

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
THALITA ALMEIDA BEZERRA**

**CARACTERIZAÇÃO MULTIESPECTRAL DA FERRUGEM DO CAFEIRO  
CAUSADA POR *Hemileia vastratrix* Berk & Br EM FOLHAS INOCULADAS E  
ASSINTOMÁTICAS**

**MONTE CARMELO  
2024**

**THALITA ALMEIDA BEZERRA**

**CARACTERIZAÇÃO MULTIESPECTRAL DA FERRUGEM DO CAFEIEIRO  
CAUSADA POR *Hemileia vastratrix* Berk & Br EM FOLHAS INOCULADAS E  
ASSINTOMÁTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Agronomia, Campus Monte Carmelo, da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Sérgio Vieira

**MONTE CARMELO  
2024**

**THALITA ALMEIDA BEZERRA**

**CARACTERIZAÇÃO MULTIESPECTRAL DA FERRUGEM DO CAFEEIRO  
CAUSADA POR *Hemileia vastratrix* Berk & Br EM FOLHAS INOCULADAS E  
ASSINTOMÁTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Agronomia, Campus Monte Carmelo, da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Sérgio Vieira

Monte Carmelo, 17 de abril de 2024.

Banca Examinadora



---

Prof. Dr. Bruno Sérgio Vieira  
Orientador



---

Msc. Claudia Fabbris  
Membro da Banca



---

Msc. Letícia Pasqualin Messias Arriero  
Membro da Banca

**MONTE CARMELO  
2024**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus que me sustentou durante toda a caminhada.

Aos meus pais Josué da Silva Bezerra e Mirian Vaz de Almeida Bezerra pela educação, apoio e incentivo, durante toda minha trajetória até os dias de hoje. Todo agradecimento e gratidão é pouco diante do sacrifício que eles já fizeram por mim para que um dia eu chegasse até aqui.

Ao meu irmão, Kairon Almeida Bezerra e meus avós Rute Vaz de Almeida e Oliveira Vaz da Silva (*in memoriam*) por todo carinho, amor e apoio nesses últimos anos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Bruno Sérgio Vieira, pela amizade, profissionalismo, paciência e contribuição para o meu desenvolvimento pessoal e profissional durante esses anos, por ter sido sempre uma grande referência nessa minha jornada, além de ter sido um grande conselheiro nesta trajetória acadêmica.

A todos meus colegas e amigos que de alguma forma, contribuíram e auxiliaram na condução do projeto, como a Mestra Analis da Silva Soares e meu namorado Diego França Reis.

Aos professores, técnicos e servidores da Universidade Federal de Uberlândia - *Campus Monte Carmelo*, que contribuíram de forma direta ou indireta para que fosse possível minha formação.

A todos vocês que contribuíram para a construção deste trabalho.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVO .....	10
3. REVISÃO DE LITERATURA .....	10
3.1 Cultura do cafeeiro.....	10
3.2 A ferrugem do cafeeiro.....	11
3.3 Manejo da ferrugem.....	13
3.4. Agricultura de Precisão.....	16
3.5 Sensoriamento Remoto.....	17
3.7 Propriedades ópticas das folhas.....	18
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
4.1. Dados gerais.....	19
4.2. Inoculação de <i>H. vastatrix</i> em mudas de cafeeiro.....	20
4.3. Imagens multiespectrais e Classificação Supervisionada pelo Software Envi.....	21
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>23</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>27</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>28</b>

## RESUMO

A ferrugem do cafeeiro provocada pelo fungo *Hemileia vastatrix* Berk & Br é uma importante doença que causa queda precoce das folhas e seca de ramos, o que impacta a produção causando prejuízos para os produtores, visto que o controle químico nem sempre é realizado corretamente, pois o fungo deposita os urediniósporos na folha, causa infecção e só após algumas semanas é possível visualizar a esporulação (fase de disseminação da doença), sendo necessária aplicação de fungicidas sistêmicos que são mais caros em relação aos protetores e biológicos, além do uso demasiado em determinados casos. O estudo foi realizado no Laboratório de Microbiologia e Fitopatologia (LAMIF), na Universidade Federal de Uberlândia – campus Monte Carmelo. O presente trabalho teve como objetivo a detecção precoce da ferrugem do cafeeiro, em folhas artificialmente inoculadas, porém, ainda assintomáticas por meio da obtenção de imagens multiespectrais obtidas por veículo aéreo não tripulado (VANT). Foram inoculadas 160 mudas de cafeeiro da cultivar Mundo Novo IAC 379-19 com urediniósporos de *Hemileia vastatrix*, outras 160 mudas não foram inoculadas a fim de determinar o intervalo mais propício para detecção precoce da doença. As 320 mudas foram posicionadas em uma superfície escura para realização dos voos, esse processo foi realizado em três repetições: aos 15, 30 e 45 dias após inoculação. A cada avaliação foram extraídas 20 mudas de cada tratamento para realização de análises laboratoriais para obtenção de dados para outra pesquisa. As imagens multiespectrais obtidas pela câmera Mapir foram processadas no Software Envi 5.1 (*Environment for Visualizing Images*) e por meio da função Region of Interest (ROI) foram gerados polígonos para extração das amostras de cada planta e realizado o treinamento do Software Envi para classificar como verde plantas saudáveis e vermelho plantas infectadas e através de um algoritmo, o software processou e classificou. Portanto, aos 15 dias após inoculação foi possível detectar a ferrugem precoce nas plantas inoculadas e essa ferramenta pode ser muito útil para o manejo da doença, visando o monitoramento no campo e auxiliando na tomada de decisão, principalmente em relação à aplicação adequada de fungicidas, promovendo benefícios ecológicos e econômicos, acompanhados de ganhos de produtividade do cafeeiro.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cafeicultura, *Hemileia vastatrix*, Diagnose, Agricultura de Precisão.

## ABSTRACT

Coffee rust, caused by the fungus *Hemileia vastatrix* Berk & Br, is an important disease that causes premature leaf fall and branch drying, which impacts production, causing losses for producers, as chemical control is not always carried out correctly, as the fungus deposits urediniospores on the leaf, causes infection and only after a few weeks is it possible to see sporulation (dissemination phase of the disease), requiring the application of systemic fungicides which are more expensive in relation to protective and biological fungicides, in addition to the use too much in certain cases. The study was carried out at the Microbiology and Phytopathology Laboratory (LAMIF), at the Federal University of Uberlândia – Monte Carmelo campus. The present work aimed to detect early coffee rust in artificially inoculated, but still asymptomatic, leaves by obtaining multispectral images obtained by an unmanned aerial vehicle (UAV). 160 coffee seedlings of the Mundo Novo IAC 379-19 cultivar were inoculated with *Hemileia vastatrix* urediniospores, another 160 seedlings were not inoculated in order to determine the most favorable interval for early detection of the disease. The 320 seedlings were positioned on a dark surface to carry out the flights, this process was carried out in three repetitions: at 15, 30 and 45 days after inoculation. At each evaluation, 20 seedlings were extracted from each treatment to carry out laboratory analyzes to obtain data for another research. The multispectral images obtained by the Mapir camera were processed in the Envi 5.1 Software (Environment for Visualizing Images) and using the Region of Interest (ROI) function, polygons were generated to extract samples from each plant and the Envi Software was trained to classify them as green healthy plants and red infected plants and through an algorithm, the software processed and classified. Therefore, at 15 after inoculation it was possible to detect early rust in inoculated plants and this tool can be very useful for managing the disease, aiming at monitoring in the field and assisting in decision making, especially in relation to the appropriate application of fungicides, promoting ecological and economic benefits, accompanied by gains in coffee productivity.

**KEYWORDS:** Coffee farming, *Hemileia vastatrix*, Diagnosis, Precision Agriculture.

## 1. INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma atividade agrícola de grande importância econômica para o Brasil. As duas espécies de cafeeiro exploradas comercialmente são *Coffea arabica* L. (café arábica) e *Coffea canephora* Pierre (café robusta) representando, respectivamente, 70% e 30% da produção mundial de café (Matiello, 1998). Grande parte das cultivares de *C. arabica* são derivadas das variedades típicas, introduzidas no Brasil em 1727 e da Bourbon, que são suscetíveis à ferrugem, principal doença que ataca o cafeeiro (Anthony et al., 2001).

A ferrugem, também conhecida como ferrugem alaranjada ou verdadeira, é causada pelo fungo *Hemileia vastatrix* Berk & Br, sendo a doença mais importante do cafeeiro no mundo. Pode atingir com gravidade grandes áreas de lavoura, causando prejuízos na produtividade, sendo que exige gastos com o controle químico o que aumenta os custos de produção (Matiello; Almeida, 2006). O controle químico da ferrugem é feito basicamente pela aplicação de fungicidas utilizando um calendário anual. Em muitos casos essas aplicações são feitas em excesso e com fungicidas sistêmicos (mais caros) se comparados com protetores (Godoy et al., 1997). O aumento da infecção provoca a redução da área foliar e, gradativamente, ocorre a desfolha das plantas (Guzzo, 2004). A desfolha compromete a produção do ano seguinte, acentuando os ciclos bienais, pois suas reservas serão utilizadas para a recomposição vegetal, conduzindo a uma menor frutificação (Bartholo et al., 1989).

De acordo com Moraes (1983), o patógeno demora em média 33 dias para iniciar o processo de esporulação desde a deposição dos esporos (urediniosporos) na folha e 40 dias para o desenvolvimento de 50% das pústulas (os locais onde estão localizados os esporos). A detecção precoce do patógeno no campo pode ser uma ferramenta muito útil para o manejo da ferrugem, visando o monitoramento da doença no campo e auxiliando na tomada de decisão, principalmente em relação à aplicação adequada de fungicidas, promovendo benefícios ecológicos e econômicos, acompanhados de ganhos de produtividade do cafeeiro.

