

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU**

**IMAGENS HIPERESPECTRAIS NO MONITORAMENTO DA NUTRIÇÃO EM
CITROS**

ANA PAULA BARBOSA

Engenheira Agrônoma

Orientadora: Prof. Dr. Célia Regina Lopes Zimback

Co-orientador: Prof. Dr. Roberto Lyra Villas Bôas

Supervisor no exterior: Arnold Walter Schumann

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP

Junho – 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Barbosa, Ana Paula, 1983-
B238i Imagens hiperspectrais no monitoramento da nutrição em citros / Ana Paula Barbosa. - Botucatu : [s.n.], 2014
 xii, 81 f. : ils. color., grafs., tabs., fots. color.

 Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2014
 Orientador: Célia Regina Lopes Zimback
 Coorientador: Roberto Lyra Villas Bôas
 Inclui bibliografia

 1. Citros - Nutrição. 2. Nitrogênio na agricultura. 3. Imagens de sensoriamento remoto. 4. Agricultura de precisão. I. Zimback, Célia Regina Lopes. II. Bôas, Roberto Lyra Villas. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “IMAGENS HIPERESPECTRAIS NO MONITORAMENTO DA
NUTRIÇÃO EM CITROS”

ALUNA: ANA PAULA BARBOSA

ORIENTADOR: PROFA. DRA. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROFA. DRA. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK



PROF. DR. PAULO MILTON BARBOSA LANDIM



PROF. DR. EDSON LUÍS PIROLI



PROF. DR. RODRIGO JOSÉ PISANI



PROF. DR. LUIS GUSTAVO FREDIANI LESSA

Data da Realização: 02 de junho de 2014.

“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado.”

(Roberto Shinyashiki)

Aos meus amados pais,

Sebastião Barbosa e Lucilia Cavaleiro Barbosa

deixo aqui a minha eterna gratidão por todo amor a mim dedicado, pela paciência e apoio incondicional para que tão longe eu pudesse chegar.

Aos meus irmãos,

Luciano Barbosa e Rodrigo Barbosa,

Obrigada pelos ensinamentos de vida. Conquistamos mais um título!

... dedico.

AGRADECIMENTO ESPECIAL

À minha orientadora **Profa. Dra. Célia Regina Lopes Zimback**, as mais ternas palavras não seriam capazes de expressar minha gratidão por estes anos de amizade, carinho e ensinamentos. Ao longo da minha pós graduação, cada novo aprendizado foi como um pedacinho de retalho. Hoje, graças à você, espero ser capaz de costurar uma linda manta de patchwork, repleta de amor e conhecimentos. Mil vezes e para sempre, *muito obrigada!*

“Nossas vidas são como colchas – um pouquinho de alegria e de tristeza, costurados com amor.”

(Autor desconhecido)

To **Dr. Arnold Walter Schumann**, thank you for your guidance and supervision during my internship experience in Florida. I had a really great time working in your lab and being part of your staff.

Ao querido **Prof. Dr. Roberto Lyra Villas Bôas**, que com toda sua simpatia e atenção me contribuiu para a idealização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agrônômicas/UNESP, Campus de Botucatu-SP, por meio da Coordenação do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Energia na Agricultura, pela oportunidade de realizar meus estudos de pós-graduação.

À Universidade da Flórida pelo apoio na realização do experimento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão das bolsas de “Doutorado no país” e “Programa Institucional de Doutorado Sanduíche no Exterior PDSE – Processo BEX: 8860/12-2”, que permitiram a realização deste tese.

To my friends MSc. Laura J. Waldo and Marcos Frateschi de Lima for their help at different stages of this work and for providing friendly environment.

To my dear Antoine Gady for the support and care he had provided me during this work. Thanks for making my days in Florida memorable and also for showing me that long-distance relationship can work.

Aos membros da banca: Prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim, Prof. Dr. Edson Luís Piroli, Prof. Dr. Luís Gustavo Frediani Lessa e Dr. Rodrigo José Pisani pela disponibilidade para avaliação deste trabalho e pelas importantes sugestões dadas.

Aos colegas do Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas – GEPAG, que me proporcionaram anos de aprendizado, carinho e companheirismo, ensinando-me o quão maravilhoso é conviver com os amigos. E também que quanto mais culturalmente diferente melhor!! Concordam: Ceará, Espírito Santo, Goiás, Minas Gerais e Rio Grande do Sul?!

Aos Professores e funcionários do Departamentos de Solos e Recursos Ambientais, pela agradável convivência e amizade.

Aos funcionários da biblioteca e às secretárias da Seção de Pós Graduação, pela atenção e dedicação ao longos destes anos.

Aos queridos professores e amigos que compartilharam comigo mais essa etapa de minha vida e que com seus conselhos, idéias e atitudes contribuíram para meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

À todos meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTO ESPECIAL	IV
AGRADECIMENTOS	V
SUMÁRIO	VII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE EQUAÇÕES	XII
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO	5
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	7
4.1 A Citricultura no Estado da Flórida, Estados Unidos da América (EUA).....	7
4.2 O Sensoriamento Remoto Hiperespectral na Agricultura.....	9
4.2.1 Conceitos de Radiometria.....	12
4.3 Importância da adubação nitrogenada para a cultura da laranja.....	14
4.3.1 Deficiência de macronutrientes em citros: Nitrogênio (N).....	14
4.4 Monitoramento do estado nutricional de plantas quanto ao comportamento espectral.....	16
4.4.1 Medida indireta do conteúdo de clorofila foliar	18
4.4.2 Índices de vegetação	21
5 MATERIAL E MÉTODOS	27
5.1 Material.....	27
5.1.1 Caracterização da área de estudo	27
5.1.2 Aquisição das Imagens Hiperespectrais	30
5.1.3 Sistemas de Informação Geográfica e Equipamentos	32
5.2 Métodos Empregados.....	33
5.2.1 Coleta e análise das folhas	33
4.2.2 Estimativas do Teor de Clorofila Foliar	35

