

MAPEAMENTO DO TEOR CLOROFILA TOTAL EM ÁREAS COM A CULTURA DO MILHO A PARTIR DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS TOMADAS POR AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS

¹George Deroco Martins¹, Denner Borges Rezende², Odair José Marques³, Rafaela Souza Martins⁴, Laura Cristina Moura Xavier⁵, Carlos Aberto Matias de Abreu Junior⁶, Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis⁷, Ricardo Luís Barbosa⁸, Alice Pedro Bom Paes⁹

¹ Faculdade de Engenharia Civil (FECIV), km 1, LMG-746, Monte Carmelo-MG. E-mail: deroco@ufu.br;

² Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG), km 1, LMG-746, Monte Carmelo-MG. E-mail: denner.borges@hotmail.com;

³ Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG), km 1, LMG-746, Monte Carmelo-MG. E-mail: ojmarques@ufu.br;

⁴ Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG), km 1, LMG-746, Monte Carmelo-MG. E-mail: rafahsmartins@gmail.com;

⁵ Instituto de Geografia (IG), km 1, LMG-746, Monte Carmelo-MG. E-mail: Xavier.lauramoura@gmail.com

⁶ Instituto de Geografia (IG), km 1, LMG-746, Monte Carmelo-MG. E-mail: carlosalberto0103@hotmail.com;

⁷ Instituto de Geografia (IG), km 1, LMG-746, Monte Carmelo-MG. E-mail: rodrigogallis@gmail.com;

⁸ Instituto de Geografia (IG), km 1, LMG-746, Monte Carmelo-MG. E-mail: rluisbarbosa@ufu.br;

⁹ Instituto de Geografia (IG), km 1, LMG-746, Monte Carmelo-MG. E-mail: aalicepbp@hotmail.com.

RESUMO

Em atividades relacionadas à agricultura de precisão, sensoriamento remoto tornou-se uma ferramenta imprescindível no monitoramento agrícola, principalmente por propiciar o acompanhamento e o desenvolvimento das culturas agrícolas ao longo do tempo, identificação de áreas afetadas por fitopatógenos e na estimativa de variáveis agrônomicas. No cenário atual, a inserção de imagens multiespectrais tomadas por aeronaves remotamente pilotadas possibilitou desenvolver uma série de aplicações em agricultura, as quais, antes estavam limitadas às baixas resoluções espaciais e temporais dos satélites orbitais. Assim, objetivou-se com este trabalho avaliar o potencial de uma câmera multiespectral aerotransportada de baixo custo (MAPIR 3) em estimar o teor de clorofila total de uma área experimental cultivada com milho. Neste contexto, a partir de um modelo de predição composto pelo índice NDVI foi possível estimar o teor de clorofila total da cultura do milho com uma acurácia superior a 87%.

Palavras-chave —milho, clorofila, ARP, camera multiespectral, modelo de predição.

ABSTRACT

In activities related to precision agriculture, remote sensing has become an essential tool in agricultural monitoring, mainly for providing monitoring and development of the crop over time, identification of agricultural areas affected by pathogens and in the estimation of agricultural variables. In the present scenario, the insertion of multispectral images taken by remotely piloted aircraft made it possible to develop a series of applications in agriculture, which had

previously limited the low space and time resolutions of the orbiting satellites. Thus, the objective of this work was to evaluate the potential of a low cost airborne multispectral camera (MAPIR 3) in estimating the total chlorophyll content of an experimental area cultivated with maize. In this context, from a prediction model composed of the NDVI index, it was possible to estimate the total chlorophyll content of the maize crop with an accuracy of over 87%.

Key words — corn, chlorophyll, RPA, multiespectral camera, prediction model

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o uso do sensoriamento remoto tornou-se imprescindível no monitoramento agrícola, principalmente por propiciar o acompanhamento e o desenvolvimento das culturas agrícolas ao longo do tempo, previsão de safra, determinação de novas áreas de cultivo, determinação da quantidade e da localização da área cultivada, entre outras possibilidades, como, uma forma alternativa para identificação de áreas afetadas por fitopatógenos [1].

