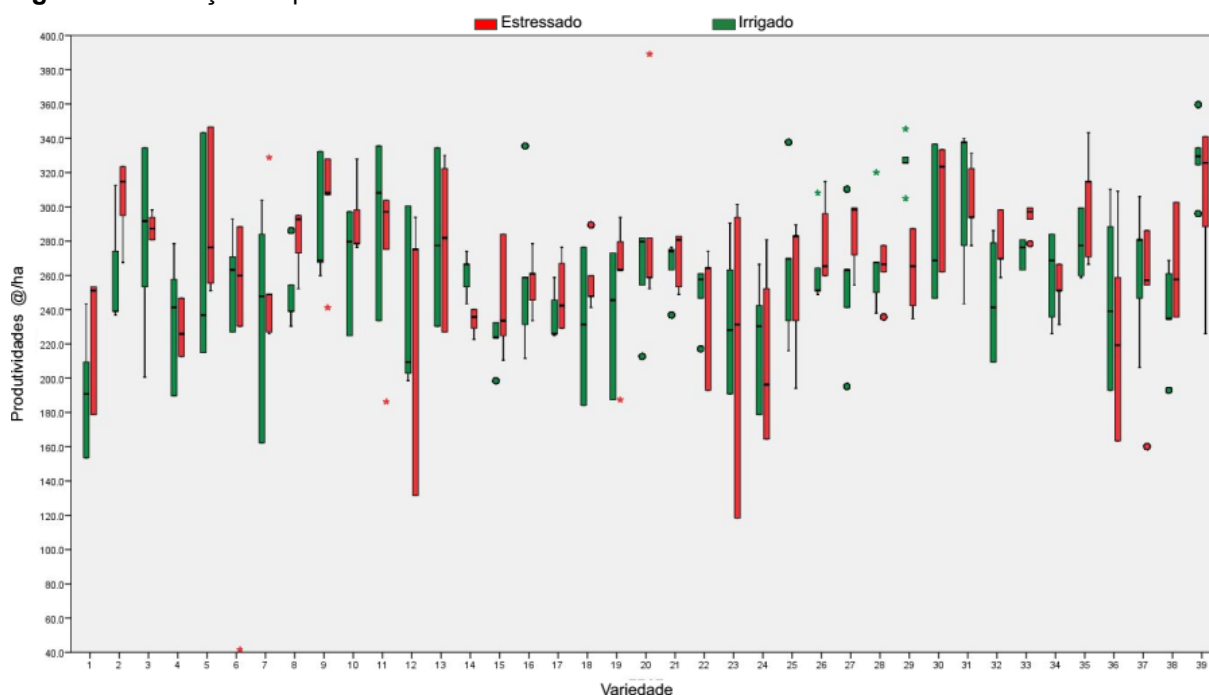
#### 4.3 COMPARATIVO ENTRE GRAU DE ESTRESSE HÍDRICO E PRODUTIVIDADE EM TALHÕES IRRIGADOS E NÃO IRRIGADOS

Ao relacionar as variedades com a produtividade e seu status hídrico, a hipótese inicial era de que quanto menos déficit hídrico a planta sofresse, maior seria sua produtividade. No entanto, a figura 31 apresenta resultados que divergem dessa expectativa. Antes de analisar mais detalhadamente as 39 variedades, é importante destacar que 30 delas são experimentais (numeradas de 1 a 30) e 9 são comerciais (numeradas de 31 a 39). Cada variedade possui características específicas em termos de desenvolvimento e resiliência diante das condições climáticas adversas. No entanto, as informações detalhadas sobre essas características não podem ser divulgadas devido ao sigilo da pesquisa.

Dadas essas circunstâncias, neste momento, analisaremos os dados apresentados na figura 31. Observa-se que, das 39 variedades, 17 delas (1, 2, 9, 16, 17, 19, 21, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 32, 36, 38 e 39) apresentaram maior produtividade mesmo sob condições de estresse hídrico.

No entanto, ao analisar o comportamento das variedades, é possível identificar alguns padrões interessantes. Por exemplo, algumas variedades obtiveram maior produtividade nas áreas estressadas em comparação com as áreas de referência (que foram irrigadas durante o período crítico para a reprodução das plantas). Um exemplo notável é a variedade dois, que apresentou uma produtividade relativa muito acima das plantas de referência. Além disso, as parcelas 1, 8, 15, 26, 27 e 28 também demonstraram uma maior produtividade nas áreas estressadas em comparação com as áreas irrigadas.

**Figura 31** - Relação de produtividade com as variedades.



**Fonte:** Elaborada pelo autor

Esses resultados surpreendentes indicam que algumas variedades podem ser mais resistentes ao estresse hídrico e ser capazes de manter ou até mesmo aumentar sua produtividade mesmo em condições desfavoráveis de disponibilidade de água. Isso ressalta a importância de estudar e entender as características genéticas e fisiológicas dessas variedades, a fim de identificar quais características específicas podem estar associadas a essa maior resiliência. No entanto, é necessário ressaltar que, devido ao sigilo da pesquisa, não podemos fornecer informações detalhadas sobre as características específicas de cada variedade.

É importante destacar que a figura 31 fornece uma visão geral das diferenças na produtividade entre as variedades em condições de estresse hídrico, mas é necessário realizar análises estatísticas mais aprofundadas para determinar a significância dessas diferenças e confirmar se existem correlações entre o status hídrico e a produtividade em cada variedade. Além disso, outros fatores, como a interação com o ambiente e o manejo agrônomico, também podem influenciar os resultados observados. Portanto, esses dados preliminares destacam a necessidade de pesquisas adicionais para aprofundar nosso entendimento sobre a resposta das variedades de plantas ao estresse hídrico e suas implicações na produtividade agrícola..

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Partindo do pressuposto que as mudanças climáticas deixaram de ser uma possibilidade longínqua e, atualmente, com frequência, apresentam-se em forma de tempestades, enchentes, secas, temperaturas dissonantes com as estações do ano, entre outros episódios prejudiciais. Essa mudança no clima está causando impactos no meio ambiente e, em especial, nas atividades de produção agrícola.

Diante deste quadro, quando esta pesquisa foi proposta - baseada em sensoriamento remoto, com uso de sensores acoplados a plataformas remotamente pilotadas, para monitorar e avaliar o estresse hídrico, um dos fenômenos oriundos da mudança do clima que afeta também a produção da cultura do algodão, era sabido que a complexidade nos procedimentos metodológicos não seria diminuta. Apesar do aperfeiçoamento dos protocolos de trabalho durante três anos de campanhas na área experimental do IMA, e um hall de trabalhos de levantamento complementares, mostrou-se como principal desafio filtrar efeitos geoambientais do entorno, para averiguar como de fato os levantamentos de RPAS são aptos para detectar o fenômeno estudado sobre as variedades da cultura.

A partir do momento em que se implementou a pesquisa e foram testados e operacionalizados os sistemas RPA, foram iniciadas as atividades de campo, resultando em muitos voos e campanhas. Gerou-se um conjunto de informações, muito mais amplo do que de fato pode ser explorado nesta tese, mas cuja análise segue, inclusive a partir do desenvolvimento de uma segunda tese de doutorado em andamento, junto ao programa de pós-graduação em Física Ambiental, da Universidade Federal de Mato Grosso.

Realizado este pequeno preâmbulo e mirando os objetivos deste trabalho, pode-se afirmar que os sensores termográficos (Câmera marca Flir, modelo T-420) e o multiespectral (Câmera marca MicaSense, modelo Red Edge) possuem potencial para identificar áreas em culturas de algodão sob condição de estresse hídrico abiótico.

Assim, a termografia, especialmente a partir da aplicação de um índice espectral (CWSI), demonstrou grande poder de separabilidade de plantas sob estresse hídrico frente às plantas saudáveis. Sendo assim, é possível aplicar um monitoramento baseado em sensores acoplados a um veículo aéreo não tripulado,

implementado com uma metodologia adequada de processamento digital de imagens.

No conjunto de dados referente às campanhas de 2018 estudadas nesta tese, o desempenho dos imageamentos com a câmera termográfica foi ligeiramente superior do que os levantamentos multiespectrais. As análises estatísticas por regressão logística, porém mostraram que o uso complementar dos dois sensores aumenta significativamente o poder preditivo do estresse hídrico, aumentando a acurácia geral no seu mapeamento em mais do que 5% p.p.

Adicionalmente, o sensor multiespectral demonstrou possuir um poder de discriminação relativamente superior na identificação de estresse em fases iniciais. Também vale acrescentar que o imageamento multiespectral é o mais robusto diante de condições meteorológicas adversas, como a presença de nuvens, causando sombreamento momentâneo. Neste quesito, a termal fica a dever, pois precisa de ótimas condições de tempo, ou seja, um céu completamente límpido.

Devido a dimensão e padrões espaciais de experimentos de fenotipagem, conduzidos para avaliação de estresse hídrico, fica inviável realizar diagnósticos suficientemente detalhados por técnicas de campo, como por exemplo, o monitoramento *in situ* dos níveis de murchamento. Desse modo, há necessidade de se empregar o uso de Sensoriamento Remoto a partir da aplicação de sensores multiespectrais e termográficos embarcados numa plataforma RPA.

Outro fator que deve ser considerado como ganho foi o desenvolvimento de expertise ao adquirir, pré-processar e analisar informações geográficas provenientes de aerolevantamentos por RPAS. Mesmo que neste momento o foco tenha sido uma aplicação mais ligada à área da agricultura, as técnicas e metodologias poderão ser aplicadas em pesquisas voltadas a outras questões pertinentes ao meio ambiente.

De acordo com a análise dos experimentos de 2018, não foi detectada uma correlação expressiva entre a produtividade das variedades e o nível do estresse hídrico. Estes resultados podem ser influenciados, porém, pela amostragem limitada *in situ*, variáveis ambientais ainda não analisadas sistematicamente ou a própria intensidade do estresse gerado nos experimentos.

Realizar um trabalho que fundamentou-se no uso de novas tecnologias, aplicadas ao monitoramento remoto de um fenômeno como o estresse hídrico, traz contribuições em duas frentes: primeiro, pode subsidiar a busca de uma prática agrícola mais inovadora e sustentável. Com o desenvolvimento de cultivares mais

adaptadas e resistentes às secas (ao estresse hídrico), o cultivo de algodão pode adaptar-se e deixar de migrar para a região da Amazônia, contribuindo com a manutenção das florestas. Por outro lado, como a cultura de algodão é uma fonte de renda considerável para Mato Grosso e outros estados do Centro Oeste, o desenvolvimento de variedades resistentes ao estresse hídrico e mais robustas a variabilidade climática, este trabalho também traz sua parcela de contribuição.

Outro ganho foi a oportunidade de realizar uma pesquisa, com financiamento e em parceria, que disponibilizou condições e melhorias na infraestrutura em pesquisa e desenvolvimento de expertise técnico-científico, o que futuramente permitirá efetuar trabalhos mais consistentes no monitoramento ambiental.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 7 ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 151 p.

ALVOR, D. *et al.* Combining socioeconomic development with environmental governance in the Brazilian Amazon: the Mato Grosso agricultural frontier at a tipping point. **Environment Development and Sustainability**. v. 20, p. 1-22, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10668-016-9889-1>>. Acesso em: 12 mai 2021.

AMARASINGAM, N. *et al.* A review of UAV platforms, sensors, and applications for monitoring of sugarcane crops. **Remote Sensing Applications - Society and Environment**, v. 26, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100712>>. Acesso em: 12 abr 2021.

ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil. **Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial – RBAC –E nº 94**. Disponível em: [http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94-e-md-00/@@display-file/arquivo\\_norma/RBACE94EMD00.pdf](http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94-e-md-00/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf). Acesso em: 20 maio 2018.

ANGELSEN, A. *et al.* **Analysing REDD+: Challenges and choices**. Bogor: CIFOR, 2012.

AMORIM NETO, M. S.; BELTRÃO, N. E. M. **Determinação da época de irrigação em algodoeiro herbáceo por via climatológica**. Campina Grande: EMBRAPA-CNPA, 1992. 17p. (Comunicado técnico, 34).

ARAGÃO, A; CONTINI, E. **O agro no Brasil e no Mundo: uma síntese do período de 2000 a 2020**. Brasília: Embrapa, 2021.

ASSAD, E. D. *et al.* Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.1057-1064, 2004.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. **Aquecimento global e cenários futuros da agricultura brasileira**. São Paulo: EMBRAPA, 2008.

ASSIS, L. F. F. G. *et al.* TerraBrasilis: A Spatial Data Analytics Infrastructure for Large-Scale Thematic Mapping. **ISPRS International Journal of Geo-Information**. v.8, n. 11, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ijgi8110513>> Acesso em: 15 abr 2021.

AZEVEDO, A. *et al.* **Panorama sobre o desmatamento na Amazônia em 2016**. Brasília: IPAM, 2016. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/312529567>>. Acesso em: 25 ago 2021.

BAI, H.; PURCELL; L.C. Aerial canopy temperature differences between fast- and slow-wilting soya bean genotypes. **Journal of Agronomy and Crop Science**, p.

243-251, 2018. Disponível em; <<https://doi.org/10.1111/jac.12259>>. Acesso em 23 set 2021.

BARET, F.; HOULÈS, V.; GUÉRIF, M. Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: the case of nitrogen management. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 4, p. 869–880, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jxb/erl231>>. Acesso em: 25 abr 2017.

BARETH, G. *et al.* Low-weight and UAV-based Hyperspectral Full-frame Cameras for Monitoring Crops: Spectral Comparison with Portable Spectroradiometer Measurements. **Photogrammetrie - Geoinformation**, p. 69-79, 2015. Disponível em: <DOI: 10.1127/pfg/2015/0256>. Acesso em: 19 mar 2017.

BARROS, M. J. *et al.* Fronteira agrícola e conflitos territoriais nas Amazônias Brasileiras: a expansão do agronegócio da soja e seus efeitos no planalto de Santarém, Pará-Amazônia-Brasil. **Ciência Geográfica**. v. 24, n. 2, p. 893-911, 2020.

BARROZO, J. C. **Fronteiras de Mato Grosso**: em busca do Eldorado e da Terra Prometida. Cuiabá: EdUFMT, 2017

BENDIG, J. *et al.* Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging. **Remote Sensing**, v. 6, n. 11, p. 10395-10412, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs61110395>>. Acesso em: 11 mar 2017.

BENEDICT, C. R. Physiology. *In*: KOEHL, R. J.; LEWIS, C. F. **Cotton**. Madison: American Society of Agronomy, 1984. (Series Agronomy, 24).

BERNI, J.A.J. *et al.* Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 11, p. 2380-2388, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.018>>. Acesso em: 18 mai 2018.

BLACKMER, T. M. *et al.* Analysis of aerial photography for nitrogen stress within corn fields. **Agronomy Journal**, v.88, n.5, p. 729-33, 1996.

BLUM, A. Plant water relations, plant stress and plant production. *In*: **Plant Breeding for Water-Limited Environments** (Org). New York: Springer, 2011. p. 11-52.

