

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - CAMPUS MONTE CARMELO
ENGENHARIA DE AGRIMENSURA E CARTOGRÁFICA

GEOVANE PIVÊTA VINHAL

DETECÇÃO DE NEMATÓIDES NA CULTURA CAFEEIRA A PARTIR DE
IMAGENS OBTIDAS POR AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA

MONTE CARMELO

2018-2

GEOVANE PIVÊTA VINHAL

**DETECÇÃO DE NEMATOIDES NA CULTURA CAFEIEIRA A PARTIR DE
IMAGENS OBTIDAS POR AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**

Trabalho apresentado como requisito para a obtenção de aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. George Deroco Martins.

MONTE CARMELO

2018-2

**DETECÇÃO DE NEMATOIDES NA CULTURA CAFEIEIRA A PARTIR DE
IMAGENS OBTIDAS POR AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**

Trabalho aprovado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Uberlândia avaliado pela banca examinadora formada por:

Monte Carmelo, 05 de dezembro de 2018.

Prof. Dr. George Deroco Martins, FECIV/UFU

Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis, IG/UFU

Prof. Dr. Ricardo Luis Barbosa, IG/UFU

Ao meu querido e amado vovô Capitão, que nos deixou há pouco tempo, mas fez tanto por mim ao longo de sua vida.

AGRADECIMENTOS

Neste momento, o único sentimento que me toma é o de gratidão, eu sinto que devo a muitos por ajudarem de alguma forma ao longo da minha vida acadêmica.

Agradeço primeiramente a Deus, por ter abençoado meus passos e me fortalecido ao ponto de superar as dificuldades. Agradeço por toda a saúde que me deu e que permitiu concluir esta etapa tão importante de minha vida.

Aos meus pais, Gilmar e Alice, e ao meu irmão, Guilherme, por todo o suporte fornecido e amor incondicional. Agradeço pelas palavras de incentivo, otimismo e orgulho não me deixarem desistir.

A minha sobrinha, Bianca, que em meio a tantas ausências, me renovava a cada encontro, com seu amor e carinho.

A minha namorada, Valéria, pelos conselhos e amizade, e por todo apoio às minhas decisões.

Aos meus companheiros de república, Henrique, Rafael e Jhonathan, que, em quase 5 anos de convívio, além de grandes amigos, foram, praticamente, como irmãos.

Aos meus amigos Paulo Victor, Sérgio e Rodolfo, por estarem presentes desde o início desta trajetória até os dias de hoje. Agradeço a vocês pelos momentos de descontração e por todo o companheirismo em meio a tantas dificuldades enfrentadas.

Aos meus amigos da 5ª turma de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica por me ensinarem que sozinho em lugar nenhum chegamos.

Ao professor George Deroco pela orientação, por compartilhar parte de seu conhecimento, e pela persistência e confiança depositadas em mim durante a execução deste trabalho.

A todos os docentes, pela dedicação e conhecimentos transmitidos.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma e estiveram presentes durante a minha caminhada.

RESUMO

A cultura cafeeira, por ser perdurável, e quando cultivada em grande escala, está sujeita a eventuais danos em consequência da incidência de pragas e doenças, afetando severamente a lavoura e causando prejuízos irreparáveis. Dentre os problemas encontrados no cafeeiro, os nematoides, fitoparasitas que atacam o sistema radicular da planta, se destacam por constituírem um dos principais fatores que causam desequilíbrios nutricionais, provocando variações na resposta espectral da folha. Nesse contexto, o sensoriamento remoto apoiado por sensores embarcados em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) revelam-se como uma eficiente alternativa no manejo localizado e no combate a disseminação de regiões doentes, permitindo um mapeamento detalhado da plantação e fornecendo informações precisas e em tempo hábil. Tendo em vista tais aspectos, esse trabalho objetivou mapear uma lavoura de café infestada por nematoides, mediante um ARP equipado com dois sensores, um RGB (canais: vermelho, verde e azul) e outro multiespectral RGN (canais: vermelho, verde e infravermelho). Para tanto, criou-se uma metodologia de mapeamento por meio de técnicas de processamento digital de imagens, discriminando o café sadio do café infectado a partir de amostras coletadas *in situ* e do processo de classificação não supervisionada por máxima verossimilhança, a qual obteve uma acurácia global de 81% e coeficiente kappa de 0,72 para a imagem RGB. Enquanto que, a imagem RGN obteve resultados pouco superiores, com uma acurácia global de 84% e coeficiente kappa de 0,75. Em um segundo momento, foi estimado os níveis de concentração de teor de clorofila considerando os valores de radiometria das imagens e os correlacionando com as amostras de clorofila coletadas *in situ*. As bandas da imagem RGB apontaram nenhuma correlação, em contrapartida, na imagem RGN, o índice de vegetação correspondente ao NDVI apresentou uma correlação significativa, possibilitando a criação de modelos empíricos para estimar a clorofila A, B e Total com acurácia de 69,28%, 53,32% e 54,01% respectivamente.

Palavras-chave: cafeeicultura, nematoides, ARPs, mapeamento, detecção de doenças, estimativa de teor de clorofila.

ABSTRACT

The coffee crop, for being sustainable, once grown on a large scale, shall be subject to eventual harm as a consequence of the pests incidence and diseases, severely affecting the crop and causing irreparable damages. Among the problems found in coffee plants, nematodes, phytoparasitic that attack the root system of the plant, stands out as being one of the main factors that cause nutritional imbalances, leading to variations in the leaf spectral response. In this context, remote sensing supported by sensors on Remotely Piloted Aircraft (RPAs) is an efficient alternative for the localized management and for combating the dissemination of sick regions, allowing a detailed mapping of the plantation and providing accurate information in timely manner. In view of the above, this work aimed to map a coffee crop infested with nematodes, using an RPA equipped with two sensors, one RGB (red, green and blue) and another multispectral RGN (red, green and infrared channels). For this purpose, a mapping methodology was created by processing techniques of digital image, discriminating the healthy coffee of the infected coffee from samples collected in situ and by the process of not supervised classification by maximum likelihood, which obtained a total accuracy of 81% and kappa coefficient of 0,72 for the RGB image. In a second moment, the concentration levels of chlorophyll content was estimated, considering the radiometry values of the images and correlating them with the chlorophyll samples collected in situ. The RGB image bands showed no correlation, in contrast, in the RGN image, the vegetation index corresponding to the NDVI presented a significant correlation, allowing the creation of empirical models to estimate the chlorophyll A, B and Total with an accuracy of 69,28%, 53,32% and 54,01%, respectively.

Key words: coffee-growing, nematodes, RPAs, mapping, detection of diseases, estimation of chlorophyll content.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Ciclo da agricultura de precisão.	17
Figura 2	Espectro eletromagnético.	20
Figura 3	Reflectância espectral característica da folha verde sadia.	24
Figura 4	Área do triângulo definida pelo TGI.	26
Figura 5	Bloco formado pelas linhas de voo e a sobreposição longitudinal e lateral.	33
Figura 6	Localização geográfica da área de estudo.	36
Figura 7	Fluxograma metodológico.	38
Figura 8	Distribuição espacial dos pontos mensurados <i>in situ</i> .	42
Figura 9	Distribuição espacial de café infectado e sadio na área de estudo, obtido pela classificação supervisionada da imagem RGB, correspondente as bandas: vermelho, verde, azul e o índice de vegetação TGI.	47
Figura 10	Distribuição espacial de café infectado e sadio na área de estudo, obtido pela classificação supervisionada da imagem multiespectral RGN, correspondente as bandas: vermelho, verde, infravermelho próximo e o índice de vegetação NDVI.	49
Figura 11	Gráficos de regressão da correlação entre os valores de clorofila observados em campo e os valores de radiometria da imagem RGB (reflectância da banda correspondente ao índice TGI).	52
Figura 12	Gráficos de regressão da correlação entre os valores de clorofila observados em campo e os valores de radiometria da imagem RGN (reflectância da banda correspondente ao índice NDVI).	54
Figura 13	Mapa cor-valor de concentração de clorofila “A” obtido a partir do modelo empírico de regressão.	56
Figura 14	Mapa cor-valor de concentração de clorofila “B” obtido a partir do modelo empírico de regressão.	57
Figura 15	Mapa cor-valor de concentração de clorofila total obtido a partir do modelo empírico de regressão.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Valores do coeficiente Kappa para análise da classificação.	44
Tabela 2	Matriz de confusão e erros de omissão e comissão da classificação da imagem RGB.	48
Tabela 3	Matriz de confusão e erros de omissão e comissão da classificação da imagem RGN.	50
Tabela 4	Correlação entre a clorofila e a reflectância das bandas originais do sensor RGB e do índice TGI.	51
Tabela 5	Correlação entre a clorofila e a reflectância das bandas originais do sensor RGN e do índice NDVI.	53
Tabela 6	Modelos de regressão da concentração de clorofila A, B e Total.	55
Tabela 7	Validação dos modelos de regressão pelo RMSE.	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
3 JUSTIFICATIVA	13
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
4.1 Nematoides na Cultura Cafeeira	14
4.2 Parâmetros Agronômicos: Teor de Clorofila	15
4.3 Agricultura de Precisão	16
4.4 Sensoriamento Remoto Aplicado a Vegetação	18
4.4.1 Sensores	19
4.4.2 Resolução das Imagens	21
4.4.2.1 Resolução Espacial	21
4.4.2.2 Resolução Espectral	22
4.4.2.3 Resolução Radiométrica	22
4.4.2.4 Resolução Temporal	23
4.4.3 Índice de Vegetação	23
4.5 Pré Processamento Digital de Imagens	27
4.5.1 Calibração Radiométrica	27
4.5.2 Registro de Imagem	27
4.5.3 Classificação de Imagens	28
4.6 Uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas na Agricultura	29
4.6.1 Regras para Operações Civis de ARPs	29
4.6.2 Mapeamento Utilizando Imagens Aéreas	31
4.6.2.1 Planejamento de Voo	32
4.6.2.2 Fototriangulação	33
4.7 Análises Estatísticas: Correlação e Regressão	34
5 MATERIAL E MÉTODOS	35
5.1 Área de Estudo	35
5.2 Material	36
5.3 Métodos	37
5.3.1 Planejamento do Voo	38
5.3.2 Aquisição das Amostras <i>in situ</i>	39
5.3.3 Processos Fotogramétricos	39
5.3.4 Processamento Digital das Imagens	39
5.3.4.1 Calibração Radiométrica	40
5.3.4.2 Aplicação do Cálculo dos Índices de Vegetação	40

5.3.4.3 Registro de Imagem	41
5.3.5 Experimento 1: Classificação Supervisionada pelo método da Máxima Verossimilhança	42
5.3.5.1 Validação da Acurácia da Classificação	43
5.3.6 Experimento 2: Estimativa do Teor de Clorofila	45
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
6.1 Distribuição Espacial de Nematoides	46
6.2 Estimativa de Teor de Clorofila a partir de Modelos Empíricos	51
6.2.1 Correlação entre a concentração de clorofila e a reflectância das bandas originais e os índices derivados dos sensores	51
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a cultura cafeeira possui grande importância socioeconômica visto que o país é o maior produtor mundial de café, o segundo maior consumidor e lidera as exportações mundiais, sendo responsável por 30% do mercado internacional (ABIC, 2017). Por ser uma cultura perene e praticada em grandes proporções, está sujeita a riscos iminentes que podem afetar diretamente a produção, em consequência da incidência de pragas e doenças que são responsáveis por uma extensa quantidade de danos e uma enorme perda de receita a cada ano no setor agrícola.

Atualmente a produção de café se mantém em crescimento constante, e aspectos como a utilização da mecanização, juntamente com as inovações tecnológicas e as exigências do mercado à qualidade do produto, são de extrema relevância para o avanço e modernização da cafeicultura em busca de reprimir quaisquer irregularidades encontradas no campo (CONAB, 2017).

Dentre os problemas encontrados no cafeeiro, os nematoides se destacam por constituírem um dos principais fatores que causam a restrição no aumento do processo de crescimento e de produção, principalmente quando cultivado de forma extensiva. Podem ser classificados como organismos de vida livre, quando não são parasitas, e fitonematoides, quando são parasitas e atacam o sistema radicular da planta e as tornam fracas e improdutivas, dificultando a absorção de água e sais mineiras, podendo levar à morte das raízes, a queda e amarelamento das folhas (SALGADO; CARNEIRO; PINHO, 2017).

Como as áreas infectadas por nematoides são consideradas não uniformes, o diagnóstico da infestação em amplas plantações pode custar valores altos e um grande despendo de tempo, o que o torna pouco viável devido à necessidade de coletar inúmeras amostras para análises laboratoriais em busca de estimar com exatidão o nível de infecção e o potencial dos danos (MARTINS, 2016).

A vista disso, a agricultura de precisão é uma técnica que pode ser inserida, por ser um método eficiente na detecção e quantificação das áreas infectadas auxiliando na intervenção cuidadosamente zoneada e oportuna. Essa ferramenta oferece uma infinidade de benefícios potenciais em relação à rentabilidade, produtividade, sustentabilidade e desenvolvimento econômico rural devido a uma maior quantidade e qualidade de dados que podem ser coletados em tempo reduzido, o que implica em informações consistentes para um melhor diagnóstico referente à variabilidade presente nos campos analisados (NAIME et al., 2014).

Nesse contexto, à medida que as áreas cultivadas vão se expandindo e simultaneamente vão surgindo anomalias que debilitam a plantação, o sensoriamento remoto apoiado a plataformas de tomada de imagens aéreas, por meio do mapeamento detalhado, possibilita a obtenção de informações precisas sob o dossel da cultura e em tempo hábil. O uso dessa prática como ferramenta no gerenciamento agrícola proporciona um melhor manejo sobre a lavoura e permite a aplicação de defensivos de maneira pertinente e em áreas específicas, fazendo com que os gestores rurais possam adotar estratégias na tomada de decisão e propor medidas que evitem a perda da produção e a disseminação de regiões doentes.

O uso de sensores dispostos em plataformas aéreas proporcionam dados de uma maior área de amostragem se comparado com informações avaliadas no local da infestação ou em laboratório, pois possui um campo de visada mais amplo na captura das condições da planta. A resposta espectral da área imageada, juntamente com a resolução das imagens, assegura as condições da cultura tornando possível discriminar locais infectados de locais saudáveis e identificar com rigor o estado de sanidade das plantas (MARTINS, 2016).

As imagens multiespectrais, em sua maioria são obtidas por aviões tripulados ou satélites, porém podem sofrer algumas restrições quanto ao custo de aquisição e flexibilidade. Nesse enfoque, as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) surgem como uma alternativa de fácil aquisição de dados e flexibilidade quando comparado com as plataformas clássicas, atendendo o estado da arte do sensoriamento remoto, a resolução temporal. Dessa forma, através da agregação dos sensores e dos sistemas integrados aos ARPs também é possível aumentar a eficiência da gestão da safra e alcançar resultados significativos de produtividade e com custo relativamente mais baixo, podendo ser utilizado de acordo com a vontade do produtor e ainda fornecer imagens com alta resolução espacial e proporcionar mapas com uma vasta gama de detalhes.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo geral mapear uma área de cultura cafeeira infectada por nematoides, com o uso de um ARP equipado com um sensor RGB e outro sensor multiespectral RGN. Para tanto, são apresentados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliação do potencial das imagens obtidas por ARPs na detecção de infestação de nematoides no cafeeiro;

- Propor a criação de uma metodologia de detecção e de mapeamento de áreas infestadas;
- Estimar os níveis de teor de clorofila da cultura em estudo.

3 JUSTIFICATIVA

Devido à necessidade de alta produtividade para buscar atender o mercado consumidor, inúmeras são as pragas e doenças encontradas agredindo as plantações de café, provocando injúrias que podem prejudicar o desenvolvimento da planta e a queda da produção, causando prejuízos irreparáveis na lavoura (EMBRAPA, 2017).

Os avanços tecnológicos alcançaram os campos agrícolas e revolucionaram a forma de trabalhar com a agricultura, que por vários anos se baseou no trabalho braçal, em que a busca por irregularidades na plantação era feita de forma manual e com a necessidade de percorrer por toda a extensão da lavoura. Em função disso, foi fundamental a adaptação para um novo e tecnológico monitoramento agrícola, para que fossem adotadas medidas rápidas de controle a fim de minimizar os danos.

Essa busca e necessidade de obter informações de maneira rápida e precisa nas etapas da produção, proporcionou a agricultura de precisão juntamente com a utilização de ARPs a se tornarem uma ferramenta no manejo da cultura, auxiliando na otimização de processos agrícolas, aumentando a produtividade por meio do mapeamento completo das áreas cultivadas e apresentando uma mensuração exata da produção.

Em consequência disso, fez-se necessário também o aperfeiçoamento, desenvolvimento e adaptação dessa nova ferramenta para a administração das lavouras, bem como o tratamento e análise dos dados obtidos por esses sensores (COELHO, 2005).

De acordo com Tschiedel e Ferreira (2002), a aplicação dos ARPs na agricultura de precisão proporciona máxima rentabilidade das colheitas e torna o agronegócio mais competitivo, maximizando os lucros e minimizando os danos e impactos ambientais. Logo ainda, as ferramentas e técnicas oferecidas auxiliam na detecção precoce do estresse das plantas, o que permite que o produtor escolha estratégias eficazes que aumente a eficiência no gerenciamento da cultura impedindo a disseminação de áreas doentes, e assim dispor de grande economia de custos e de tempo, e garantia elevada de produtividade, pois a perda da safra é reduzida.

Se comparado com outras plataformas, como grandes aeronaves, satélites e dirigíveis, os ARPs se destacam por possuir diversas vantagens, principalmente pelo seu tamanho,

facilidade de adaptação e manuseio, podendo ser utilizado em locais de difícil acesso e realizar o mapeamento de grandes áreas em tempo bem inferior. No caso dos satélites ainda existe a intermitência entre sua passagem pelo mesmo local, período que nem sempre pode coincidir com o pico do ciclo vegetativo da cultura (JORGE; TRINDADE JÚNIOR, 2002).

Além disso, os ARPs são lançados com facilidade, sendo possível realizar voos a uma menor altitude e assim eliminar a influência das nuvens ou de fumaça proveniente de queimadas, além de possibilitar a tomada de imagens georreferenciadas e com maior gama de detalhes devido à alta resolução espacial, o que proporciona uma melhor avaliação dos dados obtidos.

Dessa forma, esse trabalho tem fundamental importância, pois a utilização dessa tecnologia possui um custo reduzido em relação as outras plataformas e atende as diferentes demandas do produtor rural, potencializando os processos dentro da agricultura de precisão e gerando informações que proporcionam uma rápida tomada de decisão dos gestores rurais. Logo, o estudo dessa ferramenta e suas aplicações em áreas agrícolas é necessário pois ainda é um campo pouco explorado no Brasil.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Nematoides na Cultura Cafeeira

Os nematoides, em especial os fitonematoides, são pragas que atingem a maioria das culturas e são responsáveis por grandes perdas na produção, gerando altos custos para seu controle. Esses vermes presentes no solo, se hospedam nas plantas para sobreviver e absorvem seus nutrientes, danificando drasticamente a integridade das raízes (GALBIERI; BELOT, 2016).