O monitoramento remoto em função da resposta espectral da vegetação em condições de estresse é particularmente importante na agricultura de precisão, uma vez que os custos relacionados com a intensa amostragem de material vegetal (folhas) e material do solo ou no manejo agrícola para toda área de cultivo podem ser minimizados pelo mapeamento prévio de variáveis agrônomicas de interesse.

A agricultura de precisão considera exatamente esse cenário: a presença, distribuição e intensidade de uma condição específica que causa redução no rendimento da cultura agrícola, devem ser identificadas e receber tratamento diferenciado. Assim, o uso de dados

radiométricos, como ferramentas de planejamento, controle e análise de dados agrícolas, prevê então, o monitoramento das variações espaciais e espectrais dos fatores que limitam a produção, orientando no processo de tomada de decisão, na aplicação de insumos em áreas específicas e no manejo diferenciado das culturas no campo de produção [2].

A dimensão espacial de variáveis agrícolas está relacionada diretamente com a capacidade de amostragem dos sensores e, indiretamente, com o nível de aquisição de dados. Dados medidos *in situ* ou em laboratório, com campo de visada restrito, conseguem capturar condições específicas da folha, enquanto que sensores imageadores, instalados em plataformas remotas, determinam uma área de amostragem maior na superfície terrestre. Por incorporar em um único elemento de resolução, a resposta espectral de outros alvos, como o solo, além daquela específica da planta ou plantas, imagens aéreas podem indicar a dispersão espacial das diferentes proporções de planta e solo, dentro da cultura agrícola. Ou seja, a partir da caracterização espectral e espacial da cultura sadia e infectada por fitopatógenos, por exemplo, dados multiescala de sensoriamento remoto permitem identificar as áreas infectadas e inferir graus de sanidade da cultura [1].

As imagens multiespectrais do sensoriamento remoto obtidos em multiescala, com vistas ao monitoramento e mapeamento de culturas agrícolas encontram-se em constante avanço. Isso ocorre devido à grande quantidade de dados obtidos por intermédio de plataformas terrestres, aeronaves e orbitais, disponibilizando produtos radiométricos oriundos de fontes diversas [3].

Atualmente, uma série de novos sensores multiespectrais instalados em plataformas espaciais incluem bandas espectrais específicas e apropriadas para monitorar atividades agrícolas. Sensores como RapidEye e o WorldView 2 e 3 dispõem de uma banda espectral no vermelho limítrofe, a qual é capaz de detectar variações sutis de clorofila nas folhas e fornecer informações sobre estrutura e a condição sanitária da vegetação [4].

Quanto aos tipos de plataformas aéreas, as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) apresentam-se como uma ferramenta promissora em aplicações no setor agrícola e em missões de reconhecimento, principalmente pela redução de custo e do tamanho dos equipamentos colocados a bordo.

Além do mais, a alternativa de solução baseada em imagens tomadas de plataformas aéreas constitui uma solução que pode ser viabilizada, caso seja baseada na integração de diferentes sensores instalados em plataformas ARPs, as quais permitem maior flexibilidade na realização das tomadas de imagens principalmente no caso do monitoramento de culturas agrícolas, sendo uma excelente ferramenta para a Agricultura de Precisão.

Assim, a proposta deste trabalho foi avaliar o potencial de imagens multiespectrais tomadas por ARPs em estimar variáveis agrônomicas. Para tanto, a variável agrônômica estimada foi o teor de clorofila total (TCT) em talhões

experimentais da cultura de milho, sob tratamentos inseticidas para controle de *Spodoptera frugiperda*.

2. MÉTODOS

Para estimar os TCTs na cultura do milho, esta pesquisa foi dividida nas etapas: (1) montagem da área experimental: talhões de milho sob diferentes formas de manejo; (2) mensuração *in situ* do TCT; (3) aquisição e processamento de imagens multiespectrais; (4) análise da acurácia dos modelos de estimativa; (5) geração dos mapas.