BLUM, A.; MAYER, J.; GOLAN, G. Agronomic and physiological assessments of genotypic variation for drought resistance in sorghum. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 40, p. 49-61, 1989. Disponível em: <<https://doi.org/10.1071/AR9890049>>. Acesso em: 26 jun 2017.

BOUCHARDET, D. A.; PORSSE, A. A.; TIMOFEICZYK JUNIOR, R. Analyzing the Spatial Dynamics of Deforestation in Brazilian Amazon. **Geographical Analysis**, v. 49, p. 23-35, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/gean.12105>>. Acesso em: 10 fev 2020.

BIJU, S.; FUENTES, S.; GUPTA, D. The use of infrared thermal imaging as a non-destructive screening tool for identifying drought-tolerant lentil genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 127, p. 11-24, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.005>>. Acesso em: 15 jun 2020.

BURKE, J. J. Moisture sensitivity of cotton pollen: An emasculation tool for hybrid production. **Agronomy Journal**., v. 94, p. 883–888, 2002. Disponível em: <<http://doi.org/10.2134/agronj2002.8830>>. Acesso em: 20 maio 2018.

CABRAL, T. L. **Zoneamento e Mapeamento Geoambiental no município de Sorriso - MT**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

CAO, W. *et al.* Use of unmanned aerial vehicle imagery and a hybrid algorithm combining a watershed algorithm and adaptive threshold segmentation to extract wheat lodging. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 123, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103016>>. Acesso em: 25 ago 2022.

CARAUTA, M. *et al.* No more double cropping in Mato Grosso, Brazil? Evaluating the potential impact of climate change on the profitability of farm systems. **Agricultural Systems**, v. 190, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103104>>. Acesso em: 01 ago 2022.

CLARKE, M. *et al.* **Second Program Evaluation of the Forest Carbon Partnership Facility**. Final Report. Helsinki: The World Bank, 2016

COELHO, A. J. P. *et al.* Effects of anthropogenic disturbances on biodiversity and biomass stock of Cerrado, the Brazilian savanna. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, n. 1, p. 1-18, 2000.

COHEN, Y. Crop water status estimation using thermography: multi-year model development using ground-based thermal images. **Precision Agriculture**, v. 16, p. 311–329, 2015.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>>. Acesso em: 30 jun 2021.

COLLICHIO, E. Implicações das Mudanças do Clima no Zoneamento Agroclimático da cana-de-açúcar no Estado do Tocantins, Considerando o Modelo GFDL. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.08, n.06, p. 1730-1747, 2015.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79-97, 2014.

EISENBEISS, H. The Potential of Unmanned aerial Vehicles for mapping. In: Phogrammetric Week, 11., 2011, Stuttgart. **Proceedings...** Stuttgart: Institut für Photogrammetrie, 2011. p. 135-144. Disponível em:

<<https://phowo.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo11/140Eisenbeiss.pdf>> Acesso em: 22 set 2021.

EKINZOG, E. k. et al. Revisiting crop water stress index based on potato field experiments in Northern Germany. **Agricultural Water Management**, v. 269, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107664>>. Acesso em: 30 ago 2022.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Visão 2030**: o futuro da agricultura brasileira. Brasília: Embrapa, 2018.

\_\_\_\_\_. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília-DF, 1999.

EPIPHANIO, J. C. N. *et al.* Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.31, n.6, p.445-454, 1996.

ESPINOZA, J. C. *et al.* The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. *Environmental Research Letters*, V. 9, N. 12, 2014.

\_\_\_\_\_. Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon basin): understanding the exceptional 2010 drought **Geophys. Res. Lett.** v. 38, p.13406, 2011.

ESRI - **ARCGIS software**. version 10.3, 2015. Disponível em: <<http://www.esri.com>>. Acesso em: 18 ago 2017.

EWERS, R.; LAURANCE, W. Deforestation in Amazônia. **Environmental Conservation**, v. 33, n.3, p. 203-211, 2006.

FAHAD, S. *et al.* Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 1147, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>> Acesso em: 15 set 2021.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. OECD-FAO Agricultural Outlook 2021–2030. 2021a, Disponível em: <<https://www.fao.org/publications/oecd-fao-agricultural-outlook/2021-2030/en/>>. Acesso em: 10 ago 2022.

\_\_\_\_\_. **CropWat software**. version 8.0, 2021b. Disponível em: <<https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat>>. Acesso em: 30 set 2021.

\_\_\_\_\_. Trade - Crops and livestock products, 2020. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/TCL>>. Acesso em 27 junho de 2022.

FERREIRA FILHO, J. B. S.; ALVES, L. R. A.; VILLAR, P. M. Estudo da Competitividade da produção de algodão entre Brasil e Estados Unidos, safra 2003/04. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 47, n. 1, p. 59-88, 2009.

FLIR - **FLIR Tools software**. version 5.13, 2016. Disponível em: <<https://www.flir.com.br/>>. Acesso em: 08 set 2017.

FLIR - **User ' s manual FLIR InfraCAM SD**. Wilsonville, USA: Flir Systems, 2013

FURLANI JÚNIOR, E. *et al.* Correlação entre leituras de clorofila e níveis de nitrogênio aplicados em feijoeiro. **Bragantia**, v.55, n.1, p. 171-5, 1996.

GAO, B. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257-266. Disponível em: <Disponível em: <DOI:10.1080/01431160903283892>. Acesso em: 10 ago 2018>. Acesso em: 10 ago 2018

GANO, B. *et al.* Using UAV Borne, Multi-Spectral Imaging for the Field Phenotyping of Shoot Biomass, Leaf Area Index and Height of West African Sorghum Varieties under Two Contrasted Water Conditions. **Agronomy**, v. 11, n. 5, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agronomy11050850>>. Acesso em: 28 ago 2022.

GIORGI, F. Climate change hot-spots. **Geophysical Research Letters**, v. 33, 2006.

GOMES, L. *et al.* Agricultural expansion in the Brazilian Cerrado: Increased soil and nutrient losses and decreased agricultural productivity. **Land**, v. 8, n. 1, p. 12, 2019.

GÓMEZ-CANDÓN, D. *et al.* Field phenotyping of water stress at tree scale by UAV-sensed imagery: new insights for thermal acquisition and calibration. **Precision Agriculture**, v. 17, p. 786-800, 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-016-9449-6>>. Acesso em: 18 mai 2018.

GÓMEZ-CANDÓN, D.; DE CASTRO, A. I.; LÓPEZ-GRANADOS, F. Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. **Precision Agriculture**, v. 15, n. 1, p. 44-56, 2014.

GRANTZ, A. S. Tropospheric Ozone and Interspecific Competition between Yellow Nutsedge and Pima Cotton. **Crop Science**, v. 46, P 1879-1889, set-oct, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.06.0167> Acesso em: 10 set 2017.

HABOUDANE, D. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 3, p. 337-352, 2004.

HABOUDANE, D. *et al.* Integration of narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v.81, n.2, p.416-26, 2002

HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J.H. Temperature extremes: effect on plant growth and development. **Weather and Climate Extremes**, v. 10, p. 4-10, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>>. Acesso em: 15 abr 2021.

HAY, R.; PORTER, J. **The Physiology of Crop Yield**. Blackwell Publishing: Ames IA, 2006.

HEIN, N.T. *et al.* Bottlenecks and opportunities in field-based high-throughput phenotyping for heat and drought stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 72, n. 14, p. 5102-5116, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jxb/erab021>>. Acesso em: 15 mai 2022.

HERRMANN, I. *et al.* SWIR-based spectral indices for assessing nitrogen content in potato fields. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 19, p. 5127-5143, 2010. Disponível em: <DOI:10.1080/01431160903283892>. Acesso em: 10 ago 2018

HIGA T. C. S. Ocupação do território. Processo de ocupação e formação territorial. *In*: MORENO, G.; HIGA, T. C. S.; MAITELLI, G. T. **Geografia de Mato Grosso: Seleção de conteúdo para Concurso Público do governo de Mato Grosso**. Cuiabá: Entrelinhas, 2009.

HODGEN, P. J. Relationship Between Response Indices Measured In-Season and at Harvest in Winter Wheat. **Journal of Plant Nutrition**, v. 28, n. 2, p. 221-235, 2005. Disponível em: <DOI: 10.1081/PLN-200047605>. Acesso em: 25 jun 2017.

HOU, M. *et al.* Estimation of crop transpiration and its scale effect based on ground and UAV thermal infrared remote sensing images. **European Journal of Agronomy**, v. 131, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126389>>. Acesso em: 27 ago 2022.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)>. Acesso em: 22 ago 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. 2020. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/pesquisa/18/16459>>. Acesso em: 10 de abril de 2022.

\_\_\_\_\_. **Produção Agrícola Municipal 2020**. Culturas temporárias e permanentes. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/acervo>>. Acesso em: 24 jul de 2022.

\_\_\_\_\_. **Produção Agrícola Municipal (1990 a 2014)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2019/default.shtm>>. Acesso em: 29 de abril de 2020.

\_\_\_\_\_. **Produção Agrícola Municipal: culturas temporárias e permanentes**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019b. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=766>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2020.

\_\_\_\_\_. **Censo Agropecuário 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>>. Acesso em: 22 abr 2021.

\_\_\_\_\_. **Produção Agrícola Municipal: culturas temporárias e permanentes**. Rio de Janeiro: IBGE, 2005. 101p.

\_\_\_\_\_. **Manual técnico de uso da terra**. (Manuais técnicos em Geociências, n.9). IBGE: Rio de Janeiro-RJ, 1999.

IMEA - Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária. **Mapa das macrorregiões do IMEA**. Cuiabá: IMEA, 2017. Disponível em: <<https://www.imea.com.br/imea-ite/view/uploads/metodologia/justificativamapa.pdf>>. Acesso em: 05 fev 2020.

\_\_\_\_\_. **Dashboards: algodão**. IMEA, 2022. Disponível em: <<https://imea.com.br/imea-site/>>. Acesso em: 10 ago 2022.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Programa PRODES Amazônia, 2022a**. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>>. Acesso em 05 jun 2022.

\_\_\_\_\_. **Terra Brasilis: PRODES Desmatamento Estados, 2022b**. Disponível em: <[http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal\\_amazon/rates](http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates)>. Acesso em: 10 ago. 2022.

\_\_\_\_\_. **Relatório PRODES 2008**, 2008. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes2008.pdf>>. Acesso em: Nov. 2018.

\_\_\_\_\_. **Relatório PRODES 2014**, 2014. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. In: FIELD C.B. *et al.* **Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 1132 p. (2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability). Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2018.

\_\_\_\_\_. In: REISINGER, A. *et al.* **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva: IPCC, 2007. 104 p. (Climate Change 2007: Synthesis Report). Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4\\_syr\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2018.

JAGGARD, K. W.; QI, A.; OBER, E.S. Possible changes to arable crop yields by 2050. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 365, n. 1554, p. 2835–2851, 2010. Disponível em:

<<https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstb.2010.0153>> Acesso em: 30 set 2021.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parênteses, 2009.

JIN, X. *et al.* Estimates of plant density of wheat crops at emergence from very low altitude UAV imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 198, p. 105-114, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.007>>. Acesso em: 11 jan 2018.

JUSTICE, C. O. *et al.* The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n.4, p.1228-1249, 1998.

LALIBERTE, A. S.; RANGO, A. Image processing and classification procedures for analysis of subcentimeter imagery acquired with an unmanned aircraft over arid rangelands. **GIScience & Remote Sensing**, v. 48 n. 1, p. 4-23, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.2747/1548-1603.48.1.4>. Acesso em: 5 ABR 2018.

LATRUBESSE, E. M., RODRIGUES, S. C., MAMEDE, L. Sistema de classificação e mapeamento geomorfológicos: Uma nova proposta. **Geosul**. v. 14, n. 17, p. 682-687, 1998.

LAZZAROTTO, C., ARANTES, E.M., LAMAS, F.M. Época de semeadura e zoneamento agrícola. *In*: EMBRAPA, **Algodão Informações Técnicas**. Dourados: EMBRAPA-CPAO, p.107-118, 1998. (Circular técnica, 7).

LIU, T. *et al.* Estimates of rice lodging using indices derived from UAV visible and thermal infrared images. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 252, p. 144-154, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.021>>. Acesso em: 09 mai 2020.

LOKA, D. A. **Effect of water-deficit stress on cotton during reproductive development**. Fayetteville: University of Arkansas, 2012.

LOKA, D. A.; OOSTERHUIS, D. M.; RITCHIE, G. L. Water-Deficit Stress in Cotton. *In*: OOSTERHUIS D. M. (Org.), **Stress Physiology in Cotton**. Memphis: The Cotton Foundation, 2011, p. 37-72

LOPES, M.; REYNOLDS, M. P. Stay-green in spring wheat can be determined by spectral reflectance measurements (normalized difference vegetation index) independently from phenology. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 10, p. 3789-3798, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jxb/ers071>>. Acesso em: 30 jun 2017.

MAITELLI, G. T. Interações atmosfera – superfície. *In: Geografia de Mato Grosso: Território, Sociedade, Ambiente*. Gislaene Moreno e Tereza Cristina Higa (Organizadoras). Cuiabá: Entrelinhas, 2005.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio: Brasil 2020/21 a 2030/31**. Brasília: MAPA, 2021. 101 p.

MAPBIOMAS – Mapeamento Anual de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. **Coleção 6: A evolução das pastagens nos últimos 36 anos, 2021**. Disponível em: <<https://Disponível em: http://mapbiomas.org>>. Acesso em: 05 jul 2022.

MARENGO J. A. *et al.* Regional climates tropical South America east of the Andes (in 'state of the climate in 2013') **Bull. Am. Meteorol. Soc.** v. 95, p. 170–1, 2014.

\_\_\_\_\_. Two contrasting seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in **Northeast Brazil J. Clim.** v. 26, p. 9137–54, 2013.

\_\_\_\_\_. Extreme climatic events in the Amazon basin climatological and hydrological context of recent floods. **Theor. Appl. Climatol.** v. 107, p.73–85, 2012.

\_\_\_\_\_. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, p. 12703, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2011GL047436>. Acesso em: 18 set. 2017.

\_\_\_\_\_. **Caracterização de clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro para o século XXI**: sumário técnico. Brasília: DCBio, 2007. 50p.

MARTINELLI, L. A. *et al.* A falsa dicotomia entre a preservação da vegetação natural e a produção agropecuária Pontos de Vista. **Biota Neotrop.** v. 10, n. 4, p. 323-330, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1676-06032010000400036>>. Acesso em: 03 ago 2022.

MATO GROSSO - Secretaria de estado de planejamento e coordenação geral. **Atlas de Mato Grosso: abordagem socioeconômico-ecológica**. Cuiabá, MT: Entrelinhas, 2011.

MATOS, F. L. L. C. **Análise das Taxas Anuais de Desmatamento na Amazônia Legal a partir da Relação entre Autos de Infração e Área Desmatada no período entre 2000 e 2014**. 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado em Geografia)- Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MENDES, J. C. **Elementos e Estratigrafia**. (Biblioteca de Ciências Naturais). Editora T. A. Queiroz: São Paulo-SP, 1996.