Na cultura cafeeira, os nematoides são estritamente parasitas do solo, e atacam as raízes das plantas. É caracterizado pela ocorrência de reboleiras ou pode ser dispersas na área cultivada, ocasionando na maioria das vezes a formação de galhas nas raízes e levando as folhas a se mostrarem com aparência clorótica (CASTRO; CAMPOS, 2004).

Diversas espécies que representam vários gêneros de fitonematoides têm sido encontradas associadas às raízes de cafeeiros no Brasil, sendo as espécies dos gêneros *Meloidogyne* e *Pratylenchus* as mais prejudiciais à cafeicultura brasileira (SALGADO; CARNEIRO; PINHO, 2017).

Alguns aspectos como o aumento do plantio, a movimentação de mudas e a condição perene da cultura contribuem para o aumento do número desses patógenos, que geralmente não estão distribuídos uniformemente na área cultivada (CASTRO et al., 2008). Para auxiliar na avaliação do rigor da infestação, parâmetros como o índice de área foliar (IAF), teor de clorofila e a biomassa são propriedades fundamentais, devido a caracterização da área doente pela perda das folhas, baixa produtividade e desenvolvimento da planta, e baixa atividade fotossintética (VAAST et al., 1998).

A prevenção é a melhor forma de controle de patógenos de solo, em especial os nematoides. Para não atingir casos extremos de infecção nos talhões, há também a necessidade dos produtores em implementarem formas de conter o estresse por meio de sistemas de manejo integrado (GALBIERI; BELOT, 2016). Essa técnica envolvendo todas as ferramentas disponíveis permite conhecer os locais infestados, visando intensificar as medidas preventivas de contenção da doença e manter as boas condições fitossanitárias das lavouras dessa região.

4.2 Parâmetros Agronômicos: Teor de Clorofila

As plantas necessitam de determinada quantidade de nutrientes para o seu crescimento e realização da fotossíntese. Diante disso, é primordial que se tenha um acompanhamento recorrente da lavoura, possibilitando a capacidade de identificar campos afetados pela deficiência nutricional de tal forma a tomar decisões preventivas.

A deficiência de certos nutrientes, especialmente aqueles referentes à produção de clorofila, como o nitrogênio ou magnésio, se manifestam como uma mudança gradativa na coloração da planta, uma vez que, a mudança de coloração começa a ficar evidente visualmente e na maioria das vezes já é tarde demais.

Mediante isso, com o emprego do sensoriamento remoto, é possível de maneira efetiva mapear e monitorar tais deficiências nas áreas cafeeiras, o qual é iminente estimar com grande índice de confiabilidade parâmetros agronômicos, tais como os nutrientes, índice de área foliar, biomassa e o teor de clorofila, que são variáveis que remetem a propriedades fisiológicas particulares da vegetação (MARTINS, 2016).

O teor de clorofila está correlacionado com a concentração de nitrogênio na planta, e indica um conteúdo substancial de nutrientes, e isso, por consequência, indica uma boa produtividade. Também é possível estimar a variabilidade do teor de clorofila e outros aspectos biológicos na plantação, e com leituras instantâneas de maneira não destrutiva das

folhas, apresenta-se como alternativa o uso do clorofilômetro, que é possível estimar, de forma rápida e barata, a concentração de nitrogênio, contribuindo para a utilização moderada de fertilizantes nitrogenados (LEONARDO et al., 2013).

Segundo Streit et al., (2005), a clorofila “A” representa aproximadamente 75% de todos os pigmentos verdes encontrados nas plantas e em quase todos os organismos que fotossintetizam, se tornando o tipo mais abundante. Já a clorofila “B” atua como um pigmento acessório na fotossíntese, ajudando a ampliar a faixa de luz que pode ser utilizada nesse processo, complementando a captação de luz.

4.3 Agricultura de Precisão

A produção agrícola tem aumentado constantemente no decorrer dos anos, e para acompanhar esse processo tem se buscado cada vez mais meios de suprir essa crescente demanda e ainda evitar danos ambientais e os desafios das mudanças climáticas.

O desenvolvimento tecnológico trouxe novas possibilidades e soluções para a otimização da agricultura, e diante disso, essas novas técnicas têm sido motivo de grande procura por parte dos produtores, profissionais e pesquisadores em busca de maiores produções e eficiência nas operações para uma rápida tomada de decisão, dando ênfase nos menores custos (GALVÃO, 2014).

A necessidade de se obter produções em grande escala requer novos métodos e técnicas de produção, aliados a um maior controle no campo. Nessa perspectiva, surge a agricultura de precisão, que de acordo com Medeiros (2007) consiste em um conjunto de tecnologias cujo objetivo é aumentar a produtividade, baseado no manejo preciso das áreas agrícolas por meio da utilização de estratégias que resolvam os problemas sofridos pelas lavouras, e assim trazer o máximo de retorno financeiro possível sem causar danos ambientais.

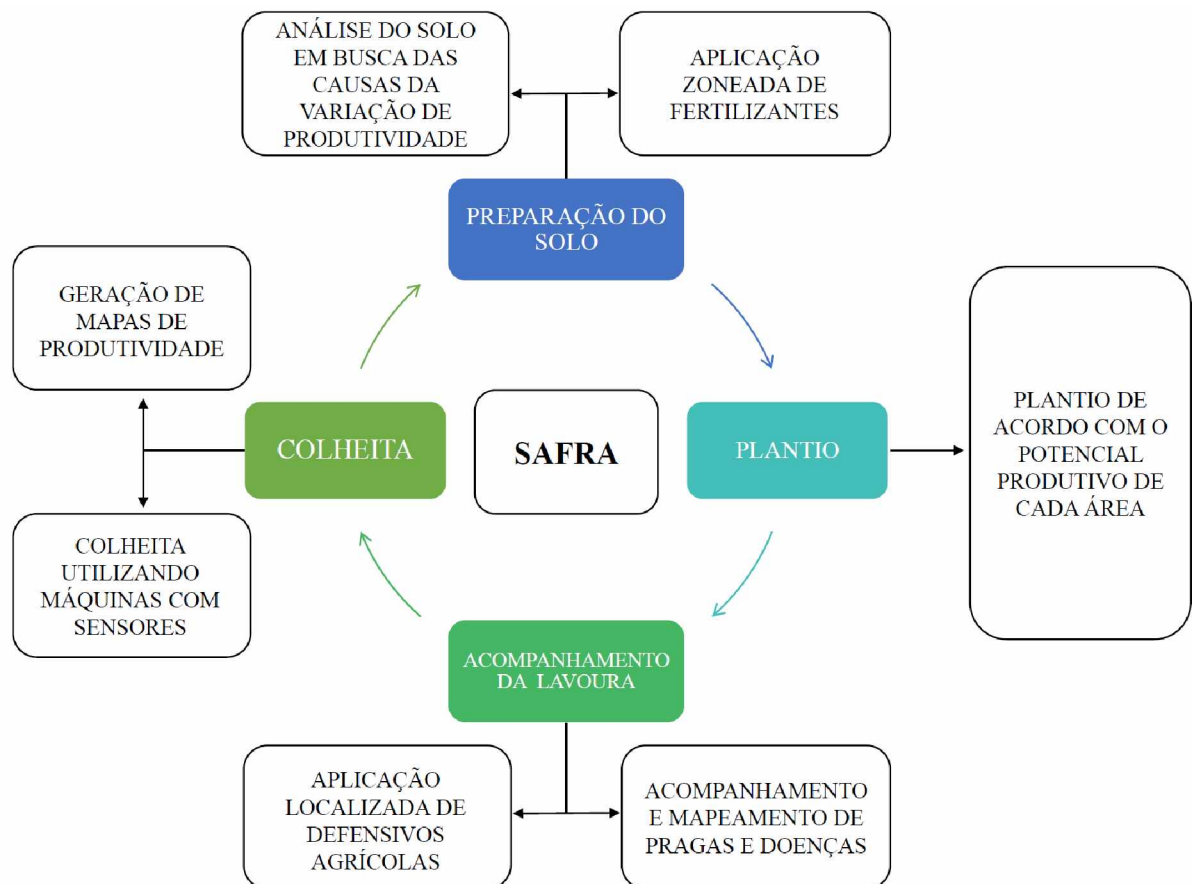
A agricultura de precisão promete grandes benefícios para os usuários desse sistema, permitindo um mapeamento aprofundado da plantação e o manejo do solo, auxiliando na aplicação de insumos agrícolas cuidadosamente zoneada e nas quantidades requeridas por meio das ferramentas automatizadas e computacionais (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015),

Há indícios de informações de que a agricultura de precisão é trabalhada desde o começo do século XX, quando na Europa foi gerado o primeiro mapa de produtividade e nos Estados Unidos da América foi feita a primeira adubação com variadas dosagens. Porém, o

maior passo dado foi com o surgimento do GPS (*Global Positioning System*), que revolucionou a forma das pesquisas do sistema de manejo integrado e tornou as informações mais acessíveis, uma vez que, sem o GPS seria quase impossível localizar com exatidão pontos no meio de uma lavoura para aplicação de algum tipo específico de produto (BRASIL, 2013).

Essa mudança na forma de se trabalhar com a agricultura está tornando cada vez mais o produtor rural em um empresário rural, por ele estar à frente do controle de sua linha de produção, o levando a conhecer cada metro quadrado de sua propriedade (TSCHIEDEL; FERREIRA, 2002). Nesse ponto de vista, é possível observar o ciclo da agricultura de precisão convencional na figura 1, o qual na parte interna corresponde as fases da agricultura convencional, ligando por setas cada etapa da agricultura de precisão disposta na parte externa (MEDEIROS, 2007).

Figura 1 - Ciclo da agricultura de precisão.



Fonte: Adaptado de Arvus (2005) apud Medeiros (2007).

A utilização das geotecnologias em conjunto com o sensoriamento remoto (SR) tem auxiliado para o avanço da agricultura de precisão e estão sendo empregadas no campo com a função de aprimorar as safras através do uso das imagens de satélite e também por meio de sensores em máquinas e ARPs.

No entanto, a fotogrametria apoiada ao uso dos ARPs é evidenciada em virtude da alta resolução espacial das imagens e também por não sofrer com a presença de nuvens ou fumaça devido à queima da vegetação, além de oferece maior liberdade aos usuários, uma vez que as imagens podem ser obtidas no momento em que se fazem necessárias.

Essa nova ferramenta beneficia a produção de mapas de vigor vegetativo e o mapeamento com maiores detalhes das culturas, implicando de forma positiva a estimativa de produção com a identificação de pragas e doenças, e ainda o cálculo de área foliar, biomassa e a quantificação de nitrogênio, clorofila, e água presentes na vegetação mapeada (GALVÃO, 2014).

4.4 Sensoriamento Remoto Aplicado a Vegetação

Na atualidade, o sensoriamento remoto vem sendo largamente aplicado para o monitoramento de coberturas vegetais, voltado principalmente, para seu comportamento espacial e/ou fisiológico (ABREU; COUTINHO, 2014).

O termo sensoriamento remoto foi criado para denominar o desenvolvimento de uma nova tecnologia de instrumentos capazes de obter imagens a longas distâncias. A vista disso, a definição mais conhecida é que o sensoriamento remoto é uma técnica em que a captura de imagens de objetos da superfície da terra é feita sem que haja um contato físico entre o sensor e o alvo, visando o desenvolvimento da obtenção dessas imagens a partir da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Novo (2010), ainda define sensoriamento remoto como modernos equipamentos sensores, equipamentos para processamento dos dados, equipamentos de transmissão, aeronaves e espaçonaves, utilizados conjuntamente com o objetivo de estudar o ambiente terrestre a partir do registro e das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que constituem o planeta terra em suas mais diversas manifestações.

O princípio fundamental do SR é que haja a existência de uma fonte de energia para iluminar o objeto, a menos que, a energia detectada esteja sendo emitida pelo próprio objeto. Conforme expressa Batista e Dias (2005), o nome dado a essa energia é radiação

eletromagnética, ou simplesmente REM, no qual o objeto imageado é registrado pelo sensor por meio dessa energia, bem como a luz solar refletida da superfície de qualquer alvo.

Para que informações apuradas sejam extraídas por meio das imagens de SR, é indispensável a qualidades técnicas dos sensores, bem como a qualidade e intensidade irradiante das fontes de REM. De acordo com Meneses e Almeida (2012), devido a sua alta temperatura, o sol é considerado a mais potente fonte de radiação do sistema solar, porém ela não consegue emitir radiação de todos os comprimentos de onda, o que levou a construção de fontes artificiais capazes de emitirem altas intensidades em comprimentos de onda, por exemplo as micro-ondas.

Inúmeras possibilidades são permitidas nos dias atuais devido a gama de recursos provenientes do SR e de suas aplicações. O desenvolvimento das tecnologias auxiliou para que essa área abrangesse diversos setores, visto que, num passado não muito distante as imagens de sensores remotos eram obtidas somente por meio de plataformas com custos considerados elevados e acessíveis apenas para instituições governamentais e grandes empresas. Porém atualmente, segundo Naime et al. (2014), os ARPs já são realidade e estão sendo utilizados no auxílio das técnicas de SR.

Campos como o da agricultura, meio ambiente e estudos florestais já estão sendo otimizados com essa nova tecnologia. Na agricultura em especial, essa ferramenta se tornou indispensável quando se trata de monitoramento agrícola, pelo fato da mesma proporcionar o auxílio na supervisão do desenvolvimento da cultura durante o todo o período em estudo, e que, conforme Figueiredo (2005), já é possível realizar o mapeamento contribuindo na previsão de rendimento de safras, na estimativa de biomassa, na definição de áreas de aptidão agrícola, no zoneamento agroecológico, no monitoramento de estresse hídrico e de incêndios em lavouras e pastagens.

4.4.1 Sensores

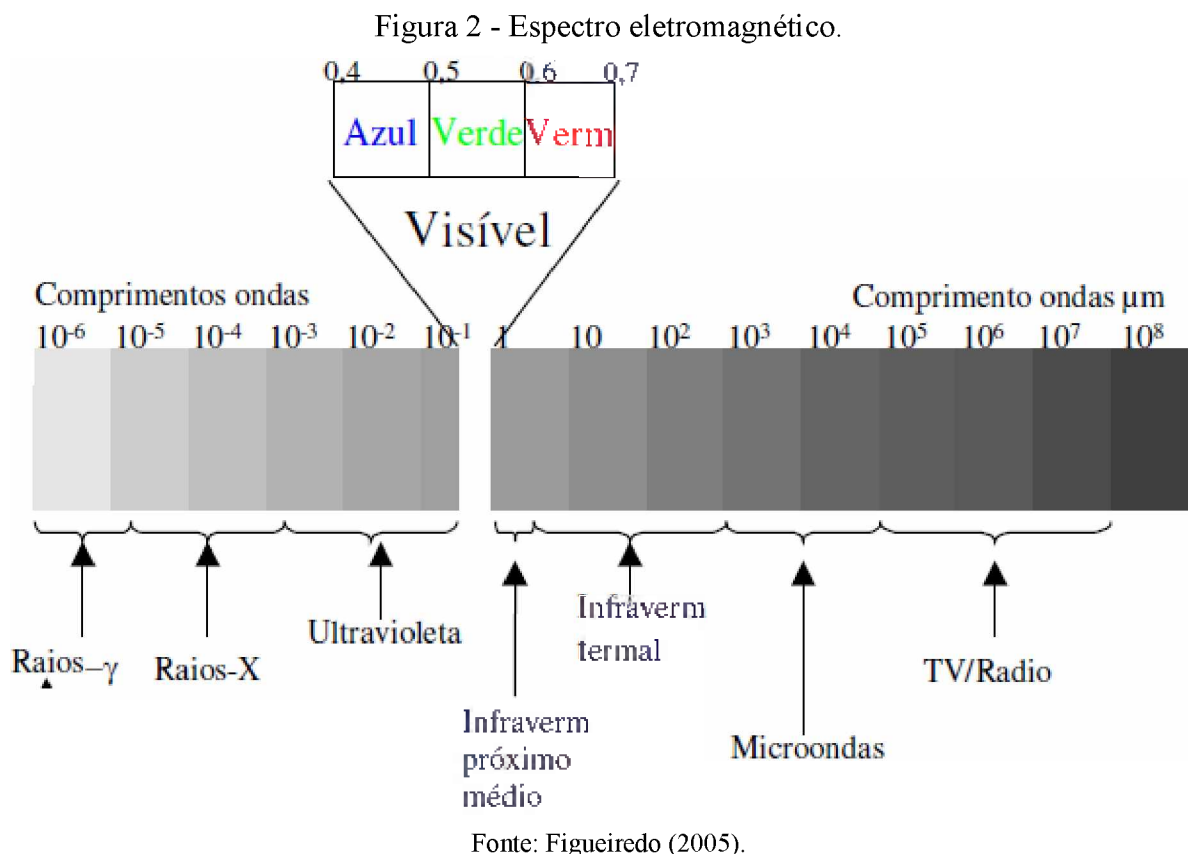
Os sensores são equipamentos capazes de coletar a energia proveniente de algum alvo e realizar a conversão em sinais passíveis de ser registrado e apresentado em uma forma adequada para extração de informações.

Para que um sensor possa coletar e registrar a energia refletida ou emitida por um objeto ou superfície, ele deve ser fixado em uma plataforma estável a uma determinada distância que esteja sendo bem observada. Essas plataformas de sensores remoto podem estar

situadas no solo, em aeronaves ou balões, ou em uma plataforma orbital (BATISTA; DIAS, 2005),

Baseado na fonte da onda eletromagnética, os sensores podem ser caracterizados como passivos ou ativos. Os sensores ativos tem a capacidade de utilizam a REM artificial produzida por radares, enquanto que os passivos utilizam apenas a REM natural refletida ou emitida a partir da superfície terrestre, num processo de interação que capta detalhadamente informações sobre as características físicas e químicas dos alvos (FIGUEIREDO, 2005).

As faixas de comprimentos de onda e de frequência da REM (Figura 2) são estritamente importantes para entender em quais faixas desse espectro eletromagnético os sensores captam melhores informações, que de acordo com Batista e Dias (2005) estão relacionados inversamente um ao outro, pois quanto menor o comprimento de onda, maior será a frequência e vice-versa.



Em conformidade com a figura 2, os sensores passivos utilizam pequenas faixas do espectro provenientes do sol (irradiância) e das faixas de ondas termais emitidas pela superfície terrestre (radiância), a qual constituem a luz do visível e a do infravermelho. Já os sensores ativos utilizam ondas de radar e operam com as micro-ondas (FIGUEIREDO, 2005).

A radiação proveniente da região do visível é a faixa do espectro mais comum, uma vez que pode ser detectada pelo sistema visual humano, dando a sensação de cor produzida pela luz associada a diferentes comprimentos de ondas. Desse modo, Batista e Dias (2005) profere que é possível verificar que a radiação do visível é formada por vários comprimentos de ondas, no qual as cores azul, verde e vermelho são consideradas as cores primárias por produzir através das várias combinações todas as outras cores.