No Brasil, a agricultura vem buscando uma produção eficiente, visando à proteção do meio ambiente, onde se insere a agricultura de precisão, que pode ser entendida como uma forma de gestão da lavoura que leva em conta a variabilidade espacial (Inamasu et al., 2011). O sensoriamento remoto (SR) vem se tornando cada vez mais presente na agricultura, caracterizando-se pela obtenção de informações de um objeto sem existir um contato físico com ele. Várias aplicações podem ser abordadas pelo SR na agricultura, dentre elas se destacam: (a)



a estimativa da biomassa e produtividade da cultura; (b) o monitoramento de estresse hídrico e do vigor nas plantas e (c) a avaliação do estágio fenológico das culturas (Brandão, 2009).

A agricultura de precisão combinada ao Sensoriamento Remoto tem se apresentado como uma importante ferramenta para identificação de estresse em lavouras, com base em medidas radiométricas *in situ* e imagens multiespectrais ou hiperespectrais. É possível correlacionar dados radiométricos, presentes em imagens orbitais e espectros obtidos em campo, com parâmetros biofísicos da vegetação, por meio da detecção, quantificação e análise da energia eletromagnética refletida, absorvida, transmitida e/ou emitida pelos alvos, em intervalos espectrais específicos (Galvão et al., 2005; Machado et al., 2007).

Dessa forma, a hipótese dessa pesquisa consiste em verificar a possibilidade de detecção precoce da ferrugem do cafeeiro em folhas inoculadas e ainda assintomáticas por meio de imagens multiespectrais obtidas através de drones.

## **2. OBJETIVO**

Detectar precocemente a ferrugem do cafeeiro, principal doença da cultura no Brasil e no mundo, em folhas artificialmente inoculadas, porém ainda assintomáticas por meio da análise de imagens multiespectrais.

## **3. REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1 Cultura do cafeeiro**

Os Árabes foram os pioneiros ao fazer uso do café, no século XV. No entanto, a partir 1690 os Holandeses foram os primeiros europeus que o cultivaram na Indonésia. Em 1706 foi enviado ao Jardim Botânico de Amsterdã. Posteriormente, em 1718, a Holanda enviou sementes e mudas para o Suriname, de onde outras sementes foram levadas, em 1722, para a Guiana, e em seguida foram enviadas as primeiras sementes e mudas para o Estado do Pará pelas mãos

de Francisco de Melo Palheta em 1727, começando assim, com a cultura no Brasil (Carvalho, 1993).

O Brasil é o maior produtor de café do mundo correspondendo a um terço da produção mundial, conforme dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa, 2020). A safra total de café do Brasil em 2023 foi de 55,1 milhões de sacas de café beneficiado, com produtividade média de 29,4 sacas por hectare (Conab, 2024).

Os maiores produtores nacionais de café arábica e robusta são Minas Gerais e Espírito Santo, respectivamente. Em Minas Gerais, a produção foi de 21,96 milhões de sacas, e no Espírito Santo, 16,72 milhões de sacas de café beneficiado (Conab, 2022).

O cultivo de cafeeiros diplóides, especialmente a espécie *C. canephora*, iniciou-se a partir de 1870, ocasião em que as plantações de *C. arabica*, ao sul da Ásia foram seriamente afetadas pela epidemia de ferrugem causada por *H. vastatrix* Berk. et Br. Como resultado das introduções de espécies diplóides, surgiram os híbridos interespecíficos resultantes de cruzamentos naturais e artificiais com *C. arabica*, utilizados para o cultivo ou em programas de melhoramento, visando, além de outras características, a resistência às doenças, especialmente à ferrugem (Bettencourt; Rodrigues Júnior, 1988).

As doenças do cafeeiro estão associadas às principais causas de redução da produção, dentre elas, a ferrugem vem sendo considerada a principal doença nas lavouras de café de todo o mundo, causando graves danos. Sua descoberta em território brasileiro foi em janeiro de 1970, pelo pesquisador Arnaldo Gomes Medeiros, no sul da Bahia. Poucos meses depois da constatação da sua presença já era possível ser encontrada em quase todos os estados (Zambolim et al., 1997).

### **3.2 A ferrugem do cafeeiro**

A ferrugem alaranjada (FA) provocada pelo fungo biotrófico *Hemileia vastatrix* é considerada a principal doença do café no mundo. Preliminarmente, ele causa manchas cloróticas translúcidas de 1-3 mm de diâmetro na face inferior do limbo foliar, que se manifestam como massas pulverulentas de pigmentação amarelo-laranja produzidas por uredósporos do patógeno. As pústulas, produzem em média 150.000 uredósporos, que podem sobreviver sob condições de seca por um período de até seis semanas. O fungo pode afetar também a extremidade do ramo em desenvolvimento e frutos verdes, acarretando a queda

prematura de folhas e a seca de ramos (Silva et al., 2006). Além disso, as desfolhas dos cafeeiros que ocorrem antes da indução floral ou durante o desenvolvimento dos frutos provocadas pela doença, ocasionam à redução da floração e a má formação dos grãos (Bedendo, 2011).

As perdas na produção variam de 35 a 50%, dependendo de fatores como, o estado nutricional da planta e suscetibilidade da cultivar (Zambolim et al., 1997). Ainda, podem contribuir para o ataque desse patógeno o alto potencial de inóculo, perspectiva de produção, condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento fúngico (Almeida, 1986) e as medidas de controle adotadas (Becker et al., 1991).

Dentre todos os mecanismos de disseminação da doença, a água é considerada como o mais eficiente a curta distância. O impacto de uma gota, caindo numa lesão, consegue liberar imediatamente os esporos, inclusive desmanchando os aglomerados. Já a disseminação a longa distância é realizada principalmente pelo homem e pelo vento (Kimati et al., 1997).

Ramirez et al. (2009) destacaram que folhas infectadas contém uredósporos integrado as pústulas que podem ser propagadas principalmente por ações do vento, de insetos e da água da chuva. Durante o processo infeccioso, *H. vastatrix* diferencia várias estruturas de infecção especializadas, como tubo germinativo, apressório, hifa de penetração e haustórios. A princípio, os esporos formam o tubo germinativo, em cuja extremidade ocorre a diferenciação do apressório sobre o estômato. Esta fase garante a adesão no ponto de penetração. Por meio de uma hifa delgada o fungo alcança a câmara subestomática onde ocorre a ramificação em duas hifas laterais, formando uma estrutura em forma de âncora. Nas extremidades dos ramos laterais é formada a célula mãe do haustório, que ocupa as células subsidiárias do estômato, formando os haustórios primários. A diferenciação sucede, com a criação de haustórios secundários nas células do mesófilo. A partir desse ponto ocorre o crescimento de hifas intercelulares e a produção de haustórios, e são formados um micélio que toma todo o mesófilo foliar (Ramirez et al., 2009). O fungo se desenvolve a partir da superfície abaxial foliar do cafeeiro pela germinação de uredósporos na presença de água e temperatura favorável (18-24°C), em 6-8 horas, podendo emitir de um a três tubos germinativos (Guzzo, 2004). Conforme Zambolim (2002), a germinação de urediniósporos da ferrugem é mais frequente em folhas novas do que em folhas velhas e mais acentuadas nas margens do que próximos à nervura principal.

Dentro do período de incubação, o micélio do fungo segue crescendo nos espaços intercelulares, dentro da folha, sem que se manifestem sintomas visíveis (Kimati et al., 1997). O poder germinativo dos urediniósporos é variável e quando eles se encontram nas lesões sobre

as folhas podem ter normalmente um poder germinativo de 30 a 50% e, nessas condições, podem permanecer viáveis durante tempo variável, até 3 meses em período seco. Entretanto, uma vez retirados das lesões, perdem rapidamente seu poder germinativo, que pode cair a 5%, depois de 5 dias, e a 1%, depois de 20 dias. As fases de germinação e penetração são demoradas, podendo prolongar-se por dois a três dias, na dependência das condições de ambiente. Os sintomas iniciais surgem 7 a 15 dias após a penetração, variando em função da temperatura, suscetibilidade da planta e idade do órgão afetado. A esporulação na face inferior das folhas inicia-se uma semana mais tarde. Precedendo a esporulação, há formação de um aglomerado de hifas na câmara subestomática, seguindo-se a produção de vários pedicelos que saem pelos estômatos. Nas extremidades desses pedicelos são formados os urediniósporos, que permanecem aglomerados (Kimati et al., 1997). De acordo com Moraes (1983), *H. vastatrix* gasta uma média de 33 dias para iniciar o processo de esporulação a partir da deposição dos urediniósporos na folha e uma média de 40 dias para o desenvolvimento de 50% das pústulas, produzindo em média 100 a 200.000 urediniósporos em cada uma das lesões.

Segundo Agrios (2005) as lesões alaranjadas nas folhas do café representam o estágio assexuado (anamorfo) do fungo. Grupos de urediniósporos reniformes de paredes espessas, meio rugoso e meio liso são produzidos em uredínia supra-estomática, formando massas alaranjadas em pó. Tais esporos funcionam como estruturas de dispersão, sobrevivência e infecção. Ocasionalmente, esporos sexuais lisos, alaranjados e de paredes finas (teliósporos) são formados dentro das lesões e germinam para produzir meiósporos hialinos menores (basidiósporos). A infectividade dos basidiósporos ao café não foi demonstrada e, até o momento, nenhum hospedeiro alternativo foi encontrado, como ocorre para as ferrugens ditas heteróicas (Ward, 1882).

*H. vastatrix* se distingue dos demais fungos causadores de ferrugens pelo fato dos urediniósporos não possuírem substância de adesão em sua epiderme e o seu tubo germinativo ser mais longo (Coutinho et al., 1993).

### **3.3 Manejo da ferrugem**

A procura por cultivares com resistência durável à ferrugem do cafeeiro tem sido um desafio, pois *Hemileia vastatrix* possui alta variabilidade genética, o que favorece o surgimento de novas raças do patógeno que são capazes de superar a resistência das cultivares

desenvolvidas. Devido à alta variabilidade, esse número passou para 45 raças de *H. vastatrix* (Várzea; Marques, 2005). Segundo Zambolim (2005), a durabilidade da resistência das cultivares atuais é difícil de ser prevista, sendo algumas já quebradas por novas raças do fungo.