MICASENSE. **Empresa desenvolvedora de câmaras multiespectrais e termais para Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT)**. 2021. Disponível em: <<https://micasense.com/>>. Acesso em: Fevereiro 2021.

MICASENSE. **User ' s manual Micasense Rededge-M Multispectral camera**. Seattle-WA, USA: MicaSense Inc, 2017

MONTEIRO, R. A. **Aspectos Fiscais da Sustentabilidade no Brasil**. Editora Dialética, 2020.

MUTAVA, R. N. et al. Characterization of sorghum genotypes for traits related to drought tolerance. **Field Crops Research**. v.123, n. 1, p. 10-18, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.04.006>> Acesso em: 15 set 2021.

NICOLA, P. et al. Yield stability for cereals in a changing climate. **Functional Plant Biology**, v. 39, n. 2, p. 539-552, 2012. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32480806/>> Acesso em: 15 set 2021.

NOBRE, C. A. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **PNAS**, v. 113, n. 39, p. 10759-10768, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>>. Acesso em 15 ago 2020.

NOBRE, A. **O futuro climático da Amazônia: relatório de avaliação científica**. São José dos Campos: INPE, 2014. Disponível em: <<http://www.ccst.inpe.br/wp-content/uploads/2014/11/Futuro-Climatico-da-Amazonia.pdf>> Acesso em 10 mai 2021.

NOBRE, C. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias Estratégicas**, v. 6, n. 2, p.239-258, 2001.

NOBRE, C.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**. v. 59, n. 3, p. 22-27, 2007.

OSTOS-GARRIDO, F. J. et al. High-throughput phenotyping of bioethanol potential in cereals using UAV-based multi-spectral imagery. **Frontiers Plant Science**, v. 10, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00948>>. Acesso em: 10 jul 2020.

PAVAN, M. N. CENAMO, M. C. **REDD + nos estados da Amazônia**: mapeamento de iniciativas e desafios para integração. São Paulo: Idesam, 2012.

PETTIGREW, W. T. The effect of higher temperatures on cotton lint yield production and fiber quality. **Crop Science**. v.48, p.278-285, 2008.

PRADHAN, G. P. et al. Cooler canopy contributes to higher yield and drought tolerance in new wheat cultivars. **Crop Physiology & Metabolism**, v. 54, p. 2275-2284, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.2135/cropsci2013.11.0788>>. Acesso em: 28 abr 2020.

PHILIP, J. R. Plant water relations: some physical aspects. **Annual Reviews Plant. Physiol.**, v. 17, p. 245-268, 1966. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev.pp.17.060166.001333>>. Acesso em: 22 mar 2020.

PIX4D. **Empresa desenvolvedora de um conjunto de programas para fotogrametria, aerofotogrametria e algoritmos de visão computacional**. 2021. Disponível em: <<https://www.pix4d.com/>>. Acesso em: 10 fev 2021.

PORTO-GONÇALVES, C. W. Amazônia enquanto acumulação desigual de tempos: uma contribuição para a ecologia política da região. **Revista Crítica de Ciências Sociais**, v. 107, 2015. Disponível em: <<http://rccs.revues.org/6018>>. Acesso em 09 set. 2021.

POTGIETER, A. B. *et al.* Multi-spectral imaging from an unmanned aerial vehicle enables the assessment of seasonal leaf area dynamics of sorghum breeding lines. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01532>>. Acesso em: 25 jun 2018.

QIAO, L. *et al.* UAV-based chlorophyll content estimation by evaluating vegetation index responses under different crop coverages. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 196, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106775>>. Acesso em: 30 ago 2022.

REYDON, B. P.; FERNANDES, V. B.; TELLES, T. S. Land governance as a precondition for decreasing deforestation in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 94, p. 1 - 13, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104313>>. Acesso em 10 set. 2021.

RIVERO, S.; ALMEIDA, O.; ÁVILA, S.; OLIVEIRA, W. Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. **Nova Economia**, V. 19, N. 1, p. 41-66, 2009.

ROUSE, J.W. *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). In: PROCEEDINGS OF THE THIRD ERTS SYMPOSIUM, 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, 1973. p. 309–317. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740003048/downloads/19740003048.pdf>>. Acesso em: 30 mar 2017.

SALATI, E. **Mudanças climáticas e o ciclo hidrológico na Amazônia**. In: BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Causas e dinâmica do desmatamento na Amazônia., 2001, p.153-172.2001.

SANO, E. E. *et al.* Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 166, p. 113-124, 2010.

SANTESTEBAN, L.G. *et al.* High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard. **Agricultural Water Management**, V. 183, p. 49-59, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.026>>. Acesso em: 18 mai 2018.

SATYAMURTY, P. *et al.* A quick look at the 2012 record flood in the Amazon basin **Geophysical Research Letters**. v. 40, p1396–401, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/grl.50245>>. Acesso em 17 set. 2017.

SEELAN, S. K. *et al.* Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, p. 157–169, 2003. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.007>>. Acesso em: 30 jun 2017.

SEPLAG-MT - Secretaria de Estado de Planejamento e Gestão. **Contas Regionais: Produto Interno Bruto de Mato Grosso**. Cuiabá: Governo de MT, 2021.

SEPLAN-MT – Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação Geral. **Zoneamento Sócio-Econômico-Ecológico do Estado de Mato Grosso**. Cuiabá - MT: 2000.

SHI, Y. *et al.* Unmanned aerial vehicles for high-throughput phenotyping and agronomic research. **Plos One**, v. 11, n. 7, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159781>>. Acesso em: 25 ago 2022.

SILVA, M.D.A. *et al.* Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 3, p. 193-201, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000300003>>. Acesso em: 21 mar 2017.

SILVA, M. T.; AMARAL, J. A. B. Zoneamento de risco climático para a cultura do amendoim no Estado do Rio Grande do Norte. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.7, p.93-99, 2007.

SILVA, R.S. *et al.* Acesso ao espaço aéreo brasileiro por aeronaves não tripuladas. **Revista do CIAAR**, v. 1, n. 1, p. 23-40, 2020. Disponível em: <<https://revistaeletronica.fab.mil.br/index.php/reciaar/article/view/236>> Acesso em: 22 set 2021.

STAEVIE, P. M. Crescimento demográfico e exclusão social nas capitais periféricas da Amazônia. **Textos e debates**, n. 28, p. 185-204, 2015.

STARK, J. C.; PAVEK, J.J.; MCCANN, I.R. Using canopy temperature measurements to evaluate drought tolerance of potato genotypes. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 116, n. 3, p. 412-415, 1991. Disponível em: <<https://doi.org/10.21273/JASHS.116.3.412>>. Acesso em: 10 ago 2021

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, v.36, n.2, p.424-433, 2006.

SWAEF, T. D. *et al.* Applying RGB- and thermal-based vegetation indices from UAVs for high-throughput field phenotyping of drought tolerance in forage grasses. **Remote Sensing**. v. 13, n. 1, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs13010147>>. Acesso em: 30 ago 2022.

TARIFA, J. R. **Mato Grosso**: clima: análise e representação cartográfica. (Série recursos naturais e estudos ambientais). Cuiabá, MT: Entrelinhas, 2011.

TEFERA, A. T. Estimating early season growth and biomass of field pea for selection of divergent ideotypes using proximal sensing. **Field Crops Research**, v. 277, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108407>>. Acesso em: 13 ago 2022.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Uncertainty assessments of climate change projections over South America. **Theoretical and Applied Climatology**. n. 112, p. 253–272, 2013.

\_\_\_\_\_. Climate change hotspots over South America: From CMIP3 to CMIP5 multi-model datasets. **Theoretical and Applied Climatology**. n. 117, p.579-587, 2014. Disponível em:<https://doi.org/10.1007/s00704-013-1030-x>. Acesso em 10 set 2017.

TUCKER, C. J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)>. Acesso em: 10 ago 2018>. Acesso em: 10 ago 2018

TURNER, N. C. *et al.* Cotton (*Gossypium Hirsutum* L.): Physiological and morphological responses to water deficits and their relationship to yield. **Field Crops Research**, v. 14, p. 153-170, 1986. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0378-4290\(86\)90054-7](https://doi.org/10.1016/0378-4290(86)90054-7)>. Acesso em: 13 jan 2022.

TYUKAVINA, A. *et al.* Types and rates of forest disturbance in Brazilian Legal Amazon, 2000–2013. **Science Advances**, v. 3, n. 4, p. 1 - 15, 2017. Disponível em:<https://doi/10.1126/sciadv.1601047>. Acesso em 10 fev 2019.

UGCS - **mission planning software**. Version 3.2.113, 2017. Disponível em: <<https://www.ugcs.com/>>. Acesso em: 23 agosto 2021.

UNFCCC. United Nation Climate Change, 2022. Bali Road Map. Disponível em: <<https://unfccc.int/process/conferences/the-big-picture/milestones/bali-road-map>>. Acesso em: 10 jul 2022.

WANG, R. *et al.* Drought effects on cotton yield and fiber quality on different fruiting branches. **Crop Science**, v. 56, n. 3, p. 1265-1276, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.05.013>>. Acesso em: 15 mai 2018.

WATTS, A. C.; AMBROSIA, V. G.; HINKLEY, E.A. Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. **Remote Sensing**. v. 4, p. 1671-1692, 2012.

VELLINGA, P.; VERSEVELD, Willem J. **Climate change and extreme weather events**. WWF, 2000.

WEST, T. A. P.; FEARNside, P. M. Brazil 's conservation reform and the reduction of deforestation in Amazonia. **Land Use Policy**, v. 100, 2021. Disponível em; <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105072>>. Acesso em 16 jul 2022.

WOLF, D. **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**. Third edition - The McGraw-Hill Companies, 2004.

XIANG, H.; TIAN, L. Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). **Biosystems Engineering**, v. 108, n. 2, p. 174-190, 2011. Disponível em; <<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.11.010>>. Acesso em 16 jul 2018.

XU, Y.; XUEJIE, G.; GIORGI, F. Regional variability of climate change hot-spots in East Asia. **Adv Atmos Sci.**, v. 26, p. 783–792, 2009.

ZAKS, D.P.M.; KUCHARIK, C.J. Data and monitoring needs for a more ecological agriculture. **Environmental Research Letters**, v. 6, p. 14-17, 2011.

YUNG, C. E.; CASTRO, B. **Estudos e produção de subsídios técnicos para a construção de uma Política Nacional de Pagamento por Serviços**: Relatório Final. Rio de Janeiro: UFRJ, 2016.

ZAKS, D. P. M.; KUCHARIK, C. J. Data and monitoring needs for a more ecological agriculture. **Environmental Research Letters**, v. 6, n. 1, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/014017>. Acesso em 10 set 2017.

ZARCO-TEJADA, P.J.; GONZÁLEZ-DUGO, V.; BERNI, J.A.J. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p. 322-337, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.007>>. Acesso em: 18 mai 2018.


ZARCO-TEJADA, P. J. *et al.* A new era in remote sensing of crops with unmanned robots. **SPIE Newsroom**, 2008. Disponível em: <10.1117/2.1200812.1438>. Acesso em: 22 jun 2017.

ZHOU, Y. *et al.* Diagnosis of winter-wheat water stress based on UAV-borne multispectral image texture and vegetation indices. **Agricultural Water Management**, v. 256, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107076>> Acesso em: 30 ago 2022.


ZULLO JUNIOR, J.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S. Alterações devem deslocar culturas agrícolas. **Scientific American Brasil**, n. 74, p. 72-77, 2008.

## APÊNDICE

### Parâmetro e característica do sensor multiespectral

MicaSense RedEdge3 (5.5 mm)	Edit	Remove
	Weight, kg	0.15
	True focal length, mm	5.50
	Sensor width, mm	4.80
	Sensor height, mm	3.60
	Sensor horizontal resolution, px	1280
	Sensor vertical resolution, px	960
	Minimum triggering interval, s	1.00

### Parâmetro e característica do sensor multiespectral

Flir T420 (18 mm)	Edit	Remove
	Weight, kg	0.88
	True focal length, mm	18.00
	Sensor width, mm	8.00
	Sensor height, mm	6.00
	Sensor horizontal resolution, px	320
	Sensor vertical resolution, px	240
	Minimum triggering interval, s	14.00

## Parâmetro e característica para calibração da plataforma

Quadcopter Emulator
Copy
Edit
Remove



Type Multicopter

Platform Emulator

 GoPro Hero3 Black Edition

Payloads  Flir T420 (18 mm)

 MicaSense RedEdge3 (5.5 mm)