4.4.2 Resolução das Imagens

O sensoriamento remoto é constituído por uma gama de tecnologias e plataformas com a capacidade de obter imagens que atendem diversas necessidades de uma ampla demanda de usuários. A qualidade de um sensor geralmente é especificada pela sua capacidade de obter informações detalhadas da energia eletromagnética e suas características estão relacionadas aos tipos de resoluções.,

Diante disso, uma forma de se abordar as potencialidades de um sensor é pelo dimensionamento e características de suas resoluções.

4.4.2.1 Resolução Espacial

Para algumas aplicações de SR, a distância entre o objeto a ser imageado e a plataforma tem um papel importante para determinar o nível de detalhe de informações obtidas e a área total imageada pelo sensor. Baseado nisso, Batista e Dias (2005) apontam que os sensores a bordo de plataformas distantes dos alvos, habitualmente observam uma área maior, mas não podem suprir com grande detalhamento os objetos imageados.

Cada sistema sensor tem a capacidade de definir o tamanho do *pixel*, que corresponde a menor parcela imageada, e ainda destaca que é impossível identificar um alvo dentro de um único *pixel* pois seu valor integra todo o feixe de luz proveniente da área do solo correspondente ao mesmo (FIGUEIREDO, 2005).

No entanto, a dimensão do *pixel* pode ser denominada de resolução espacial, compondo uma importante característica do sensor pois tem como função distinguir os objetos da superfície imageada e determinar o tamanho do menor elemento que pode ser identificado em uma imagem (MORAES, 2002).

Segundo Meneses e Almeida (2012), quanto maior a dimensão do *pixel*, menor será a resolução espacial da imagem. Logo, Naime et al. (2014) salienta sobre a disponibilidade de

imagens em que o *pixel* representa áreas de um quilômetro quadrado ou até maiores, as quais podem ser aplicadas para estudos em que não se deseja uma alta resolução espacial. Nessa mesma perspectiva, também é possível obter imagens com resolução espacial na ordem de centímetros a partir de plataformas aerotransportadas ou de sensores orbitais de alta resolução, o que auxiliam para uma melhor definição dos alvos terrestres.

4.4.2.2 Resolução Espectral

As faixas espectrais, também denominadas bandas espectrais, compõe diferentes regiões do espectro eletromagnético, e para o SR, obter imagens em múltiplas bandas é uma característica muito importante dos sensores imageadores.

A resolução espectral é uma medida da largura das faixas espectrais e da sensibilidade do sistema sensor em distinguir entre dois níveis de intensidade do sinal de retorno. Logo um sensor tem melhor resolução espectral se ele possuir um número maior de bandas em regiões diferentes e com larguras estreitas de comprimentos de onda (NOVO, 2010).

O termo resolução espectral envolve pelo menos três parâmetros de medida, no qual o número de bandas que o sensor possui, a largura do comprimento de onda das bandas e as posições que as bandas estão situadas no espectro eletromagnético, são elementos essenciais para que o sensor alcance uma boa resposta espectral (MENESES; ALMEIDA, 2012).

De acordo com a faixa do espectro eletromagnético, os objetos na superfície da terra podem responder de formas diferentes, interferindo em distintas aplicações para cada uma das bandas dos sensores (NAIME et al.,2014). Nesse sentido, os sensores multiespectrais são caracterizados por bandas em diferentes faixas do espectro, e cobrem a faixa do visível, infravermelho próximo, médio e termal, e já os sensores hiperespectrais possuem um número mais elevado de bandas interligadas, capazes de coletar informações do espectro eletromagnético sucessivamente.

4.4.2.3 Resolução Radiométrica

A radiação radiométrica está relacionada a faixa de valores numéricos associadas aos *pixels*. Esse valor representa a intensidade da radiância emitida da área do terreno correspondente e é denominado de nível de cinza, necessitando da quantidade de *bits* utilizada para cada *pixel* (FIGUEIREDO, 2005).

Segundo Moraes (2002), a resolução radiométrica pode ser definida como a eficiência do sensor em detectar sucintos sinais, ou seja, a maior ou menor capacidade de detectar e registrar diferenças na energia refletida ou emitida pelos elementos.

Em função disso, a partir da intensidade da radiação que o sensor capta, a resposta de saída dos detectores é convertida eletronicamente em um número digital, processo que se dá o nome de quantização. Quanto maior for a quantização, maior também será a qualidade visual da imagem, no qual o sinal é medido pelo intervalo de números de valores digitais usados para expressar os valores de radiância medidos pelo detector, que normalmente é expressa em números binários (*bits*) (MENESES; ALMEIDA, 2012).

4.4.2.4 Resolução Temporal

A resolução temporal se refere ao intervalo de tempo entre a primeira e a segunda tomada das imagens referentes ao mesmo objeto ou local (MENESES; ALMEIDA, 2012), e está relacionada com a real necessidade do SR em aprimorar a tomada de dados.

De acordo com Batista e Dias (2005), a habilidade de se obter imagens da mesma área da superfície terrestre em períodos diferentes de tempo é um dos mais importantes elementos em aplicações de dados de SR em monitorar as mudanças que acontecem na superfície da Terra, sejam elas de natureza natural ou induzidas pelo homem. Logo, Meneses e Almeida (2012) apontam a relevância no acompanhamento do ciclo fenológico de agriculturas, desmatamentos e desastres ambientais.

4.4.3 Índice de Vegetação

Os estudos que envolvem aplicações das técnicas de SR voltados a vegetação, geralmente buscam compreender a aparência que uma determinada cobertura vegetal apresenta, e conhecer o comportamento espectral dos objetos imageados torna-se então essencial para a escolha da região do espectro que se pretende adquirir informações.

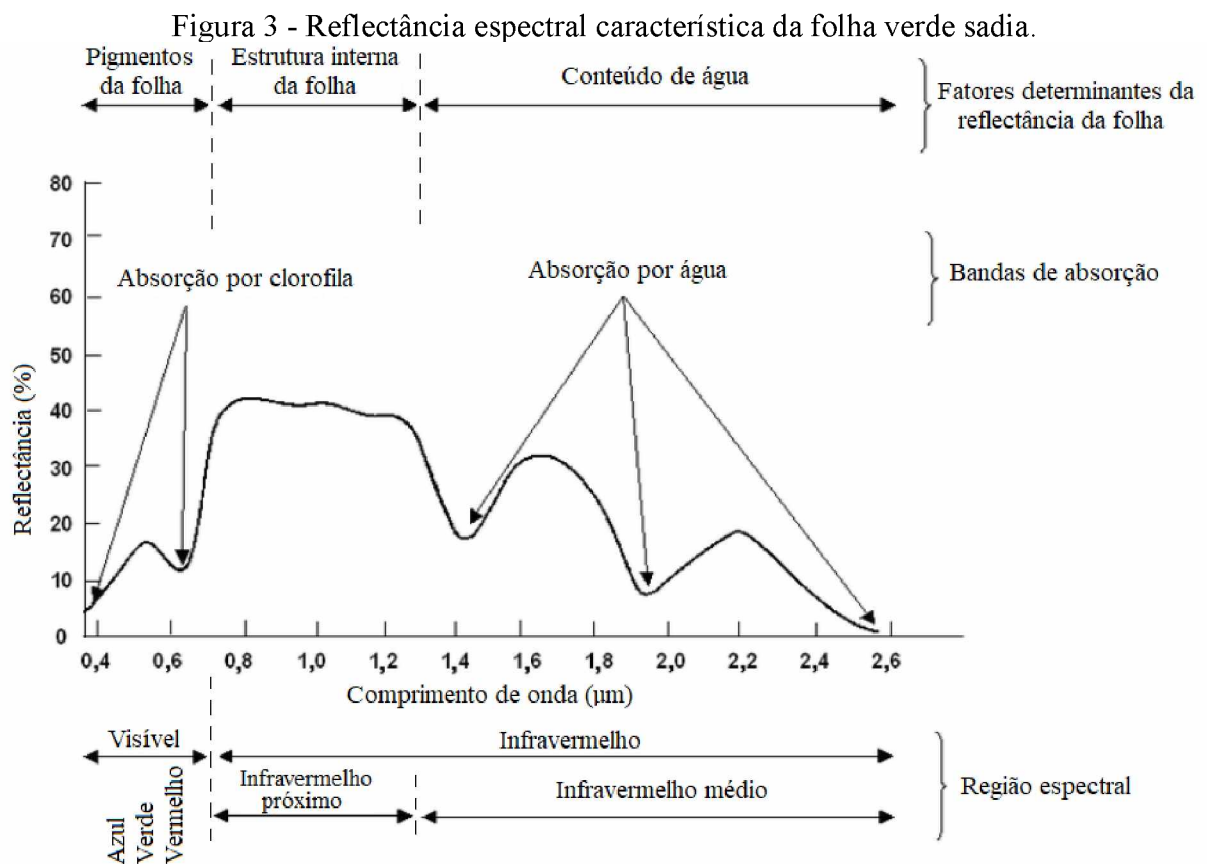
As características básicas observadas no comportamento espectral podem variar para cada objeto, no qual a vegetação, a água, os minerais e o solo podem interagir de maneiras distintas espectralmente com a incidência das ondas de energia. Tal fato é possível pois há uma grande variedade entre suas composições e padrões de reflectância, o que torna possível o discernimento devido a suas propriedades físico-químicas e biológicas (MORAES, 2002).

Segundo Moraes (2002), ao atingir o objeto, o fluxo eletromagnético sofre interações com o material que o compõe, sendo capaz de refletir, absorver e transmitir totalmente ou

parcialmente sua energia. A vista disso, de todos os elementos constituintes da vegetação, a folha é principal deles quando se considera o processo de interação com REM, e para uma melhor compreensão das características de reflectância que incide na vegetação, é necessário também o conhecimento de sua composição química, principalmente o tipo e a quantidade de pigmentos fotossintetizantes e de sua morfologia interna.

De acordo com Meneses e Almeida (2012), a principal banda de absorção da vegetação está relacionada a região do visível, logo a região de maior reflectância é a do infravermelho próximo. A alta absorção de energia eletromagnética está associada a clorofila para a realização da fotossíntese, e a alta reflectância é devido a estrutura celular interna da folha, sendo que, a partir desse comprimento de onda quem modula as bandas de absorção é o conteúdo de água que compõe a vegetação (MORAES, 2002).

A curva de reflectância espectral característica de uma folha verde sadia é mostrada na figura 3, e é possível observar que os comprimentos de onda associados ao ultravioleta foram desconsiderados, devido ao fato de que grande quantidade dessa energia é absorvida pela atmosfera e a vegetação não faz uso dela.



Fonte: Adaptado de Novo (2010).

A partir da utilização desses dados espectrais na estimativa de parâmetros da vegetação, é possível conhecer o seu comportamento em relação aos fenômenos de absorção, emissão e reflexão da REM incidente, e a partir dessas informações utilizam-se os Índices de Vegetação (IV) para otimizar a interpretação dos dados das imagens que são obtidas pelos sensores, realçando suas características e minimizando os efeitos do solo ou de outros alvos (ALVARENGA et al., 2003).

Nessa perspectiva, os IV surgem como indicadores da qualidade da vegetação, constituindo-se em operações algébricas que utilizam os níveis de cinza dos *pixels* para obter valores numéricos. Esses índices envolvem faixas de reflectância específicas entre diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético, e possibilitam determinar a cobertura vegetal e sua densidade, o que o tornam uma importante solução no monitoramento e identificação de mudanças na cobertura vegetal (CRUZ et al., 2011), por estarem relacionados aos parâmetros biofísicos da vegetação, como a biomassa e o IAF (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

O índice de vegetação mais empregado na avaliação das características da cobertura da vegetação é o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), que traduzido para o português significa Índice de Vegetação da Diferença Normalizada. Esse IV facilita a obtenção e a modelagem de parâmetros biofísicos das plantas, com destaque para as bandas do infravermelho do espectro eletromagnético, que pode fornecer importantes informações sobre a evapotranspiração das plantas (JENSEN, 2009).

O NDVI atribui a área estudada um determinado valor que irá depender do estado em que se encontra a vegetação. Ele varia de -1 a 1, visto que, quanto mais próximo de 1 mais densa será a vegetação e valores iguais a zero vão estar relacionados aos *pixels* que não possuem cobertura vegetal (LOPES et al., 2010), e pode ser obtido pela razão entre a diferença da resposta espectral do *pixel* nas bandas do infravermelho próximo e do vermelho, e a somatória dessas duas bandas (FIGUEIREDO, 2005), conforme expressa a equação (1).

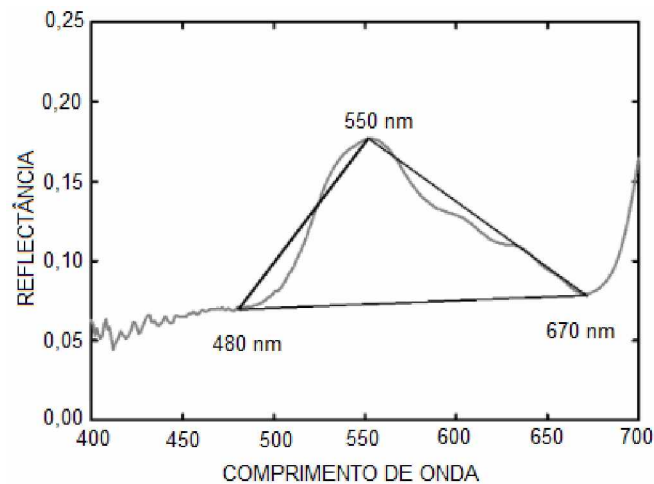
$$NDVI = \frac{IVP - RED}{IVP + RED} \quad (1)$$

Onde:

- *NDVI* é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada;
- *IVP* é a reflectância medida na faixa espectral do infravermelho próximo;
- *RED* é a reflectância medida na faixa espectral do vermelho na região do visível.

Outro índice de vegetação foi desenvolvido, e diferente do NDVI, foi baseado exclusivamente em sinais RGB. O *Triangular Greenness Index* (TGI, do português Índice de Verde Triangular), é um índice que possui a capacidade de obter informações durante todo o período de crescimento da planta, e de acordo com Hunt Jr. et al. (2011), ele é definido como a área de um triângulo no qual seus vértices são determinados pelos sinais de reflectância do vermelho, verde e azul (Figura 4), e foi produzido com base nessa área triangular envolvendo as características espectrais da clorofila.

Figura 4 – Área do triângulo definida pelo TGI.



Fonte: Hunt Jr. et al. (2011).

Logo, segundo McKinnon e Hoff (2017) depois de analisar o sensor de uma câmera CMOS e considerar os seus comprimentos de ondas, normalizados pelo sinal do verde, pode-se descrever a equação do TGI como demonstrada na fórmula (2).

$$TGI = GREEN - 0.39 * RED - 0.61 * BLUE \quad (2)$$

Onde:

- *TGI* é o Índice de Verde Triangular;
- *GREEN* é a reflectância medida na faixa espectral do verde na região do visível;
- *BLUE* é a reflectância medida na faixa espectral do azul na região do visível;
- *RED* é a reflectância medida na faixa espectral do vermelho na região do visível.

Com a utilização dos IV aplicados as práticas de SR, a partir das imagens obtidas poderá ser mensurado indiretamente diversas variáveis relacionadas a cobertura vegetal, pois os dados da refletância estão diretamente associados as características das plantas. Na agricultura por exemplo, a incidência de pragas e doenças, de deficiências nutricionais e de estresse hídrico são alguns dos problemas frequentemente encontrados e que são fontes que causam grande intermitência, ou seja, causam variabilidades e manchas na plantação. Portanto, uma visão heterogênea irá otimizar a identificação de inconsistências, pois as informações coletadas são compostas de dados de grande precisão.

4.5 Pré Processamento Digital de Imagens

4.5.1 Calibração Radiométrica

As imagens digitais possuem uma grande vantagem por ser possível realizar o processamento almejando o realce ou a extração de informações específicas (NOVO, 2010). Mesmo com esse benefício, as imagens adquiridas possuem erros inseridos no processo de captura, que frequentemente apresentam degradações radiométricas devido a desajustes na calibração dos detectores e erros nas transmissões dos dados (FIGUEIREDO, 2005).

As principais correções radiométricas são o *stripping*, padrão sucessivo de linhas horizontais que aparecem na imagem e o *dropedlines* ou linhas com ausência de informação, padrão horizontal anômalo na imagem que ocorre pela perda de informações. Essas correções visam corrigir as degradações da imagem e é uma das mais importantes fases do processamento digital, pois, caso essas imperfeições não sejam removidas, podem comprometer os resultados e produtos derivados (BRYS, 2008).

4.5.2 Registro de Imagem

Em diversas circunstâncias, no qual é fundamental uma análise comparativa de imagens multitemporais, ou uma combinação entre imagens que foram tomadas de diferentes sensores ou posição, ou ainda a sobreposição das mesmas, se faz necessário a aplicação do registro de imagens, assegurando que os *pixels* a serem trabalhados e as áreas do terreno, estejam em concomitância, ou seja, registradas entre si (CRÓSTA, 1992).

O registro de imagens compreende geometricamente a uma transformação, que relaciona as coordenadas da imagem com as coordenadas de um sistema de referência (INPE,

2004), abstraindo distorções existentes no processo de formação da imagem, seja pelo sensor ou pela ambiguidade dos dados de posicionamento da plataforma de captura.

Conforme Crósta (1992), há duas formas de execução do registro, sendo o modo automático, método baseado na análise da similaridade ou dissimilaridade entre duas imagens, no qual é calculado por meio do deslocamento relativo existente entre elas. Esse processo possui grande precisão, entretanto, é delongado, e requisita de uma alta capacidade de computação e de um *software* sofisticado.

Por sua vez, o registro manual é um procedimento corriqueiro e com menor precisão, fazendo-se necessário que o operador apenas identifique pontos análogos entre as duas imagens (pontos de controle) para que a técnica seja efetivada.

4.5.3 Classificação de Imagens

O processo de atribuir significado a um *pixel* baseado em suas propriedades numéricas é chamado de Classificação. Esse procedimento distribui a cada *pixel* rótulos em função de suas características espectrais ou espaciais (NOVO, 2010).

Ao se classificar uma imagem, define-se que alvos diferentes apresentam propriedades espectrais diferentes e que cada ponto pertence a uma única classe. Além disso, os pontos representativos de uma certa classe devem possuir padrões próximos de tonalidade, de cor e de textura (FIGUEIREDO, 2005).

A classificação pode ser não supervisionada quando não se tem o conhecimento prévio sobre as classes de interesse, e são definidas automaticamente pelo próprio algoritmo do *software*. Já a classificação supervisionada permite que o analista tenha o conhecimento antecipado e cada classe espectral pode ser atribuída por meio do fornecimento de amostras (NOVO, 2010).