5.2.3 Determinação do Nitrogênio Foliar	36
5.2.4 Pré-Processamento das imagens hiperespectrais	37
5.2.4.1 Georreferenciamento	37
5.2.4.2 Correção Atmosférica	37
5.2.5 Medidas de reflectância espectral	39
5.2.5.1 Laboratório	39
5.2.5.2 Nível Terrestre (campo)	41
5.2.5.3 Nível Sub-orbital (imagens)	42
5.2.5.3.1 Perfil Espectral	42
5.2.5.3.2 Índices de Vegetação	42
5.3 Análise dos dados.....	44
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
6.1 Análise Foliar.....	48
6.2 As relações entre teor de N-foliar, medidas SPAD, NDVI _(campo) e 670 nm.....	50
6.3 Colorimetria	51
6.4 Análise do perfil espectral das imagens hiperespectrais para as bandas selecionadas.....	54
6.5 Os resultados da análise de regressão linear múltipla entre os dados de verdade terrestre os índices de vegetação.....	56
7 CONCLUSÃO.....	68
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXOS	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro Eletromagnético.	12
Figura 2. Sintoma de deficiência de nitrogênio em folha de citros: (a) folha sadia, (b) folha com deficiência.....	15
Figura 3. Seção transversal de uma folha.	17
Figura 4. Curva de reflectância espectral típica de uma folha verde e sadia.....	18
Figura 5. Localização da área de estudo nas cidades de Lake Alfred e Auburndale, Polk County, Flórida, EUA.	28
Figura 6. Ilustração das árvores amostradas nos blocos A, B, C e D.....	29
Figura 7. Aeronave utilizada no imageamento.....	31
Figura 8. Sistema de imageamento hiperespectral e multiespectral.....	31
Figura 9. Equipamento GPS SX Blue II-B utilizado no georreferenciamento das amostras.	33
Figura 10. Amostragem georreferenciada do Bloco A, em um pomar de produção comercial de laranja – variedade Valência, nas cidades de Lake Alfred, Flórida, EUA.	34
Figura 11. Leituras dos valores SPAD correspondentes às medidas indiretas do teor de clorofila na folha.....	36
Figura 12. Lonas de calibração de diferentes níveis de cinza instaladas no pomar.	38
Figura 13. Curva espectral resultante da correção atmosférica por Calibração Linear Empírica correspondente a um ponto antes (a) e depois (b) da correção ser aplicada.....	38
Figura 14. Espectrorradiômetro portátil de fibra óptica de alta resolução (Modelo EPP2000-HR) e programa SpectraWiz.	40
Figura 15. Representação do modelo CIE Lab.....	40
Figura 16. Unidade de sensor óptico portátil GreenSeeker.	41
Figura 17. Exemplificação da técnica de Análise de Componentes Principais utilizada na redução da dimensionalidade em dados de sensoriamento remoto hiperespectral.....	44
Figura 18. Correlação entre teores de N-foliar (%) e medidas SPAD.....	51
Figura 19. Análise de componentes principais de parâmetros de colorimetria, considerando 102 amostras distribuídas em 4 blocos e 5 níveis de teor de nitrogênio.	53

Figura 20. Comportamento do perfil espectral das amostras distribuídas nos blocos A, B, C e D	55
Figura 21. Índices de vegetação (a) MCARI, (b) TCARI, (c) mSR ₇₀₅ , (d) NDVI e (e) RVI ₁ aplicados ao bloco A.....	62
Figura 22. Índices de vegetação (a) MCARI, (b) TCARI, (c) mSR ₇₀₅ , (d) NDVI e (e) RVI ₁ aplicados ao bloco B.	63
Figura 23. Índices de vegetação (a) MCARI, (b) TCARI, (c) mSR ₇₀₅ , (d) NDVI e (e) RVI ₁ aplicados ao bloco C.	64
Figura 24. Índices de vegetação (a) MCARI, (b) TCARI, (c) mSR ₇₀₅ , (d) NDVI e (e) RVI ₁ aplicados ao bloco D.....	65
Figura 25. Mapas temáticos da análise de tendência para os blocos A, B, C e D, respectivamente.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos blocos quanto à idade de plantio, porta-enxerto, manejo da adubação, irrigação e localização	30
Tabela 2. Diretrizes para a interpretação de análise foliar de laranjeira com base em folhas de 4 a 6 meses de idade, de ramos sem frutos (Koo et al., 1984)	37
Tabela 3. Índices de vegetação estudados	43
Tabela 4. Alcance das bandas selecionadas pela Análise de Componentes Principais	45
Tabela 5. Valores médios de teor de N-foliar nas plantas	49
Tabela 6. Valores médios de das medidas SPAD nas plantas	49
Tabela 7. Valores médios de teor de NDVI _(campo) nas plantas	49
Tabela 8. Correlações entre teores de N-foliar (%), medidas SPAD, NDVI _(campo) e comprimento de onda 670 nm	50
Tabela 9. Valores médios de luminosidade, intensidade a* e intensidade b*	52
Tabela 10. Resultado da análise de componentes principais para a colorimetria.....	54
Tabela 11. Resultados da análise de regressão linear entre os dados de verdade terrestre e os índices de vegetação.....	57