Battery

Charged battery voltage, V 12.60

Normal battery voltage, V 10.50

Low battery voltage, V 10.00

Discharged battery voltage, V 9.50

Normal battery power level, % 50.00

Low battery power level, % 20.00

Battery weight, kg 0.20

GPS

Normal number of satellites 9.00

Low number of satellites 7.00

Telemetry

Normal telemetry level, % 70.00

Low telemetry level, % 50.00

Routing

Max waypoints 120.00

Waypoint acceptance radius, m 2.00

Max altitude AMSL, m 3000.00

Max. altitude AGL, m 300.00

Fence radius, m 500.00

Maximum travel time, s 1200.00

Safe height over terrain, m 5.00

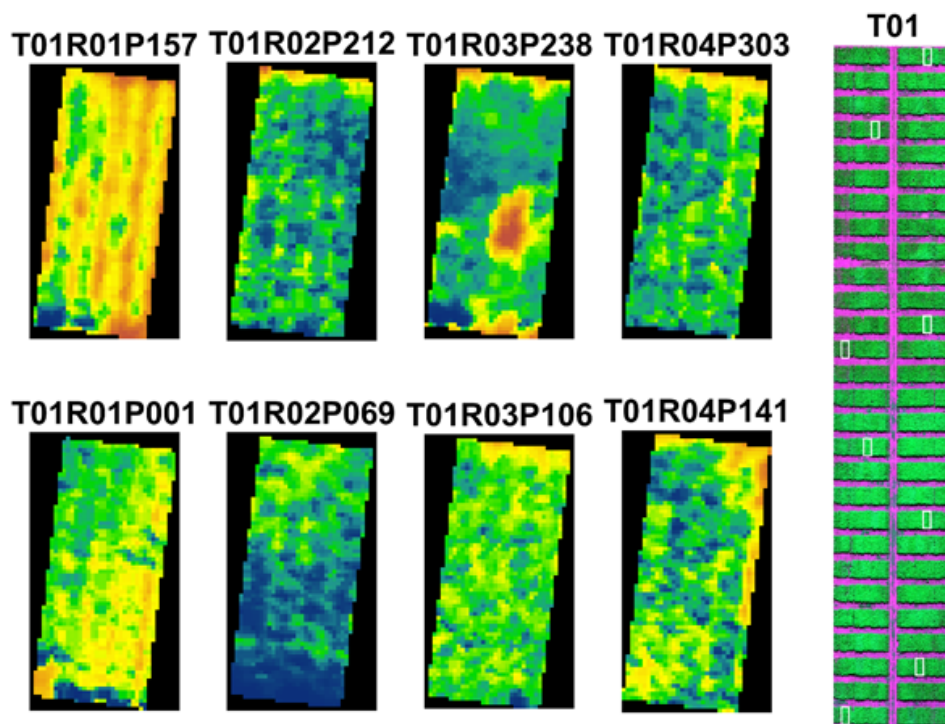
Safe distance to obstacle, m 20.00

Max climb rate, m/s 5.00

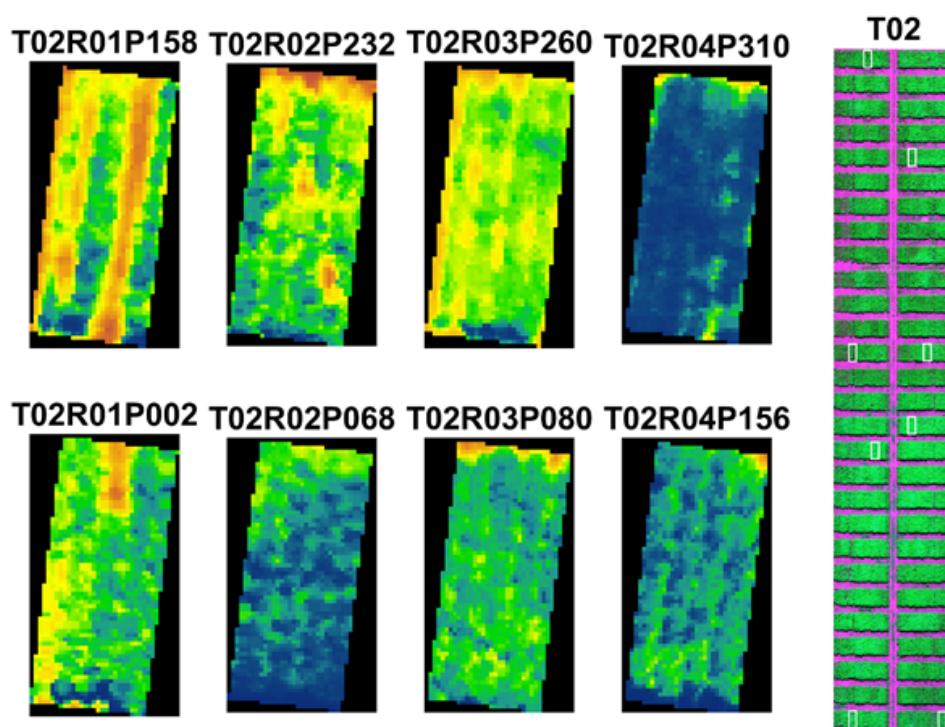
Max descent rate, m/s 5.00

Recortes dos tratamentos (variedades), com imagens termográficas do dia 13 de junho de 2018, localizadas na suas respectivas parcelas.

FT4 06 13 2018

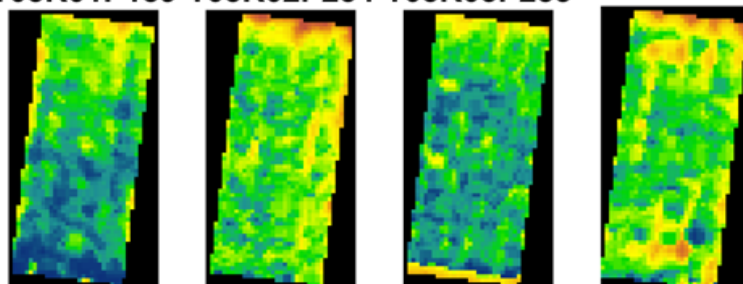


FT4 06 13 2018

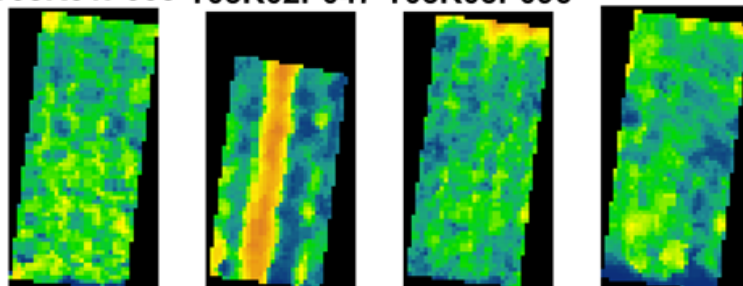


FT4 06 13 2018

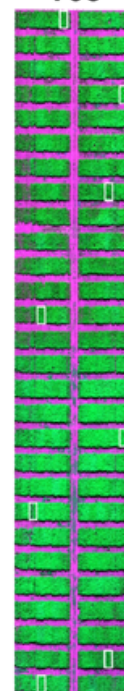
T03R01P159 T03R02P234 T03R03P253 T03R04P279



T03R01P003 T03R02P047 T03R03P096 T03R04P147

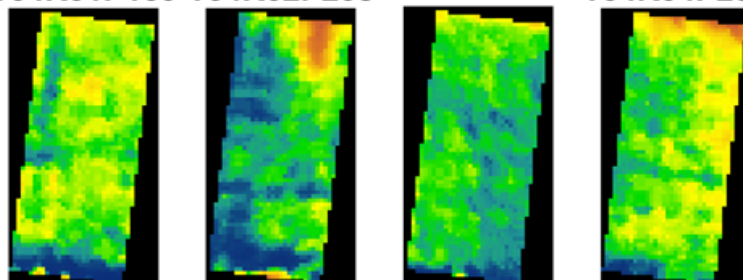


T03

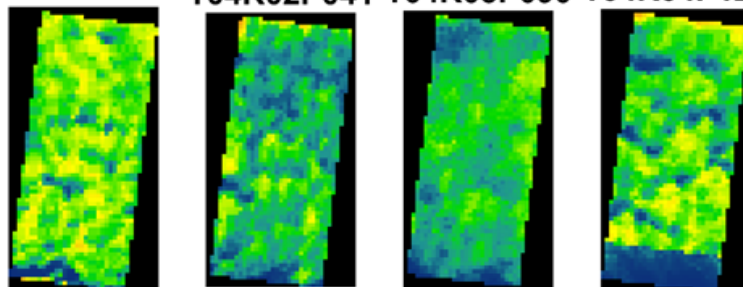


FT4 06 13 2018

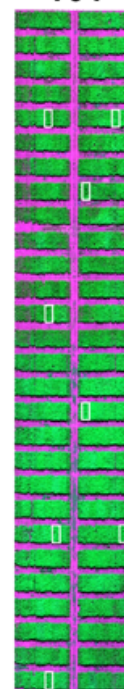
T04R01P160 T04R02P208 T04R03P263 T04R04P282



T04R01P004 T04R02P041 T04R03P090 T04R04P120

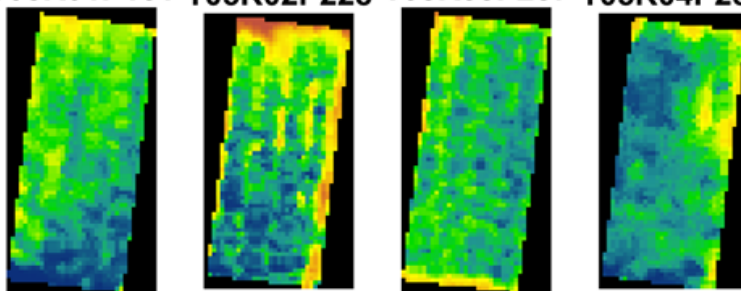


T04

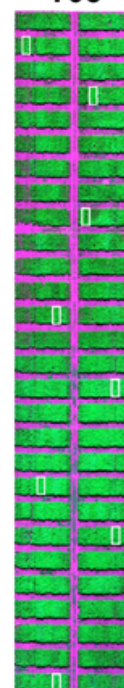


FT4 06 13 2018

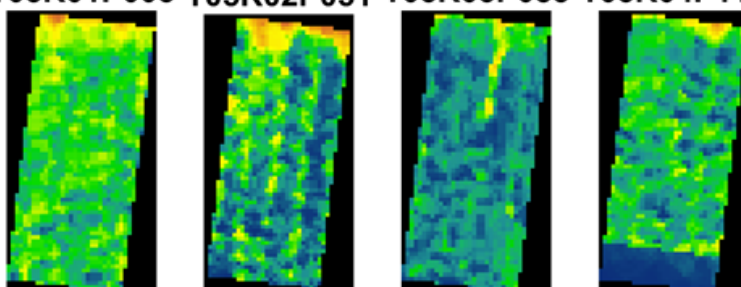
T05R01P161 T05R02P228 T05R03P257 T05R04P283



T05

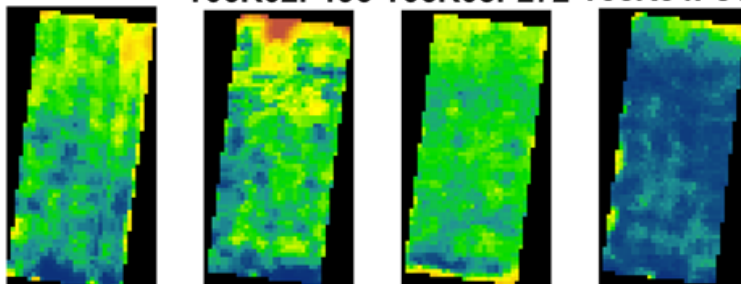


T05R01P005 T05R02P051 T05R03P083 T05R04P119

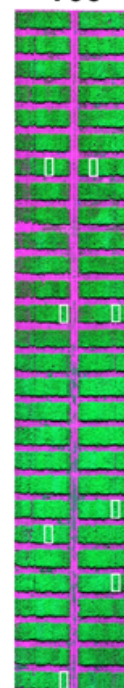


FT4 06 13 2018

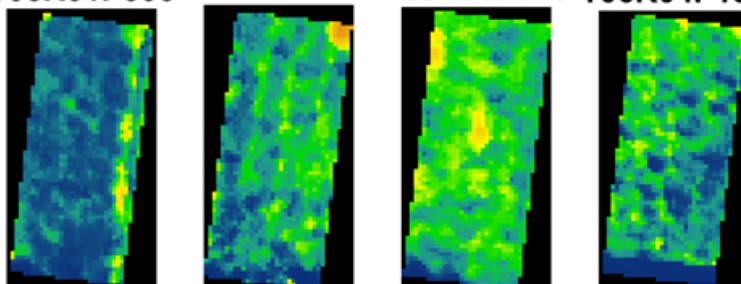
T06R01P162 T06R02P196 T06R03P272 T06R04P311



T06

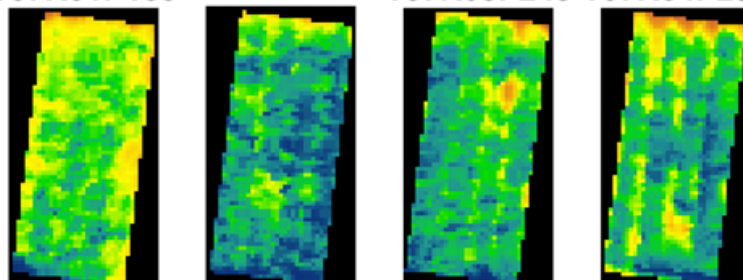


T06R01P006 T06R02P040 T06R03P110 T06R04P131

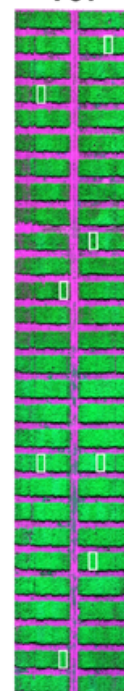


FT4 06 13 2018

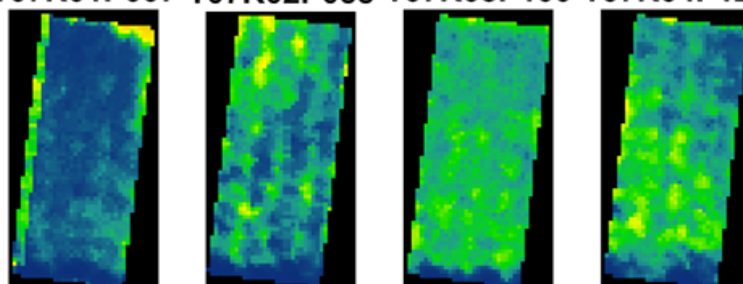
T07R01P163 T07R02P214 T07R03P243 T07R04P293



T07

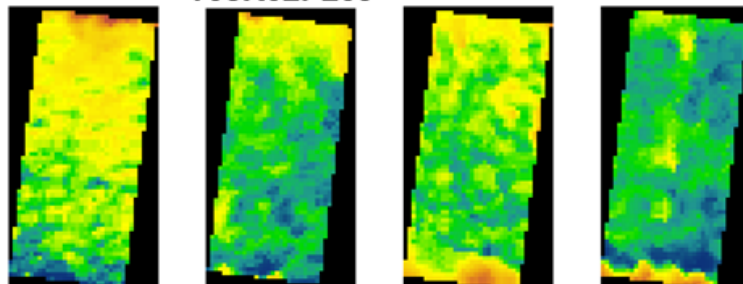


T07R01P007 T07R02P058 T07R03P100 T07R04P125

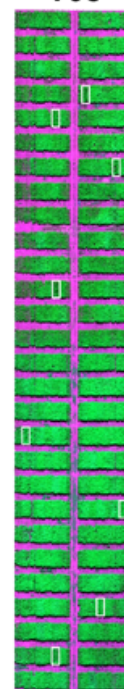


FT4 06 13 2018

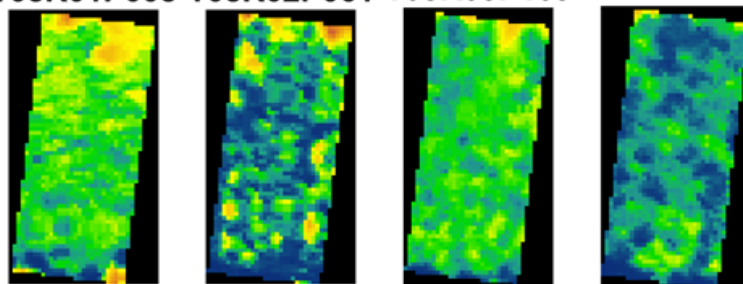
T08R01P164 T08R02P209 T08R03P258 T08R04P275