2.1. Área de Estudo

O experimento foi instalado, no período da safra de 2018, no Campo Demonstrativo e Experimental da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo. A área de estudo, localiza-se na região do Alto Paranaíba, estado de Minas Gerais, apresenta altitude aproximada de 908 m. O solo da área é caracterizado como LATOSSOLO Vermelho eutroférrico de textura argilosa [5].

2.2. Instalação e condução do experimento

O delineamento foi realizado em blocos com tratamentos atualizados, contendo dois híbridos de milho (um convencional SHS4080® da Santa Helena Sementes e um transgênico Fórmula Viptera® da Syngenta Seeds) e seis tratamentos inseticidas para controle de *S. frugiperda* (lagarta-do-cartucho), com quatro repetições, totalizando em 48 parcelas. Cada parcela tinha dimensões de 6,0 x 2,0 m (12 m²), contendo quatro linhas de plantas, com espaçamento de 0,5 m nas entrelinhas, sendo a área útil composta pelas duas linhas centrais com dimensões de 5,0 x 1,0 (5 m²).

Com intuito de simular condições diversas do TCT ao longo do talhão, o manejo e tratos culturais preconizados para a cultura foram aplicados, variando apenas a aplicação de inseticidas.

2.3 Mensuração da clorofila

O TCT foi mensurado em 60 pontos georreferenciados com uma única campanha de campo no estádio V8 (oito folhas da planta estão completamente expandidas).

As medidas foram realizadas na última folha expandida da planta com um clorofilômetro SPAD 502 *plus*, da *Konica Minolta*, com precisão de $\pm 1,0$ unidade SPAD (SPAD para o valor entre 0,0 e 60,0 em temperatura/umidade normais).

2.4 Aquisição e processamento de imagens multiespectrais

Concomitante as medidas do TCT, as imagens multiespectrais foram adquiridas a partir de uma câmera

multiespectral MAPIR 3, contendo as bandas do intervalo espectral médio do verde (550 nm), vermelho (660 nm) e infravermelho próximo (IVP) (850 nm).

A câmera foi instalada na posição nadir em um ARP, drone Phantom 4 Pro e, o voo foi realizado às 12 h com uma altitude de 165 m e uma configuração da resolução espacial das imagens em 12,5 cm. No momento da aquisição de imagens, foram instaladas na superfície próxima do talhão, placas de papel fotográfico nas cores: azul, verde, vermelho, branco e preto para a posterior calibração radiométrica das imagens adquiridas.

O mosaico de imagens foi gerado no software *Pixel4D*. Na etapa de fototriangulação, não foram utilizados pontos de apoio materializados no terreno, para formação do mosaico, apenas utilizou-se as coordenadas geográficas do centro perspectivo das imagens e os ângulos de orientação exterior proveniente de um sistema inercial embarcado na própria câmera MAPIR 3. A calibração radiométrica do mosaico foi realizada de forma automática com o software *Mapir Camera Control*.

2.5 Definição de modelos predição para estimativa do teor de clorofila

Para geração dos modelos empíricos, primeiramente, foram avaliadas a correlação entre o TCT e as bandas multiespectrais e o índice de vegetação NDVI [6].

O critério para escolha das bandas e dos índices de vegetação para composição dos modelos foi definido a partir dos canais que apresentaram uma significativa e maior correlação com o TCT. Deste modo, definiu-se como significativa a correlação superior a 50% e um nível de significância de 5%.

Os modelos predição foram definidos a partir de equações de regressão lineares simples entre valores radiométricos medidos na imagem e a concentração do TCT. Para tanto se considerou a radiância e o TCT de 50 amostras (definidas aleatoriamente) entre os 60 pontos de coletas contidos dentro da área (Figura 1).