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Reflectância.....	13
Equação 2. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI).....	22
Equação 3. Green Normalized Difference Vegetation Index GNDVI).....	22
Equação 4. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada na Borda Vermelha (Red Edge Normalized Difference Vegetation Index - NDVI705).....	23
Equação 5. Double-peak Canopy Nitrogen Index DCNI).....	23
Equação 6. Índice Razão Simples Modificado na Borda Vermelha (Modified Red Edge Simple Ratio - mSR705).....	24
Equação 7. Índice Vogelmann de Borda Vermelha 1 (Vogelmann Red Edge Index 1 - VOG1).....	24
Equação 8. Ratio Vegetation Index (RV1 e RV2)	25
Equação 9. Índice de Vegetação Ótimo (Optimal Vegetation Index VIopt).....	25
Equação 10. Índice de Absorção de Clorofila Modificado (Modified Chlorophyll Absorption in the Reflectance Index – MCARI).....	25
Equação 11. Índice de Absorção de Clorofila Transformado (Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index – TCARI).....	25
Equação 12. Análise de regressão linear múltipla.....	46

1 RESUMO

Muitos estudos em sensoriamento remoto tem por objetivo identificar as diferenças varietais, prever o rendimento, identificar deficiências nutricionais das culturas, estimativas de área de culturas e outras informações espectrais. O imageamento hiperespectral sub-orbital é uma ferramenta potencial para monitorar o estado nutricional das plantas cítricas, uma vez que esta tecnologia tem mostrado eficientemente a deficiência de nitrogênio em outras culturas. Portanto, isso contribui para reduzir custos, tempo e trabalho quando usado em grandes áreas. Os principais objetivos deste estudo foram: (i) determinar o comportamento espectral em pomares de citros em imagens hiperespectrais de alta resolução coletados com aeronaves; (ii) analisar a correlação entre características da planta e parâmetros radiométricos, especialmente do estado nutricional de nitrogênio de pomares de citros. O experimento foi conduzido em pomares localizados em Lake Alfred e Auburndale, Polk County, Flórida, EUA. A variedade estudada foi a Valência (*Citrus sinensis*). As imagens hiperespectrais consistem de 128 comprimentos de onda do visível e do infravermelho próximo (457,2 - 921,7 nm). Dados detalhados de verdade terrestre foram coletados no mesmo período em que as imagens, para avaliar a nutrição foliar de pomares de citros. As características espectrais das árvores individuais foram identificadas utilizando valores de reflectância espectral média com base em pixel, em vários comprimentos de onda da imagem. As imagens hiperespectrais e a verdade de campo foram avaliadas com estatística, SIG e ferramentas de modelagem, como os índices de vegetação (NDVI, NDVI₇₀₅, RVI, VOG₁, entre outros). Os métodos Regressão Linear Múltipla *Backward* e Análise de Componentes Principais (PCA) foram utilizados para desenvolver modelos de predição para nitrogênio nas folhas. A combinação dos métodos empregados Os índices de vegetação MCARI, TCARI e mSR₇₀₅ apresentaram correlação

forte de 87% com as medidas SPAD e mostraram-se sensíveis à concentração de clorofila foliar. Os resultados desta pesquisa contribuirão para com o desenvolvimento de técnicas rápidas de detecção do estado nutricional em grandes áreas de citros, com o intuito de reduzir a necessidade de amostragem de foliar, que tem um alto custo financeiro e é incompleta, e de análises laboratoriais.

Palavras chave: índices de vegetação, nitrogênio, SIG, sensoriamento remoto, agricultura de precisão.

AIRBORNE HYPERSPECTRAL IMAGERY TO MONITOR THE NUTRIENT STATUS OF CITRUS ORCHARDS. Botucatu, 2014. 81p. Thesis (Doctorate in Agronomy / Energy in Agriculture) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: Ana Paula Barbosa

Advisor: Célia Regina Lopes Zimback

Co-advisor: Roberto Lyra Villas Bôas

Internship supervisor: Arnold Walter Schumann

2 SUMMARY

Many studies in remote sensing aim to identify varietal differences, predict yield, identify crop nutrition deficiencies, crop area estimates, and other spectral information of crops. Airborne hyperspectral imagery is a potential tool to monitor the nutrient status of citrus trees, since this sensing technology has been shown to efficiently detect nitrogen deficiency in other crops. Therefore, it contributes to save cost, time and labor when used over large areas. The objective of this study was: (i) to determine the spectral behavior of a citrus orchard in high resolution hyperspectral imagery collected with aircraft; (ii) to analyze the correlation between plant parameters and radiometric parameters, especially of the nitrogen nutritional status of citrus orchards. The experiment was conducted in orchards located near Lake Alfred and Auburndale, Polk County, Florida, USA. The variety studied is Valencia (*Citrus sinensis*). Hyperspectral images consist of 128 visible and near-infrared wavelengths (457.2 – 921.7 nm). Detailed ground truth data were collected at the same time as the imagery for assessing foliar nutrition of citrus groves. The spectral features of the individual trees were identified using pixel-based average spectral reflectance values at several wavelengths from the image. Hyperspectral images and ground truth data were assessed with statistical, GIS and modeling tools, i.e. Vegetation Index (Normalized Difference Vegetation Index, Red Edge Normalized Difference Vegetation Index, Modified Red Edge Simple Ratio, Vogelmann Red Edge Index 1, and others.). The methods Backward Multiple Linear Regression and Principal Component Analysis (PCA) were used to develop prediction models for leaf nitrogen. These results will contribute to the development of rapid detection techniques of nutritional status in

citrus groves, in order to reduce the sampling procedures for foliar analysis, which has a high financial cost and is incomplete; and laboratory analysis.