T08

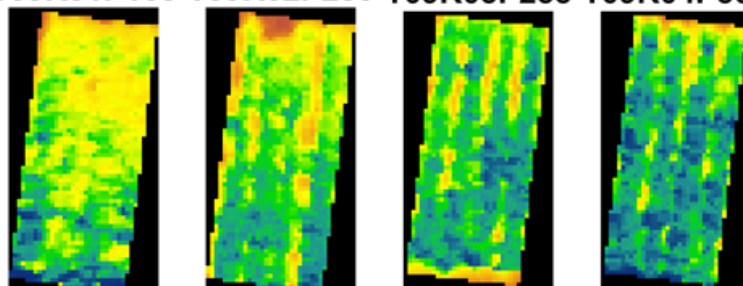


T08R01P008 T08R02P061 T08R03P109 T08R04P136

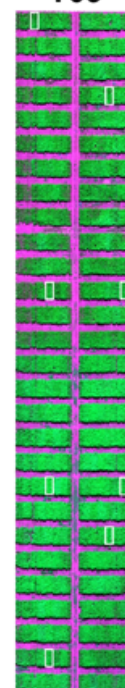


FT4 06 13 2018

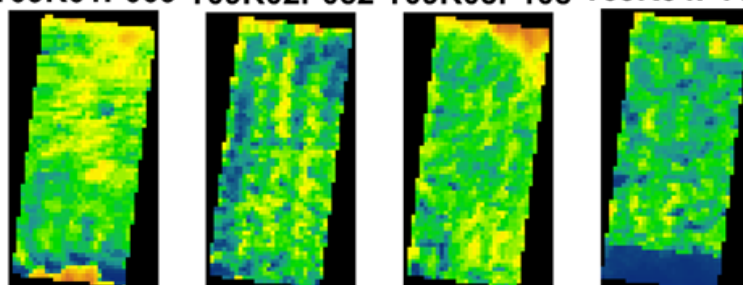
T09R01P165 T09R02P230 T09R03P255 T09R04P301



T09

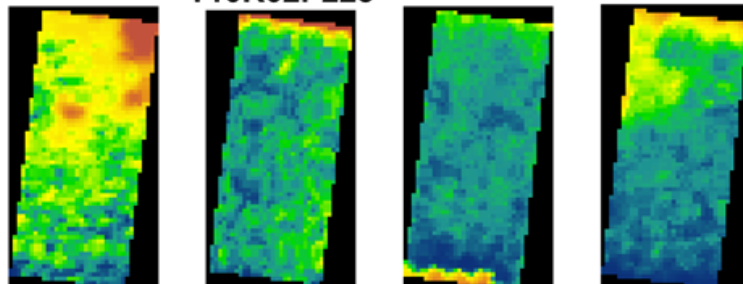


T09R01P009 T09R02P052 T09R03P108 T09R04P118

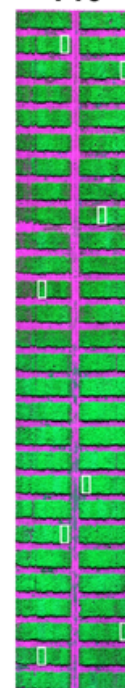


FT4 06 13 2018

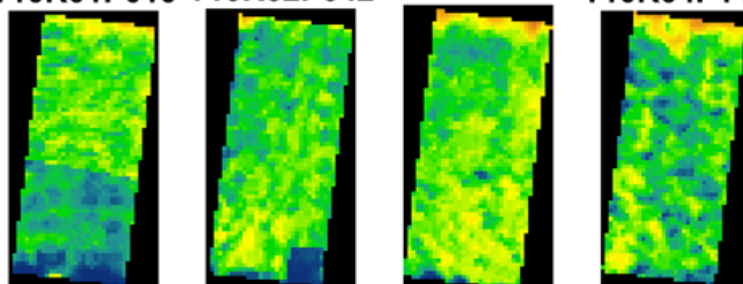
T10R01P166 T10R02P223 T10R03P252 T10R04P285



T10

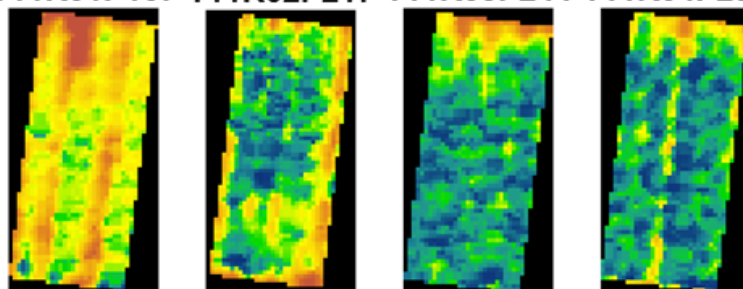


T10R01P010 T10R02P042 T10R03P103 T10R04P144

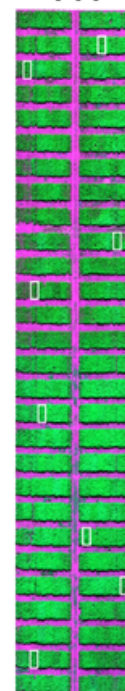


FT4 06 13 2018

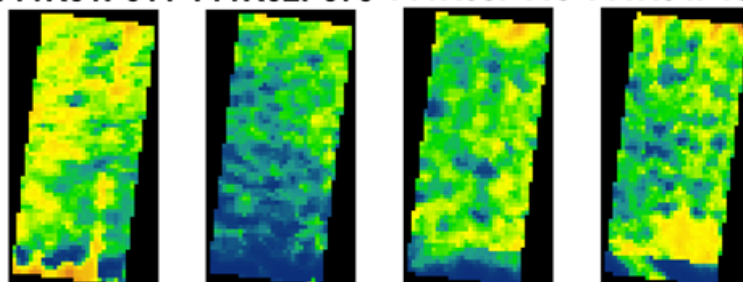
T11R01P167 T11R02P217 T11R03P244 T11R04P290



T11

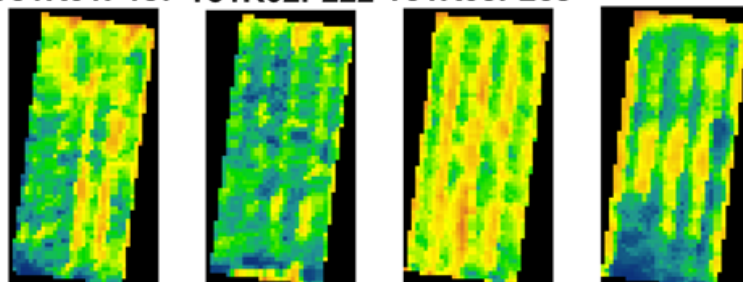


T11R01P011 T11R02P070 T11R03P115 T11R04P132

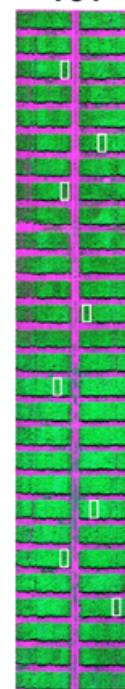


FT4 06 13 2018

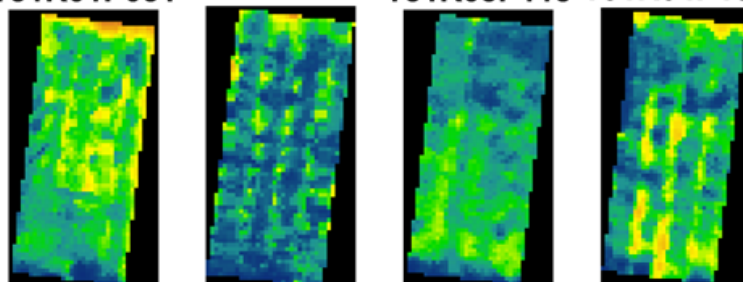
T31R01P187 T31R02P222 T31R03P268 T31R04P307



T31

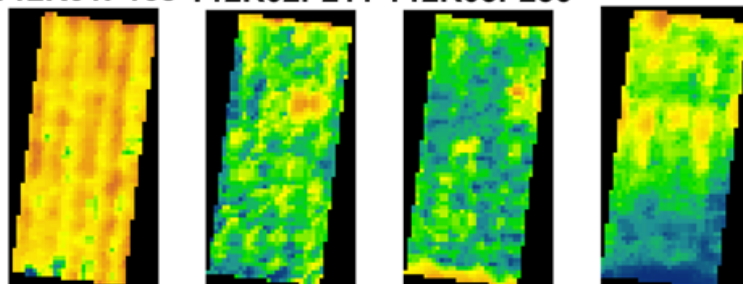


T31R01P031 T31R02P077 T31R03P113 T31R04P134

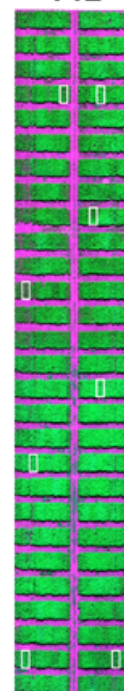


FT4 06 13 2018

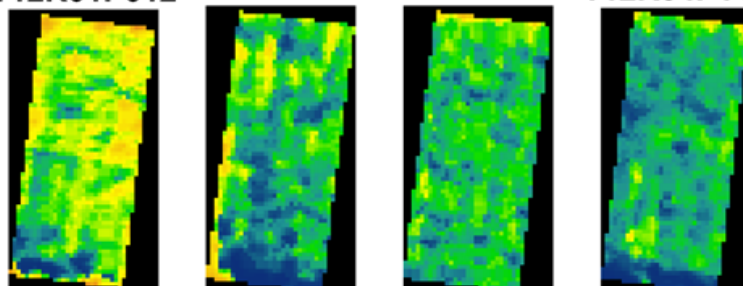
T12R01P168 T12R02P211 T12R03P256 T12R04P284



T12

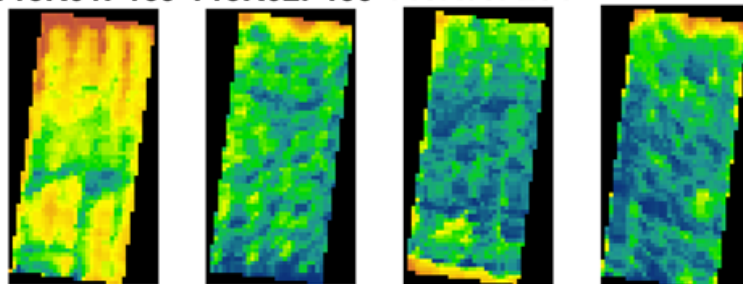


T12R01P012 T12R02P059 T12R03P081 T12R04P146

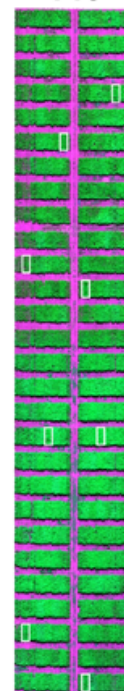


FT4 06 13 2018

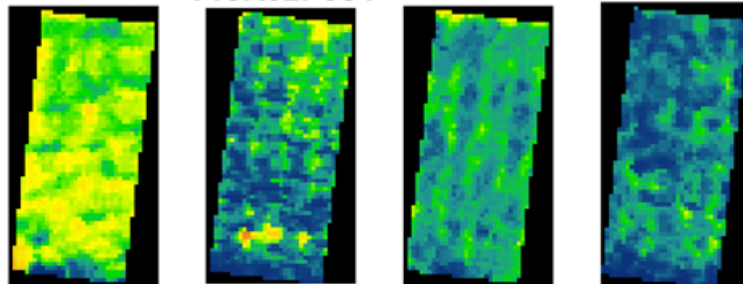
T13R01P169 T13R02P199 T13R03P254 T13R04P306



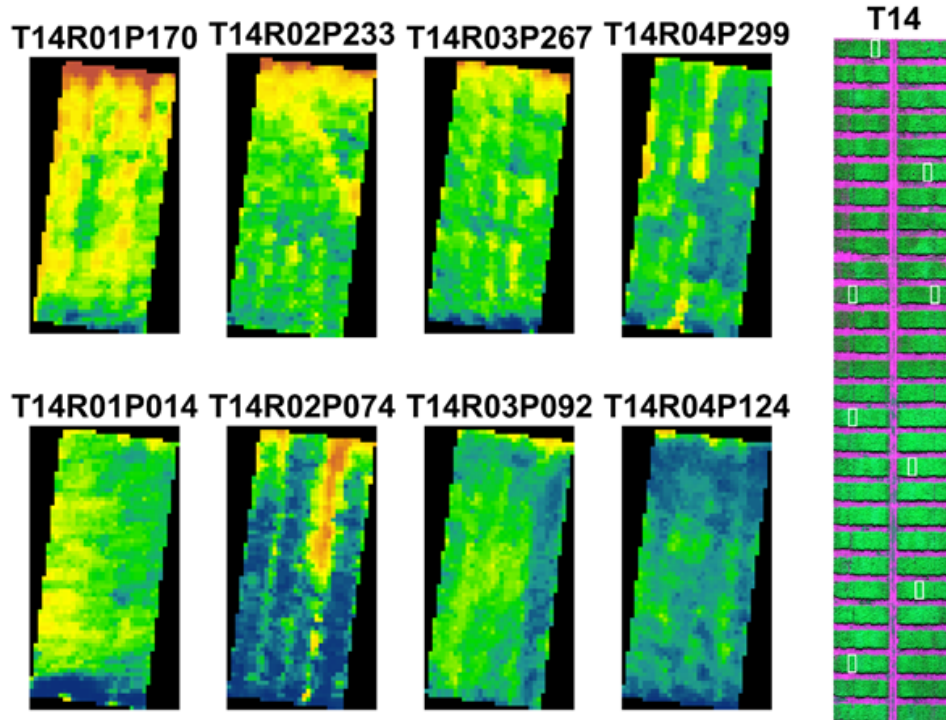
T13



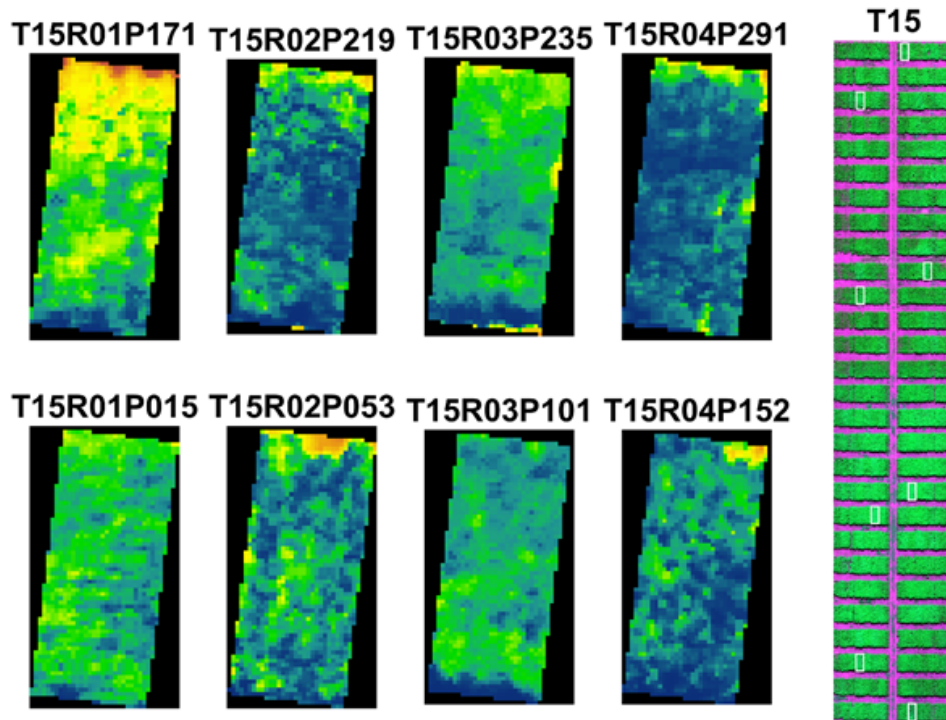
T13R01P013 T13R02P064 T13R03P093 T13R04P151