A principal técnica de controle da ferrugem é o método químico, preventivamente com fungicidas protetores, sendo os cúpricos os mais efetivos, ou por aplicação de fungicidas sistêmicos via foliar e/ou solo, formulados em associação com inseticidas sistêmicos ou separadamente. O controle pode também ser realizado por pulverizações com sulfato de cobre associado a micronutrientes. Porém, esse método retrata algumas desvantagens como impacto ambiental, contaminação do alimento e aumento nos custos de produção (Zambolim et al., 1999).

O manejo da ferrugem por meio da prática de aplicação pré-definida (calendário) tem favorecido o uso intensivo de fungicidas do grupo dos triazóis, possibilitando o surgimento de isolados de *H. vastatrix* resistentes aos fungicidas sistêmicos, levando a um maior número de aplicações e cooperando para a perda de sustentabilidade da atividade cafeeira (Capucho et al., 2011).

Um método bem empregado resulta no uso ponderado dos defensivos, aplicando quando for necessário, prolongando a eficiência das moléculas dos fungicidas sistêmicos e prorrogando o aparecimento de patógenos resistentes.

Os sistemas de aviso objetivam conduzir os agricultores quanto ao manejo da doença, viabilizando um controle químico mais eficiente, menores perdas econômicas causadas pela doença, e menores custos operacionais e impacto ambiental em função da racionalização do número de aplicações dos defensivos (Reis, 2004). Alterações no manejo devem ser bem analisadas para que o controle seja econômico e racional. Este limiar é definido como a intensidade de doença na qual o benefício do controle iguala ao custo (Bergamin Filho; Amorim, 1996). A busca para quantificar qual o limiar do controle tem que pautar pela simplicidade do sistema de previsão a ser implantado e pela praticidade do manejo (Bergamin Filho et al., 1995). Campbel e Madden (1990) explicam que o monitoramento de variáveis meteorológicas relacionadas à incidência permite identificar períodos críticos favoráveis à doença, definindo-se a melhor época para efetivar o controle, determinando-se o início e os intervalos que devem ser adotados.

Segundo Vanderplank (1963), os conceitos básicos da epidemiologia, tais como, o uso correto do controle químico e táticas disponíveis, melhor momento de controle embasado na

incidência e severidade da doença, número de vezes que a medida deve ser efetivada, ou seja, definir conceitos básicos para uma estratégia a ser empregada, são condições necessárias para o sucesso no controle da epidemia. A porcentagem de plantas doentes, ou de suas partes, em uma amostra ou população caracteriza a incidência. A severidade é a porcentagem da área ou volume de tecido coberto por sintomas (Bergamin Filho; Amorim, 1996). Zambolim et al. (1997) explicaram que se a porcentagem de incidência estiver em torno de 5% recomenda-se iniciar a aplicação de fungicida de contato. Caso ultrapasse de 5% até 12%, recomenda-se utilizar fungicidas sistêmicos.

Conforme explicações de Bergamin e Amorim (1996), incidência e severidade para a maioria das doenças foliares têm maior relação linear em níveis baixos de severidade. No início da epidemia, a doença dissemina em novas unidades vegetais, aumentando rapidamente a incidência. Quando as plantas apresentarem incidência elevada, a evolução da doença ocorrerá quase que exclusivamente pelo aumento da severidade. Na cultura do café arábica foi quantificada a favorabilidade para o desenvolvimento da ferrugem por meio do monitoramento das variáveis climáticas de molhamento foliar e temperatura. Foram atribuídos valores de severidade da doença (VSD), avaliados diariamente. Com o acúmulo dos VSD foram estipulados os valores para a validação do sistema de previsão para a tomada de decisão do controle (Garçon, 2001). A alta carga pendente na produção do cafeeiro tem correlação positiva entre a incidência e severidade da ferrugem. Provavelmente o estresse da produção leva a um quadro de desequilíbrio, diminuindo a resistência ao ataque do patógeno (Zambolim et al., 1992).

No Estado de São Paulo, Figueiredo et al. (1974) discerniram a flutuação populacional da ferrugem do cafeeiro, em três fases diferentes do ciclo da doença, a primeira fase diz respeito ao período da colheita a meados de novembro, período que ocorre uma redução do índice de infecção, combinando com o período mais seco do ano e época de repouso vegetativo das plantas de cafeeiro e desfolha dessas plantas; a segunda fase do ciclo, encontram-se de novembro a março, período no qual começa o aumento do índice de infecção da doença, caracterizada pelo aumento do índice pluviométrico, temperatura adequada para o patógeno e começa a recuperação da lavoura; a terceira fase que inicia-se a partir de março, a infecção aumenta significativamente até atingir seu máximo. As chuvas nesse período começam a diminuir assim como a temperatura e o potencial de inóculo nessa fase é considerado como muito elevado.

Segundo Capucho (2011), no estado do Espírito Santo, os meses mais propícios à infecção da ferrugem compreendem ao período de maio a outubro que coincidem com inverno quando as temperaturas ficam mais amenas (20-24°C) e com pouca chuva (<50 mm), favorecendo o desenvolvimento da doença e o aumento da sua intensidade. Estudos constataram que o desenvolvimento da doença foi máximo no final do período chuvoso e que, para ocorrer infecção, as folhas deveriam permanecer molhadas por pelo menos 48 horas (Ventura et al., 2007).

### **3.4. Agricultura de Precisão**

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), ao instituir a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão (CBAP), definiu a Agricultura de Precisão como “um sistema de gerenciamento agrícola baseada na variação espacial e temporal da unidade produtiva e visa ao aumento de retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização do efeito ao ambiente” (Brasil, 2012). A utilização da Agricultura de Precisão está em fase de crescimento nas empresas rurais brasileiras e seus conceitos diferem daqueles utilizados pela agricultura tradicional, sendo a principal diferença o uso de equipamentos tecnologicamente modernos, como do GNSS (Molin, 2004).

A Agricultura de Precisão tem como principal conceito aplicar no local correto (espaço), no momento adequado (tempo), as quantidades de insumos necessários (quantidade) à produção agrícola, permitindo ao produtor rural obter áreas cada vez mais homogêneas, tanto na tecnologia quanto nos custos envolvidos na produção (Dobermann; Ping, 2004).

A agricultura de precisão adota tecnologias mais sofisticadas de sistemas GPS, sistemas de monitoramento de campo e sistemas de aplicações a taxas variadas de produtos agroquímicos combinados e adaptados com sistemas GIS e sensoriamento remoto (indução eletromagnética, fotografia aérea, imagens de satélites e etc.) ou então o uso de tecnologias de medidas rápidas de propriedades do solo, tal como resistividade elétrica e TDR (time domain reflectometry) (Plant, 2001). O manejo de uma cultura em sítio-específico objetiva a orientar o manejo do solo, doenças e pragas na cultura, de acordo com a sua variação espacial dentro do campo (Larson; Robert, 1991).

As técnicas de Agricultura de Precisão, direcionadas para a observação e a análise da vegetação, encontraram no Sensoriamento Remoto uma possibilidade emergente na análise e

no suporte do monitoramento de culturas (Melesse et al., 2007). Essa integração é importante, pois permite: a) o estudo da fenologia de determinada vegetação; b) o monitoramento das condições nutricionais da planta; c) avaliações de produtividade; entre outros (Holzapfel et al., 2009).

Dentre essas abordagens se destacam a avaliação de estresse hídrico em plantas (MATESE et al., 2018). Em nível foliar, a análise de dados hiperespectrais mostrou o potencial do sensoriamento remoto para as culturas do arroz (Mahajan et al., 2017), do algodão (Zhao et al., 2010), da cana-de-açúcar (Miphokasap; Wannasiri, 2018), do trigo (LI et al., 2018); e para mapear e identificar estresses bióticos e abióticos em lavoura cafeeira por meio de índices de vegetação provenientes de imagens multiespectrais (Marin et al., 2019). Kumar et al. (2010) constataram que a reflectância do dossel de plantas de mostarda infestadas com pulgão apresenta diferença significativa na região espectral próxima ao infravermelho, comparado à reflectância do dossel de plantas não-infestadas. Os autores demonstraram que as bandas nas regiões espectrais em torno do verde (550-560 nm) e do vermelho (700-1250 nm) e infravermelho próximo (1950-2450 nm) são mais significativas para avaliar infestações de pulgões em mostarda. Em plantas cítricas, a avaliação de dados espectrais tem proporcionado resultados promissores, como a implementação de índices espectrais na detecção de estresse hídrico e da produtividade de laranjeiras (Stagakis et al., 2012).

### **3.5 Sensoriamento Remoto**

Conforme Jensen, (2011) o sensoriamento remoto é a arte de obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno sem que haja o contato físico, por meio de sistemas sensores capazes de detectar, quantificar e analisar a radiação eletromagnética (REM) refletida, absorvida, transmitida e/ou emitida por esses alvos.

Quando alguma energia eletromagnética incide em qualquer superfície, três possíveis reações com essa superfície são possíveis: reflexão, absorção ou transmissão (Lillesand et al., 2004). Segundo Molin, Amaral e Colaço (2015) quando a REM oriunda do sol atinge a vegetação, ocorre uma interação entre eles, onde essa energia é fracionada em três partes: absorvida, refletida e transmitida, onde a intensidade de cada um dependerá do comprimento de onda, bem como as características físico-químicas do alvo. As plantas respondem aos estresses bióticos e abióticos de diversas formas como senescência de folhas, alterações das



estruturas internas e quantidade de água no interior da célula. Assim, todas essas características podem ser detectadas por meio das diferenças entre a energia refletida na faixa do visível e do infravermelho próximo (Mahajan et al., 2014).

