Caracterização hiperespectral *in situ* do cafeeiro infectado por nematoides

George Deroco Martins[1,3]
Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo[1,2]
Bruno Sérgio Vieira[3]

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP/FCT
[1]Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas
[2]Departamento de CartografiaRua Roberto Simonsen, 305 – 19060-900 – Presidente Prudente - SP, Brasil
gderoco@yahoo.com.br, mlourdes@fct.unesp.br,

[3]Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Civil; Instituto de Ciências Agronômicas
brunovieiraiciag@gmail.com

Abstract. The productivity of coffee in Brazil depends on a set of factors that influence the development of culture, including the incidence of plant pathogens. Nematodes are parasites of the plants root system, responsible for considerable decrease in coffee productivity. For the detection and monitoring of nematode-infected areas, the approaches based on remote sensing have been increasingly used due to its ability to selectively record the spectral flux of electromagnetic radiation reflected by vegetation. In this sense, the objective of this work was to characterize the spectral response of healthy coffee and nematode-infected coffee plants in different degrees of severity. For this, radiometric measurements were obtained under controlled conditions and the spectral characterization of the healthy and infected plants was made by spectral analysis techniques, such as Spectral Angle Mapping (SAM). The reflectance curves generated show differences in magnitude that allowed only distinguish between the healthy and infected plants. The SAM supervised classification discriminate accurately healthy plants and under severe action of nematodes, but the spectral curves generated for plants with moderate and high infection levels showed increased degree of confusion in assigning their classes.

Palavras-chave: *In situ* spectroradiometer data, spectral analysis, SOM, coffee crop, nematodes. Dados espectrorradiométricos de campo, análise espectral, SOM, cultura cafeeira, nematoides.

1. Introdução

Atualmente o Brasil é o maior produtor mundial de café, com uma área plantada estimada em 2,7 milhões de hectares, o que corresponde aproximadamente a 6,7 bilhões de plantas. Com uma produção média de 50 milhões de sacas de 60 kg, o país é o principal exportador, respondendo por mais de um terço da produção mundial registrada no último ano. Em termos econômicos, o setor cafeeiro é responsável pela geração de milhões de empregos diretos e indiretos no país e por uma receita anual de 6,4 bilhões de dólares (EMBRAPA CAFÉ, 2013).

Segundo os índices da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), no ano de 2012 somente o estado de Minas Gerais contribuiu com 52,3 % da produção nacional, sendo a região sul do estado responsável por mais da metade deste montante (50,2 %). A produtividade do café em áreas brasileiras é afetada por um conjunto de fatores diretos e indiretos, incluindo fatores fisiológicos, parâmetros culturais e ambientais e ação de pragas e patógenos. Dos elementos relacionados, de acordo com Campos e Silva (2008), a ocorrência de fitopatógenos, como os nematoides, representa uma das principais causas da queda de produtividade na cultura do cafeeiro.Dentre as espécies de nematoides com maior ocorrência na cafeicultura brasileira têm-se aquelas do gênero *Meloidogyne*, as quais são parasitas do solo que atacam o sistema radicular da planta e causam uma brusca queda de produtividade (CASTRO e CAMPOS, 2004).

Além disso, aspectos relacionados com o aumento do plantio de cafeeiros em determinadas regiões, a movimentação interestadual de mudas de café e a condição perene da cultura contribuíram, nos últimos anos, para o aumento expressivo na incidência de espécies de nematoides na cultura do cafeeiro.

Neste quadro, baseando-se em fontes especializadas e relatórios anuais de produtividade que retificam a ocorrência de nematoides como um problema expressivo para a cultura cafeeira, verifica-se que inúmeros investimentos têm sido aplicados em pesquisas ao longo dos anos, com o objetivo de lançar novos cultivares mais produtivo e mais resistente a doenças. Com o mesmo propósito, registra-se uma motivação no desenvolvimento de tecnologias viáveis visando a detecção de fitopatógenos em campo ao longo do desenvolvimento do vegetal (BOECHAT, 2012).

Atualmente, o setor tecnológico tem direcionado esforços para incorporar técnicas de agricultura de precisão no monitoramento de fitonematoides em áreas agrícolas. Nesse segmento, o sensoriamento remoto uma tecnologia difundida por diversos pesquisadores em aplicações que vão desde a estimativa de produtividade agrícola até a detecção de áreas infestadas por fitonematoides (MARCHIORATO, 2008; BOECHAT, 2012; MARTINS, 2013).