Key words: vegetation indices, nitrogen, GIS, remote sensing, precision agriculture.

3 INTRODUÇÃO

Dentro do cenário mundial da citricultura, destaca-se a agricultura de precisão, com um pacote de tecnologias que priorizam a sustentabilidade dos pomares, de modo a otimizar os recursos de produção vegetal. A diversidade do conhecimento de novas técnicas e produtos, bem como sua aplicação deve criar condições de maior eficiência do sistema produtivo, como a redução do uso de herbicidas por meio do equilíbrio nutricional e do solo, aprofundamento do sistema radicular, otimização do uso da água e fertilizantes.

A aplicação das técnicas de sensoriamento remoto para a agricultura de precisão consiste em obter, com a devida precisão, informações que definem a variabilidade e que normalmente dizem respeito à cultura e ao solo (MOLIN, 1997).

Para a avaliação da fertilidade do solo e a determinação da quantidade de nutrientes para as plantas, o método mais utilizado ainda é a análise química. A quantidade de massa seca por planta ou o teor de nitrogênio (N) no tecido vegetal são formas precisas de expressar a possível resposta da planta ao N aplicado. Entretanto, o custo destas análises é alto, sendo um dos principais entraves para a prática da agricultura de precisão.

Além disso, a coleta de amostras é uma prática que demanda tempo, pois para uma boa representação do estado nutricional de um talhão muitas folhas devem ser amostradas.

Assim, o estudo da variabilidade espacial da disponibilidade de nutrientes minerais em solos agrícolas tornou-se uma ferramenta eficiente para a introdução de novas práticas de adubação. Para o caso do nitrogênio, é requisito necessário a quantificação do estado nutricional das plantas antes da aplicação do fertilizante.

Com a utilização de instrumentos que permitam caracterizar as propriedades ópticas da folha e do dossel de plantas, busca-se agilizar as avaliações no campo do estado nutricional das plantas.

Dentre estes tem-se a técnica de sensoriamento remoto, cujo principal estudo visa a classificação e estimativa de áreas, discriminação de variedades, estimativa de produtividade e o comportamento espectral das culturas agrícolas.

A carência de técnicas e recursos mais simples e rápidos, que contribuem com o monitoramento da fertilidade em áreas de citros, dificulta a mensuração dos efeitos da aplicação de insumos. Isso justifica o esforço em desenvolver novas ferramentas de avaliação do comportamento das culturas agrícolas.

Desse modo, a transformação de dados espectrais em índices de vegetação, que tem por função discriminar a variável em estudo (status nutricional) e minimizar diferentes fatores de variação (arquitetura do dossel, influência dos solos, estágio fenológico da vegetação, entre outros), tem por finalidade buscar uma melhor compreensão das variações observadas nas imagens, assim como, permitir que sejam feitas verificações das modificações apresentadas na cobertura vegetal.

A hipótese deste estudo foi de que é possível discriminar as classes de teor de nitrogênio em laranjeira por meio de índices de vegetação, obtidos por sensoriamento remoto sub-orbital.

Para verificá-la, considerando-se que algumas características das plantas podem ser determinadas por sua energia eletromagnética refletida e emitida, os objetivos do trabalho são:

- estudar o comportamento espectral do citros em imagens hiperespectrais;
- estabelecer correlações entre os teores de clorofila e de N nas plantas com os valores de reflectância obtidos nas imagens e no campo;
- avaliar a aplicação da colorimetria para discriminar plantas com sintomas foliares de deficiência nutricional;
- analisar a interação de parâmetros radiométricos da planta de citros com parâmetros de seu estado nutricional, com referência ao nitrogênio.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 A Citricultura no Estado da Flórida, Estados Unidos da América (EUA)

A citricultura é de grande importância econômica e social, pois apresenta participação significativa na geração de empregos, na ocupação de terra, formação de renda, ativação dos elos da cadeia produtiva, captação de divisas e desenvolvimento regional de outros setores da economia (prestação de serviços, transportes, comércio, etc.).

As frutas cítricas de predomínio comercial no Estado da Flórida são do grupo das laranjas doces (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) com predominância das variedades Valência, Navel e Hamlin. Para a citricultura, os solos profundos e permeáveis, com boa fertilidade (pouco ácidos e com ampla reserva de nutrientes) permitem maior desenvolvimento das árvores e maior produção de frutos (MATTOS JUNIOR et al., 2005).

No início da primeira década do século XXI, os Estados Unidos eram os maiores produtores mundiais de laranja, quando o Estado da Flórida chegou a produzir 87% da safra paulista (safra 2003/2004). Entretanto, na safra 2009/10 não atingiu a metade da produção, devido aos fatores climáticos e fitossanitários, resultantes da passagem de furacões nos anos de 2004 e 2005, que espalhou doenças como o cancro cítrico e o greening, cujo controle é a erradicação (NEVES et al., 2010).

O greening (huanglongbing - HLB) é considerado uma doença devastadora de citros com altos custos econômicos para a indústria citrícola no mundo, em função da dificuldade de controle, da rápida disseminação e por ser altamente destrutiva. Esta doença é causada por uma bactéria '*Candidatus liberibacter spp*' que se hospeda nos vasos

de circulação da seiva elaborada, o floema. Os sintomas incluem clorose e/ou manchas nas folhas; brotos amarelados; bloqueio dos vasos; crescimento atrofiado; crescimento pobre das raízes; frutos pequenos e malformados; e, por fim, a morte (BOVÉ, 2006).