### 3.7 Propriedades ópticas das folhas

A maioria das características naturais da Terra refletem, absorvem e transmitem luz de forma diferencial, não apenas com respeito ao comprimento de onda, considerações espaciais e temporais, mas também com respeito à iluminação e ângulos de visão (Peddle et al., 2001).

Para vegetação saudável, variações devido ao comprimento de onda, condições espaciais e temporais são perceptíveis nas regiões Visível (VIS), Infravermelho Próximo (NIR) e Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR) do Espectro Eletromagnético (EMS). Quando uma folha verde saudável intercepta a luz, essas variações no sinal que chega ao sensor são vistas como baixa reflectância tanto no azul quanto nas regiões vermelhas do EMS devido à absorção de clorofila pelo cloroplasto para fotossíntese (Vogelmann, 1993).

O termo comportamento espectral da vegetação pode ser usado para representar as propriedades espectrais das folhas, dos galhos, de uma planta isolada ou de um conjunto de plantas (Ponzoni; Disperati, 1995). As folhas são os elementos da vegetação que mais contribuem para o sinal detectado pelos sensores ópticos, sendo que as propriedades espectrais de uma única folha são função de sua composição química, morfologia e estrutura interna (COLWELL, 1974). As plantas respondem aos estresses bióticos e abióticos de diversas formas como senescência de folhas, alterações das estruturas internas e quantidade de água no interior da célula. Logo, todas essas características podem ser detectadas por meio das diferenças entre a energia refletida na faixa do visível e do infravermelho próximo (Barton, 2012; Mahajan et al., 2014).

As três principais classes de pigmentos encontrados em plantas são as clorofilas, os carotenoides e as ficobilinas. Os carotenoides e as ficobilinas são chamados de pigmentos fotossintéticos acessórios. Já as clorofilas são pigmentos que dão às plantas a cor verde. A clorofila a é verde azulada e está presente em todos os organismos que liberam O<sub>2</sub>. A clorofila b é verde amarelada, cujo teor é de cerca de 1/3 da clorofila a. Está presente nas folhas de plantas superiores e nas algas verdes (Hall; Rao, 1980). Os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância espectral na região do visível. Estes pigmentos, geralmente encontrados nos cloroplastos são: clorofila (65%), carotenos (6%), e xantofilas (29%). Os valores

percentuais destes pigmentos existentes nas folhas podem variar grandemente de espécie para espécie.

Existe na região do infravermelho próximo uma absorção pequena da REM e considerável espalhamento interno na folha a absorção da água é geralmente baixa nessa região. E a reflectância espectral é quase constante. De maneira geral, quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da radiação incidente, e conseqüentemente, maior será também a reflectância (Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich, 2012).

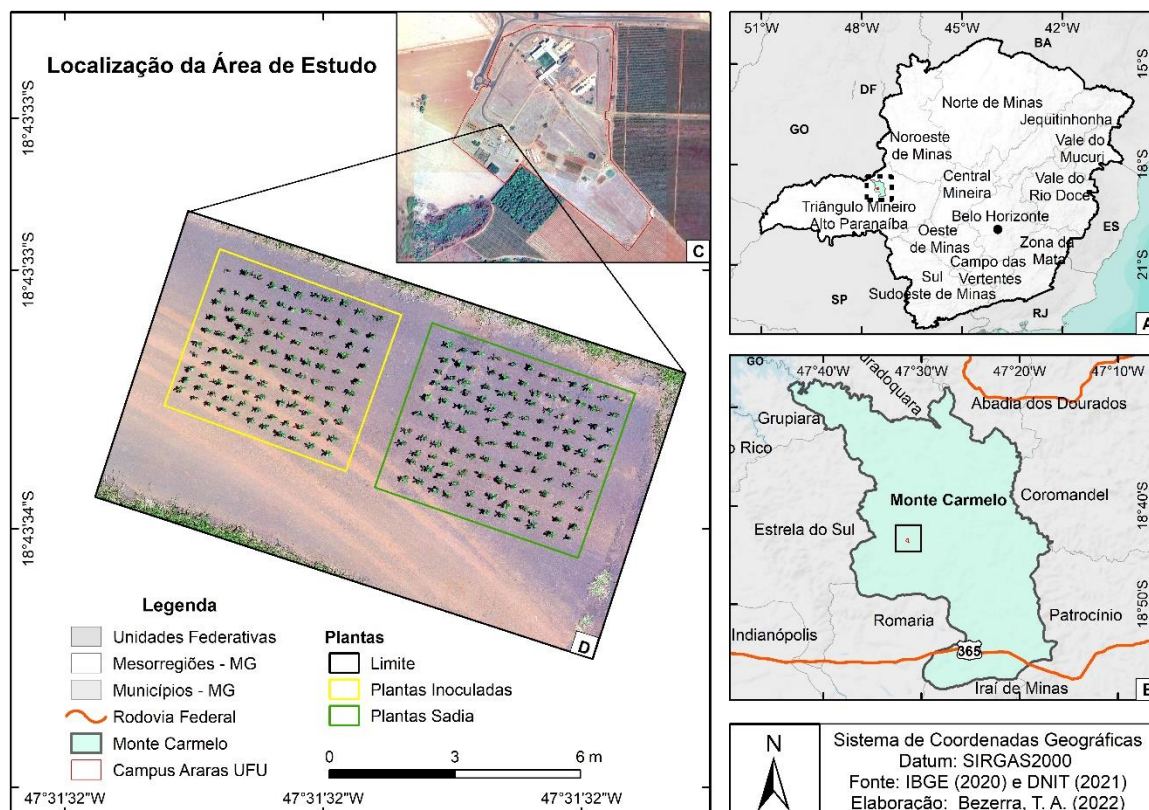
Nos comprimentos de onda correspondente ao infravermelho médio a reflectância da vegetação passa a ser modulada pelas bandas de absorção da água, cujos picos ocorrem em 1.400, 1.900 e 2.700 nm. Nestas bandas, valores muito baixos de reflectância são percebidos. Considera-se que a reflectância nesta faixa do espectro é função do teor de água presente na vegetação (Steffen; Moraes, 1993; Fontana, 1995).

Alguns fatores químicos e estruturais dos cafeeiros podem afetar a absorção da REM na folha como quantidade de água, a idade e o estado fitossanitário da planta, ou seja, o ataque de pragas ou patógenos podem facilitar ou prejudicar a absorção das radiações e posteriormente reduzir ou aumentar o fluxo de energia refletida (Jensen, 2009).

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1. Dados gerais**

O experimento foi realizado na Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, com coordenadas geográficas 18° 43' 41'' S e 47° 31' 26'' O, situada a 903 m de altitude no Laboratório de Microbiologia e Fitopatologia (LAMIF) conforme é apresentado na figura 1. A figura em destaque apresenta a localização do município no estado de Minas Gerais, bem como a localização do experimento no Campus da Universidade Federal de Uberlândia.



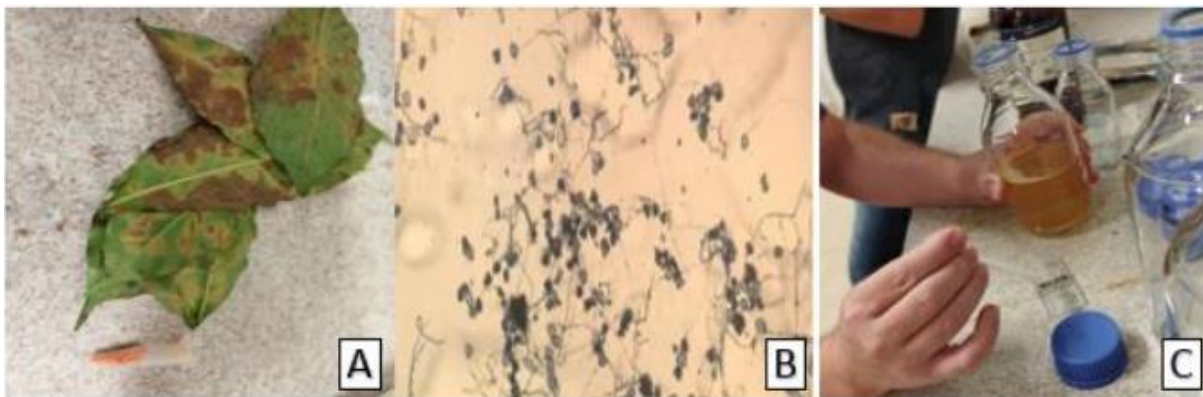
**Figura 1.** Mapa de Localização  
Fonte: elaborado pela autora.

## 4.2. Inoculação de *H. vastatrix* em mudas de cafeeiro

Inicialmente foi realizado o processo de inoculação de urediniósporos de *Hemileia vastatrix* na parte abaxial das folhas de 160 mudas de cafeeiro, sendo 160 mudas inoculadas e 160 mudas não inoculadas. Para o experimento foi utilizado a raça II de *Hemileia vastatrix* e a espécie *Coffea arabica* cultivar Mundo Novo IAC 379-19 (susceptível à ferrugem). Os uredósporos foram previamente coletados e conservados em ampolas de vidro vedadas com algodão, e em seguida colocadas dentro de um dessecador, com umidade relativa interna em torno de 50%, em geladeira. Antes da inoculação, a viabilidade dos uredósporos de *H. vastatrix* foi testada pelo teste de germinação em meio ágar-água a 2%, utilizando o método de Shein e Rotem (1965), modificado por Zambolim e Chaves (1974). Apenas os uredósporos com viabilidade superior a 80% foram utilizados para a inoculação.

O inóculo foi preparado pela adição de 1 mL de água destilada em um tubo de Eppendorf, contendo 4 mg dos uredósporos de *Hemileia vastatrix*, seguida de rápida homogeneização da amostra num vórtex. Em seguida, foi adicionado mais 1 mL de água no

tubo. Conforme Capucho et al., (2005) e durante todo o processo de inoculação, o inóculo deve ser submetido a várias homogeneizações para ser mantido em suspensão.