O princípio utilizado no estudo da vegetação por sensoriamento remoto é a existência de relações entre respostas espectrais e radiométricas do seu dossel e os parâmetros que caracterizam o estado de crescimento da planta. As respostas radiométricas são captadas pelos sensores e utilizadas para inferir o crescimento da vegetação e o estado fisiológico do vegetal, ou seja, as medidas de reflectância são utilizadas, inclusive, para estimar danos causados por doenças em culturas agrícolas (JENSEN, 2009). Assim, o comportamento das plantas em diferentes situações de cultivo constitui uma informação relevante quando usada na elaboração de modelos de estimativa de danos baseados em medidas espectrais (HIKISHIMA et al., 2010). Nesse contexto,medidas espectrorradiométricas tomadas *in situ*, tem sido utilizadas na identificação de áreas agrícolas infectadas por fitopatógenos, pelo fato de as quais oferecerem maior detalhamento na descrição das características hiperespectrais dos alvos agrícolas, as quais refletem a características biofísicas da vegetação (JENSEN, 2009).

Com base no exposto e considerando-se que as características biofísicas da vegetação podem indicar o grau de infecção por nematoides em café e que o comportamento espectral está relacionado com tais características, o objetivo geral deste estudo foi caracterizar espectralmente a planta do cafeeiro sadio e infectada, por meio de medidas espectrorradiométricas obtidas em condições controladas.

2. Metodologia de Trabalho

Este estudo foi realizado em áreas de cultivo de café na região sudoeste de Minas Gerais, no munícipio de Monte Carmelo, o qual se situa no maior polo cafeeiro do país. A área experimental selecionada é constituída de talhões nos quais foi certificada a ocorrência de nematoides (centralizada nas coordenadas UTM 410979, 199 W e 7516401,397 N, Fuso 23), e possui aproximadamente 600 hectares. A análise nematológica de amostras coletadas nessa área comprovou a presença de dois gêneros de nematoides: *Meloidogyne* e *Pratylenchus*.

Com base nos sintomas que se manifestaram na parte aérea de plantas de cafeeiro infectadas por fitonematoides, foram identificadas plantas sadias e infectadas na área experimental e definidos, três estágios de infecção: moderado, alto e muito alto. Amostras de plantas de cafeeiro sadias e nos diferentes níveis de infecção são mostradas na Figura 1.

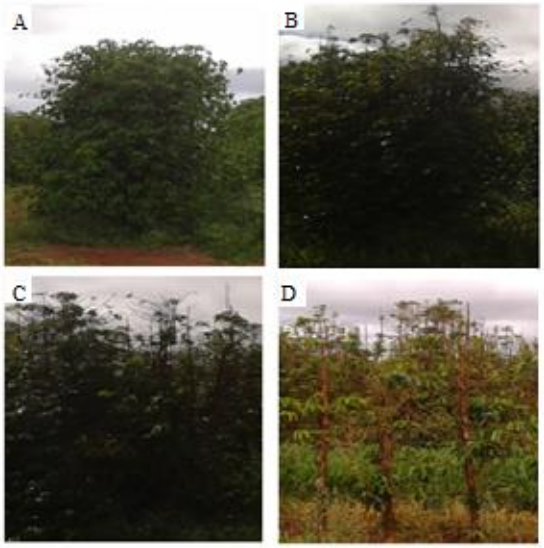

Figura 1. Plantas do cafeeiro sadio (A) e infectadas por nematoides em níveis crescentes de infecção: B - moderada, C- alta, D - muito alta.

Para aquisição de dados radiométricos, foram extraídas folhas de 24 cafeeiros, sendo seis plantas em cada condição estudada. Devido a diferentes condições de iluminação da planta, coletou-se uma folha em cada um dos quatro pontos cardeais da região do terço inferior basal por cafeeiro, ou seja, quatro folhas por planta.

Pouco antes da aquisição das medidas radiométricas, as folhas de plantas sadias e infectadas foram transportadas para um ambiente controlado (laboratório escuro), no qual foram realizadas as medidas usando um espectrorradiômetro ASD Fieldspec HandHeld, modelo UV/VNIR operando em um intervalo espectral de 375-1075nm, configurado em 512 canais. Nesse procedimento, utilizou-se uma fonte de luz constante halógena, a placa de referência de Sulfato de Bário (Spectralon) e um notebook dedicado para aquisição e armazenamento dos dados.