Após a classificação, torna-se necessário avaliar e determinar o quão preciso foi o seu resultado em relação a realidade. Essa validação pode ser realizada por meio da comparação do mapa derivado da classificação com um mapa de referência obtido de uma matriz de erro, também chamada de matriz de confusão. Outras formas de validação se dão por meio do cálculo do coeficiente kappa e pelo índice de exatidão global.

A matriz de confusão representa a qualidade obtida de uma classificação digital de imagem a partir da correlação de informações dos dados de referência com os dados classificados. O coeficiente kappa pode ser quantificado após a construção da matriz de confusão, retratando o grau de concordância entre as informações e gerando um aspecto de

confiabilidade e precisão dos dados classificados. Seu cálculo considera todo o número de categorias ou classes da análise e o resultado obtido varia no intervalo de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo a 1 melhor a concordância dos dados classificados, e valores próximos e abaixo de 0, indicam nenhuma concordância (PRINA; TRENTIN, 2015). Por fim, o índice de exatidão global expressa a classificação digital pela razão entre os pontos corretamente classificados e o número total de pontos de referência.

4.6 Uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas na Agricultura

O desenvolvimento das Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) surgiram como uma importante opção na agricultura de precisão. Suas aplicações na área agrícola e em missões de reconhecimento vem sendo favorecida e facilitada pelo atual estágio de desenvolvimento tecnológico, principalmente pela redução do custo, do tamanho dos equipamentos e pela necessidade de otimização da produção.

As primeiras aplicações no Brasil ocorreram na década de 80, mas foi na década seguinte que houve um maior desenvolvimento dessa tecnologia. A utilização dessas plataformas aéreas ampliou-se progressivamente desde então, e por ser uma área que se tornou bastante explorada várias pesquisas e trabalhos vieram a surgir criando uma grande variedade de aplicações. Medeiros (2007), ainda aponta alguns estudos, bem como atividades empregadas em práticas civis, inspeções de linhas de transmissão de energia, monitoramento e acompanhamento de atividades ambientais e agrícolas.

Na agricultura tem sido bastante vantajoso, tornando cada vez mais prático os serviços agrícolas devido ao mapeamento detalhado da área de produção e uma maior eficiência no manejo da agricultura. Também é válido ressaltar outros benefícios que favorecem um bom desempenho, tal como o auxílio no reconhecimento de pragas e doenças, balanço nutricional, deriva de agrotóxicos, estresse hídrico e falhas de plantio.

4.6.1 Regras para Operações Civis de ARPs

Os ARPs podem ser definidos como pequenas aeronaves aptas a realizar inúmeras funções desde que não tenha contato físico direto entre a plataforma de obtenção e o alvo. As aeronaves não necessitam de qualquer piloto embarcado, sendo controladas através de meios eletrônicos e computacionais a determinadas distâncias (MEDEIROS, 2007). Popularmente os ARPs são conhecidos como “drones” (zangão, em inglês), mas de acordo com a Agência

Nacional de Aviação Civil – (ANAC), (2017), o termo a ser utilizado para melhor distinguir suas categorias e finalidades são “aeromodelo” para toda aeronave não tripulada com objetivo de recreação, e “aeronave remotamente pilotada (ARP)” ou “veículo aéreo não tripulado (VANT)” para aeronaves não tripuladas com propósitos comercial, corporativa e experimental.

Ainda, segundo a ANAC (2017), para se manusear essas aeronaves, deve ser respeitado o Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial perante a lei de número 94/2017, publicada no dia 03/05/2017, que prega em sua ementa requisitos gerais para Aeronaves não Tripuladas de uso Civil, e ainda enfatiza que o descumprimento de qualquer que seja a regra estabelecida pela lei acarretará no proibimento de sua utilização. Segue alguns dos requisitos:

- Aero navegabilidade civil: uma aeronave não tripulada deve estar com condições legíveis de voo;
- Aplicabilidade: aeronaves não tripuladas devem possuir certidão de cadastro emitidos pela ANAC e operar apenas em território brasileiro;
- Segurança: deve ser respeitado uma determinada distância entre terceiros, onde pessoas que não estejam envolvidas no voo possam estar livres de riscos, determinando ainda uma altura mínima de 30 metros de voo e uma idade mínima de dezoito anos para operar tais plataformas;
- Responsabilidade e autoridade do piloto remoto em comando: o piloto deve arcar com as responsabilidades pelo voo;
- Categorias: A classificação se deve de acordo ao peso:
 - Classe 1: ARP acima de 150 kg;
 - Classe 2: ARP entre 25 e 150 kg;
 - Classe 3: ARP abaixo de 25 kg.
- Requisitos para piloto remoto e observador: todos os pilotos que comandarem uma aeronave de classe 1 ou 2, devem ser maiores de 18 anos e devem possuir um certificado médico aeronáutico, e todos os pilotos que atuarem acima de 400 pés do nível do solo ou que atuarem em operações de Classe 1 ou 2, devem possuir licença e habilitação emitida pela ANAC. Vale ressaltar que um ARP que pesar menos que 250 gramas não precisam ser cadastrados perante a ANAC;
- Uso de substâncias psicoativas: o uso de quais queres substâncias que cause alterações psicoativas são altamente proibidas.

A fiscalização é feita por meio dos órgãos públicos e também por meio de denúncias, e em casos de infrações são tratadas por esses órgãos como contravenção penal ou crime, desde que apuradas administrativamente de acordo com as penalidades pressupostas no Código Brasileiro de Aeronáutica.

4.6.2 Mapeamento Utilizando Imagens Aéreas

A captura de imagens a partir de um referencial acima do solo traz inúmeras vantagens para a visualização e mapeamento de áreas. A ampla visão proporcionada pela tomada aérea pode ser essencial para projetos que exijam uma perspectiva de cima e com riqueza de detalhes.

No mapeamento aéreo, a fotogrametria é a ciência que explica determinada técnica, o qual segundo Gonçalves (2006), é baseada no registro, medição e interpretação de fotografias, onde se obtém informação geométrica e semântica confiável sobre os objetos físicos fotografados.

Logo, Coelho e Brito (2007) ainda afirmam que a fotogrametria consiste na ciência e tecnologia capaz de reconstruir o espaço tridimensional, denominado de espaço-objeto, a partir de imagens bidimensionais advindas da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas, também chamado de espaço-imagem ou sistema fotográfico, sem a necessidade do contato físico entre o objeto ou alvo de interesse e o sensor.

De acordo com os diferentes modos em que o sensor é posicionado, a fotogrametria pode ser classificada como sendo fotogrametria terrestre, fotogrametria aérea e fotogrametria orbital. Dessa forma, o sensor pode estar disposto sobre qualquer plataforma conforme o propósito em que o mesmo for destinado.

Para Fontes (2005), a aerofotogrametria está relacionada com as operações realizadas a partir da tomada de fotografias da superfície da terra, obtidas por uma câmara de precisão instalada em uma aeronave preparada exclusivamente, mantendo sempre o eixo óptico do sistema de lentes o mais vertical possível.

A princípio, as imagens aéreas eram tomadas por câmaras embarcadas em balões. Posteriormente, para auxiliar no processo da obtenção dessas imagens se fez necessário o uso de aviões e helicópteros, que seguidamente seriam auxiliados pelo uso de satélites e ARPs, otimizando o tempo e diminuindo os custos.

Os aerolevantamentos realizados por ARPs possuem maior flexibilidade em relação as aeronaves tradicionais. As imagens adquiridas geralmente possuem uma resolução espacial de

centímetros e não sofrem com a cobertura de nuvens, logo, ainda se sobressai devido ao baixo custo.

Na execução do projeto aerofotogramétrico é fundamental que seja realizado etapas que irão auxiliar na tomada de decisão e assim potencializar o trabalho, tais como, o desenvolvimento do plano de voo (DALMOLIN, 2005). Haja vista, o planejamento do voo é considerado uma etapa crucial, pois é a etapa em que será selecionado e calculado os elementos para a elaboração do mapa de voo que orientará os profissionais durante a cobertura aerofotogramétrica.

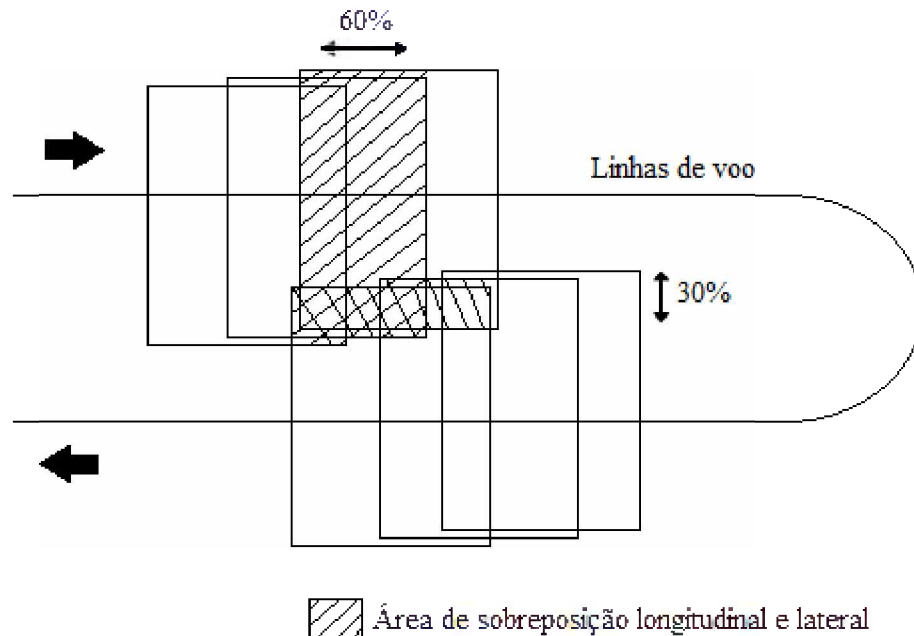
4.6.2.1 Planejamento de Voo

No mapeamento aéreo, planejar é uma etapa necessária para determinar os parâmetros a serem utilizados, visando aspectos econômicos e apoiando a equipe em campo com agilidade e clareza. É necessário planejar pois, os critérios do projeto, bem como a escala da foto, a escala do mapa, a precisão desejada e o tipo de instrumentos a serem utilizados são especificados previamente.

O plano de voo consiste na escolha dos recursos adequados disponíveis para desempenhar o aerolevanteamento, preparando o mapa de voo e todas as especificações que irão orientar a equipe durante a cobertura aérea. Segundo Gonçalves (2006), os elementos básicos para a realização do voo são a altura de voo acima de uma determinada superfície de referência, geralmente a do nível médio do mar, a distância entre duas fotos tomadas sucessivamente e o espaçamento no terreno entre as linhas de voo. Outra condição importante é a sobreposição das imagens, sendo fundamental a obtenção de no mínimo duas fotografias e que sejam tomadas de ângulos diferentes.

De acordo com Coelho e Brito (2007), as linhas de voo são planejadas com uma área de superposição longitudinal de aproximadamente 60% entre as fotografias, enquanto que, a área de superposição lateral entre duas faixas deve possuir no mínimo o recobrimento de 30% (Figura 5), com o propósito de viabilizar a visão estereoscópica e possibilitar maiores acurácias e precisões na restituição tridimensional do espaço-objeto, evitando assim falhas (espaços vazios) entre fotografias sucessivas ou adjacentes.

Figura 5 - Bloco formado pelas linhas de voo e a sobreposição longitudinal e lateral.



Fonte: Adaptado de Tommaselli (2009).

Outro fator importante na determinação do plano de voo é a distância focal e a abertura da câmara, que obedecem a três padrões (normal, grande angular e supergrande angular) dependendo do terreno a ser levantado (COELHO; BRITO, 2007),

Do mesmo modo, outra condição fundamental é a escala, que consiste na razão entre uma distância medida em um mapa e a distância correspondente no terreno. Nesse sentido, a escala deve seguir o aspecto técnico para determinar a resolução da fotografia, visto que, quanto maior a escala melhor será a resolução, e o aspecto econômico indicando que quanto menor for a escala da fotografia maior será o terreno a ser recoberto e menos fotografias serão necessárias para cobrir a mesma área.

Dispondo dos elementos anteriores, para finalizar é necessário que se conheça as dimensões da área a ser recoberta, e assim determinar o restante dos parâmetros do plano de voo, dentre eles o cálculo da quantidade de linhas de voo, o número total de fotos e o tempo total que será gasto para realizar o aerolevanteamento.

4.6.2.2 Fototriangulação

A fototriangulação pode ser definida como um método fotogramétrico em que se determina as coordenadas de pontos no espaço-objeto através da relação geométrica de fotos devidamente tomadas adjuntas, de um esparso controle de campo e de um conjunto de valores

aproximados dos parâmetros (FERREIRA, 1990). Logo, Fontes (2005) define como sendo a densificação de pontos de controle utilizados na relação entre imagem das fotografias aéreas e o sistema de coordenadas do mapeamento, a partir de um pequeno número de pontos no sistema foto-terreno com suas coordenadas conhecidas.

O principal objetivo é gerar coordenadas com precisão significativa de pontos do espaço-objeto. Isso é possível a partir de coordenadas medidas em fotografias adequadamente tomadas ou em modelos estereoscópicos formados, e também baseado nas informações do sensor (LUGNANI, 1987 apud ARANA, 1994).

Esse processo representa um grande avanço nas técnicas fotogramétricas, pois permite a racionalização dos custos e economia de tempo devido capacidade de obter coordenadas de vários pontos a partir da interpolação de apenas alguns pontos de controle, limitando as operações de levantamento geodésico e topográfico. Portanto, para que se tenha resultados satisfatórios é fundamental se atentar a utilização dos dados iniciais, posto que, para o mapeamento a ser produzido, esses dados devem ter uma boa precisão e qualidade (COELHO; BRITO, 2007).

Em relação ao tipo de processador, pode ser aplicado soluções analógicas, analíticas ou semi analíticas. O método analógico consiste em processar as coordenadas dos pontos do espaço objeto por meio de instrumentos fototrianguladores ópticos, mecânicos ou a junção deles. Já o Analítico permite a computação das coordenadas dos pontos do espaço objeto numericamente, a partir de coordenadas de pontos do espaço imagem. Finalmente, o método semi analítico combina os dois processos, o analógico para construir modelos estereoscópicos e o numérico para a concatenação dos modelos (LUGNANI, 1987 apud ARANA, 1994).

O método que mais se adequa no processo de fototriangulação é o semi analítico, por apresentar melhores resultados que o analógico e melhor custo computacional que o método analítico. Em virtude desse processo, é possível obter um produto cartográfico georreferenciado conhecido como mosaico semicontrolado, obtido a partir da justaposição de pontos homólogos entre duas ou mais imagens sobrepostas entre si e com escala aproximada, formando uma vista composta por toda a área coberta por essas fotografias.

4.7 Análises Estatísticas: Correlação e Regressão

O interesse em estudar o comportamento conjunto de uma ou mais variáveis existe em situações em que há a necessidade de explicar fenômenos que podem estar associados a diversos fatores, que de alguma forma contribuem para a ocorrência dos mesmos.

Em diversos problemas dentre as mais diversas áreas, existe um grande interesse em verificar se duas ou mais variáveis estão relacionadas, o qual é fundamental estabelecer algum modelo matemático que verifique seu comportamento e que ajude a entender como determinados aspectos influenciam outros.

Haja vista, duas técnicas estreitamente associadas, visam estimar uma relação existente entre determinados elementos, verificando se elas têm algum relacionamento entre si, em que valores de uma variável implica em valores de outra variável. A correlação, tendo como exemplo, e segundo Triola (1999), desempenha a função de resumir o grau de relacionamento entre duas variáveis determinando como uma se comporta em um cenário onde a outra está variando, visando identificar se existe alguma relação entre a variabilidade de ambas. Já a regressão, como expressa Zeviani, Ribeiro Júnior e Bonat (2013), tem como resultado uma equação matemática que descreve o relacionamento entre as variáveis, descrevendo o comportamento e buscando encontrar padrões de homogeneidade dentre a heterogeneidade observada em um conjunto de observações.

Os modelos de regressão são amplamente usados em diversas aplicações para descrever a relação entre uma variável resposta Y e uma variável explicativa X . O modelo estatístico é linear se a quantidade de interesse, geralmente a média de Y , é função linear dos parâmetros, caso contrário é não linear.

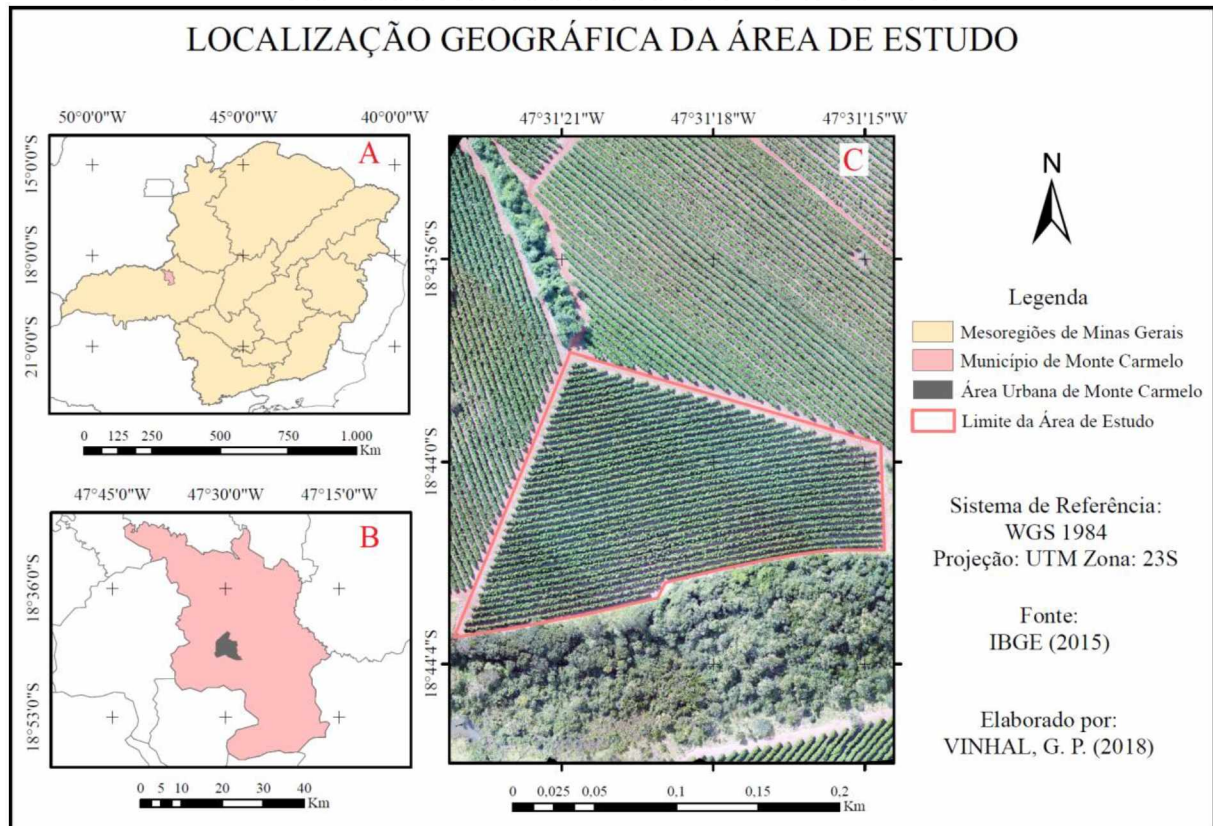
Modelos não lineares usualmente são sustentados por alguma informação sobre a relação entre Y e X , que matematicamente nada mais é que uma função não linear nos parâmetros. Esses modelos descrevem alguma quantidade relacionada à distribuição de probabilidades de uma variável aleatória Y como uma função não linear nos parâmetros. Na grande maioria das vezes, a quantidade de interesse é a média de Y (ZEVIANI; RIBEIRO JÚNIOR; BONAT, 2013).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de Estudo

A região estudada (Figura 6) está localizada nas imediações da área urbana do município de Monte Carmelo-MG, situado na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. A área abrange cerca de 3 hectares e consiste em uma parcela de cultura cafeeira.