A validação da precisão dos modelos de predição foi realizada estimando-se o TCT em 10 (definidos aleatoriamente) dos 60 pontos amostrados *in situ*. A partir dos dados de discrepância entre o TCT observado e estimado, foi calculado o erro médio quadrático (RMSE) da amostra. O RMSE e erro (RMSE(%)) foi calculado a partir do modelo da equação 1 e 2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{med})^2}{n}} \quad (1)$$

Onde, x_i e x_{med} representam o valor estimado e medido *in situ* do TCT, respectivamente, e n é o número de amostras.

Ao final, a partir do modelo que obteve o menor RMSE foi gerada uma carta contendo o mapeamento do TCT sobre os talhões milho. O mapa coroplético foi dividido em cinco

classes em intervalos iguais, apresentando a magnitude do TCT em ordem crescente de cinco unidades de valores de SPAD.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta a correção obtida entre as bandas da câmera, índice de vegetação e o TCT.

Tabela 1 – Correlação entre bandas - índice de vegetação e o teor de clorofila total

Banda	Correlação	p-valor
Verde (R ₅₅₀)	0,45	0,001
Vermelho (R ₆₆₀)	0,40	0,006
IVP (R ₈₅₀)	0,55	0
Índice		
NDVI	0,70	0

A partir da Tabela 1 observa-se que as bandas da câmera e índice de vegetação apresentaram uma correlação significativa com o TCT, onde o maior p-valor foi de 0,006 para a banda do vermelho. A maior correlação registrada foi para o índice NDVI, 0,70, e a menor com a banda do vermelho, 0,40.

A alta correlação entre o índice NDVI e o TCT pode ser atribuída à sensibilidade do índice com a quantidade de nitrogênio na folha. Isto se justifica ao fato de que o NDVI e as leituras do clorofilômetro se tornam mais sensíveis às taxas de nitrogênio em cada estágio fenológico da planta.

Constatações semelhantes a estes resultados observam-se em [7], onde foi avaliada a correlação do NDVI com o TCT em todas as fases do desenvolvimento fenológico do milho. Neste estudo, o autor constatou que correlação do índice com o nitrogênio estimado por medidas de SPAD aumentou em estádios mais avançados de desenvolvimento da cultura, possivelmente devido ao maior acúmulo de nitrogênio pela planta.

A Tabela 2 apresenta os modelos de predição do teor de clorofila total gerados, os RMSE/RMSE (%) e os correspondentes coeficientes de determinação (R²).

Tabela 2 – Modelos de estimativa do teor de clorofila e análise da acurácia. (onde R representa banda da câmera MAPIR 3)

Banda	Modelo	RMSE/ RMSE (%)	R ²
Verde (R ₅₅₀)	3,9+0,0007*R ₅₅₀	6,18/13,1%	21
Vermelho (R ₆₆₀)	17,8+0,0014*R ₆₆₀	6,38/13,5%	15
IVP (R ₈₅₀)	21,1+0,0017*R ₈₅₀	6,01/13,0%	27
Índice			
NDVI	34,5+225*NDVI	5,86/12,5%	46

A partir da Tabela 2, observa-se que embora haja uma diferença significativa entre o maior (46%) e o menor coeficiente de determinação (21%), os índices de acerto dos

modelos de predição obteve pouca variação, onde o maior erro foi para o modelo composto pela banda do vermelho (13,5%) e o menor erro para o modelo composto pela banda do IVP (12,5%).

O fato dos coeficientes determinísticos não terem sido maiores do que 50% justificam-se por serem compostos por uma única banda e pelo fator multiesca, ou seja, há uma imprecisão radiométrica aliada à distância do sensor/alvo e pela resolução espacial da imagem. Em [8], os modelos para predição para o TCT no milho apresentaram coeficientes de determinação próximas a 98%, porém, neste os modelos foram compostos pelo NDVI derivado de médias espectralradiométricas *in situ*.

A Figura 1 apresenta o mapeamento do TCT representados em valores de SPAD gerados a partir do modelo de predição composto pelo índice NDVI.