A incidência do greening na Flórida resultou na queda no número de árvores. Desde 2004/05, houve uma redução de 23% no número destas, totalizando a perda de aproximadamente 17 milhões de plantas (USDA - United States Department of Agriculture, 2013). Outro fator que contribuiu para esta queda foi a carência na renovação dos pomares. Aproximadamente 45% das árvores tem mais de dez anos e o número de árvores jovens, com no máximo dois anos, não passa de 10%. Esse aumento na idade média dos pomares reflete na produtividade das árvores, que também vem diminuindo (NEVES et al., 2010).

Na safra 2012/2013, a área ocupada com laranja no mundo foi de 4,189 milhões de hectares produzindo 49,40 milhões de toneladas de laranja. O Brasil e os EUA juntos responderam por aproximadamente 50% da oferta mundial de laranja (24,70 milhões toneladas) (USDA, 2013; FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012).

Nos Estados Unidos estima-se que na safra 2012/2013 foram produzidas 191.888 milhões de caixas de laranja, numa área de 248.072,18 hectares (613.000 acres) (USDA, 2013). O Estado da Flórida contribuiu com 133.600 milhões de caixas, equivalente a 6,02 milhões de toneladas, em 198.134 hectares (489.600 acres), sendo o maior produtor americano (PLATTNER, PEREZ, 2013).

Depois do Brasil e dos Estados Unidos, China, Índia, México, Egito e Espanha são os maiores produtores. Estes 7 países produzem 68% de toda a laranja disponível no mundo, embora utilizem suas produções de maneiras diferentes (FDOC - Florida Department of Corrections, 2012).

Segundo dados publicados pela USDA (2013), a produção de laranja na Flórida para a safra 2012/2013 foi de 67 milhões de caixas de laranjas não-Valência (variedades precoce, meia-estação, Navel e Temple) e 67 milhões de caixas de laranja Valência. Esta safra foi menor do que a produção das duas safras anteriores e apenas um pouco superior do que a safra de 2009/2010.

A queda da produtividade em função de problemas fitossanitários, somada aos problemas de restrição e encarecimento de mão de obra, contaminação de lençóis freáticos, valorização das terras, e a outros relacionados aos riscos climáticos como secas, furacões e invernos rigorosos, vem desanimando os citricultores americanos (NEVES et al., 2010).

A disponibilidade de ferramentas para um monitoramento constante das áreas citrícolas, permite tomada de decisões rápidas e abrangentes, de forma a favorecer a manutenção desta exploração em níveis internacionalmente competitivos (ASN – Agência SEBRAE de Notícias, 2004; SANCHES et al., 2005).

4.2 O Sensoriamento Remoto Hiperespectral na Agricultura

O final do século XX foi marcado por uma grande mudança no sensoriamento remoto: os dados hiperespectrais. Esses dados modificaram a compreensão e os procedimentos usuais sobre processamento de imagens, pois passaram da dimensão de algumas poucas bandas para a dimensão de centenas de bandas, contínuas no espectro da reflectância.

Novo (2008) definiu o sensoriamento remoto como sendo a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações.

O sensoriamento remoto hiperespectral possibilita a extração das feições espectrais de reflectância/absorção nas imagens que identificam a composição dos materiais, do mesmo modo em que é feita a análise dos espectros de reflectância obtidos com os espectrorradiômetros. Por processamento, um detalhado espectro de reflectância pode ser obtido de cada pixel, visto que cada pixel da imagem tem o registro da radiância do alvo medida por centenas de bandas (BAPTISTA, 2012).

As imagens hiperespectrais têm larguras espectrais muito estreitas, normalmente da ordem de 10 nm, pelo fato de ultrapassarem centenas de bandas, o que implica numa total mudança na forma de processamento dos dados. A elaboração de uma composição colorida com alto contraste dos alvos não é um processo tão simples, pois as bandas de um sensor hiperespectral possuem alta correlação espectral (BAPTISTA, 2012).

O ETM+/Landsat-7 e o TM/Landsat-5 são sensores remotos multiespectrais tradicionais, que produzem imagens de baixa resolução espectral, com bandas abrangendo centenas de nanômetros de largura ($1000 \text{ nm} = 1 \text{ }\mu\text{m}$), cujos espectros de

reflectância de cada pixel muitas vezes carecem da informação espectral essencial (SOUZA FILHO, 2004).

Atualmente, há vários sensores hiperespectrais em funcionamento, porém a maioria são aerotransportados. A partir de 2000, experiências e tentativas têm sido feitas no sentido de demonstrar a viabilidade do imageamento hiperespectral a bordo de satélites. Os resultados registrados são muito promissores. Em operação, existem alguns sensores hiperespectrais do tipo orbital: o Compact High Resolution Imaging Spectrometer (CHRIS) (bandas visível e infravermelho próximo), a bordo do micro-satélite europeu PROBA, e o Hyperion Imaging Spectrometer, a bordo do satélite americano EO-1 (SOUZA FILHO, 2004).

O uso de sensores orbitais tem-se tornado uma opção na agricultura de precisão, devido a aplicação de novos conhecimentos no meio rural, que auxiliam o produtor a identificar estratégias para aumentar a eficiência no gerenciamento da agricultura, maximizando a rentabilidade das colheitas e tornando o agronegócio mais competitivo.