Figura 6 – A: Delimitação das mesorregiões do estado de Minas Gerais, evidenciando o município onde se encontra a área de estudo. B: Limites do município de Monte Carmelo, evidenciando a localização da área urbana. C: Polígono no entorno da área de estudo, localizada a oeste da área urbana de Monte Carmelo.



Fonte: O autor.

5.2 Material

O material utilizado para a execução desse trabalho, foi:

- Cartolinas para a pré sinalização dos alvos coloridos;
- ClorofiLOG *Falker*, medidor eletrônico de teor de clorofila;
- *GPS* de Navegação Portátil *Garmin GPSMAP 73*;
- Drone *Phantom 4 Advanced*, com peso de 1368 gramas, autonomia de voo de aproximadamente 30 minutos e equipado com sensor RGB de 20 *megapixels* e *GPS* integrado;
- Sensor *Mapir* acoplada ao drone, com peso de 60 gramas, *GPS* integrado e operando nas regiões RED+Green+IVP do espectro eletromagnético.

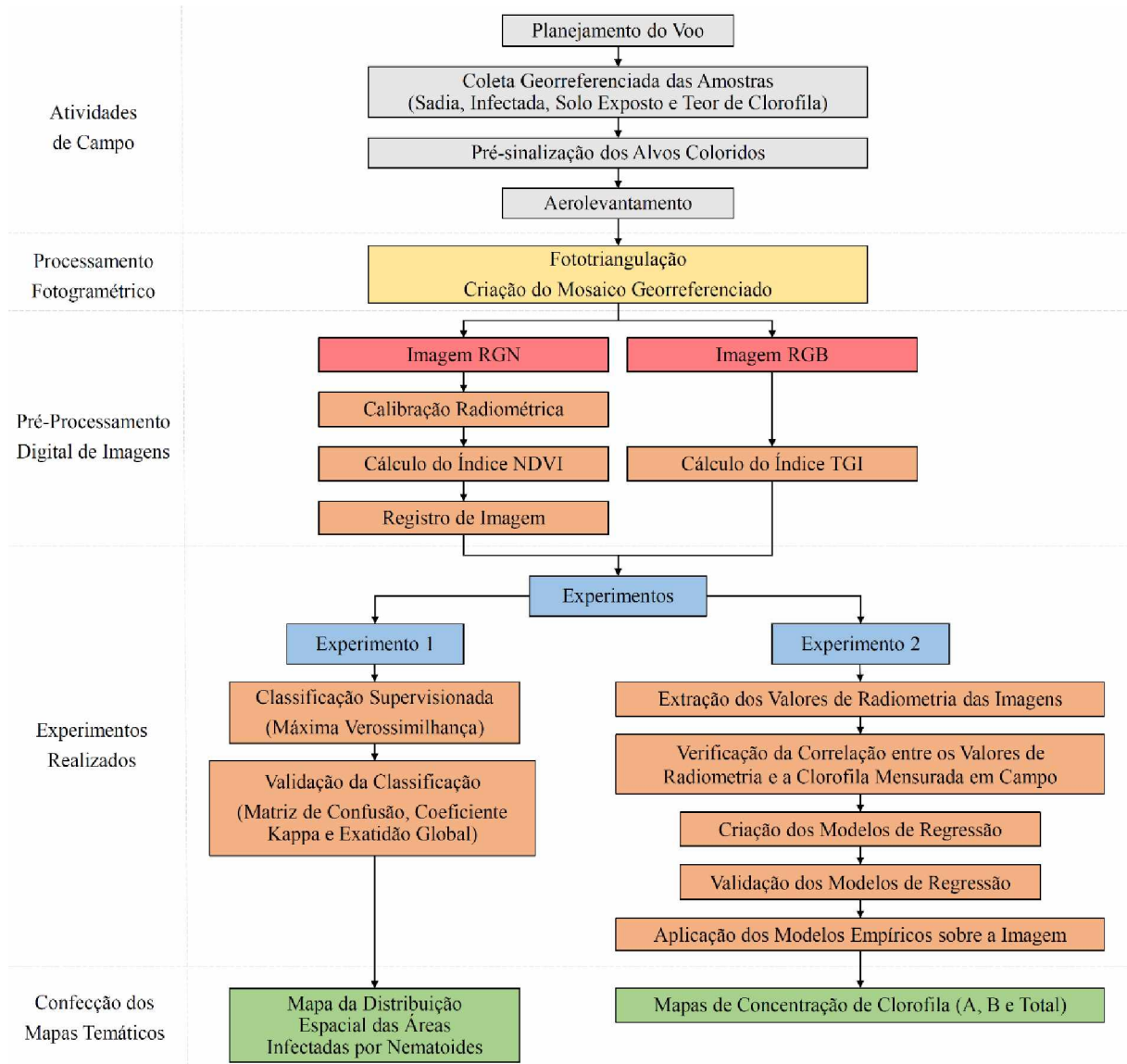
➤ *Hardware e softwares:*

- *Notebook Dell Inspiron 15 7000 Ultrafino, Intel Core i7, 8GB RAM e sistema operacional de 64 bits;*
- *Software DroneDeploy para elaboração do plano de voo;*
- *Software Pix4Dmapper para o processamento fotogramétrico;*
- *Software MAPIR Câmera Control para a calibração radiométrica;*
- *Software ENVI Classic 5.0 para aplicação das técnicas de pré-processamento, técnicas de realce, registro de imagem, classificação e extração dos valores radiométricos;*
- *Software Minitab 16 e Excel 16 para análises e tratamento das amostras de clorofila, cálculo da correlação entre clorofila e os valores radiométricos, e para a criação dos modelos de regressão visando a estimativa de clorofila;*
- *Software ArcGIS 10.5 para a confecção dos mapas temáticos.*

5.3 Métodos

A sequência das etapas realizadas no trabalho está ilustrada na figura 7, onde notam-se as seguintes divisões: (i) atividades de campo: planejamento do voo, coleta das amostras (sadias, infectadas e solo exposto) e dos valores de clorofila, e a pré-sinalização de alvos coloridos; (ii) processos fotogramétricos: procedimentos para a geração de dois mosaicos georreferenciados, um utilizando o sensor RGB e o outro o sensor RGN; (iii) pré-processamento digital das imagens: calibração radiométrica, correção das distorções geométricas e técnicas de realce; (iv) experimentos realizados: 1 – classificação supervisionada das imagens, geração de mapas de infecção e análise da acurácia; 2 – estimativa de clorofila, análise da acurácia dos modelos empíricos e geração de mapas de concentração de clorofila.

Figura 7 - Fluxograma metodológico.



Fonte: O autor.

5.3.1 Planejamento do Voo

No planejamento de voo foram determinados todos os parâmetros para a realização do aerolevantamento, com o objetivo de orientar a equipe em campo. O voo foi realizado no intervalo entre onze horas da manhã e treze horas da tarde, devido à grande incidência da radiação solar e também por não sofrer com o efeito de sombras nos talhões do cafeeiro nesse período.

Utilizando o *software DroneDeploy* calculou-se os elementos necessários e os definiu da seguinte maneira: 10 faixas de voo, tempo total do voo de aproximadamente 12 minutos e altitude de 70 metros. Também foi estabelecido a sobreposição longitudinal e lateral de 75% e

65%, respectivamente, evitando assim espaços vazios entre as fotografias e estabelecendo pontos comuns em duas fotos consecutivas para uso na interpretação. Em relação ao número total de imagens tomadas, a câmera RGN realizou a tomada de aproximadamente 250 fotos, enquanto que a câmera RGB um total de 50 fotos, diferença devido ao tempo de tomada entre uma foto e outra ser menor na câmera RGN.

4.3.2 Aquisição das Amostras *in situ*

Durante as atividades de campo foi realizada a verificação das zonas de infestação e assim feito a coleta das amostras georreferenciadas de vegetação sadia, infectada e solo exposto, para o auxílio na classificação supervisionada visando um maior grau de precisão. A coleta das amostras de clorofila foi efetuada nos mesmos pontos de vegetação sadia e infectada, devido a esses pontos já estarem georreferenciados. A coleta foi feita com o auxílio de um clorofilômetro, técnica não destrutiva e precisa, com o propósito de uma estimativa para toda a área em estudo.

5.3.3 Processos Fotogramétricos

Após o levantamento de campo, no *software Pix4D* foram realizados os processos de fototriangulação e mosaicagem das imagens, objetivando a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos no espaço-objeto e resultando em um mosaico georreferenciado.

A Fototriangulação, realizada computacionalmente, efetuou o cálculo e o ajustamento das coordenadas dos centros de perspectiva e dos ângulos do sensor no momento da aquisição de cada uma das imagens fotográficas que compõem um bloco fotogramétrico, permitindo a obtenção de coordenadas tridimensionais no espaço objeto (terreno) a partir do espaço imagem. Logo foi gerado o mosaico a partir da busca de pontos homólogos entre as imagens sobrepostas entre si (condição básica para o processo de mosaicagem).

5.3.4 Processamento Digital das Imagens

O processamento digital almeja o realce ou a extração de informações específicas das imagens, que quando obtidas podem possuir erros inseridos no processo de captura e frequentemente apresentar degradações radiométricas e geométricas. Nessas circunstâncias, foi realizado o pré-processamento, fase preliminar do tratamento digital de imagens e com a finalidade de corrigir essas degradações.

5.3.4.1 Calibração Radiométrica

A calibração radiométrica foi executada utilizando o *software MAPIR Câmera Control*, com o apoio dos alvos coloridos (branco, preto, vermelho, verde e azul) que foram implantados em pontos estratégicos e que possibilitasse serem identificados nas imagens. Essa etapa foi totalmente automatizada e realizada apenas para a imagem RGN, o qual a única intervenção do operador foi ao selecionar o arquivo e a imagem alvo, o modelo da câmera e o filtro das regiões do espectro eletromagnético onde a mesma opera, que nesse caso já se tinha o conhecimento do filtro RGN.

Como descrito no manual de utilização desse *software*, inicialmente é preferível que se fosse feito a mosaicagem das imagens não calibradas, e posteriormente calibrar o mosaico, devido a possíveis falhas que podem ocorrer no processo de calibração.

O método consistiu em detectar, em cada banda envolvida, as regiões mais claras (com alta intensidade e baixa saturação) e as mais escuras (com baixa intensidade e alta saturação). Os valores de reflectância conhecidos, ou seja, os valores dos alvos implantados, foram necessários para a geração dos valores de calibração, que em seguida foram comparados com os valores do mosaico, transformando os *pixels* e calibrando as imagens do levantamento. Para melhor entendimento, o alvo preto dispõe do valor máximo de reflectância, enquanto que o branco do valor mínimo, e quando comparados com outras cores, estas seriam o valor máximo perante o alvo branco, e quando analisada perante o alvo preto, seu valor seria o mínimo na imagem.

5.3.4.2 Aplicação do Cálculo dos Índices de Vegetação

A aplicação da álgebra dos índices de vegetação foi efetuada da seguinte maneira: índice TGI para a imagem RGB e índice NDVI para a imagem RGN, buscando otimizar a interpretação dos dados das imagens, realçando suas características relacionadas ao comportamento espectral das plantas baseado nos aspectos biofísicos. O TGI foi operado na região do espectro do visível, enquanto que o NDVI na região do infravermelho próximo. Para tanto, foi realizada a caracterização espectral, verificando a resposta da utilização dos índices de vegetação e das bandas, determinando se são pertinentes.

Seguidamente se fez necessário a junção das bandas de cada imagem para a criação de um novo arquivo contendo todas juntas. Com as bandas já disponíveis para manipulação iniciou-se o processo de junção: (i) a imagem resultante do cálculo do TGI foi associada com

a imagem original contendo as bandas RGB; (ii) e o resultado do cálculo do NDVI com as bandas correspondentes ao Red, Green e IVP, criando então variáveis armazenando as bandas da união das imagens, e que posteriormente, essas combinações foram utilizadas para classificação das imagens.

5.3.4.3 Registro de Imagem

As imagens produzidas por sensores remotos, sejam elas fotografias aéreas ou imagens de satélite, apresentam uma série de distorções espaciais, não possuindo, portanto, precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos, superfícies ou fenômenos nelas representados. Por esse motivo, fez-se necessário o registro de imagem, e logo ainda, devido a fundamentação desse trabalho se basear na captura de imagens aéreas por meio de dois sensores embarcados em uma mesma plataforma, tal técnica foi fundamental para que as imagens se tornassem georreferenciadas entre si e ser possível a utilização das mesmas amostras de fornecimento prévio para o treinamento do algoritmo de classificação.

Essa etapa se baseou no registro de “uma imagem para outra imagem”, utilizada quando existe uma imagem georreferenciada da mesma área. A imagem base foi definida pela RGB, enquanto que a imagem distorcida a RGN, definindo ainda como tipo de reamostragem a transformação polinomial, devido a determinação de 5 pontos de controle, e assim definido também como 4 o grau do polinômio.

Após feito o registro de imagem, foi importante notar o erro advindo de tal procedimento. Denominado erro médio quadrático, é uma medida do desvio dos valores calculados em relação aos valores originais. O erro RMSE foi estimado tomando-se uma amostra dos valores calculados e comparando-a com seus valores reais. As diferenças entre elas foram elevadas ao quadrado e somadas. A soma foi então dividida pelo número de medidas, para que se obtesse a média cuja raiz quadrada fornecesse uma medida característica de erro na mesma unidade das medidas originais. O erro RMS é diretamente comparável ao conceito de desvio padrão, e pode ser observado pela equação 3.

$$RMSError = \sqrt{(x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2} \quad (3)$$

Onde:

- x_r é a coordenada de linha calculada na imagem não-registrada;

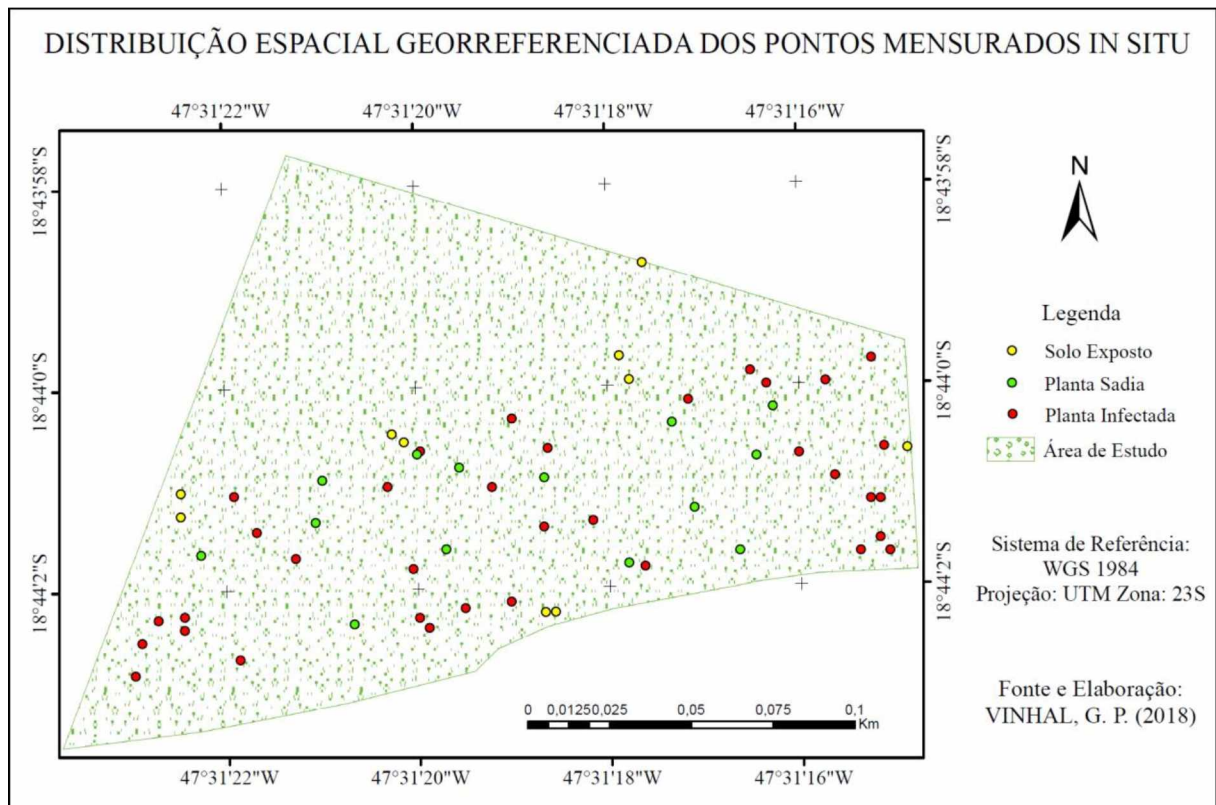
- y_r é a coordenada de coluna calculada na imagem não-registrada;
- x_i é a coordenada original de linha do GCP (*Ground Control Points*) na imagem;
- y_i é a coordenada original de coluna do GCP na imagem.

Esse erro não interferiu na sequência das etapas pois foi considerado mínimo, pois o deslocamento de uma imagem para outra foi de somente 1,21 centímetros.

5.3.5 Experimento 1: Classificação Supervisionada pelo método da Máxima Verossimilhança

Esse experimento consistiu na técnica de classificação de imagens, processo em que foi atribuído significado aos *pixels* em função de suas propriedades numéricas por meio da associação de pontos de uma imagem a uma classe (feições e alvos terrestres) ou grupo de classes. Inicialmente foram coletadas *in situ* três tipos de amostras: solo exposto, café sadio e café infectado por nematoides. Com o auxílio de um *GPS* de navegação portátil foram georreferenciados pontos para o apoio da classificação e para a verificação da acurácia. Pontos que podem ser observados na figura 8.

Figura 8 - Distribuição espacial dos pontos mensurados *in situ*.



Fonte: O autor.

Criou-se então, para serem utilizados como amostras de fornecimento prévio para as regiões de interesse, três arquivos no formato *shapefile* com parte dos pontos com coordenadas mensuradas em campo, para a definição de cada classe, a fim de se realizar o treinamento do algoritmo, e assim tornar possível a classificação das imagens. Os pontos restantes foram utilizados para criar novas amostras a serem aplicadas na validação da classificação, por meio da matriz de confusão, coeficiente kappa e do índice de exatidão global. No total foram utilizados 23 pontos amostrais no treinamento do algoritmo para a classificação, e 44 pontos para a validação da classificação.