FT4 06 13 2018

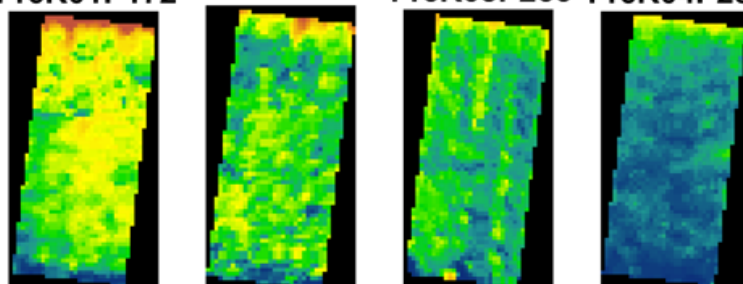


FT4 06 13 2018

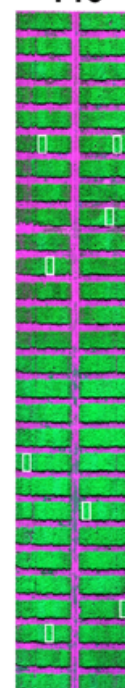


FT4 06 13 2018

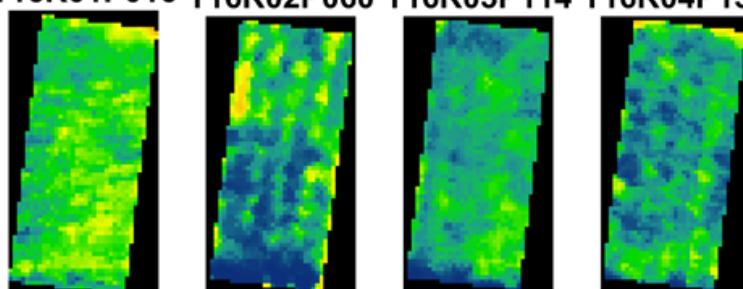
T16R01P172 T16R02P202 T16R03P266 T16R04P286



T16

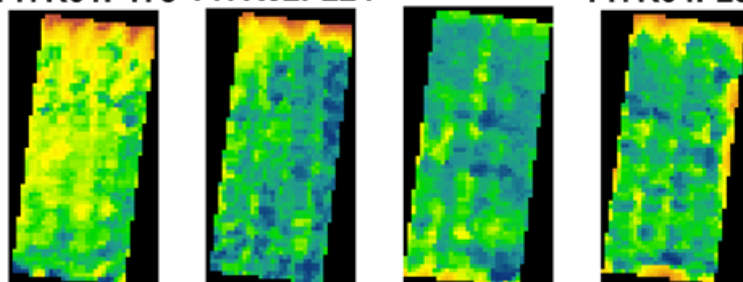


T16R01P016 T16R02P060 T16R03P114 T16R04P133

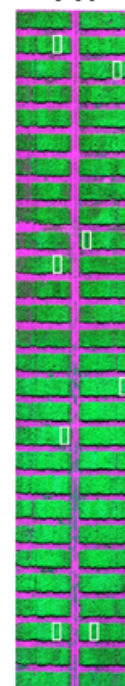


FT4 06 13 2018

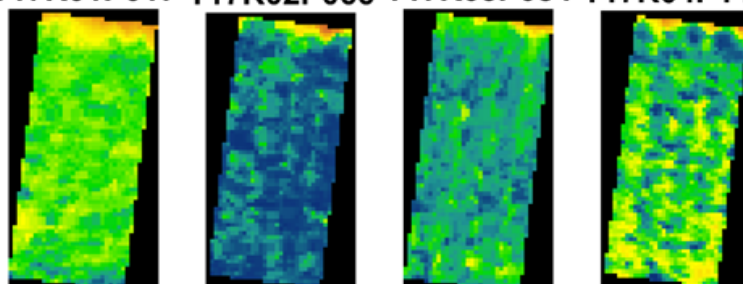
T17R01P173 T17R02P224 T17R03P251 T17R04P294



T17

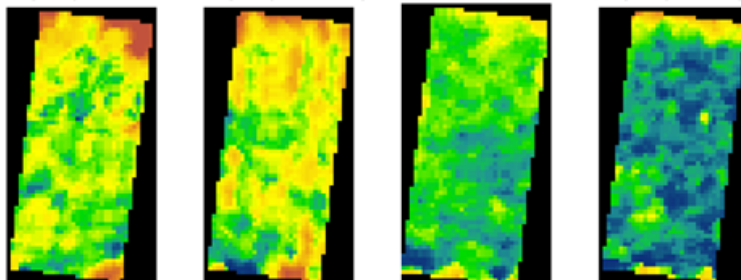


T17R01P017 T17R02P066 T17R03P084 T17R04P140

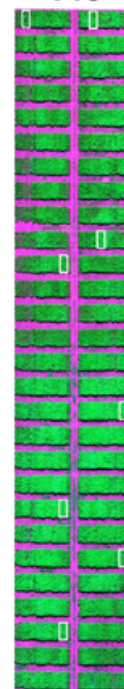


FT4 06 13 2018

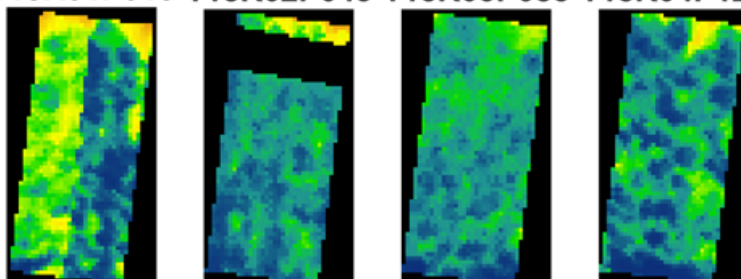
T18R01P174 T18R02P229 T18R03P236 T18R04P292



T18

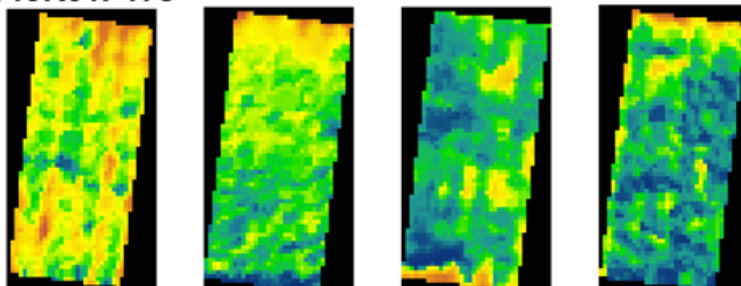


T18R01P018 T18R02P043 T18R03P085 T18R04P121

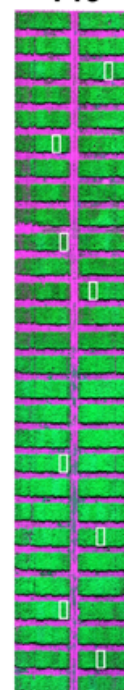


FT4 06 13 2018

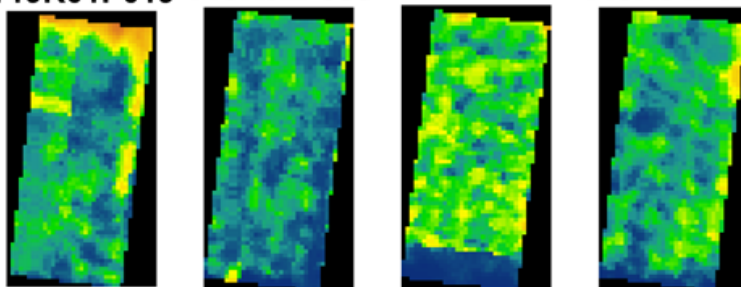
T19R01P175 T19R02P200 T19R03P250 T19R04P305



T19

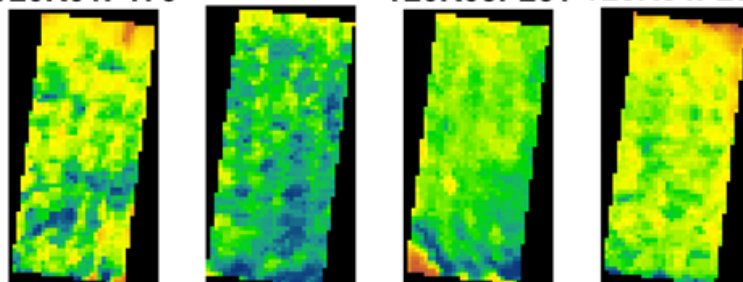


T19R01P019 T19R02P055 T19R03P117 T19R04P148

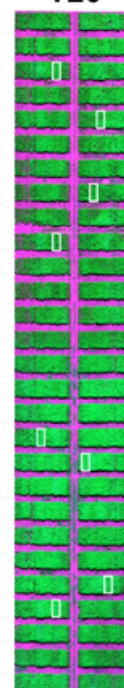


FT4 06 13 2018

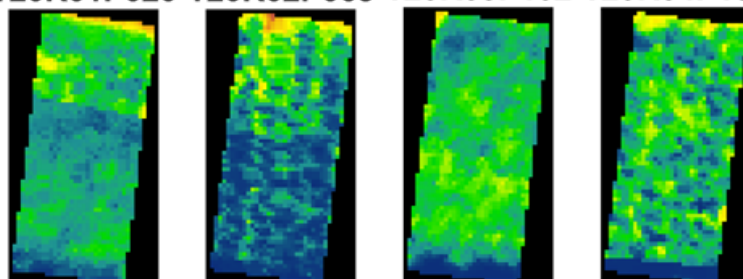
T20R01P176 T20R02P221 T20R03P261 T20R04P281



T20

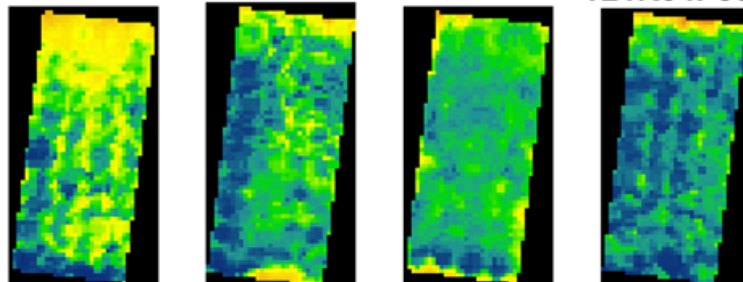


T20R01P020 T20R02P063 T20R03P102 T20R04P130

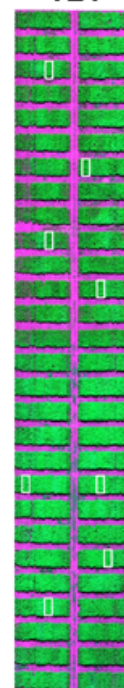


FT4 06 13 2018

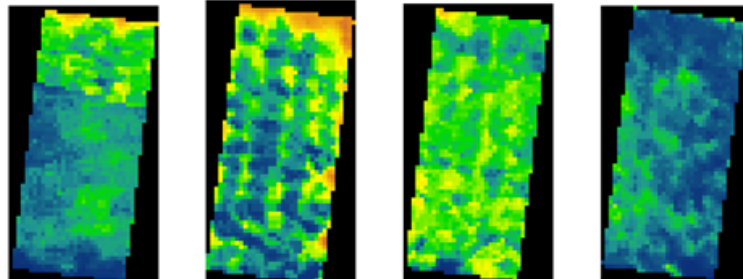
T21R01P177 T21R02P220 T21R03P271 T21R04P304



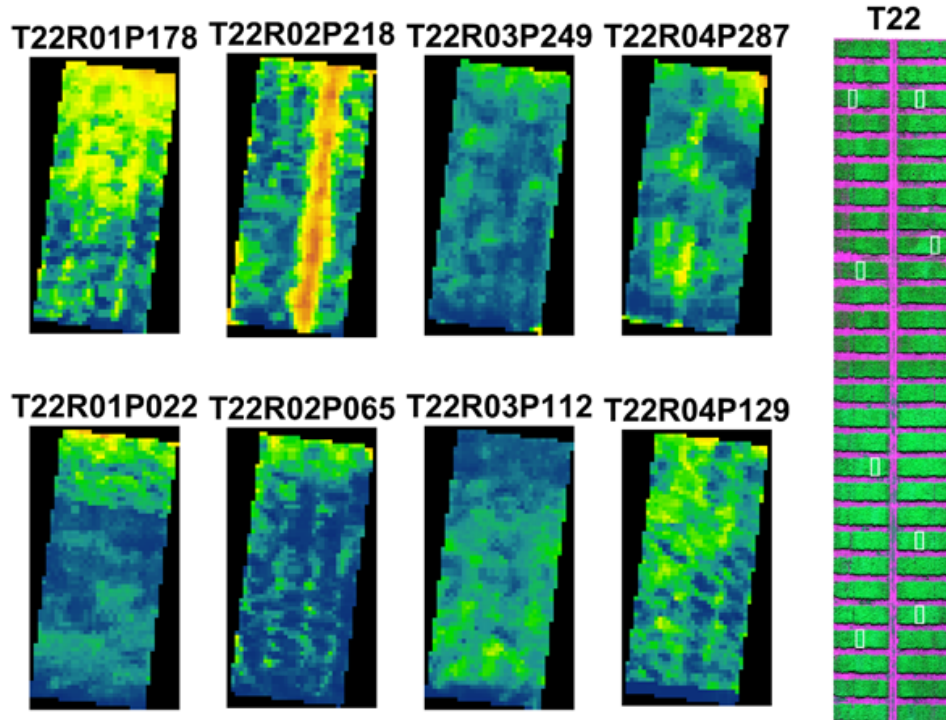
T21



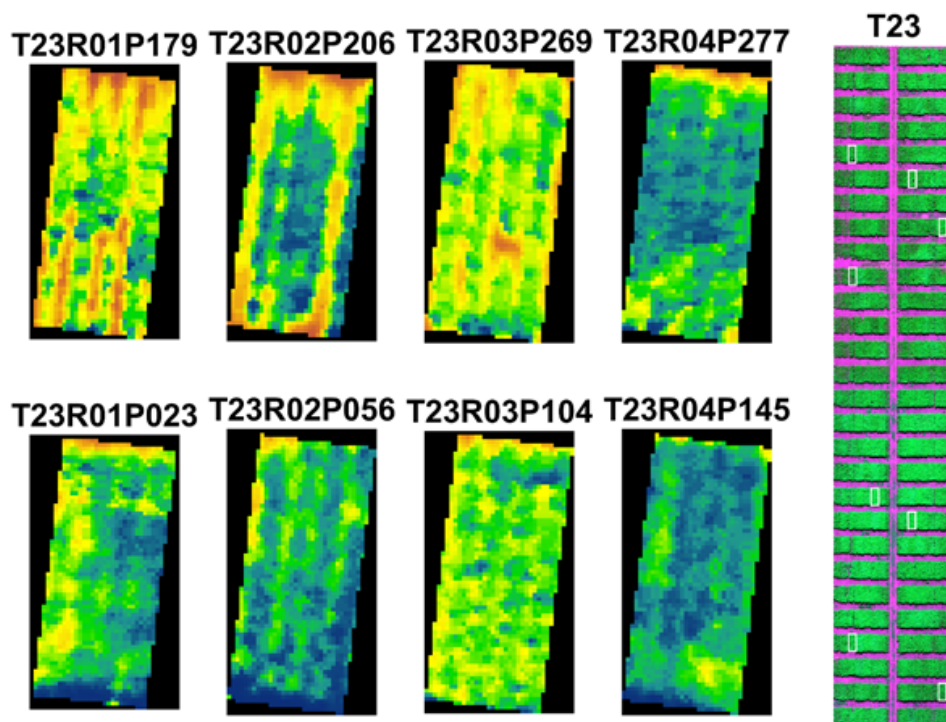
T21R01P021 T21R02P049 T21R03P105 T21R04P123