Durante a aquisição dos dados radiométricos, as folhas foram posicionadas a 50 cm de distância inclinada (45°) do espectrorradiômetro, o qual apresentava uma abertura angular de 1°. A fonte de luz formava um ângulo de 45° em relação vertical e 90° em relação ao espectrorradiômetro, conforme ilustrado na Figura 2. Em cada coleta de dados, as folhas foram dispostas na mesma posição e realizou-se dez repetições de leitura de radiância. Entre duas coletas de radiância das folhas, foi medida a radiância da placa de referência Spectralon.

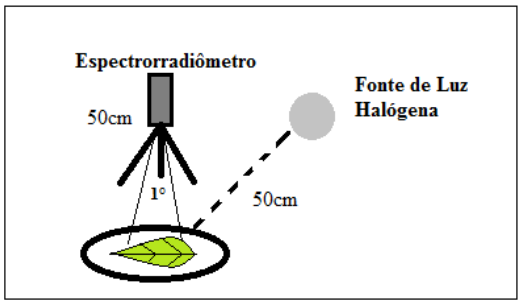

Figura 2. Geometria de aquisição de medidas radiométricas.

Os dados radiométricos obtidos em laboratório foram processados no *software ViewSpec ProTM*, da ASDIniciamente, conforme proposto por Nicodemus et al. (1977), os valores de radiância foram transformados em FRHC e calculada a média das dez repetições por folha, gerando uma única curva de FRHC por elemento amostral. Uma nova média foi

calculada a partir das medidas das quatro folhas avaliadas por planta, resultando em uma curva espectral para cada um dos 24 cafeeiros analisados. Essas curvas espectrais foram numeradas de acordo com a condição original da planta (c1 a c6 referem-se a plantas sadias; c7 a c12 plantas com moderada infecção por nematóides; c13 a c18, alta infeção e c19 a c24 nível de infecção muito alto).

A análise de curvas espectrais adquiridas de amostras de plantas sadias e em diferentes níveis de infecção permitem avaliar de os efeitos do grau de parasitismo por nematóides na resposta espectral da vegetação (MARCHIORATO 2008; MARTINS, 2013). Nesse sentido,, foram analisadas as discrepâncias entre as curvas médias de FRHC geradas para cada tipo de ocorrência investigado e aplicado o método de classificação supervisionada pelo mapeamento por ângulo espectral (*SAM – Spectral Angle Mapping*) nas 24 curvas de FRHC de cada cafeeiro, a fim de agrupar aquelas adquiridas de plantas nas mesmas condições (sadia, moderada, alta e muito alta infecção por nematoides.

O algoritmo SAM foi desenvolvido para mapear o grau de similaridade entre curvas espectrais geradas por sensores hiperespectrais a curvas de referência, representativas do fenômeno de interesse. O algoritmo calcula a similaridade espectral por meio do ângulo formado entre um espectro teste (*t*) e um espectro de referência (*r*), tratando-os como vetores em um espaço de dimensionalidade correspondente ao número de bandas do sensor (*nb*). Segundo Kruse et al. (1993), o cálculo consiste em usar o arcocosseno do produto escalar dos espectros para determinar o ângulo θ:

$$\theta = cos^{-1} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{(\sum_{i=1}^{nb} t_i^2)^{\frac{1}{2}} (\sum_{i=1}^{nb} r_i^2)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (1)$$

O algoritmo SAM, implementado em MATLAB, foi usado na classificação das 24 curvas espectrais de FRHC medidas para plantas do cafeeiro. Os membros de referência para cada classe foram definidos pelos espectros médios, calculados a partir de conjunto de seis curvas que representaram cada uma das quatro condições avaliadas. A classificação das curvas espectrais pelo SAM foi realizada considerando o intervalo de comprimento de onda entre 375 a 1075nm.

3. Resultados e Discussão

3.1 Caracterização Espectral do Cafeeiro Sadio e Infectado

As curvas de FRHC de cada um dos cafeeiros analisados são mostradas na Figura 3. Nessa figura, as curvas espectrais rotuladas como c1, c2, v3, c4, c5 e c6 correspondem a plantas sadias; c7, c8, c9, c10 c11 e c12 referem-se a plantas sob infeção moderada por nematódes; c13, c14, c15, 16, c17 e c18 são espectros obtidos em plantas altamente infectadas e c19 a c24 definem as plantas com grau de infecção muito alto. O intervalo de comprimento de onda considerado foi de 375 a 1070 nm.