O espectro de reflectância na região de 400 a 2500 nm pode ser usado para identificar diversas classes de materiais de cobertura da superfície que não podem ser identificadas com sistemas de imageamento de banda larga ou baixa resolução espectral (JENSEN, 2009). Por isso, foram criados os sistemas de sensores hiperespectrais, planejados para operarem com centenas de bandas, permitindo que os objetos possam ser identificados ou mesmo discriminados por meio de suas diferenças de reflectâncias. Dessa forma, para a interpretação de imagens hiperespectrais é essencial primeiro conhecermos padrões de respostas de reflectância dos diferentes tipos de objetos, obtidos por meio de medidas radiométricas (MENESES, 2001).

Quando comparada à reflectância multiespectral, a reflectância hiperespectral geralmente é mais sensível a variáveis específicas das culturas, por causa da aquisição abundante de informações em bandas espectrais estreitas e contínuas (FENG et al., 2008).

O imageamento da reflectância hiperespectral foi utilizado com sucesso na identificação de doenças, nutrientes e déficit hídrico em diferentes frutas e vegetais. Uma informação espectral diferente baseada no método de classificação de imagem mostra-se uma ferramenta útil para detecção de lesões de cancro em citros (QIN et al., 2009).

Min e Lee (2003) estudaram quais comprimentos de onda são adequados para a detecção da concentração de N foliar em citros, e detectaram 707 nm e 2194 nm como bandas promissoras a tal propósito em sensores hiperespectrais. Posteriormente, em

2006, os mesmos autores desenvolveram um sensor multiespectral, utilizando as bandas de 620 a 950 nm e 1400 a 2450 nm, para a detecção de N em folhas de citros (MIN, LEE, 2005) .

Min et al. (2008), ao desenvolverem um sistema sensor hiperespectral para medir a concentração de N em folhas de laranjeira, verificaram boa linearidade e estabilidade na detecção de N, tanto na faixa do visível e infravermelho quanto na faixa do infravermelho próximo.

Estudos indicam as vantagens do uso de dados obtidos a partir de bandas estreitas, localizadas em posições específicas do espectro, na obtenção de informações qualitativas ou quantitativas da vegetação, porém, em poucos deles foram utilizados dados hiperespectrais oriundos de sensores orbitais para o estudo de alvos agrícolas (TISOT et al., 2005).

As relações quantitativas dos índices de N foliar com os parâmetros hiperespectrais de reflectância do dossel de trigo foram analisados por Feng et al. (2008), e por comparação dos resultados de validação de diferentes índices hiperespectrais, foram encontrados bons indicadores para estimar a Concentração de N Foliar (N%), bem como parâmetros confiáveis para a previsão de Acúmulo de N Foliar.

Tian et al. (2011) avaliaram novos índices de vegetação para estimar a concentração de nitrogênio foliar do arroz, com base na reflectância hiperespectral em campo e no espaço. Os autores verificaram que o índice de três bandas espectrais $[R705 / (R717 + R491)]$ foi um bom indicador da Concentração de N foliar em escalas de campo e espacial.

Yang et al. (2003, 2004) examinaram a utilidade de imagens aéreas hiperespectrais para estimar e mapear variabilidade de produção de algodão e grãos de sorgo, comparando os dados hiperespectrais com dados de produtividade. Eles descobriram que os rendimentos de ambas as culturas foram significativamente correlacionados com dados de reflectância hiperespectral.

Para predição de produção de citros a partir de imagens aéreas hiperespectrais, Ye et al. (2007) confirmaram a hipótese de correlação entre as características do dossel e da produção de citros, aplicando o modelo de regressão por Mínimos Quadrados Parciais (*Partial Least Squares* - PLS), onde sete fatores (produtividade de 7 árvores dentre 24, em 9 estações) foram calculados a partir de 72 bandas.

4.2.1 Conceitos de Radiometria

A radiação eletromagnética (REM) é uma forma dinâmica de energia que se manifesta a partir da sua interação com a matéria e é o meio pelo qual a informação é transferida pelo objeto ao sensor (NOVO, 2008).

Conhecer as características da REM com relação ao seu comprimento de onda e frequência é fundamental para o entendimento da informação extraída dos dados obtidos do sensoriamento remoto.

O espectro eletromagnético (Figura 1) representa os diversos tipos de radiação eletromagnética. Seu intervalo vai dos comprimentos de onda curtos incluindo radiação gama e raios X, aos grandes comprimentos de onda, que abrangem as microondas e ondas de rádio. As bandas espectrais ou limites destes comprimentos são decorrentes dos processos utilizados na sua produção ou detecção (PONZONI, 2001).

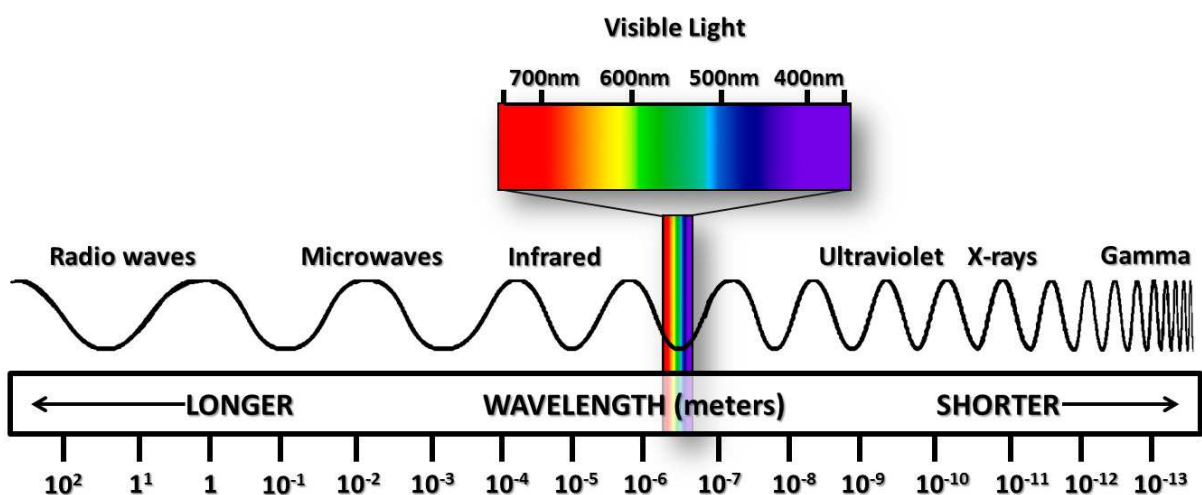


Figura 1. Espectro Eletromagnético.