O método de classificação realizado foi o de máxima verossimilhança, que considerou a ponderação dos valores dos *pixels* das classes utilizando parâmetros estatísticos e assumindo que todas as bandas possuem distribuição normal, calculando a probabilidade e o destinando a uma classe particular a partir da melhor perspectiva. Para que a classificação tivesse uma resposta precisa, foi necessário um número considerável de *pixels* para cada classe de treinamento, possibilitando uma base segura para o tratamento estatístico do algoritmo.

5.3.5.1 Validação da Acurácia da Classificação

Para expressar os erros e concordâncias no processo de classificação e validar a confiabilidade das áreas do mapa infectadas por nematoides, as informações obtidas foram avaliadas por meio da matriz de confusão e de medidas derivadas dessa mesma matriz, como o cálculo do coeficiente kappa e do índice de exatidão global.

A matriz de confusão comparou os dados da verdade de campo com os da classificação, e os agrupou em uma tabela. Seguidamente, o índice Kappa, determinado pela expressão 4, retornou um valor indicando a qualidade da classificação, e foi analisado de acordo com a tabela 1 proposta por Landis e Koch (1977), que associa um grau de qualidade para parametrizar tal índice e define que os intervalos das classes variam de valores inferiores a 0 indicando nenhuma concordância, e valores próximos ou igual a 1 quando dispuser de maior concordância. A exatidão global por sua vez, demonstrada na equação 5 de acordo com Figueiredo e Vieira (2007), foi calculada dividindo a soma da diagonal principal da matriz de erros pelo número total de amostras coletadas.

$$\hat{K} = \frac{\hat{P}_o - \hat{P}_e}{1 - \hat{P}_e} \quad (4)$$

Onde:

- \widehat{K} é o valor do Coeficiente Kappa;
- \widehat{P}_o é representado por $\sum_{i=1}^r \frac{n_{ii}}{n}$
- \widehat{P}_e é representado por $\sum_{i=1}^r \frac{n_{i_0} * n_{0_i}}{n^2}$

Em que:

- r são as categorias de avaliação;
- n_{ii} , n_{0_i} , n_{i_0} representam a quantidade de elementos amostrais avaliados em determinada categoria;
- n é o total de elementos amostrais avaliados.

$$G = \frac{\sum_{i=1}^c x_{ii}}{n} \quad (5)$$

Onde:

- G é o resultado da acurácia geral;
- x_{ii} é soma da diagonal principal da matriz de erros;
- n é número total de amostras coletadas.

Tabela 1 - Valores do coeficiente Kappa para análise da classificação.

Coeficiente Kappa	Qualidade da Classificação
<0,00	Insignificante
0,00 – 0,20	Fraca
0,20 – 0,40	Razoável
0,40 – 0,60	Moderada
0,60 – 0,80	Forte
0,80 – 1,00	Quase Perfeita

A partir do resultado da classificação das imagens, foi produzido mapas do cafeeiro contendo a distribuição espacial das áreas infectadas por nematoides, sadias e do solo exposto, possibilitando identificar os locais específicos com diferentes potenciais de produtividade, e que poderão auxiliar na determinação da metodologia mais econômica e tecnicamente viável a ser aplicada no tratamento da infestação.

5.3.6 Experimento 2: Estimativa do Teor de Clorofila

Com as etapas do processamento digital de imagens concluída, realizou-se a análise da correlação entre os valores de radiometria das imagens e a clorofila mensurada em campo, com o propósito de uma aferição significativa do teor de clorofila para toda a área de estudo por meio da criação de modelos de regressão que melhor expressasse essa analogia.

No total, aproximadamente 50 pontos amostrais de clorofila A e clorofila B foram medidos em campo por meio de um clorofilômetro, e georreferenciados por um receptor de navegação portátil, estratégia realizada com o intuito de se tornar possível a extração dos valores de radiometria das imagens nos locais correspondentes.

Para o cálculo e validação dos modelos radiométricos foi considerado a concentração de clorofila e a resposta espectral dos pontos amostrados em campo. A escolha dos pontos foi de forma aleatória, sendo 40 pontos utilizados para o cálculo e 10 pontos para a validação do desempenho dos modelos. Dentre as bandas que foram avaliadas para a criação dos modelos, foram analisadas as quatro advindas da junção entre a imagem RGB (Red, Green e Blue) e o índice de vegetação TGI e as quatro advindas da junção entre a imagem RGN (Red, Green e infravermelho) e o índice de vegetação NDVI, porém, esse procedimento seguiu uma abordagem em que, como critério para compor o modelo, foi considerado uma única banda de cada imagem que apresentasse a maior e significativa correlação com a concentração de clorofila. Para que a correlação fosse significativa, considerou um P-valor menor que 0,05 resultantes da correlação Pearson.

Os modelos de estimativa foram gerados a partir da regressão exponencial entre a concentração de clorofila e a radiância das bandas. Para tanto, se fez necessário verificar a acurácia dos modelos criados, aplicando-se os modelos sobre a radiometria de 10 pontos de *check* (verificação). A partir dos dados de discordância entre a concentração de clorofila A, B e Total (soma dos valores de clorofila A e B observados) observada e estimada, foi calculada a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE, em inglês) e esse erro em porcentagem. Também foi calculado o erro padrão das medidas, indicando a variação do RMSE a partir do intervalo de confiança. O RMSE, o RMSE (%) e o erro padrão foram calculados a partir das equações 6, 7 e 8, respectivamente.

Por fim, mediante os modelos empíricos de estimativa, foram gerados mapas representativos do valor da concentração de clorofila A, B e Total.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_o - x_e)^2}{n}} \quad (6)$$

$$RMSE (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_o - x_e)^2}{n}} * \frac{100 * n}{\sum_{i=1}^n x_e} \quad (7)$$

$$EP = \frac{RMSE}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

Onde:

- $RMSE$ é a raiz do erro quadrático médio;
- $RMSE (\%)$ é a raiz do erro quadrático médio em porcentagem;
- EP é o erro padrão;
- x_o representa o valor de clorofila observado *in situ*;
- x_e representa o valor de clorofila estimado;
- n é o número de amostras.

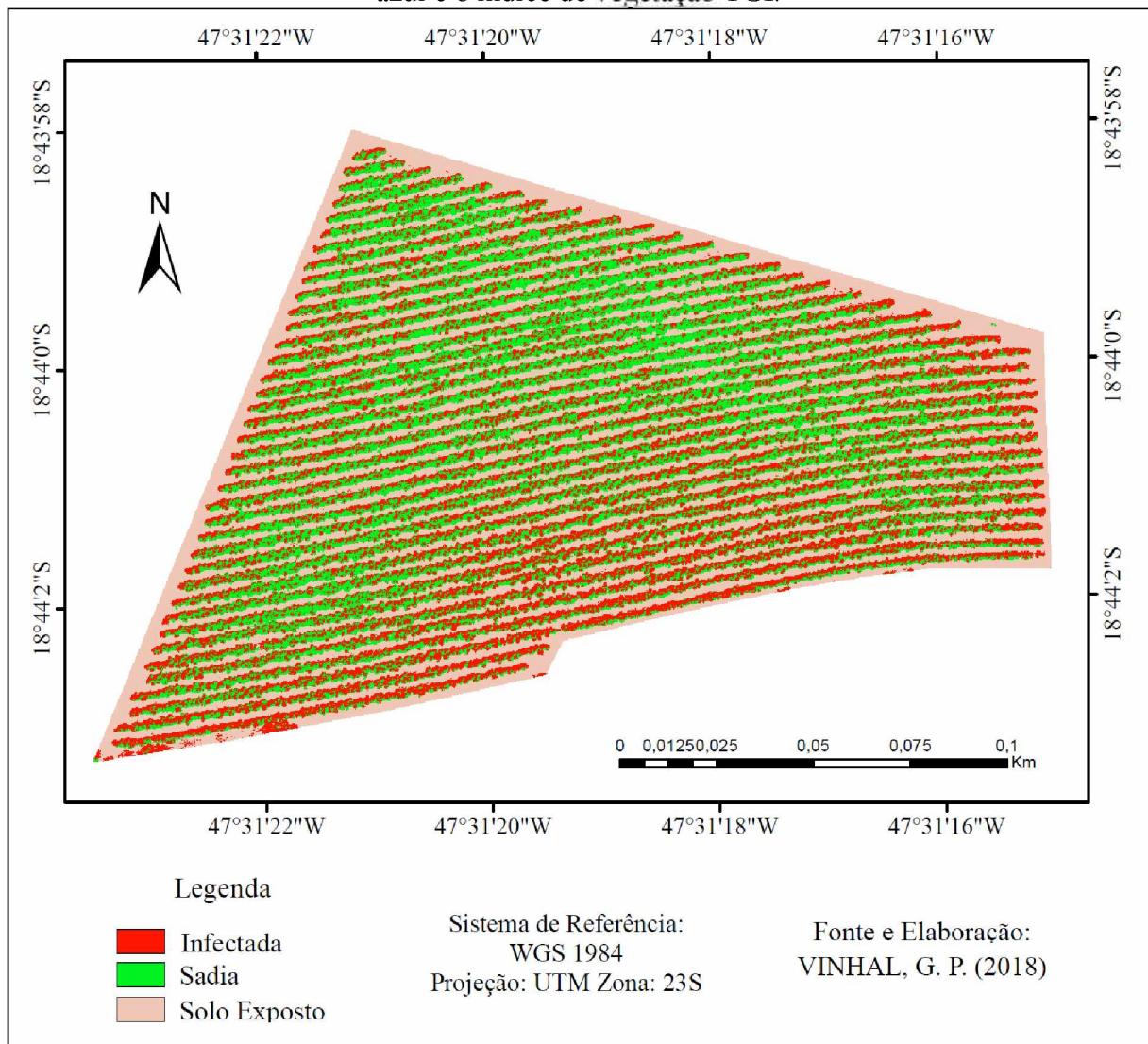
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Distribuição Espacial de Nematoides

Dentre os resultados a serem evidenciados nesse trabalho, pode-se destacar o processo de classificação não supervisionada pelo método da máxima verossimilhança, o qual obteve resultados satisfatórios ao discriminar as áreas sadias das infectadas.

O mapa temático produzido pela classificação realizada sobre a imagem RGB e o conjunto de classes rotuladas como café infectado e sadio, bem como áreas com solo exposto, é mostrado na figura 9.

Figura 9 - Distribuição espacial de café infectado e sadio na área de estudo, obtido pela classificação supervisionada da imagem RGB, correspondente as bandas: vermelho, verde, azul e o índice de vegetação TGI.



Fonte: O autor.

A partir da Figura 9, nota-se, que a dispersão das áreas infectadas se estendem principalmente no centro inferior e nas extremidades da área de estudo, bem como, também é evidente a presença da delimitação do solo exposto. Como afirma Villate et al. (2008), a evidência de nematoides nas porções inferiores dos talhões pode ser explicada pois nessa área há um maior declive, o que leva o patógeno ser transportado por enxurradas em carreadores e acumular nessa região. Já nas regiões periféricas do talhão, onde a planta está mais vulnerável a sofrer com estresses ambientais (efeitos de borda), há uma perda significativa de área foliar e a redução de sua resposta espectral pode vir a se confundir com a resposta do café infectado, os colocando na mesma classe.

A Tabela 2 mostra a matriz de confusão gerada no processo de validação e qualificação da classificação supervisionada da imagem RGB, comparando os 44 pontos amostrais georreferenciados observados *in situ*, e sua rotulação como café saio e infectado, além das áreas de solo exposto. Nela podemos observar que as linhas representam os elementos atribuídos as classes no processo de classificação, e as colunas correspondem à verdade de campo. A última linha mostra a porcentagem dos erros de omissão por categoria, enquanto na última coluna são apresentados a porcentagem dos erros de comissão.

Tabela 2 - Matriz de confusão e erros de omissão e comissão da classificação da imagem RGB.

		Verdade de Campo				
		Sadia	Infectada	Solo Exposto	Total	Comissão (%)
Classificação	Classe					
	Sadia	12	3	0	15	20
	Infectada	1	15	1	17	11,76
	Solo Exposto	1	2	9	12	25.00
	Total	14	20	10	44	
Omissão (%)	14,3	25	10			

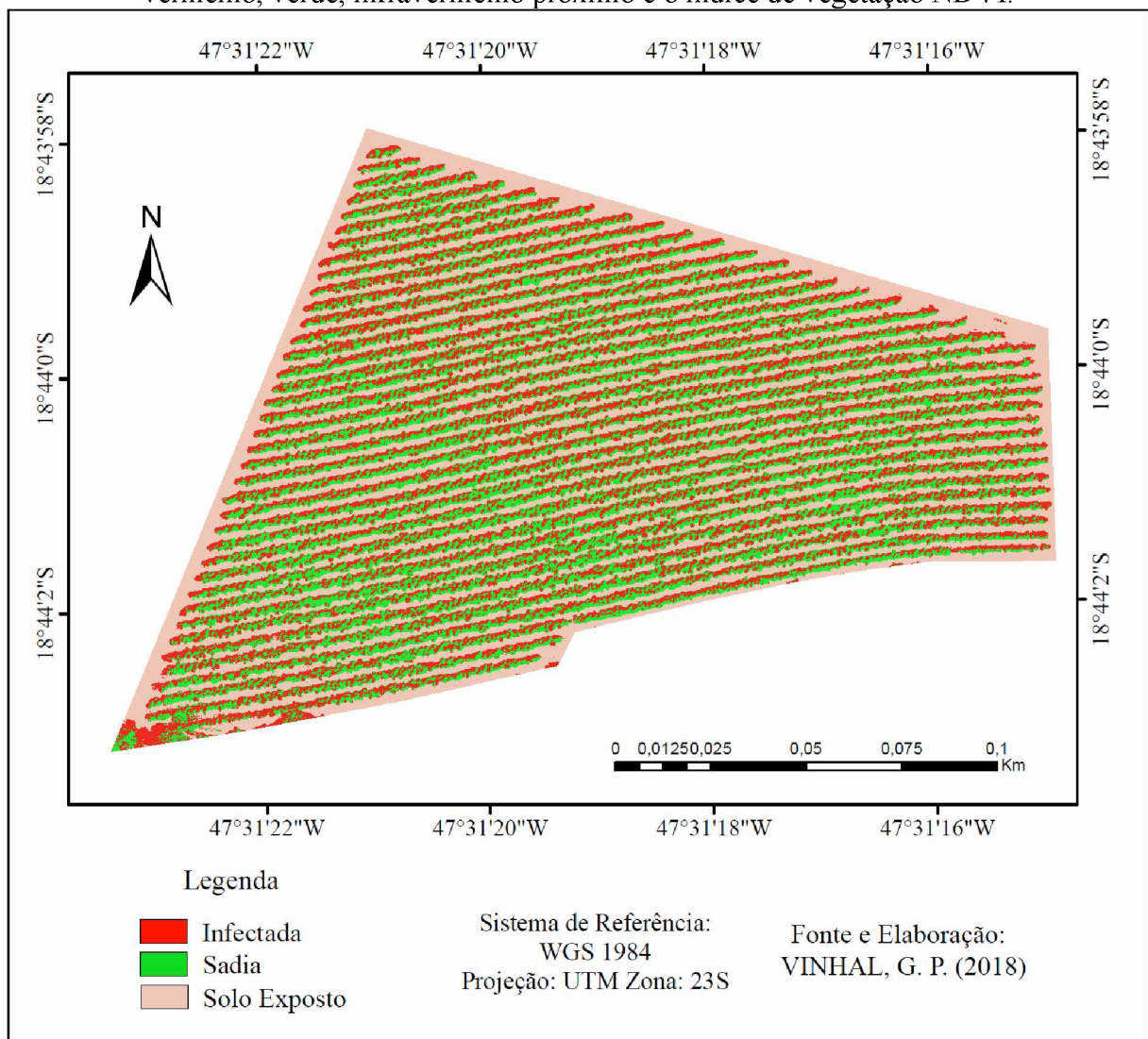
A acurácia da verdade de campo (acurácia do produtor) da classe de café infectado (75%) foi o resultado mais crítico, uma vez que incluiu uma quantidade maior de pontos em outras classes (área de solo exposto 10% e sadia 15%), provocando um erro de omissão de 25% devido está-se a omitir os pontos da classe correta atribuindo-os a outras classes. A classe sadia obteve uma acurácia da verdade de campo de 85,7%, e apenas 2 pontos classificados erroneamente, levando a um erro de omissão de 14,3%. A classe solo exposto alcançou a maior acurácia da verdade de campo, e o menor erro de omissão, o qual dos 10 pontos analisados 90% foram bem classificados, admitindo um erro de omissão de 10%.

No acerto da classificação (acurácia do usuário) a classe de café infectado obteve um número maior de acertos, o qual houve 88,23% de pontos classificados corretamente e apenas 11,76% de erro (comissão), devido a inclusão de pontos as classes sadia e solo exposto, quando na verdade deveriam pertencer a classe infetada. Para os 15 pontos analisados da classe sadia, 80% foram classificados corretamente, enquanto que os 3 pontos restantes foram mal classificados, provocando um erro de comissão de 20%. A menor acurácia de acertos na classificação foi da classe solo exposto, onde obteve 75% de pontos classificados corretamente e assumiu um erro de comissão de 25%.

Os resultados da classificação da imagem RGB foram comparados com pontos georreferenciados verificados em campo (Figura 8), determinando a exatidão global de 81% e índice kappa de 0,72. Entretanto, o resultado do coeficiente kappa mostra que a qualidade da classificação é “forte”, uma vez que esse resultado se encontra entre o intervalo de 0,6 e 0,8 como indicado na tabela 1.

O mapa temático produzido pela classificação realizada sobre a imagem multiespectral RGN e o conjunto de classes rotuladas como café infectado e sadio, além de áreas com solo exposto, é mostrado na figura 10.

Figura 10 -Distribuição espacial de café infectado e sadio na área de estudo, obtido pela classificação supervisionada da imagem multiespectral RGN, correspondente as bandas: vermelho, verde, infravermelho próximo e o índice de vegetação NDVI.



A partir da Figura 10, nota-se que a dispersão das áreas infectadas se propaga uniformemente por toda área de estudo, bem como, também é evidente a presença da delimitação do solo exposto. É evidenciado também alguns aglomerados de infecção na parte central e nas extremidades do talhão, bem como concentrações mais esparsas de infecção.

A Tabela 3 mostra a matriz de confusão gerada no processo de validação da classificação supervisionada da imagem RGN, onde são expressos os valores dos erros de omissão e comissão, o qual também compara os 44 pontos amostrais georreferenciados observados *in situ*, e sua rotulação como café sadio e infectado, além das áreas de solo exposto.

Tabela 3 - Matriz de confusão e erros de omissão e comissão da classificação da imagem RGN.