FT4 06 13 2018

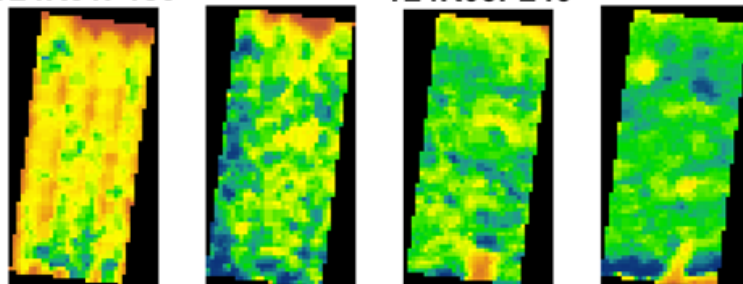


FT4 06 13 2018

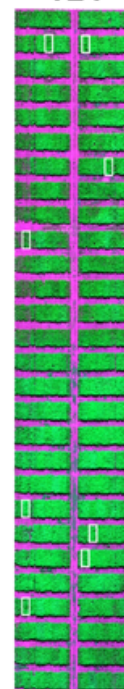


FT4 06 13 2018

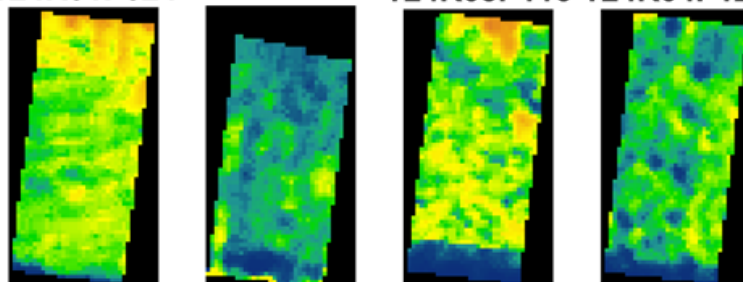
T24R01P180 T24R02P225 T24R03P246 T24R04P274



T24

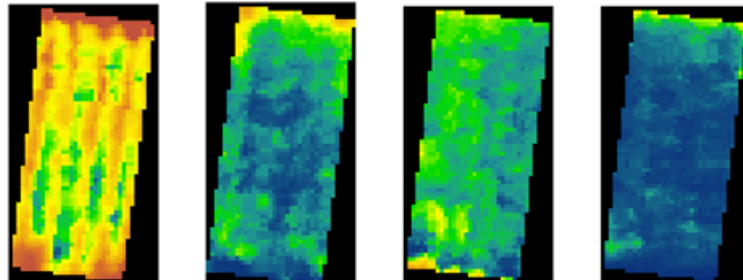


T24R01P024 T24R02P048 T24R03P116 T24R04P126

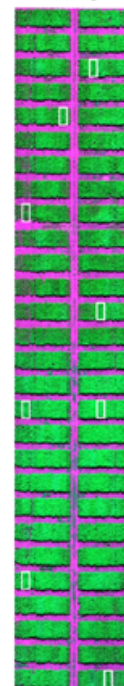


FT4 06 13 2018

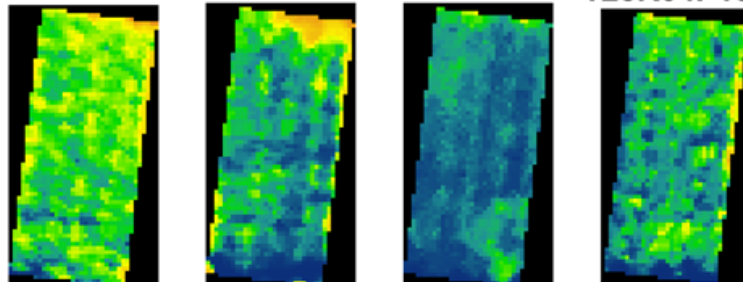
T25R01P181 T25R02P210 T25R03P248 T25R04P309



T25

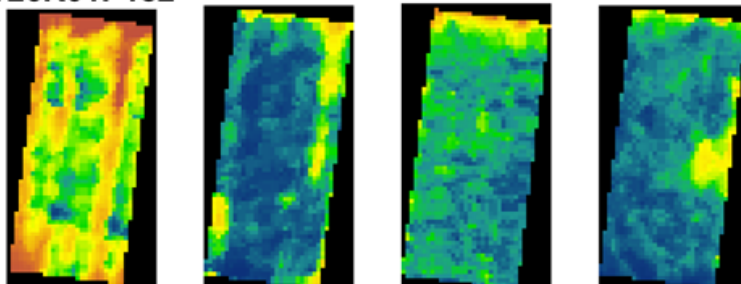


T25R01P025 T25R02P072 T25R03P088 T25R04P154

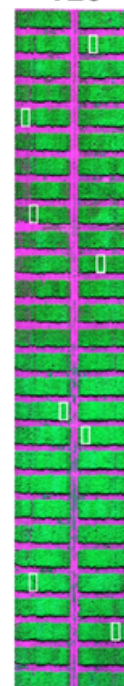


FT4 06 13 2018

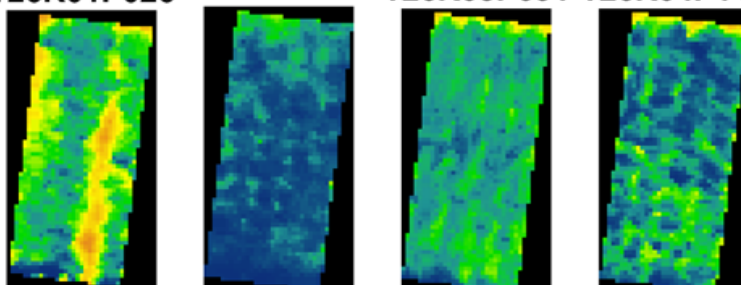
T26R01P182 T26R02P205 T26R03P245 T26R04P297



T26

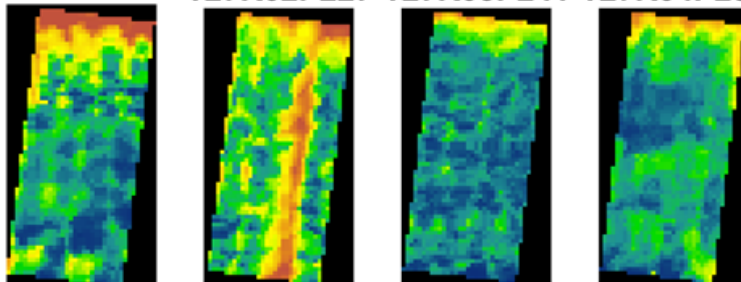


T26R01P026 T26R02P067 T26R03P091 T26R04P143

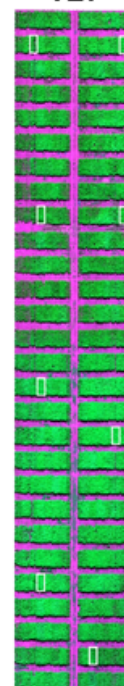


FT4 06 13 2018

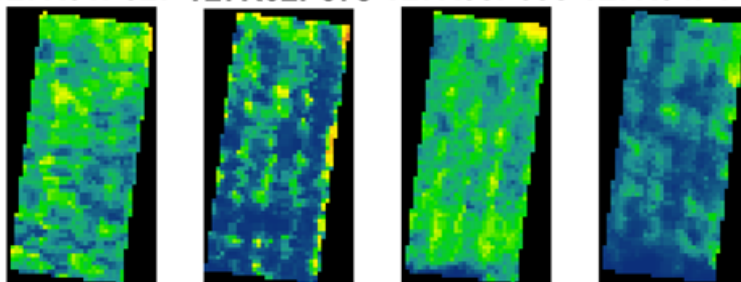
T27R01P183 T27R02P227 T27R03P241 T27R04P288



T27

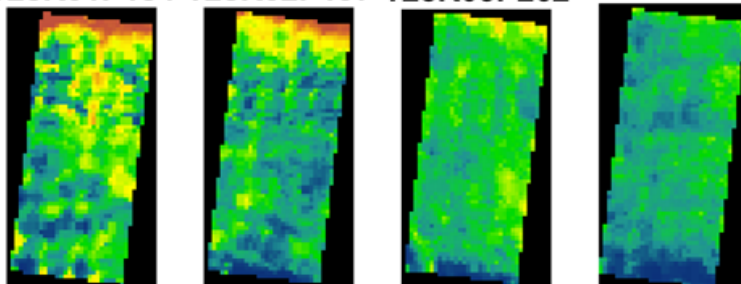


T27R01P027 T27R02P075 T27R03P095 T27R04P149

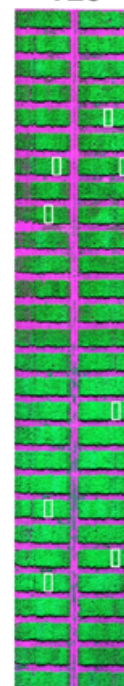


FT4 06 13 2018

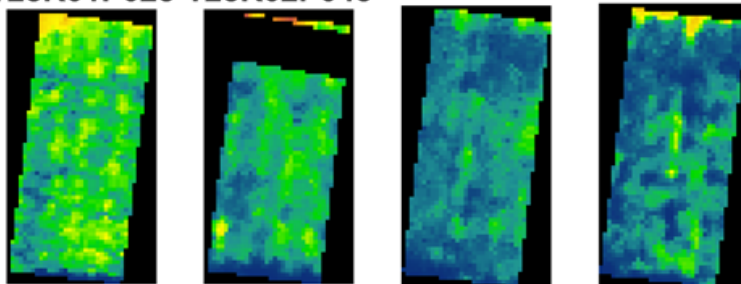
T28R01P184 T28R02P197 T28R03P262 T28R04P276



T28

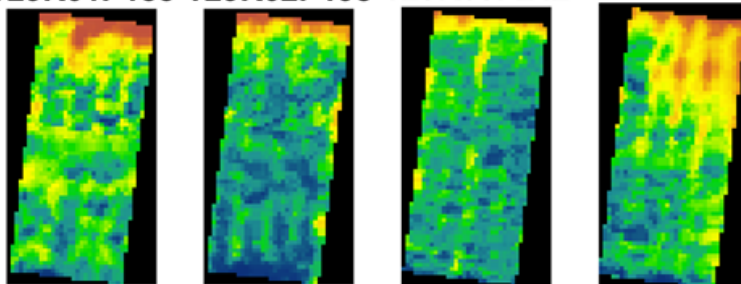


T28R01P028 T28R02P045 T28R03P086 T28R04P122

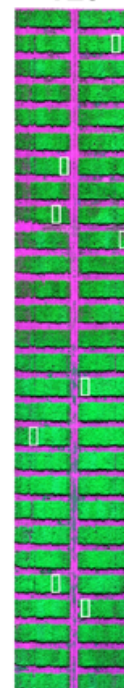


FT4 06 13 2018

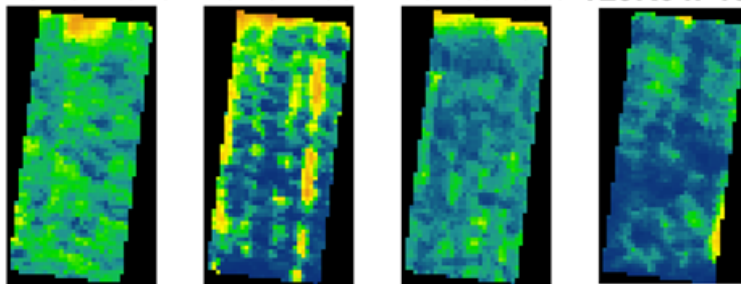
T29R01P185 T29R02P198 T29R03P242 T29R04P289



T29

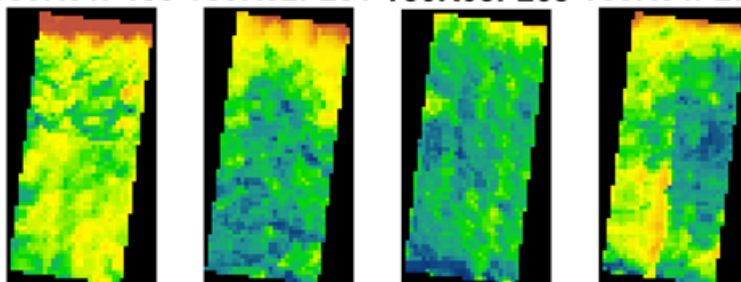


T29R01P029 T29R02P062 T29R03P079 T29R04P138

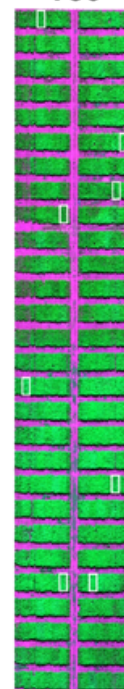


FT4 06 13 2018

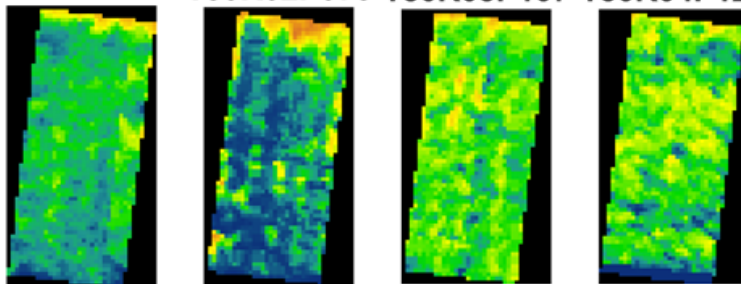
T30R01P186 T30R02P231 T30R03P265 T30R04P278