Fonte: NASA (2014).

Segundo Steffen (1996), as radiações eletromagnéticas receberam denominações que são de natureza histórica ou decorrente dos processos utilizados na sua produção ou determinação: raios gama, raios-x, radiação ultravioleta, luz visível, radiação infravermelha (próximo, médio e termal), microondas e ondas de rádio. O mesmo autor as define conforme segue:

Raios gama: são gerados por átomos radioativos e explosões nucleares, possuindo maior poder de penetração do que os raios-X. Os raios gama são

utilizados em aplicações na medicina e em tomadas de imagens do universo, de forma a fornecer importantes informações sobre a vida e morte de estrelas e outros processos no universo.

Raios-X: são ondas de alta energia que têm grande penetração e possuem diversas aplicações na medicina.

Radiação ultravioleta (UV): abrange uma porção estreita do espectro antes da região do visível. Essas ondas contidas na luz do Sol podem queimar a pele, mas têm sua utilização em observatórios de astronomia.

Radiação Visível (Luz): é o conjunto de radiações eletromagnéticas compreendidas entre os comprimentos de onda de 0,39mm a 0,70mm. As radiações contidas nesta faixa de comprimento de onda, ao incidir no sistema visual humano, são capazes de provocar a sensação de cor. A cor "azul" é encontrada próxima do intervalo de 0,4 a 0,5mm, "verde" de 0,5 a 0,6mm e "vermelho" de 0,6 a 0,7mm (LILLESAND; KIEFER, 1994).

Segundo Ponzoni (2001), é na região do visível que os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância espectral. A energia é absorvida seletivamente pela clorofila e é convertida em calor ou fluorescência e também convertida fotoquimicamente em energia estocada na forma de componentes orgânicos através da fotossíntese.

É por meio das medidas radiométricas de laboratório ou de campo que se descobrem com qual intensidade cada material, seja água, solo, vegetação ou minerais e rochas, reflete a radiação eletromagnética nos diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético (MENESES, 2001), cuja equação de reflectância é dada pela seguinte fórmula:

$$\rho = 100 \frac{L}{E} \quad (1)$$

onde: ρ = reflectância em porcentagem; E = intensidade da energia incidente; L = intensidade da energia que deixa a amostra.

Espectrorradiometria de reflectância é uma técnica que tem a função de medir em diferentes comprimentos de onda a energia eletromagnética refletida da superfície dos objetos e representá-la na forma de um gráfico que se denomina curva de reflectância espectral (MENESES, 2001).

4.3 Importância da adubação nitrogenada para a cultura da laranja

Os produtores de citros da Flórida estão tentando manter a produção econômica da cultura e proteção do ambiente no entorno dos pomares do excesso de nutrientes, perante o aumento dos custos de fertilizantes, novos surtos de doenças e conversão de terras para usos urbanos (OBREZA; SCHUMANN, 2010).

O custo de produção e a produtividade de uma cultura sofrem influência direta e indireta de diversos fatores, como as características do clima, disponibilidade de água, o tipo do solo, potencial genético da planta, controle fitossanitário, tratos culturais e grau de tecnologia utilizada na cultura (LOPES, 2010).

O manejo ideal da nutrição visa o suprimento de nutrientes em quantidades suficientes e sincronizadas com os períodos de maior demanda da planta, otimizando-se a produção e a qualidade de frutos e possíveis impactos ambientais são minimizados (MATTOS JUNIOR et al., 2005).

Em estudos sobre a nutrição dos citros realizados na Califórnia e Flórida entre as décadas de 1930 e 1960, plantas adultas foram avaliadas em soluções nutritivas e no campo, para verificar o efeito do suprimento e omissão de nutrientes sobre sintomas visuais de desordens nutricionais, absorção, composição mineral e produção de frutos (BRYAN, 1957; CHAPMAN, 1960 apud QUAGGIO et al., 2005).

4.3.1 Deficiência de macronutrientes em citros: Nitrogênio (N)

Árvores cultivadas em locais cujo N disponível para a planta é limitado podem parecer normais, porém apresentam tamanho reduzido. Tais árvores possuem baixo carregamento de frutos, pois florescem esparsadamente, brotam de maneira irregular, a produção de galhos é limitada e apresentam redução no crescimento foliar. A deficiência de N provoca um amarelecimento geral da folhagem, sintoma este que pode ser observado em árvores bem nutridas que tiveram o fornecimento de N drasticamente reduzido (ZEKRI, OBREZA, 2012).

A deficiência de nitrogênio aparece primeiro nas folhas mais velhas e prossegue em direção às folhas mais novas (Figura 2). Ocorre diminuição ou até paralisação do crescimento das plantas; folhas menores e pouco numerosas; amarelecimento geral da folhagem, atingindo também as nervuras; redução do número e tamanho dos frutos, que

apresentam casca fina, verde-pálida e maturação precoce; secamento das extremidades dos ramos (RODRIGUEZ, 1991).