**Figura 2.** Imagens ilustrativas da coleta de urediniósporos (A); teste de germinação em meio ágar-água a 2% (B); solução para inoculação (C).  
Fonte: elaborado pela autora.

Para inoculação nas mudas de cafeeiro, foram utilizadas folhas jovens, com estágio fenológico de 4 a 6 pares de folhas totalmente desenvolvidas e em boas condições sanitárias. As folhas de cafeeiro foram inoculadas com uma suspensão contendo  $1 \times 10^9$  urediniósporos/mL e foram pinceladas com um pincel de cerdas macias na parte abaxial das folhas. A seguir as mudas de cafeeiro inoculadas e não inoculadas foram transferidas para um ambiente climatizado ficando 2 dias no escuro acondicionadas em câmara úmida e 5 dias com fotoperíodo de 12 horas de luz e 12 horas no escuro, após esse período, ficaram dispostas em local com temperaturas amenas, de até 25° C.

#### 4.3. Imagens multiespectrais e Classificação Supervisionada pelo Software Envi

Após esta etapa, as mudas inoculadas e não inculadas foram posicionadas em superfície plana e de cor uniforme para realização dos vôos com drone com câmera Mappir aos 15, 30 e 45 dias após a inoculação, para obtenção de imagens com curvas multiespectrais e detecção da ferrugem incubada.

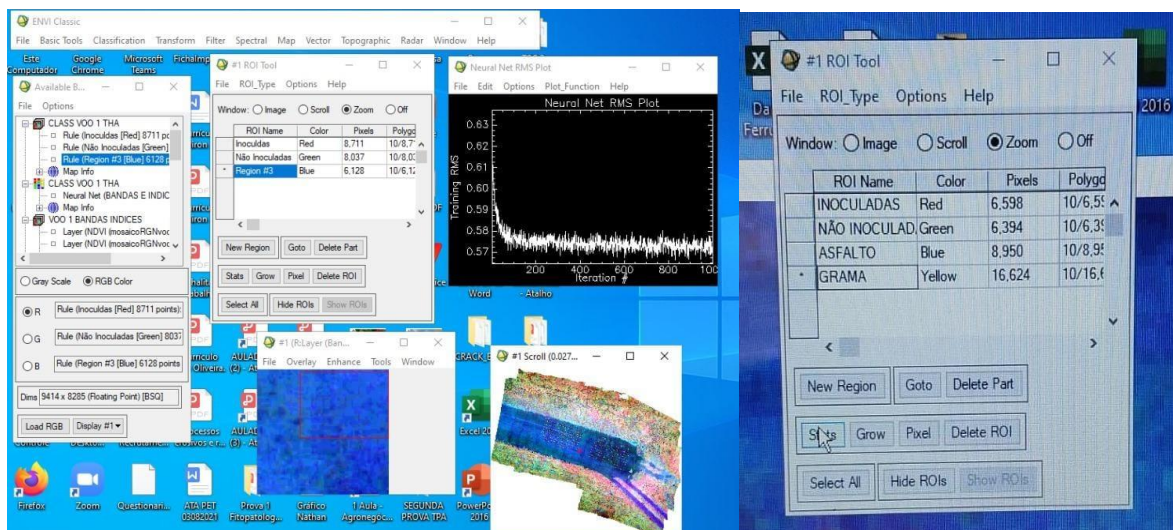
Para a aquisição das imagens foi utilizado um drone Phantom 4 Pro embarcado com uma câmera com sensor RGB e com uma câmera Mapir Survey3W. A câmera com sensor RGB é capaz de coletar imagens no canal do vermelho (650 nm), verde (550 nm) e azul (480 nm), com resolução de 20 megapixels. Já a câmera Mapir Survey3W apresenta resolução de 12 megapixels, com canais equivalentes ao vermelho (bandas de 660 nm), verde (550 nm) e

infravermelho próximo (850 nm) (RGN) e FWHMs de 40, 60 e 80 nm, respectivamente. Os voos foram realizados a uma altura de 9 metros, com 70 % de sobreposição lateral e 75 % de sobreposição longitudinal a uma velocidade de 1 m/s. Cada voo durou aproximadamente 2 minutos, capturando 40 imagens em formato jpeg. Para as fotografias, as mudas de cafeeiros foram organizadas sobre uma área asfaltada (Figura 1) com espaçamento de aproximadamente 30 cm entre mudas.

O objetivo desses três voos foi monitorar a progressão da infecção causada pelo patógeno nas mudas ao longo do tempo. **Primeiro Voo (15 dias após a inoculação):** nesse estágio, os esporos do patógeno já germinaram, as hifas já penetraram no tecido foliar e estabeleceram relações parasitárias estáveis, no entanto, ainda não há sintomas visíveis de infecção, apenas algumas cloroses. **Segundo Voo (30 dias após a inoculação):** Agora, os primeiros sintomas visíveis da infecção estão aparecendo. Esses sintomas são caracterizados por lesões cloróticas (manchas amareladas) na parte inferior (abaxial) das folhas. Além disso, o processo de esporulação do patógeno começa a ocorrer nesta região. **Terceiro Voo (45 dias após a inoculação):** A infecção continua a se desenvolver e progredir. Neste estágio, pelo menos 50% das pústulas (estruturas de esporulação do patógeno) estão presentes nas folhas.

A banda 3 do vermelho está relacionada a taxa de senescência, banda 2 do verde, taxa de pigmentação, banda 1 do azul, taxa de fotossíntese e banda 4 do infravermelho próximo, relacionada a biomassa e área foliar.

Essas imagens passaram por uma Classificação Supervisionada no Software ENVI (Environment for Visualizing Images) desenvolvido pela empresa Exelis VIS (Visual Information Solutions). Nesse programa, fizemos um treinamento algoritmo indicando quais eram as plantas inoculadas em vermelho, contornando uma a uma e não inoculadas em azul e através de um algoritmo o Software realizou a classificação do que para o programa eram considerada plantas saudáveis ou plantas infectadas, em suas respectivas cores.

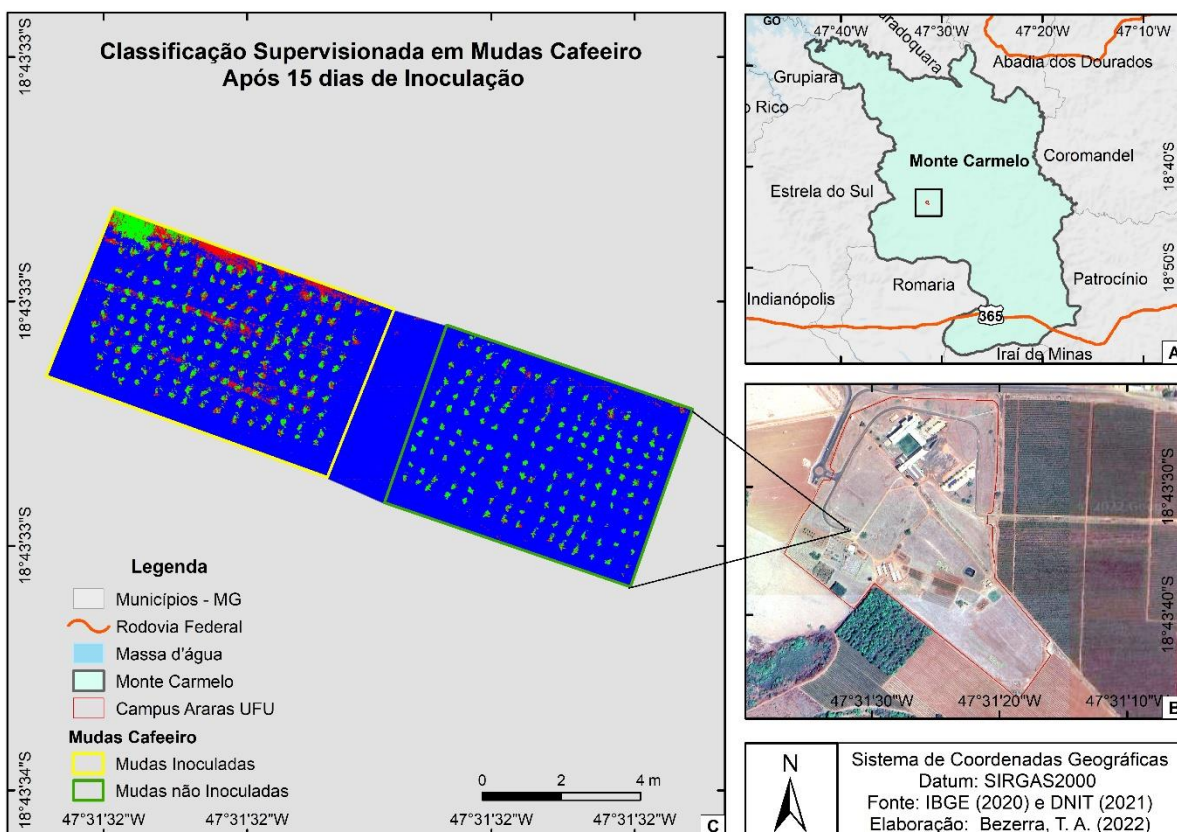


**Figura 3.** Processamento no Software Envi  
Fonte: elaborado pela autora.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