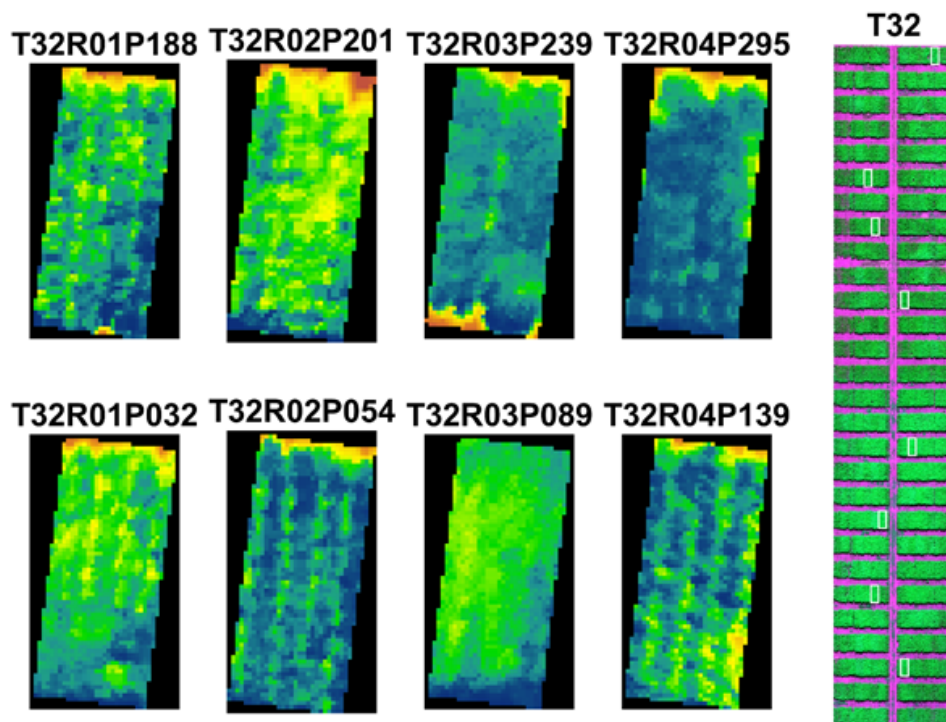
T30



T30R01P030 T30R02P073 T30R03P107 T30R04P128

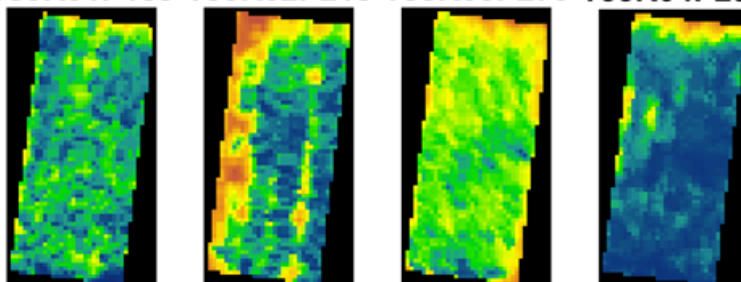


FT4 06 13 2018

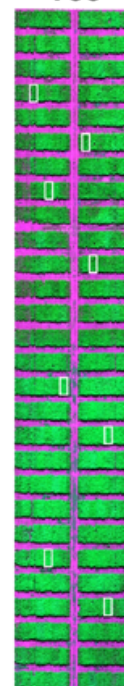


FT4 06 13 2018

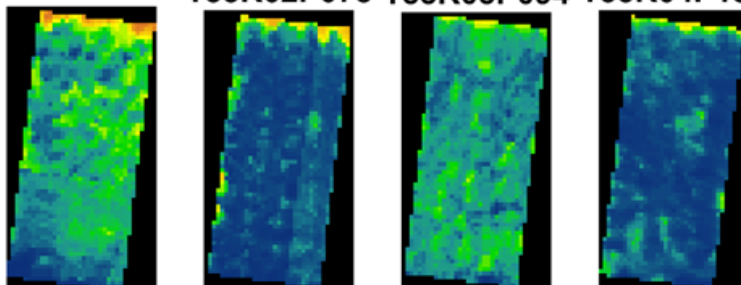
T33R01P189 T33R02P215 T33R03P270 T33R04P296



T33

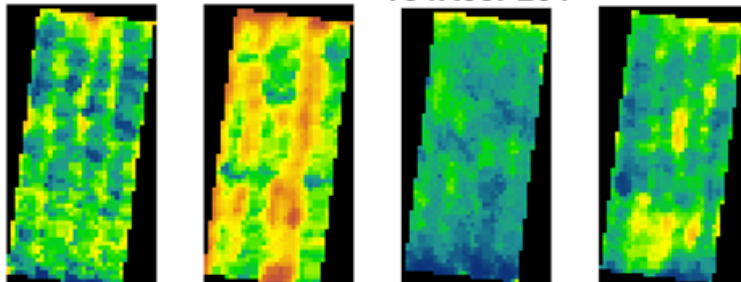


T33R01P033 T33R02P078 T33R03P094 T33R04P135

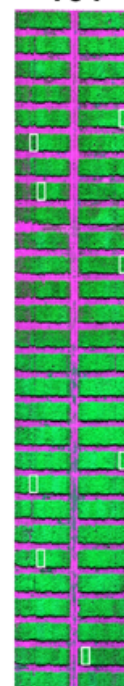


FT4 06 13 2018

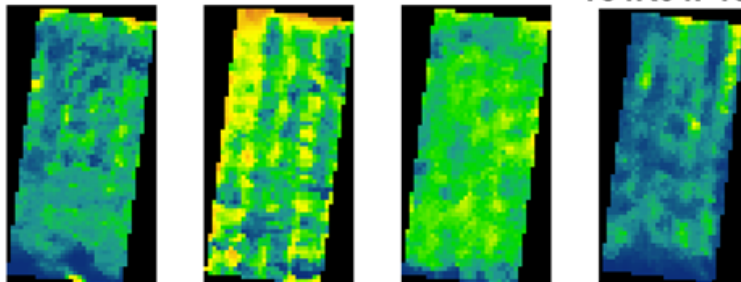
T34R01P190 T34R02P203 T34R03P264 T34R04P300



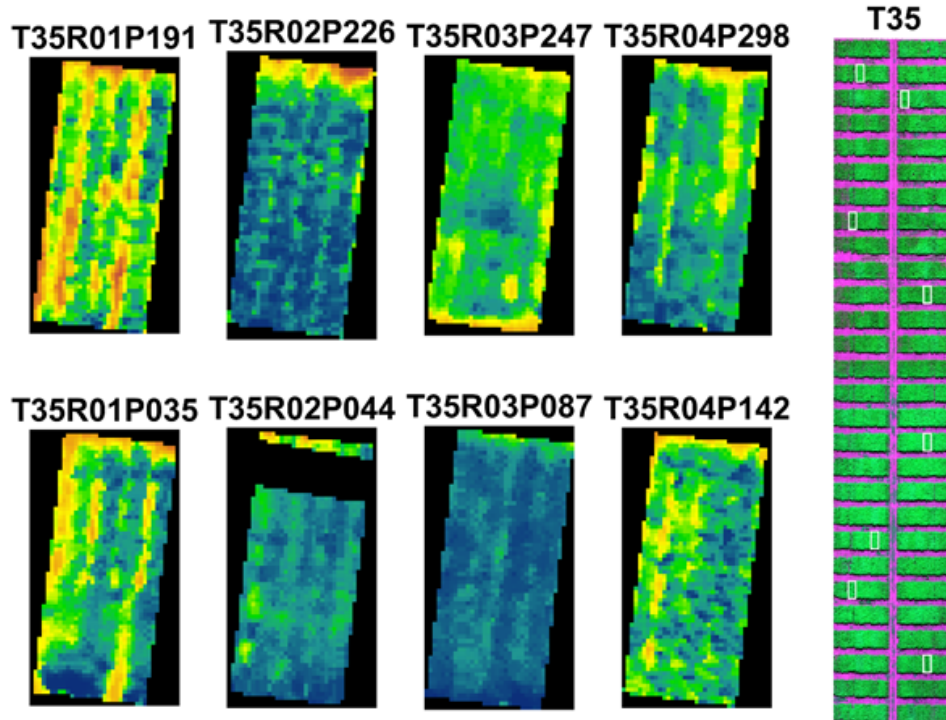
T34



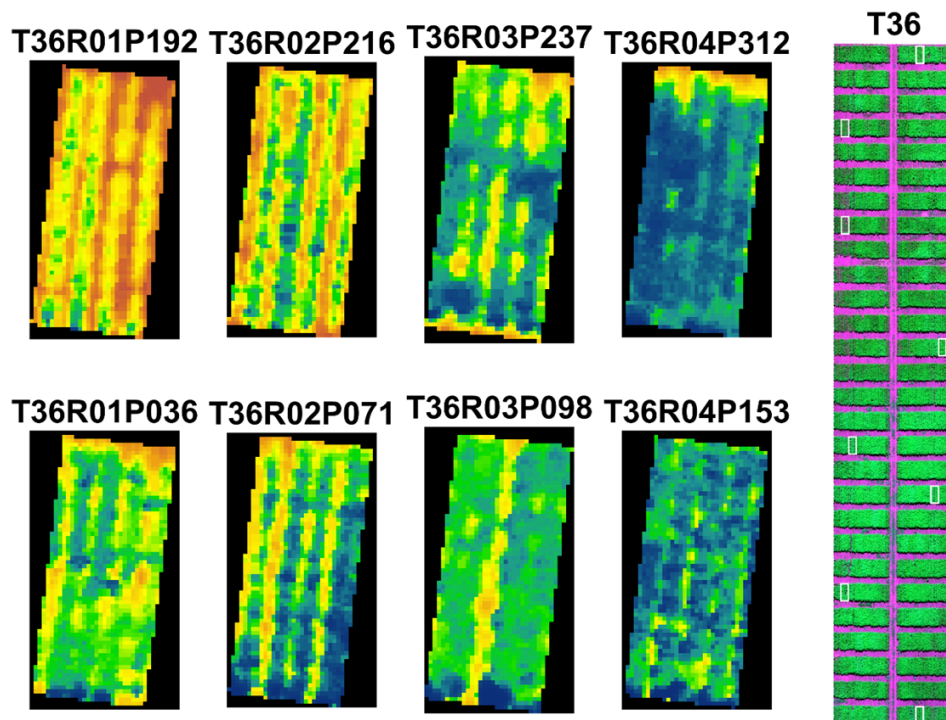
T34R01P034 T34R02P050 T34R03P097 T34R04P150



FT4 06 13 2018

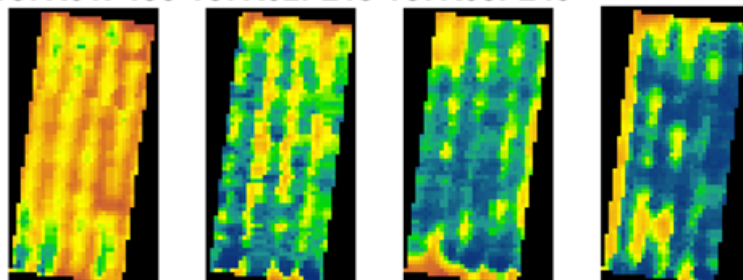


FT4 06 13 2018

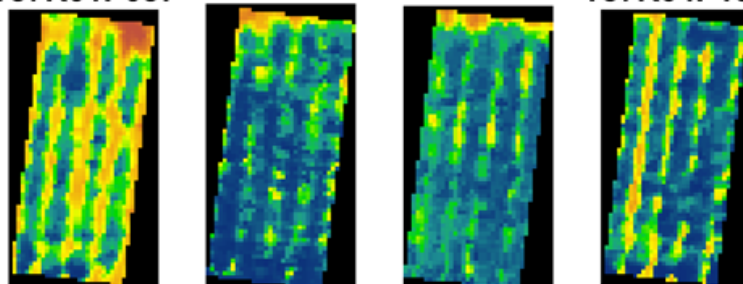


FT4 06 13 2018

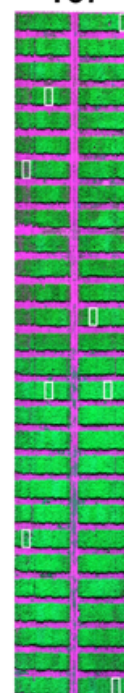
T37R01P193 T37R02P213 T37R03P240 T37R04P308



T37R01P037 T37R02P076 T37R03P082 T37R04P155

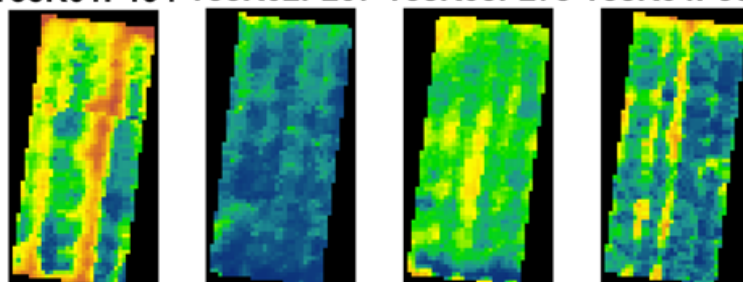


T37

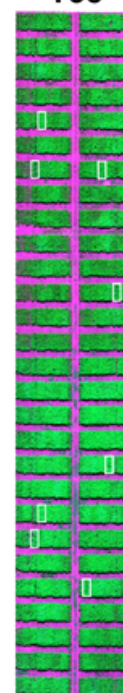


FT4 06 13 2018

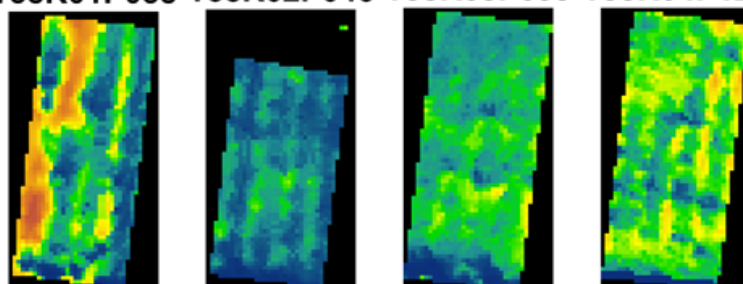
T38R01P194 T38R02P207 T38R03P273 T38R04P302



T38

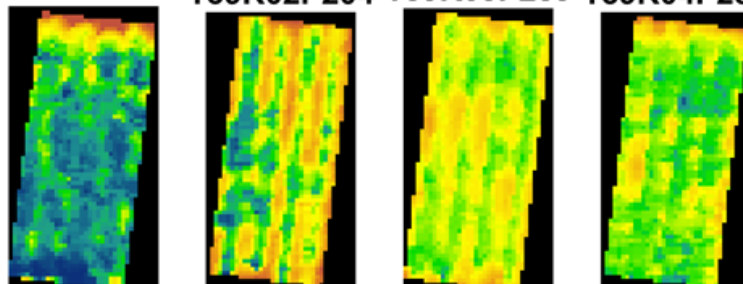


T38R01P038 T38R02P046 T38R03P099 T38R04P127

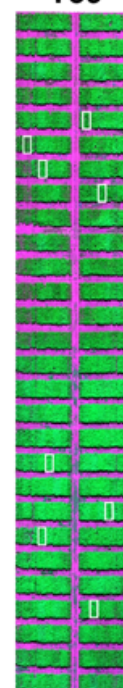


FT4 06 13 2018

T39R01P195 T39R02P204 T39R03P259 T39R04P280



T39



T39R01P039 T39R02P057 T39R03P111 T39R04P137