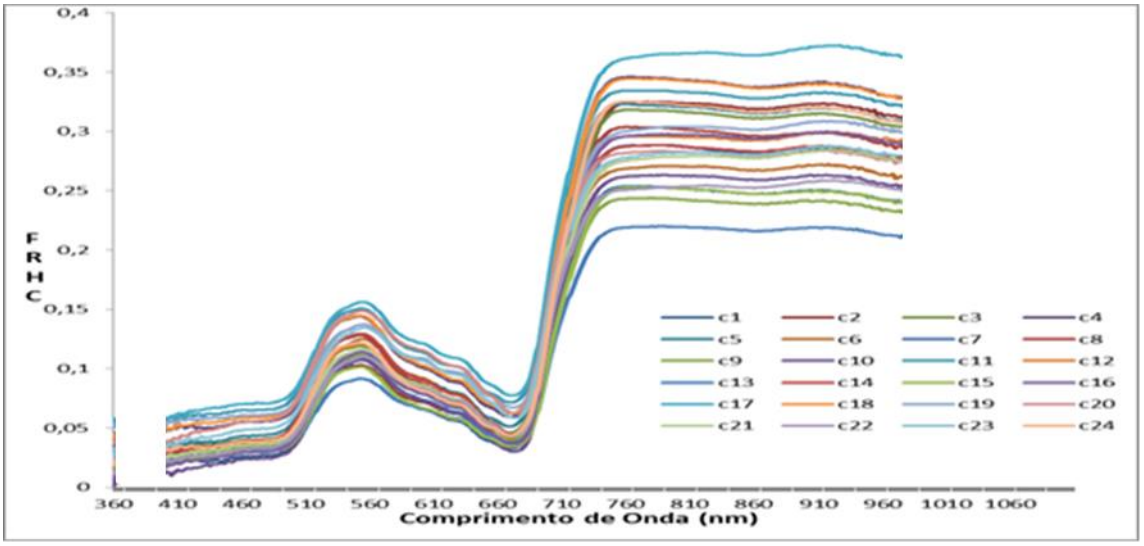

Figura 3. Curvas de FRHC medidas em plantas do cafeeiro sadio (c1 a c6), sob infecção moderada por nematoides (c7 a c12), com alto grau de infeção (c13 a c18) e muito alta nível de infecção (c19 a c24).

As curvas de FRHC mostradas na Figura 3 representam o comportamento padrão da vegetação em termos de faixas espectrais de absorção e espelhamento, tanto para plantas sadias quanto infectadas, diferenciáveis apenas por variações em magnitude. A maior variação nos valores de FRHC ocorre no intervalo do infravermelho próximo.

Uma representação das curvas médias calculadas a partir das seis medidas de FRHC realizadas para cada uma das ocorrências (Figura 4) permite uma primeira associação entre as diferentes intensidades aos níveis de infeção por nematoides.

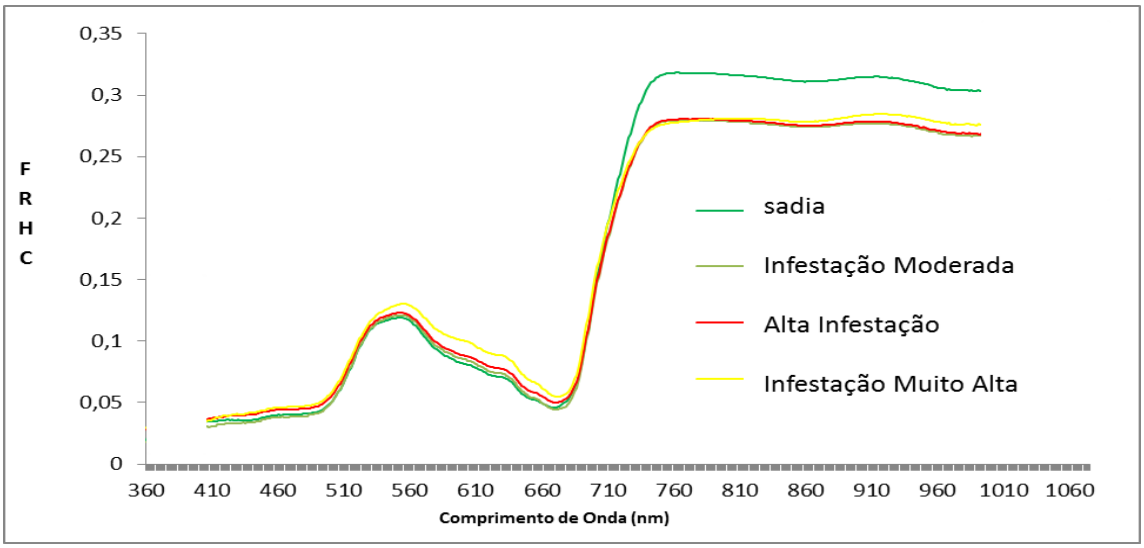

Figura 4. Curvas espectrais médias referentes aos cafeeiros sadios e sob diferentes graus de infecção por nematoides.