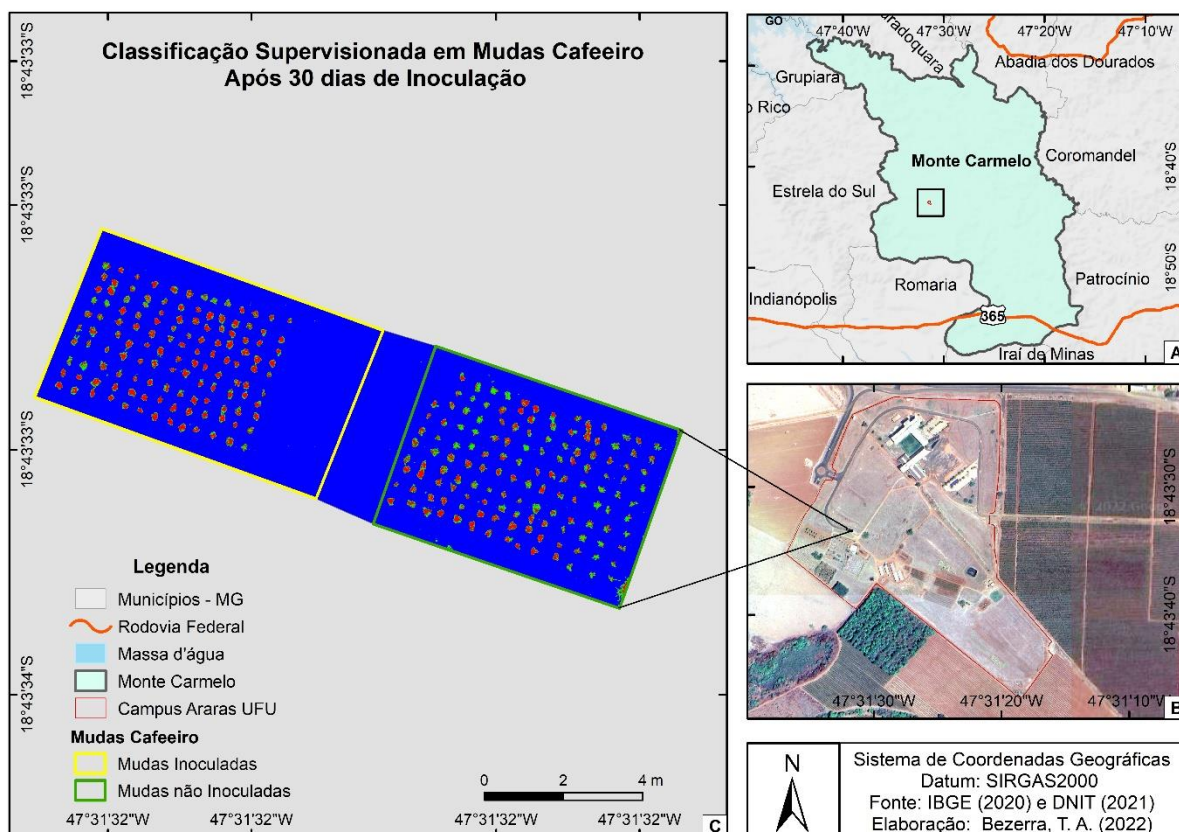
Após a classificação das imagens em três períodos diferentes, foi possível observar a quantidade de mudas que apresentaram sintoma da ferrugem. A Figura 4 apresenta a classificação de 160 mudas após 15 dias da inoculação, juntamente com 149 mudas não inoculadas para comparação do resultado. Após 15 dias da inoculação das plantas, não foi possível observar a presença da doença nas plantas, porém, com as imagens obtidas através de voo com drone e classificadas no software Envi foi possível detectar a ferrugem de forma precoce. De forma quantitativa em uma análise visual, das 160 mudas inoculadas expostas nas imagens, apenas 11% foram classificadas como plantas saudáveis, enquanto na classificação das mudas não inoculadas 7% foram classificadas como infectadas. O que infere um acerto superior a 80% na classificação.





**Figura 4.** Classificação supervisionada após 15 dias de inoculação  
Fonte: elaborado pela autora.

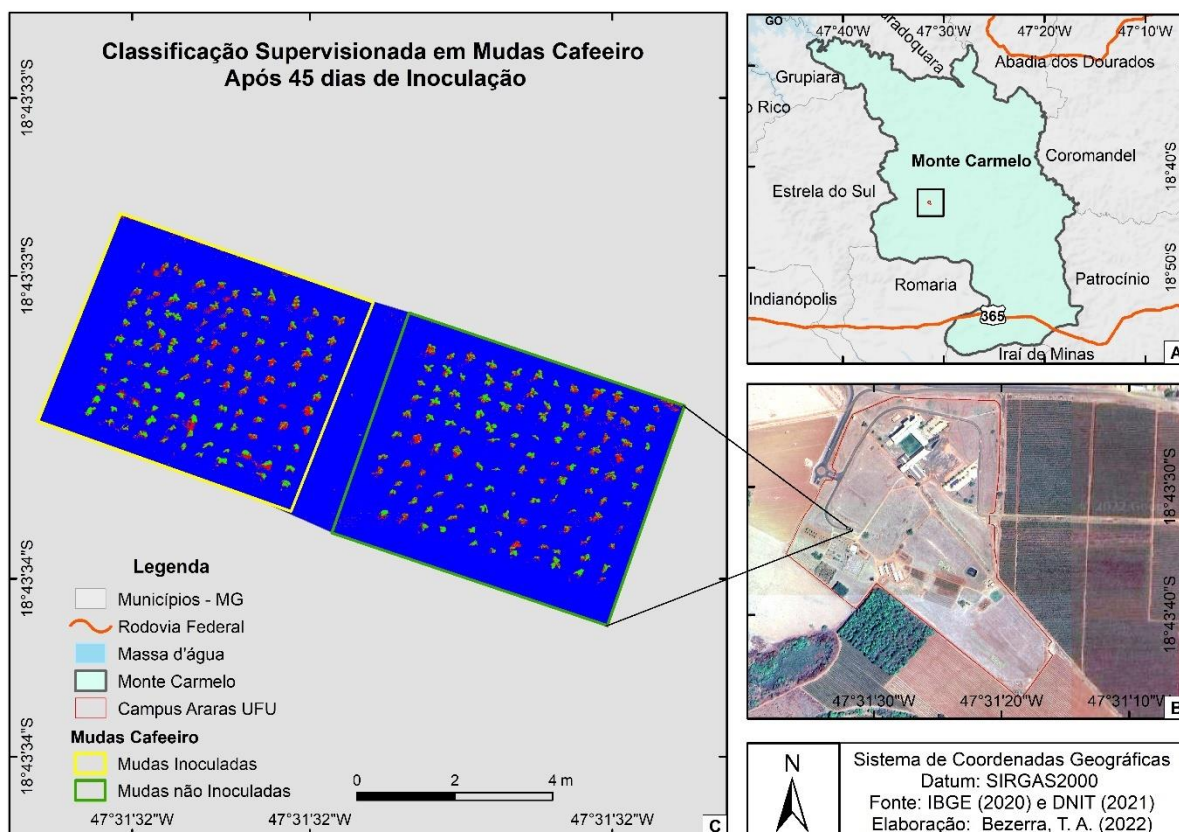
A Figura 5 apresenta a classificação de 130 mudras inoculadas, juntamente com 138 mudras não inoculadas para comparação. Visualmente já era possível ver algumas cloroses e após análise da Figura 5 pode-se observar que ao passar 30 dias a classificação perde eficácia no resultado em relação as mudras não inoculadas. Ao classificar as plantas inoculadas, obteve-se cerca de 8,5% do total como plantas saudias e cerca de 91,5% como inoculadas o que foi uma margem de acerto alta, já nas mudras não inoculadas foram apresentadas cerca de 69,6% como mudras infectadas, enquanto apenas 30,4% das plantas mostraram-se saudias fazendo com que as mudras infectadas e saudias não tivessem uma classificação certa. Isso acontece porque não há diferença na reflectância das plantas, ou seja, a imagem tem dificuldade de discriminar a planta saudável e a doente, pois a planta regulariza as propriedades nutricionais por estar em pleno desenvolvimento, mesmo estando inoculada. Esse desenvolvimento mascara a real condição da planta. Existindo uma época de detecção, e essa época se dá no início.



**Figura 5.** Classificação supervisionada após 30 dias de inoculação  
Fonte: elaborado pela autora.

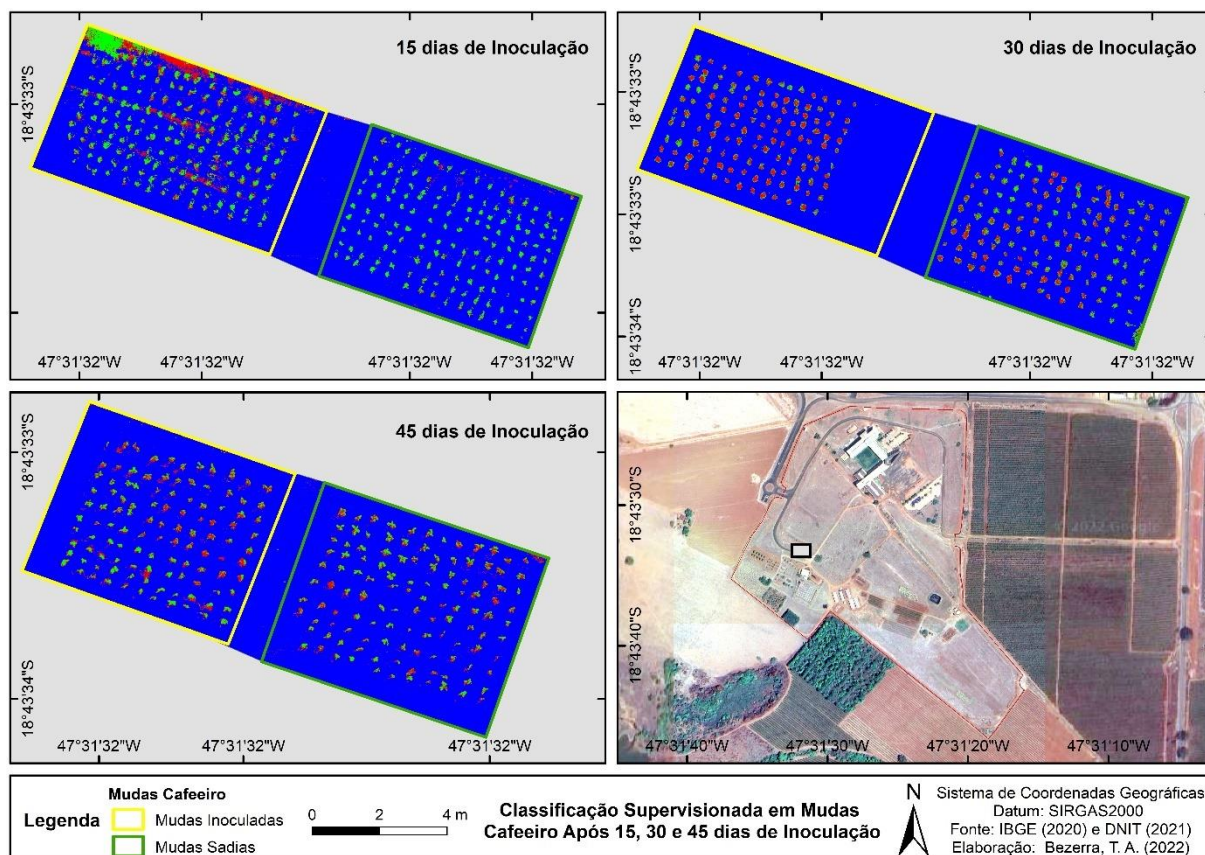
Ao analisar a figura 6, pode-se afirmar que a classificação após 45 dias de inoculação melhorou em relação aos 30 dias de inoculação, isso se deve pois quanto mais o tempo passa os sintomas da doença se tornam mais visíveis a olho nu. Nessa avaliação contamos com 118 mudas não inoculadas 105 mudas inoculadas. Vale ressaltar, que a ferrugem não se espalha na planta de forma homogênea, podendo levar o software ao erro no momento da classificação. Ao classificar as mudas inoculadas (doentes) cerca de 33,33% são qualificadas como mudas saudias e cerca de 66,67% classificadas como doentes, em contrapartida, nas mudas não inoculadas (saudáveis) apresenta-se cerca de 40,68% classificadas como infectadas com o fungo e 59,32 % como saudias.