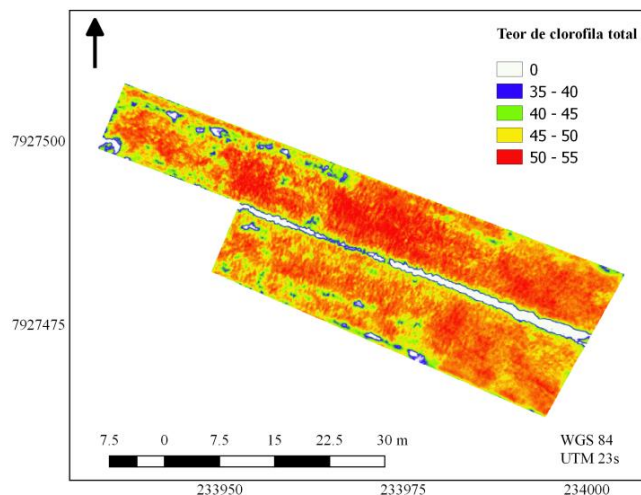


Figura 1. Carta do teor de clorofila total.

Na carta da Figura 1 observa-se que o modelo de predição composto pelo NDVI foi sensível as variações de clorofila resultantes dos diferentes manejos inseticidas aplicados sobre a área experimental.

Em alguns locais como na parte superior do talhão e na porção inferior do talhão menor, nota-se alguns vazios margeados por valores menores de SPAD (35-40), ou seja, locais em que não foi estimado o TCT. A esta ocorrência justifica-se pela desfolha causada pela *S. frugiperda*.

5. CONCLUSÕES

1-As bandas do visível apresentaram correlação significativa com índice de vegetação, porém com valores não expressivos. Em contrapartida, a banda do infravermelho e o índice NDVI apresentaram correlações superiores a 0,50.

2- Mesmo com um coeficiente de determinação inferior a 50%, a partir do índice NDVI foi possível estimar a

concentração do teor de clorofila total com acurácia superior à 87%.

3-Com mapeamento do teor de clorofila total foi possível constatar que o NDVI derivado de uma câmara de baixo custo é extremamente sensível a pequenas variações de clorofila em produtos radiométricos de alta resolução espacial.

6. REFERÊNCIAS

- [1] MARTINS, George Deroco; GALO, Maria de Lourdes Bueno Trindade; VIEIRA, Bruno Sergio. Detecting and Mapping Root-Knot Nematode Infection in Coffee Crop Using Remote Sensing Measurements. **Ieee Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing**, [s.l.], v. 10, n. 12, p.5395-5403, dez. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)..
- [2] BECK, P. S. A et al., **The feasibility of detecting trees affected by Pine Wood Nematode using remote sensing**. Europe Comission. Joint Research Centre. Institute of Environment and Sustainability, Italy. 2015. 34p.
- [3] PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos, SP. Editor Parêntese, 2015.
- [4] OUMAR, Zakariyyaa; MUTANGA, Onesimo. Integrating environmental variables and WorldView-2 image data to improve the prediction and mapping of Thaumastocoris peregrinus (bronze bug) damage in plantation forests. **Isprsr Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing**, [s.l.], v. 87, p.39-46, jan. 2014.
- [5] EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª. Ed. Rio de Janeiro, Embrapa, 2006. 306p.
- [6] ROUSE, J.W; HAAS, R.H; SCHELL, J.A; DEERING, DW, onitoring vegetation system in the great plains with ERTS. In: **EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM**, 3, 1973, Washington. **Proceedings**. Washington: NASA, 1973.
- [7] POVH, Fabricio Pinheiro. Gestão da adubação nitrogenada em milho utilizando sensoriamento remoto. **Tese de Doutorado**, [s.l.], p.1-108, 2011. Universidade de Sao Paulo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBiUSP.
- [8] GASPAROTTO, Aline de Carvalho et al. Utilização do índice de vegetação RNIR nas diferentes doses de nitrogênio em cultura agrícola. **Anais Xvii Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - Sbsr, João Pessoa-pb, Brasil, 25 A 29 de Abril de 2015, Inpe, Pb**, p.2435-2442, 2015.