		Verdade de Campo				
Classificação	Classe	Sadia	Infectada	Solo Exposto	Total	Comissão (%)
	Sadia	11	1	0	12	8,33
	Infectada	2	16	0	18	11,11
	Solo Exposto	1	3	10	14	28,57
	Total	14	20	10	44	
	Omissão (%)	21,42	20,00	0,00		

A verdade de campo da classe solo exposto obteve a maior acurácia (100%) entre as classes analisadas, incluindo corretamente todos os pontos a classe predestinada e assumindo nenhum erro de omissão. A classe infectada também alcançou grande acurácia de verdade de campo, atingindo 80% de precisão e dispondo de apenas 20% de erro. A classe sadia por sua vez atingiu resultados pouco inferiores, com uma acurácia de verdade de campo de 78,57% e um erro de omissão de 21,43%.

Analisando o acerto da classificação ou acurácia do usuário, a classe sadia obteve um número maior de acertos, chegando a uma precisão de 91,67% de pontos classificados corretamente e apenas 8,33% de erro de comissão, onde incluiu somente 1 ponto erroneamente em outra classe. Para os 18 pontos verificados da classe infetada, 88,89% foram classificados corretamente, enquanto que somente 2 pontos foram mal classificados, assumindo um erro de 11,11%. A menor acurácia de acertos na classificação foi da classe solo exposto, onde obteve 78,57% de pontos classificados corretamente e um erro de 28,57%.

Os resultados da classificação da imagem RGN foram comparados com pontos georreferenciados verificados em campo (Figura 8), e a partir da matriz de confusão determinou uma precisão de 84% de exatidão global e índice kappa de 0,75, indicando, de acordo com a tabela 1, uma classificação “forte”, uma vez que esse resultado se encontra entre o intervalo de 0,6 e 0,8.

6.2 Estimativa de Teor de Clorofila a partir de Modelos Empíricos

6.2.1 Correlação entre a concentração de clorofila e a reflectância das bandas originais e os índices derivados dos sensores

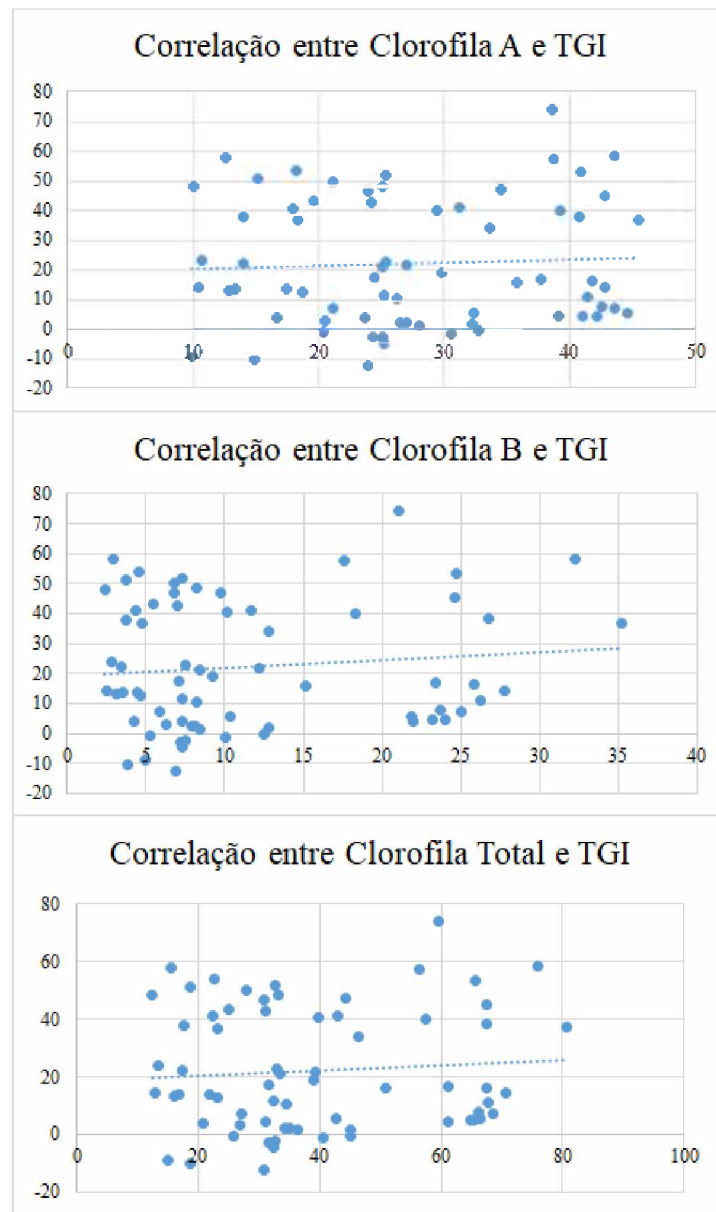
A tabela 4 apresenta a relação entre a concentração de clorofila no talhão observada em campo e a reflectância das bandas originais do sensor RGB e do índice TGI.

Tabela 4 – Correlação entre a clorofila e a reflectância das bandas originais do sensor RGB e do índice TGI.

	Clorofila A	Clorofila B	Clorofila Total
TGI	0,055	0,107	0,080
Red	0,005	0,041	0,022
Green	0,021	0,065	0,042
Blue	0,005	0,033	0,018

Como critério para compor os modelos foi considerado somente uma única banda, o qual apresentasse uma melhor correlação com a concentração de clorofila A, B e Total. Diante dessa abordagem nota-se que o índice de vegetação TGI, ao ser comparado com as outras bandas obteve melhor correlação, porém não foi um valor significativo. Em alguns estudos, como Hunt Jr. et al. (2011), é evidenciado que o TGI é o mais consistente entre os índices de vegetação correlacionados com o teor de clorofila com base em imagens de cores do visível, pois suas combinações de medidas de reflectância são mais sensíveis aos efeitos combinados da concentração de nitrogênio. Mesmo com tais indícios, a correlação entre o TGI e o teor de clorofila não foi relevante o suficiente para a criação dos modelos empíricos, o qual é demonstrado na figura 11.

Figura 11 – Gráficos de regressão da correlação entre os valores de clorofila observados em campo e os valores de radiometria da imagem RGB (reflectância da banda correspondente ao índice TGI).



Fonte: O autor.

A partir dos gráficos é possível notar o alto grau de dispersão dos pontos, provando uma relação pouco significante entre o teor de clorofila A, B e Total mensurados e os valores do índice TGI, o que torna essas variáveis independentes. Esse fato pode ser explicado por Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich (2012), o qual afirmam que a resposta espectral da radiação fotossintetizante ativa, na região do visível, corresponde a uma baixa reflectância devido a absorção da radiação incidente pela clorofila.

Na tabela 5 é analisada a relação entre a concentração de clorofila observada em campo e a reflectância das bandas originais do sensor multiespectral RGN e do índice de vegetação NDVI.

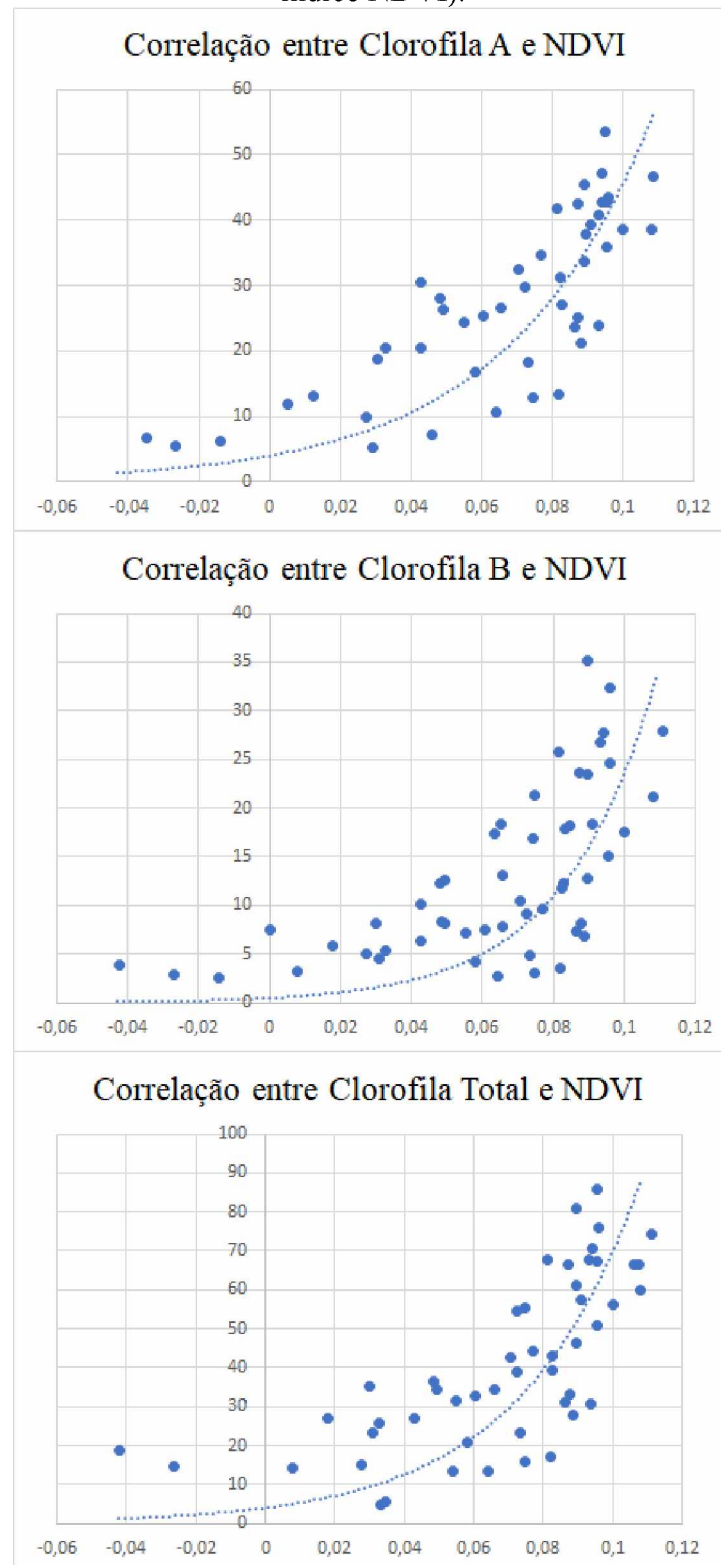
Tabela 5 – Correlação entre a clorofila e a reflectância das bandas originais do sensor RGN e do índice NDVI.

	Clorofila A	Clorofila B	Clorofila Total
NDVI	0,175	0,237	0,206
Red	0,064	0,107	0,085
Green	0,068	0,121	0,094
IVP	0,105	0,158	0,131

Foi utilizado o mesmo critério da imagem RGB para compor os modelos, considerando somente a banda que apresentasse uma melhor correlação com a concentração de clorofila A, B e Total. Nesse contexto, é notável que a banda do índice de vegetação NDVI melhor correspondeu, e também é evidente que a banda do IVP obteve um maior grau de correlação quando comparado com as bandas Red e Green que pouco se destacaram, abordagem que, de acordo com Gates et al. (1965) é atribuída à alta absorção da radiação pela clorofila e ao seu espalhamento pelas folhas nas regiões espectrais do infravermelho próximo. Em alguns estudos, como Moreira, Teixeira e Galvão (2015), o NDVI também apresenta correlações significantes quando relacionado com pigmentos de clorofila na detecção de estresse no arroz. Em Tittoto (2016), o NDVI se mostra mais confiável ao ser utilizado também na cana-de-açúcar.

Com o alto nível de correlação entre a concentração de clorofila e a resposta espectral do NDVI da imagem RGN (Figura 12), foi possível então criar os modelos empíricos de estimativa de clorofila.

Figura 12 – Gráficos de regressão da correlação entre os valores de clorofila observados em campo e os valores de radiometria da imagem RGN (reflectância da banda correspondente ao índice NDVI).



Fonte: O autor.

Os gráficos de regressão da imagem RGN demonstram uma dispersão bem próxima da linha de tendência, diferente da análise da relação feita com a imagem RGB onde os pontos ficaram totalmente esparsos. Os gráficos assumiram então uma relação exponencial positiva, fato que pode ser explicado devido ao NDVI possuir uma alta absorção da radiação nas regiões espectrais do infravermelho próximo, definindo assim os modelos empíricos de estimativa da concentração de clorofila. A partir das análises de correlação criou-se então os modelos de resposta do teor de clorofila (clorofila estimada) em relação a reflectância da banda do NDVI (variável de predição do modelo de regressão), gerando uma equação para cada tipo de clorofila, como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Modelos de regressão da concentração de clorofila A, B e Total.

Clorofila	Modelos de Regressão
A	$4 * e^{(21,538*NDVI)}$
B	$0,4 * e^{(41,364*NDVI)}$
Total	$4 * e^{(32,177*NDVI)}$

Para validar o desempenho dos modelos criados foi feito testes de acurácia, expressos pelo erro médio quadrático e demonstrados na tabela 7. O cálculo foi realizado considerando 10 pontos de clorofila observados em campo (pontos de *check*) e os valores estimados da relação entre a clorofila e o valor radiométrico da banda do NDVI da imagem RGN.

Tabela 7 – Validação dos modelos de regressão pelo RMSE.

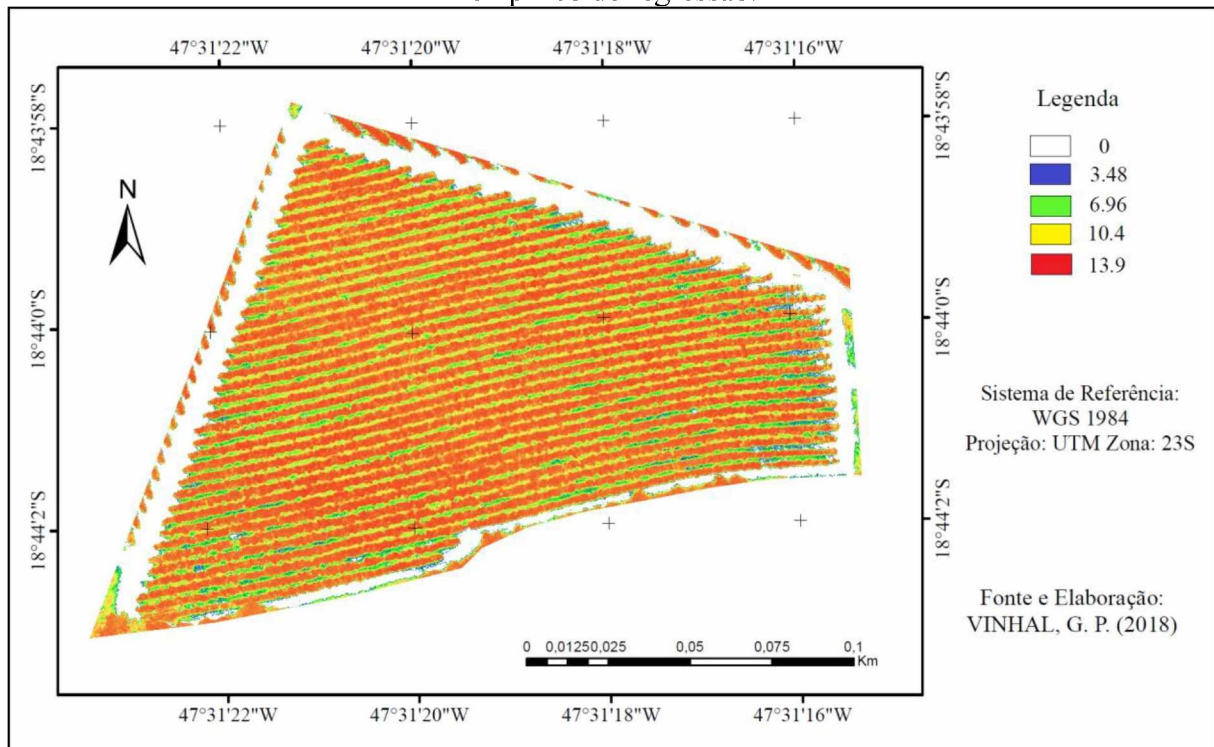
	Clorofila A	Clorofila B	Clorofila Total
RMSE	9,83	8,40	22,99
RMSE (%)	30,72	46,68	45,99
Erro Padrão	3,11	2,65	7,27

O modelo da relação entre clorofila B e NDVI gerado pela regressão apresentou o menor erro (RMSE=8,40) em termos de unidade de clorofila observado em campo, podendo variar entre os intervalos de 5,75 e 11,05, porém obteve a menor precisão da medida, equivalente a aproximadamente 53,32%. A validação do modelo criado entre a clorofila total e NDVI apontou o maior erro, indicando um RMSE de 22,29 que pode variar entre 15,72 e 30,26 de acordo com o erro padrão, e precisão de 54,01%, semelhante ao da clorofila B. O desempenho do modelo criado entre clorofila A e NDVI foi o mais aceito, uma vez que seu

RMSE (9,83 variando entre 6,72 e 12,94) foi bem próximo ao da clorofila B, no entanto teve maior precisão na medida (69,28%).

As Figuras 13, 14 e 15 apresentam os mapas cor-valor de concentração de clorofila gerados a partir dos modelos de regressão e aplicados sobre a imagem RGN.

Figura 13 - Mapa cor-valor de concentração de clorofila “A” obtido a partir do modelo empírico de regressão.

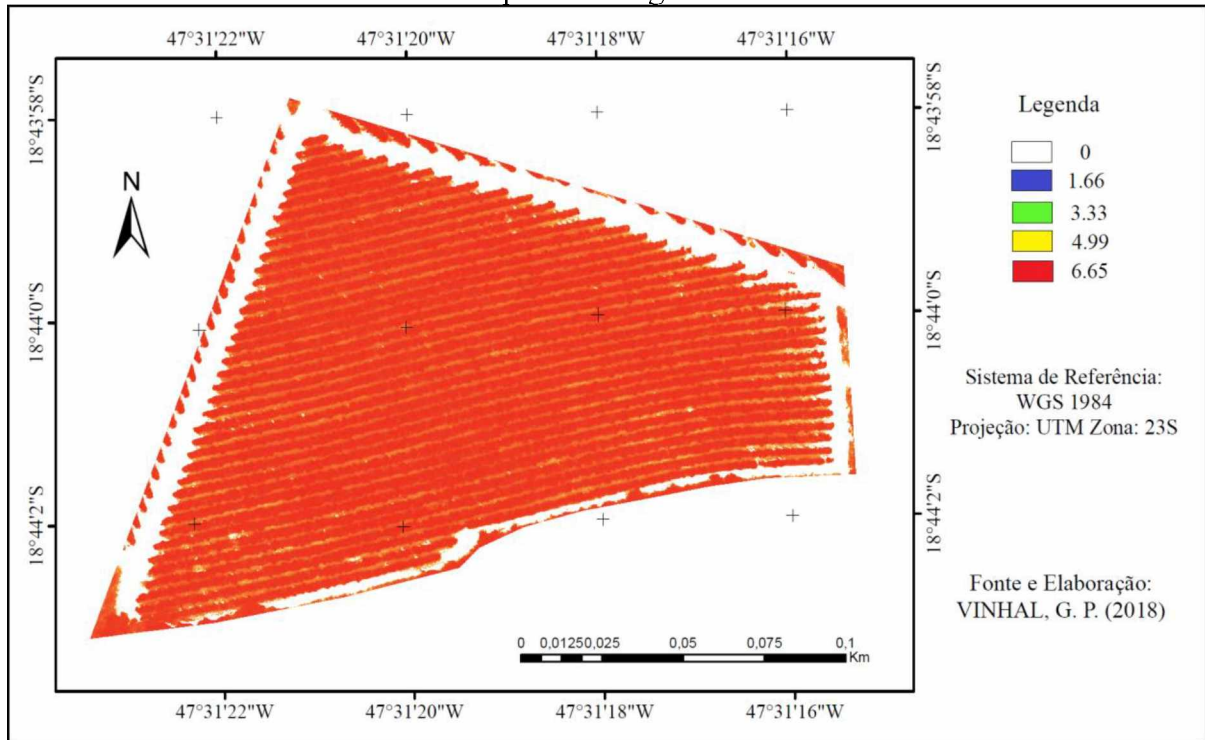


Fonte: O autor.