**Figura 6.** Classificação supervisionada após 45 dias de inoculação  
Fonte: elaborado pela autora.

Após as análises das 3 classificações (Figura 7), nota-se que aos 15 dias o software consegue classificar bem as mudas inoculadas das não inoculadas, com precisão de 80%, sendo uma ferramenta útil para prever o patógeno incubado na planta antes da esporulação. Aos 30 dias após inoculação, a classificação de mudas inoculadas foi precisa, porém, nas mudas sadias não foi muito bem. Por fim, aos 45 dias após inoculação quando os sintomas da doença podiam ser observados a olho nu, a classificação voltou a ser muito boa novamente.



**Figura 7.** Classificações de 15, 30 e 45 dias após a inoculação  
 Fonte: elaborado pela autora.

## 6. CONCLUSÃO

Com as imagens obtidas através de voo com drone e com uma classificação supervisionada utilizando o software Envi foi possível detectar a ferrugem do cafeeiro de forma precoce em mudas assintomáticas, com melhor classificação aos 15 dias após inoculação.

Esses voos foram realizados para analisar a progressão da infecção ao longo do tempo e entender melhor a dinâmica da interação entre o patógeno e as plantas hospedeiras. Essas informações são úteis para desenvolver estratégias de manejo e controle da doença.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIOS, G. N. 2005. **Plant Pathology**. Elsevier Academic Press: Amsterdam. ISBN 978-0-12-044565-3

ANTHONY, F., BERTRAND, B., QUIROS O., WILCHES, A., LASHERMES, P., BERTHAUD, J., CHARRIER, A. **Genetic diversity of wild coffee (*Coffea arabica* L.) using molecular markers.** *Euphytica*. 118: 53-65. 2001. DOI <https://doi.org/10.1023/A:1004013815166>

ALLEN, W. A., GAUSMAN, H. W., RICHARDSON, A. J., AND THOMAS, J. R. Interaction of isotropic light with a compact plant leaf, *J. Opt. Soc. Am.* 59(10): 1376-1379, 1969. DOI <https://doi.org/10.1364/JOSA.59.001376>

ALLEN, W. A., GAUSMAN, H. W., AND RICHARDSON, A. J. Mean effective optical constants of cotton leaves, *J. Opt. Soc. Am.* 60(4):542-547, 1970. DOI <https://doi.org/10.1364/JOSA.60.000542>

ALMEIDA, S. R. **Doenças do Cafeeiro**. In: RENA, A. B. et al. *Cultura do Cafeeiro, fatores que afetam a produtividade*. 1. ed. Piracicaba: Potafós, 1986. p. 391-399.

Asner, G.P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing Environment**, 64: 234-253, 1998. DOI [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00014-5)

Baret, F., & Fourty, T. (1997). Estimation of leaf water content and specific leaf weight from reflectance and transmittance measurements. *Agronomie*, 17, 455-464. DOI <http://dx.doi.org/10.1051/agro:19970903>

BARTHOLO, G. F.; MAGALHAES FILHO, A. A. R. de; GUIMARAES, P. T. G.; CHALFOUN, S. M. **Cuidados na colheita, no preparo e no armazenamento do café**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 14, n. 162, p. 33-44, 1989

BECKER, S.; MORALES W.; QUIJANO RM. **La roya del cafeto conocimiento y control**. *Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ)* Alemanha. 281 p., 1991. ISBN 978-3-88085-439-0

BEDENDO, I. Ferrugens. In: AMORIM, L.; REZENDE, J.A.M.; BERGAMIN FILHO, A. **Manual de fitopatologia: princípios e conceitos**. 4. ed. Piracicaba: Agronômica Ceres, p.479-484, 2011

BETTENCOURT, A.J., RODRIGUES JR., C. J. **Principles and practice of coffee breeding for resistance to rust and other disease**. In: CLARKE, R.J., MACRAE, R. (Eds.). *Coffee*. Londres: Elsevier Applied Science. Agronomy, v.4, p.199-234, 1988.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria nº 852 - Art. 1º Criar a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão – CBAP. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 21 set. 2012. Seção 1, n. 184. Disponível em: [http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/ do/p\\_do42.htm](http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/ do/p_do42.htm). Acesso em: 12 mar. 2024.

BRANDÃO, Z. N. **Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodão irrigado via técnicas de sensoriamento remoto**. 2009. 152 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais)- Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/8472>. Acesso em: 12 mar. 2024.

CARVALHO, A. & FAZUOLI, L.C. Café. pp.29-76 In: FURLANI, A.M.C.; VIÉGAS, G.P. (Eds.) **O melhoramento de plantas no Instituto Agrônomo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas. 1993.

CAMARGO, M.B.P.; SANTOS, M.A.; PEDRO JUNIOR, M.J.; FAHL, J.I.; BRUNINI, O.; MEIRELES, E.J.L.; BARDIN, L. Modelo agrometeorológico de monitoramento e de estimativa de quebra de produtividade como subsidio à previsão de safra de café (*Coffea arabica* L.): resultados preliminares. In: **SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL**, 3., 2003. Porto Seguro. Anais...Porto Seguro: Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café, 2003. p. 75-76.

CARVALHO, L.G.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.; RAMOS ALVES, H.M. Avaliação de um modelo agrometeorológico para previsão de produtividade de café em três localidades da região sul do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria**, v.11, n.2, p.343-352, 2003. ISSN 0104-1347

CAPUCHO, A. S.; RUFINO, R. J. N.; ZAMBOLIM, E. M.; CAIXETA, E. T.; OLIVEIRA, A. C. B. de; ALMEIDA, R. F. de; BRITO, G. G. de; ZAMBOLIM, L. Método de inoculação de *Hemileia vastarix* Berk. et Br. em folhas destacadas de cafeeiro. In: **SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL**, 4., 2005, Londrina. Anais... Brasília, DF: Embrapa Café, 2005. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/2081>. Acesso em: 12 mar. 2024.

COLWELL, J.E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing Environment**, v.3,n.3, p.175-183, 1974. DOI [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(74\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(74)90003-0)

**CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: café**, v. 9 - Safra 2022, n. 4, quarto levantamento. Brasília: Conab, 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 02 janeiro 2022.

DANNER, M.; BERGER, K.; WOCHER, M.; MAUSER W.; HANK, T. Fitted PROSAIL Parameterization of Leaf Inclinations, Water Content and Brown Pigment Content for Winter Wheat and Maize Canopies. **Remote Sens.** 2019, 11, 1150. DOI <https://doi.org/10.3390/rs11101150>



FERET, J.-B. et al. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. **Remote Sensing of Environment**, 112, 3030-3043, 2008. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.012>

FÉRET, J.B. et al. PROSPECT-D: Towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle. **Remote Sensing of Environment**, 193, 204-215, 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.004>

FONTANA, D. C. **Índice de vegetação global para o monitoramento da vegetação e a sua correlação com elementos agrometeorológicos e rendimento de grãos de soja**. 1995. 133f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

GALVÃO, L. S., FORMAGGIO, A.R.; TISOT, D. A.. Discriminação de variedades de canade-açúcar com dados hiperespectrais do sensor hyperion/eo-1. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 1, n. 57, 01 ago. 2005. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.18.09.55/doc/381.pdf?languagebutton=pt-BR>. Acesso em: 12 mar. 2024.

GODOY, C. V.; BERGAMIN FILHO, A.; SALGADO, C. L. Doenças do cafeeiro. In: KIMATI, H.; AMORIN, L.; CAMARGO, L. E. A.; REZENDE, J. A. M. **Manual de Fitopatologia**. 3 ed., v.ol. 2 . São Paulo, Agronômica Ceres, 1997. 774 p.

GOVENDER, M., CHETTY, K. AND BULCOCK, H. A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies. **Water Science**, 33: 145-152, 2007. DOI <https://hdl.handle.net/10520/EJC116430>

GUZZO, S.D. **Aspectos bioquímicos e moleculares da resistência adquirida em cafeeiro contra *Hemileia vastatrix***. Doctor Scientiae, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP. 2004. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64132/tde-24082004-105153/publico/Sylvia.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2024.