As curvas médias mostradas na Figura 4 indicam que na região do visível, especificamente entre 400 e 660nm, os níveis de infecção por nematoides alto e muito alto apresentaram maiores valores de FRHC. Entre 400 a 520nm, a curva espectral do cafeeiro com alta grau de infecção teve uma resposta maior do que aquela apresentada pela curva extraída de medidas das plantas moderadamente infectadas.

A maior resposta apresentada pelas curvas espectrais das plantas sujeitas a níveis de infecção alto e muito alto pode ser atribuída a diversos fatores relacionados à fisiologia do vegetal infectado, tais como a diminuição de clorofila foliar, mudança da estrutura interna da folha (SANTOS JUNIOR et al., 2002; MARCHIORATO, 2008).

Na região do verde, entre 510 a 560, com exceção da curva média das plantas em condição de muito alta infecção, percebe-se variação mínima nos valores de reflectância para as demais ocorrências. Esse comportamento da resposta espectral pode ser atribuído ao fato de que, visualmente, a folha do cafeeiro sadio apresenta um aspecto colorido similar ao do cafeeiro em níveis intermediários de infecção. Porém, tal comportamento para plantas mais comprometidas pela ação dos nematoides, pois nesse nível de infecçãoas plantas apresentam um aspecto visual bem característico, marcado por folhas cloróticas e amareladas.

Na região do infravermelho próximo (780nm a 1070nm) também são marcantes as diferenças no comportamento espectral médio das amostras analisadas. O cafeeiro sadio apresentou maior resposta que as plantas infectadas por nematoides, em todo o intervalo espectral considerado.

3.2 Agrupamento das curvas pelo SAM

A associação das curvas espectrais obtidas a parti das 24 plantas identificadas nas quatro condições fitossanitárias a um dos membros de referencia (curvas médias calculadas para plantas sadias e com graus moderado, alto e muito alto de infecção por nematoides), por meio da classificação supervisionada pelo SAM, resultou na associação correta das seis curvas espectrais a plantas sadias. Porém, alguns equívocos ocorreram na atribuição das demais curvas às respectivas classes definidas para os três níveis de infecção por nematoides considerados.

Para expressar os erros e concordâncias no processo de classificação pelo SAM, no contexto deste estudo, elaborou-se a matriz de confusão mostrada na Tabela 1. As linhas da matriz expressam o resultado da classificação, enquanto que as colunas indicam o estado de infeção da planta por ocasião da tomada dos dados espectrorradiométricos.

Tabela 1. Matriz de confusão da classificação pelo SAM.

		Estado de infeção da planta por nematoides				
		Sadia	Moderado	Alto	Muito alto	*TOTAL*
Classificação SAM	Sadia	6	-	-	-	6
	Moderado	-	4	2	-	6
	Alto	-	2	4	1	7
	Muito alto	-	-	-	5	5
	TOTAL	6	6	6	6	24

A única classe que teve todas as curvas espectrais corretamente agrupadas no processo de classificação foi aquela que correspondente cafeeiro sadio. Esse resultado confirma a possibilidade de discriminar plantas sadias daquelas infectadas por nematoides por meio da classificação pelo SAM.

Porém, a Tabela 1 mostra que a discriminação entre níveis de infecção é menos acurada. Para as classes de infecção moderada e alta quatro curvas foram corretamente agrupadas nas suas respectivas classes. Já a classe correspondente à infecção severa (muito alta) cinco curvas espectrais foram corretamente classificados. A tabela 1 indica, também, um maior erro de inclusão para a classe alta infecção (0,43) e mostra que essa classe se confunde com as demais classes definidas para plantas infectadas por nematoides, principalmente, para níveis de infecção moderados. Em suma, o resultado sugere que há margem para confusão

visual em campo quando da definição dos níveis de infecção e no processo de separação das amostras para as medidas radiométricas.

5. Conclusões

Com procedimento de aquisição e análise de dados hiperespectrais, com base nas medidas espectrorradiométricas realizadas em amostras de plantas infectadas em diferentes níveis de infecção por nematoides e de plantas sadias, foi possível caracterizar espectralmente quatro condições fitossanitárias do cafeeiro e indicar os intervalos de comprimento de onda que melhor discriminaram a planta sadia daquela infectada por nematoides.