A partir do mapa de estimativa de concentração de clorofila A (Figura 13) é possível identificar com evidência a boa distribuição e delimitação dos níveis de clorofila no talhão de café estudado. A área correspondente ao branco na imagem compete aos carregadores, passagens em que há o tráfego de veículos em meio a plantação, e devido a isso não existe nenhuma incidência de vegetação nesses locais. Os mais altos índices de clorofila (valores equivalentes a cor vermelha) se encontram exclusivamente sobre as linhas do plantio, onde a planta é mais densa, bem como também é notável algumas manchas amarelas (valores de clorofila inferiores ao vermelho) que podem ser entendidas como locais de possível infestação ou deficiências nutricionais por apresentarem menor reflectância que as áreas em vermelho. Os níveis mais baixos de clorofila correspondem as cores verde e azul e possuem conformidade com as gramíneas existentes entre as linhas de plantio, assim como alguns pontos de solo exposto. É válido ressaltar que esse modelo foi o mais aceito pois se mostrou

com melhor concordância dos dados quando validado pelo RMSE, possuindo uma maior porcentagem de verdade na estimativa de clorofila.

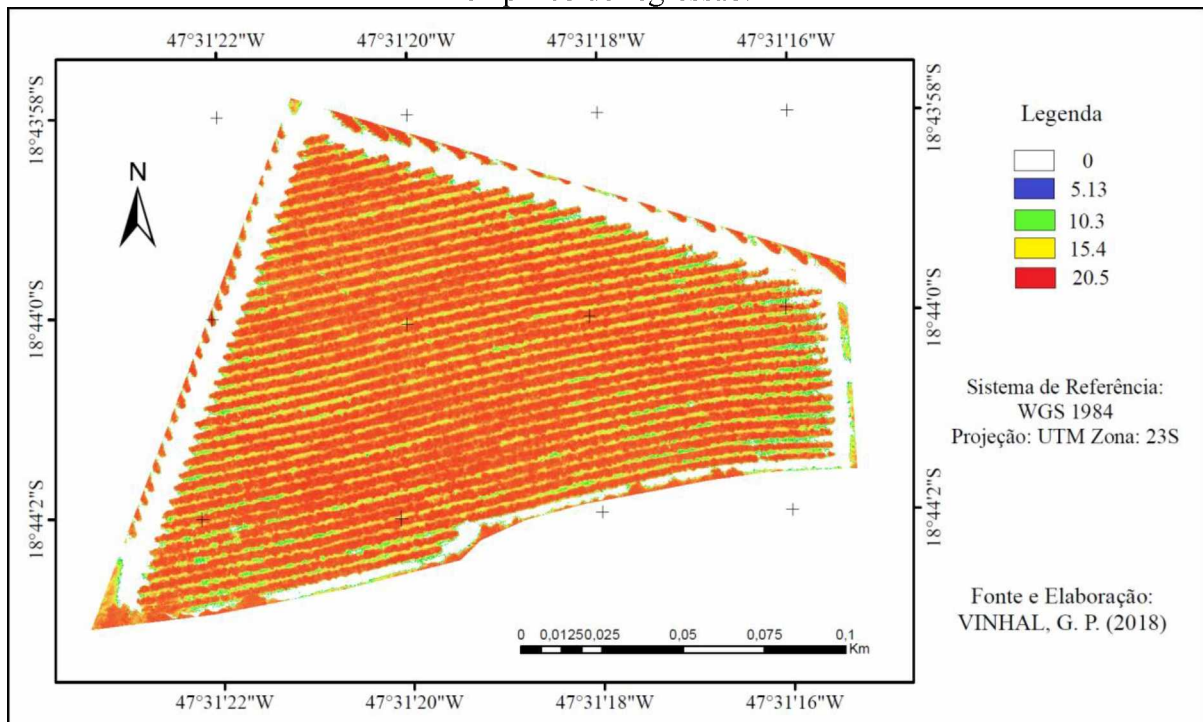
Figura 14 - Mapa cor-valor de concentração de clorofila “B” obtido a partir do modelo empírico de regressão.



Fonte: O autor.

O mapa de estimativa de concentração de clorofila B (Figura 14) apresenta grande homogeneidade visualmente, predominando a cor vermelha que representa os maiores níveis desse tipo de clorofila no talhão em estudo. É possível notar também que entre as linhas de plantio o índice de clorofila é menor devido a incidência de gramíneas, bem como a boa delimitação dos carregadores. Por ser um tipo de clorofila acessório para a processo da fotossíntese, ela apresenta valores menores que a clorofila “A”, porém é mais abundante em todo o talhão.

Figura 15 - Mapa cor-valor de concentração de clorofila total obtido a partir do modelo empírico de regressão.



Fonte: O autor.

No mapa de estimativa da soma entre a concentração de clorofila A e clorofila B, visualizado na figura 15, a escala de cores é bem semelhante ao da estimativa de clorofila A, porém possui valores diferentes. Os índices de clorofila são mais elevados nesse mapa, o qual percebe-se um maior volume entre as cores vermelha e amarela, porém esse modelo foi o que apresentou menor precisão quando avaliado pelo RMSE.

Considerando o grande despendo de tempo para que seja feito a coleta em campo de amostras de clorofila para que se tenha uma estimativa para grandes áreas, a possibilidade de estimar essa concentração a partir da resposta espectral das folhas do cafeeiro torna-se uma alternativa viável na agricultura de precisão, uma vez que, a partir dos modelos empíricos foi possível estimar com uma precisão de aproximadamente 70% (no caso do modelo criado a partir da relação clorofila A / NDVI).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de ARPs na detecção de patógenos na agricultura vem se desenvolvendo cada vez mais, visto que essa tecnologia tem se mostrado eficiente em estudos agrícolas. O método desenvolvido e aplicado nessa pesquisa possibilitou discriminar o café sadio do café infectado por nematoides, afirmando a hipótese de que as abordagens de sensoriamento

remoto apoiadas pelo uso dessas plataformas aéreas foram adequadas para o monitoramento da cultura em estudo.

A classificação supervisionada mapeou os três tipos de classes corretamente, incluindo o solo exposto, com um coeficiente de concordância kappa igual a 0,72 para a imagem RGB e 0,75 para a imagem RGN, indicando “forte” conformidade dos dados, e uma exatidão global de 81% e 84% respectivamente. Dessa forma, pode-se admitir que o potencial das imagens obtidas em conjunto com as técnicas de pré-processamento digital de imagens e do método da máxima verossimilhança na discriminação desse patógeno na cultura cafeeira se mostraram eficientes com sensores embarcados em uma plataforma aérea não tripulada de baixo custo.

A partir das análises estatísticas realizadas foi verificado a correlação entre a clorofila mensurada em campo e os valores de radiometria das imagens, para a criação dos modelos empíricos de estimativa. Estabelecer esses modelos matemáticos para o uso em estudos e avaliações de extensas plantações é uma alternativa viável em relação aos métodos padrões de quantificação pois otimiza o tempo para que medidas rápidas sejam tomadas.

Foi possível obter modelos com bom desempenho para as estimativas de clorofila, formulado pela imagem RGN associada ao índice multiespectral formado pela diferença normalizada entre a banda do infravermelho próximo e do vermelho, pois se mostrou correlacionada com os valores mensurados em campo, diferente da imagem RGB que apresentou nenhuma concordância dos dados. Os modelos exponenciais de regressão gerados são estatisticamente confiáveis, resultando em consideráveis erros de estimativas e uma precisão de até 70%, possibilitando a obtenção de uma visão espacial da distribuição da concentração de clorofila.

REFERÊNCIAS

- ABIC - **Associação Brasileira da Indústria de Café**. Disponível em: <<http://abic.com.br/>>. Acesso em: 4 nov. 2017.
- ABREU, K.M.P;COUTINHO, L.M. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação com ênfase em índice de vegetação e métricas da paisagem**. Vértices, Campos dos Goytacazes/RJ, v.16, n.1, p. 173-198, jan./abr. 2014.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Regras da ANAC para uso de drones entram em vigor**. BRASIL. 2017. Disponível em :<<http://www.anac.gov.br/noticias/2017/regras-da-anac-para-uso-de-drones-entram-em-vigor>>. Acesso em 15 out. 2017.
- ALVARENGA, B. S.; D'ARCO, E.; ADAMI, M.; FORMAGGIO, A. R. **O ensino de conceitos e práticas de espectrorradiometria laboratorial: estudo de caso com solos do estado de São Paulo**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. Anais... São José dos Campos: INPE, p.739-747, 2003.
- ARANA, M. J. **Integração do GPS com a Fotogrametria**. Departamento de Cartografia, UNESP. São Paulo, 1994.
- BATISTA, T. G; DIAS, W. N. **Introdução ao Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens**. Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), 2004.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. **Agricultura de Precisão**. 3. ed. Brasília: Assessoria de Comunicação Social, 2013. 36 p.
- BRYN, L. M. **Página dinâmica para aprendizado do sensoriamento remoto**. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Concentração e Desenvolvimento de Metodologias em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- CASTRO, C.M. J. et al. **Levantamento de Fitonematóides em Cafezais do Sul de Minas Gerais**. Embrapa, Petrolina, Pernambuco, Brasil, 2008.
- CASTRO, J.M.C.; V.P. CAMPOS. Detecção de *Meloidogyne paranaensis* em cafeeiros do Sul de Minas Gerais. **Summa Phytopathologica**, 30 (4): 507. 2004.
- COELHO, L.; BRITO, J. N. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: Editora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2007. 196 p.
- COELHO, M. A. **Agricultura de Precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas**. Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Milho e Sorgo. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasil, 2005.
- CRÓSTA, A.P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas, SP IG/UNICAMP, 1992. 170 p.

CRUZ, M. A. S.; SOUZA, A. M. B.; JESUS, J. S. **Avaliação da cobertura vegetal por meio dos Índices de Vegetação SR, NDVI, SAVI e EVI na bacia do rio Japaratuba-Mirim em Sergipe**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba, Brasil. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011. p. 1357-1365.

DALMOLIN, Q. **Projeto fotogramétrico**. Curitiba: Imprensa Universitária da UFPR, 2005.

EMBRAPA (Brasil). **Principais pragas do cafeeiro no contexto do manejo integrado de pragas**. 2015. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-integracao-lavoura-pecuaria-floresta-ilpf/busca-de-noticias/-/noticia/6694669/artigo---principais-pragas-do-cafeeiro-no-contexto-do-manejo-integrado-de-pragas>>. Acesso em: 12 out. 2017.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS (Minas Gerais). Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. **Aspectos técnicos dos nematoides parasitas do cafeeiro**. Belo Horizonte: Vânia Lacerda, 2011. 60 p.

FERREIRA, E.R. **Fototriangulação analítica: solução de grandes sistemas lineares em micro computadores da série pc**. 1990. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1990. Disponível em: <http://www.acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/37155/D_-_EDGAR_RICARDO_FERREIRA.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 17 out. 2017.

FIGUEIREDO, G. C.; VIEIRA, C. A. **O estudo do comportamento dos índices de Exatidão Global, Kappa e Tau, comumente usados para avaliar a classificação de imagens do sensoriamento remoto**. In: ANAIS XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Florianópolis, 2007. Anais Eletrônicos... Florianópolis: INPE, 2007. p. 5755-62. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.13.17.35/doc/5755-5762.pdf>> . Acesso em: 30 out. 2018.

FIGUEREDO, D. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. Companhia Nacional do Abastecimento. Brasil, 2005.

FONTES, A. A. C. L. **Fundamentos de Aerofotogrametria Aplicada a Topografia**. Universidade Federal da Bahia, Departamento de Transportes, 2005.

GALBIERI, R.; ASMUS, G. L. Principais espécies de nematoides do algodoeiro no Brasil. In: GALBIERI, R.; BELOT, J. L. (Ed.). **Nematoides fitoparasitas do algodoeiro nos cerrados brasileiros: biologia e medidas de controle**. Cuiabá: IMAmt, p. 11-36. Boletim de P&D, n. 3. 2016.

GALVÃO, M. G. **Acurácia da Mosaicagem Gerada por Veículo Aéreo não Tripulado Utilizado na Agricultura de Precisão**. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, São Paulo. 2014.

GATES, D. M.; KEEGAN, H. J.; SOILETER, J. c.; WEIDNER, V. R. **Spectral properties of plants**. Applied Optics. 4: 11-20. 1965.

GONÇALVES, G.R. **Elementos da fotogrametria analítica**. Coimbra: Departamento de Matemática da FCTUC, 2006.

HUNT, E. R. EITEL, J.; DAUGHTRY, C.; LONG, D. **Remote Sensing Leaf Chlorophyll Content Using a Visible Band Index**. *Agronomy Journal*, [s.l.], v. 103, n. 4, p.1090-1099, maio 2011.

INSTITUTO MATOGROSSENSE DO ALGODÃO. **Nematoides fitoparasitas do algodoeira nos cerrados brasileiros: Biologia e medidas de controle**. Boletim de P&D. Número 3, 2016.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2 ed. Tradução de J. C. N. Epiphânio. São José dos Campos, SP: Parênteses, 2009. 598 (Prentice Hall Series in Geographic Information Science) Tradução de: Remote Sensing of the environment: an Earth resource perspective.

JORGE, L. A. C.; TRINDADE JÚNIOR, O. **Circular Técnica: Metodologia para utilização de aeromodelos em monitoramento aéreo**. São Carlos-SP: Embrapa, 2002, v. 15.
Disponível em:
http://www.cnpdia.embrapa.br/publicacoes/download.php?file=CiT15_2002.pdf. Acesso em: 24 out. 2017.

LANDIS JR; KOCH G. G. **The measurement of observer agreement for categorical data**. *Biometrics* 1977; 33:159–174.

LEONARDO, F.A.P.; PEREIRA, W.E.; SILVA, S.M.; COSTA, J.P. **Teor de clorofila e índice spad no abacaxizeiro cv. Vitória em função da adubação nitrogenada**. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 35, n. 2, p. 377-383, 2013.

LOPES, A. S.; SILVA, H. P.; ARAUJO, I. R.; ALENCAR, B. P. B. **Utilização de imagens de satélite e dados meteorológicos visando o monitoramento de mudanças climáticas no município de Orocó – PE**. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO. Recife, 2010.

LOPES, E. S. S.; **Apostila de Curso - SPRING-3.3: Spring Básico**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 1999. 16p. Apostila.

MARTINS, G. D. **Inferência dos níveis de infecção por nematoides na cultura cafeeira a partir de dados de sensoriamento remoto adquiridos em multiescala**. 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2016.

MCKINNON, T.; HOFF, P. **Comparando Índices de Vegetação Baseados em RGB com o NDVI para Imagens Drone Agrícolas**. Boulder, 2017. Disponível em: <
<https://agribotix.com/blog/2017/04/30/comparing-rgb-based-vegetation-indices-with-ndvi-for-agricultural-drone-imagery/>> Acesso em: 15, out. 2018.

MEDEIROS, Fabricio Ardais. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão**. 2007. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de

Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Mecanização Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

MENEZES R. P.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto.** Brasília. 2012.

MOLIN, P. J.; AMARAL, L. R. COLAÇO, F. A. **Agricultura de Precisão.** Oficina de Textos. São Paulo, Brasil, 2015.

MORAES, C. E. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto.** Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais (Inpe), São José dos Campos, 2012.

MOREIRA, L. C. J.; TEIXEIRA, A. S.; GALVÃO, L. G. **Utilização de índices de vegetação obtidos de dados multiespectrais e hiperespectrais para detectar estresse salino na cultura do arroz,** In: ANAIS XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. João Pessoa, 2015.

NAIME, João de Mendonça et al. **Agricultura de Precisão.** São Carlos: Cubo, 2014. 73 p.

NOVO, Evlyn M. L. de Moraes. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações.** 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2010. 387 p.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. v. 1, 176p.

PRINA, Z. B; TRENTIN, R. **GMC: Geração de Matriz de Confusão a partir de uma classificação digital de imagem do ArcGIS.** INPE. In: ANAIS XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 2015.

SALGADO, S.M.L.; CARNEIRO, R.M.D.G.; PINHO, R.S.C.de. **Aspectos técnicos dos nematoides parasitas do cafeeiro.** EPAMIG, Belo Horizonte, 2011. 60p.

STREIT, N. M.; CANTERLE, L. P.; CANTO, M. W.; HECKTHEUER, L. H. H. **As clorofilas.** Santa Maria: Ciência Rural, 35 (3):748-755. Santa Maria, 2005.

TITTOTO, L. P. **Índices de vegetação na estimativa de parâmetros biométricos da cultura da cana-de-açúcar.** In: XXV CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNICAMP, 2447-5114. Campinas, 2017.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica.** 2009. Disponível em: <http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/891/introducao_a_fotogrametria.pdf>. Acesso em: 4 out. 2017.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística.** 10a Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2008.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, F. M. **Introdução à Agricultura de Precisão: Conceitos e Vantagens.** Revista de Ciência Rural, Santa Maria, v.32, n.1, p.159-163, 2002.

VAAST PH.; CASWELL-CHEN, E. P.; ZASOSKI, R. J. **Effects of two endoparasitic nematodes (Pratylenchus coffeae and Meloidogyne konaensis) on ammonium and**

nitrate uptake by arabica coffee (Coffea arabica L.). Applied Soil Ecology 10:171-178. France, 1998.

VILLATE, L., FIEVET, V., HANSE, B., DELEMARRE, F., PLANTARD, O., ESMENJAUD, D.; VAN HELDEN, M. **Spatial distribution of the dagger nematode Xiphinema index and its associated grapevine fanleaf virus in French vineyard.** Phytopathology 98, 942-948. France, 2008.

ZEVIANI, W.M.; RIBEIRO, P. J. JR.; BONAT, W. H. **CURSO: Modelos de regressão não linear.** Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2013. 119 p. Apostila.