HALL, D. O.; RAO, K. K. **Fotossíntese**. São Paulo: E.P.U., 1980. 89 p

HENDRY, G.A.F.; PRICE, A.H. Stress indicators: Chlorophylls and carotenoids. In: G.A.F. HENDRY ; J.P. GRIME (eds.) **Methods in Comparative Plant Ecology** Chapman & Hall, London, pp. 148-152, 1993.

HOLZAPFEL, C. B et al. Estimating canola (*Brassica napus* L.) yield potential using an active optical sensor. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 89, n. 6, p. 1149-1160, 2009. DOI <https://doi.org/10.4141/CJPS09056>

INAMASU, R. Y. et al. **Agricultura de precisão para a sustentabilidade de sistemas produtivos do agronegócio brasileiro**. In: INAMASU, R. Y et al. (Ed.).. **Agricultura de precisão: um novo olhar** São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 14-26.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos campos: Parêntese, 2009. 598p.

JENSEN, J. R. 2011. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 3 ed. Parêntese. São José dos Campos.

JIANG, J. et al. Estimation of leaf traits from reflectance measurements: Comparison between methods based on vegetation indices and several versions of the PROSPECT model. **Plant Methods**, 14, 23, 2018. DOI <https://doi.org/10.1186/s13007-018-0291-x>

KIMATI, H.; AMORIN, L.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L.E.A.; REZENDE, J.A.M. **Manual de fitopatologia**. v.2: Doenças das Plantas Cultivadas. 3ed., São Paulo: Agronômica Ceres, 1997. 774p.

KUMAR, J et al. Identification of aphid infestation in mustard by hyperspectral remote sensing. **Journal of Agricultural Physics**, v. 10, p. 53-60, 2010. ISSN 0973-032X

LICHTENTHALER, H.K.; WELLBURN, A.R. Determination of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions** 11: 591-592, 1983. DOI <https://doi.org/10.1042/bst0110591>

LI, Z. et al. Remote Sensing of Leaf and Canopy Nitrogen Status in Winter Wheat (*Triticum aestivum*L.) Based on N-PROSAIL Model. **Remote Sensing**, v. 10, p. 1463, 2018. DOI <https://doi.org/10.3390/rs10091463>

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote sensing and image interpretation**. Hoboken, USA: Wiley, 2004. Disponível em: <https://archive.org/details/remotesensingima00lill>. Acesso em: 12 mar. 2024.

MACHADO, H.; LAMPARELLI, R. A. C. Desenvolvimento metodológico para amostragem em cana-de-açúcar, com a resposta espectral da biomassa em imagens orbitais. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 2, n. 56, ago. 2007

MAHAJAN, G. R. et al. Monitoring nitrogen, phosphorus and sulphur in hybrid rice (*Oryza sativa*L.) using hyperspectral remote sensing. **Precision Agriculture**, v.18, p.736-761, 2017. DOI <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9485-2>

MAPA 2020. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Informe estatístico do café**. Disponível em: [https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/producao-brasileira-de-cafe-deve-alcancar-44-77-milhoes-de-sacas/caffe\\_-21.jpg/view](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/producao-brasileira-de-cafe-deve-alcancar-44-77-milhoes-de-sacas/caffe_-21.jpg/view) . Acesso em: 16 abril 2020.

MATESE, A et al. Estimation of Water Stress in Grapevines Using Proximal and Remote Sensing Methods. **Remote Sensing**, v. 10, n. 1, p. 114-122, 2018. DOI <https://doi.org/10.3390/rs10010114>

MATIELLO, J.B.; ALMEIDA S.R. **A ferrugem do cafeeiro no Brasil e seu controle**. MAPA/PROCAFE, Varginha, 98p., 2006.

- MATIELLO, J.B. **Café conillon**. Rio de Janeiro: MMA/SDR/PROCAFÉ/PNFC, 1998. 162p.
- MEDINA FILHO, H. P.; BORDIGNON, R. Arabustas: Interessantes híbridos dos cafés Arábica e Robusta. **O Agrônomo**. Campinas. vol. 55, n. 2, 8-9 p, 56 p, 2003. ISSN 0365-2726.
- MELESSE, A. M. et al. Remote Sensing Sensors and Applications in Environmental Resources Mapping and Modelling. **Sensors**, v. 7, n. 12, p. 3209-3241, 2007. DOI <https://doi.org/10.3390/s7123209>
- MIPHOKASAP, P.; WANNASIRI, W. Estimations of Nitrogen Concentration in Sugarcane Using Hyperspectral Imagery, **Sustainability**, v. 10, p. 1266-1282, 2018. DOI <https://doi.org/10.3390/su10041266>
- MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de Precisão**. 1 ed. São Paulo – SP, p. 119 – 131, 2015.
- MORAES, S.A. **A ferrugem do cafeeiro: importância, condições pré-disponentes, evolução e situação no Brasil**. Campinas: IAC, 1983. 50p. (Circular Instituto Agrônomo, 119).
- Moreira, M. A. 2011. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4 ed. Viçosa.
- PEDDLE, D., BRUNKE, S., HALL, F. A comparison of spectral mixture analysis and ten vegetation indices for estimating boreal forest biophysical information from airborne data, **Canadian Journal of Remote Sensing**, 27(6), 625-635, 2001. DOI <https://doi.org/10.1080/07038992.2001.10854903>
- PRABHAKAR, M.; PRASAD, Y. G.; RAO, M. N. Remote Sensing of Biotic Stress in Crop Plants and Its Applications for Pest Management. In: VENKATESWARLU, B.; SHANKER, A. K.; SHANKER, C.; MAHESWARI, M. (EdS.). **Crop stress and its management: perspectives and strategies**. Netherlands: Springer, 2012. p.517-545. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-2220-0>. Acesso em 12 mar. 2024.
- PONZONI, F. J.; DISPERATI, A. A. **Comportamento espectral da vegetação**. São José dos Campos: INPE, 1995. 37p. (INPE-5619 – PUD/065).
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. v. 1, 176p.
- ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: **ERTS-1 Symposium**, 3, 10-14 December, Washington, DC. Proceedings. Washington, NASA SP-351, p. 309-317, 1973. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>. Acesso em: 12 mar. 2024.

SILVA, M. C. et al. Coffee resistance to the main diseases: leaf rust and coffee berry disease. *Braz. J. Plant Physiol.* v. 18, p. 119-147, 2006. DOI <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100010>

STAGAKIS, S. et al. Monitoring water stress and fruit quality in an orange orchard underregulated deficit irrigation using narrow-band structural and physiological remote sensing indices. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 71, p. 47–61, 2012. DOI <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.05.003>

STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C. Introdução à radiometria. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 7., 1993, Curitiba. Anais...Curitiba, 1993. p. 2-12.

VAN DER MEER, F., DE JONG, S.M., BAKKER, W.H. **Imaging Spectrometry: Basic Analytical Techniques**. In F. Van der Meer, & S.M. De Jong (Eds.), *Imaging Spectrometry* (pp. 17-61). The Netherlands: Kluwer Academic, 2001.

VÁRZEA, M. P. V.; MARQUES, D. V. Population variability of *Hemileia vastatrix* vs. Coffee durable resistance. In: ZAMBOLIM, L.; ZAMBOLIM, E. M.; VÁRZEA, M.P.V. (Orgs). **Durable Resistance to coffee leaf rust**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 2005, p. 53-74

VÁRZEA, V.M.P. et al.. Resistência do cafeeiro a *Hemileia vastatrix*. pp.297-320 In: ZAMBOLIM, L. (Ed.) **O estado da arte de tecnologias na produção de café**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa. 2002

VOGELMANN, T. Annual review of plant physiology and plant molecular biology, **Plant tissue optics**, 44, 231-251, 1993. Disponível em: [https://archive.org/details/annualreviewofpl0040\\_1989unse](https://archive.org/details/annualreviewofpl0040_1989unse). Acesso em: 12 mar. 2024.

WARD, M. H. On the morphology of *Hemileia vastatrix* Berk. and Br. (The fungus of the coffee disease of Ceylon). **Quarterly Journal of Microscope Science**, 22: 1-11, 1882. DOI <https://doi.org/10.1242/jcs.s2-22.85.1>

ZAMBOLIM, E. M.; VÁRZEA, V. M. P. (Eds.). **Durable Resistance to Coffee Leaf Rust**. Viçosa: UFV, p. 75-98, 2005.

ZAMBOLIM, L. et al. Café (*Coffea arabica* L.), controle de doenças causadas por fungos, bactérias e vírus. In: VALE, F. X. R.; ZAMBOLIM, L. (Eds.). **Controle de doenças de plantas**. v. 1. Viçosa, 1997, p. 83-180.

ZAMBOLIM, L. & CHAVES, G.M. Efeito de baixas temperaturas e do binômio temperatura-umidade relativa sobre a viabilidade dos uredósporos de *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. e *Uromyces phaseolityca* Arth. **Experientiae**, p. 151-184. 1974. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/28460>. Acesso em: 12 mar. 2024.



ZAMBOLIM, L., VALE, F. X. R.; PEREIRA, A. A.; CHAVES, G. M. Manejo integrado das doenças do cafeeiro. **In: Encontro sobre produção de café com qualidade**, v. 1. Viçosa/MG:, 1999, p. 134-215.

ZHAO, D. et al. Remote-sensing algorithms for estimating nitrogen uptake and nitrogen-use efficiency in cotton. **Soil and Plant Science**, v. 60, p. 500-509, 2010. DOI <https://doi.org/10.1080/09064710903233854>

ZHAO, D. et al. S. Selection of optimum reflectance ratios for estimating leaf nitrogen and chlorophyll concentrations of field grown cotton. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 1, p. 89-98, 2005. DOI <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0089>