A caracterização espectral, na região espectral do visível, indicou que o intervalo do vermelho resultou em maior discriminação entre as cinco ocorrências. Porém, a região espectral que melhor discriminou as áreas afetadas pelos fitopatógenos do solo do cafeeiro sadio foi o intervalo do infravermelho próximo, no qual foram observadas as maiores discrepâncias entre as curvas de FRHC geradas.

Por meio da classificação das curvas pelo mapeamento do ângulo espectral (*SAM*), também foi possível discriminar quatro classes espectrais, com a ressalva de que, para as plantas sob diferentes níveis de infecção algumas curvas espectrais foram agrupadas em classes diferentes das utilizadas para gerar as curvas médias de FRHC representativa de cada uma das ocorrências de nematoides.

Referências

BOECHAT, L. T. **TÉCNICA DE SENSORIAMENTO REMOTO NA DETECÇÃO DO MOFO BRANCO E DA MANCHA-ANGULAR NO FEIJOEIRO.** 2012. 128 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, 2012.

CAMPOS, V.P., SILVA, J.R.C. Management of *Meloidogyne spp*.in coffee plantations. In: Souza, R.M. (Ed.), **Plant-parasitic Nematodes of Coffee**. Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 149–164. 2008.

CASTRO, J.M.C; V.P. CAMPOS. Detecção de *Meloidogyne paranaensis* em cafeeiros do Sul de Minas Gerais. **Summa Phytopathologica**, v.30 n.4, p. 507. 2004.

CHO, M. A.; SKIDMORE, A. K. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method. **Remote Sensing of Environment**, n.101, p.181-193. 2006.

CHO, M. A.; SKIDMORE, A. K.; ATZBERGER, C. Potential utility of the spectral red-edge region of SumbandilaSat imagery for assessing indigenous forest structure and health. **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation.** p. 85-93. 2012.

CLEVERS, J. G. **Imaging Spectrometry in Agriculture: Plant Vitality and Yield Indicators**, Dordrechet, Netherlands: Kluwer Academic, p. 193-219, 1994.

EMBRAPA CAFÉ. **Manual da Cafecultura**. 2013. disponível em: www.embrapa.br/cafe.

KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J. W.; HEIDEBRECHT, K. B.; SHAPIRO, A. T.; BARLOON, P. J.; GOETZ, A. F. H. The spectral Image-Processing System (Sips) - interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. Remote Sensing of Environment, v.44, p.145-163, 1993.

HIKISHIMA, M. CANTERI, M. G.; GODOY, C. V.; KOGA, L. J.; SILVA, A. J. Quantificação de danos e relações entre severidade, medidas de reflectância e produtividade no patossistema ferrugem asiática da soja. **Tropical plant pathology**, v. 35, n. 2, p.96-103., 2010.

HILLNHÜTTER, C.; MAHLEIN, A. K.; STEINER, U.; DEHNE, H. W.; OERKE, E. C. Remote sensing to detect plant stress induced by Heterodera schachtii and Rhizoctonia solani in sugar beet fields. **Field Crops Research**, p. 70-77. jan. 2011.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução da 2ª ed. por (pesquisadores do INPE): José Carlos N. Epiphanio (coordenador); Antonio R. Formaggio; Athos R. Santos; Bernardo F. T. Rudorff; Cláudia M. Almeida; Lênio S. Galvão. São José dos Campos: Parêntese. 672 p, 2009.

MARCHIORATO, Ivo Aurélio. **MAPAS DE VARIABILIDADE DO POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE OBTIDOS POR SATÉLITES COMO INSTRUMENTOS AUXILIARES ÀS DECISÕES SOBRE O MANEJO DE NEMATÓIDES NA CULTURA DE SOJA:** Unesp. 2008. 55 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Unesp, Jaboticabal, 2008.

MARTINS, George Deroco. **CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL E ESPACIAL DE ÁREAS INFESTADAS POR NEMATOIDES E MIGDOLUS FRYANUS EM CULTURA CANAVIEIRA**. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Cartográfica, Unesp, Presidente Prudente, 2013.

SANTOS JUNIOR, R.F.; SANTOS, J.M.; RUDORFF, B.F.T.; MARCHIORATO, I.. Detecção de *Heterodera glycines* em plantio de soja mediante espectrorradiometria no visível e infravermelho próximo. **Fitopatologia Brasileira**, p. 355-360. 2002.