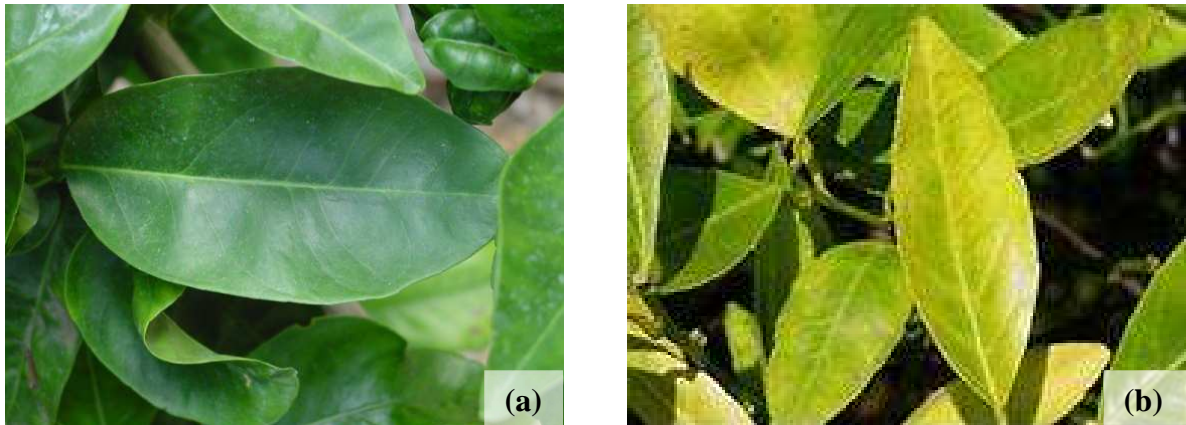


Figura 2. Sintoma de deficiência de nitrogênio em folha de citros: (a) folha sadia, (b) folha com deficiência.

Fonte: Página da UF/IFAS Extension.

Se a deficiência de N ocorrer durante o verão e outono, quando a fruta está em expansão e amadurecimento, algumas das folhas verdes ficarão amarelas e podem cair. Um padrão que se assemelha ao sintoma de deficiência de magnésio (Mg) pode ocorrer em tais condições. Árvores que estão constantemente com carência de N são raquíticas e os galhos apresentam crescimento irregular e muito curto. Com isso, a produção agrícola é bastante reduzida (ZEKRI, OBREZA, 2012).

A capacidade para distinguir entre a deficiência de N e a deficiência de outros elementos é muito importante. Os sintomas de deficiência de Mg em fases posteriores pode ser confundida com a deficiência de N. Deve ser sempre lembrado que as folhas amarelas não são necessariamente uma indicação de deficiência de N. A deficiência de nitrogênio pode ser distinguida pela natureza geral da coloração amarelada da folhagem ao longo de toda a árvore, com a ausência de qualquer padrão de folha distinto (DEPARTMENT OF PRIMARY INDUSTRIES, 2002).

A deficiência de nitrogênio na Flórida é mais provável de ser observada após a floração, mas antes da estação chuvosa começar (verão). Em muitos casos, a folhagem das árvores ficará mais verde durante o verão, especialmente após uma safra (ZEKRI, OBREZA, 2012).

Ainda segundo os mesmo autores, a falta de disponibilidade de N no solo, o que pode ser devido a diversos fatores, como a lixiviação, que é causada pela

combinação de forte precipitação no verão ou excesso de irrigação em um solo muito poroso e a saturação do solo, que pode causar a perda de N por desnitrificação e levar a uma deficiência temporária de N, aliviada pelo tempo seco (ZEKRI, OBREZA, 2012).

4.4 Monitoramento do estado nutricional de plantas quanto ao comportamento espectral

O comportamento espectral dos alvos da superfície terrestre é representado por curvas de reflectância espectral, que representam a variação da energia refletida pelos objetos em cada comprimento de onda. Esta diferença na radiação refletida torna possível a identificação e diferenciação dos objetos em produtos de sensores remotos (NOVO, 2008).

Na literatura encontram-se curvas “padrão” que representam genericamente a resposta espectral da reflectância de alvos como vegetação, solo e água, que mostram importantes pontos a serem estudados nas propriedades de reflectância de um determinado alvo (PONZONI, 2001).

No estudo do comportamento espectral da vegetação, a curva espectral da vegetação sadia é caracterizada pela intensa absorção da radiação eletromagnética nas regiões do azul e do vermelho, causada pela quantidade de pigmentos fotossintetizantes, e pela intensa reflexão do infravermelho próximo, causada pela estrutura foliar.

Os três principais fatores que influenciam a quantidade de energia eletromagnética refletida pelas folhas são: pigmentos, espaços ocupados pela água e pelo ar e estruturas celulares com dimensões do comprimento de onda da radiação incidente (grãos de amido, mitocôncrias, ribossomos, núcleo e outros plastídeos). Há outros fatores que também afetam a energia refletida pelas folhas, como conteúdo de água, maturação ou idade da folha, posição nodal, condição de iluminação, pubescência e senescência (GATES et al., 1965 apud MOREIRA, 2003).

Segundo Ponzoni (2001), pequena quantidade de luz é refletida pelas células da camada superficial, enquanto que a maior parte é transmitida para o mesófilo esponjoso onde os raios incidem frequentemente nas paredes celulares, sendo refletidos se os ângulos de incidência da radiação forem suficientemente grandes (Figura 3). Dado o grande número de paredes celulares dentro da folha, alguns raios são refletidos de volta, enquanto outros são transmitidos através das folhas.

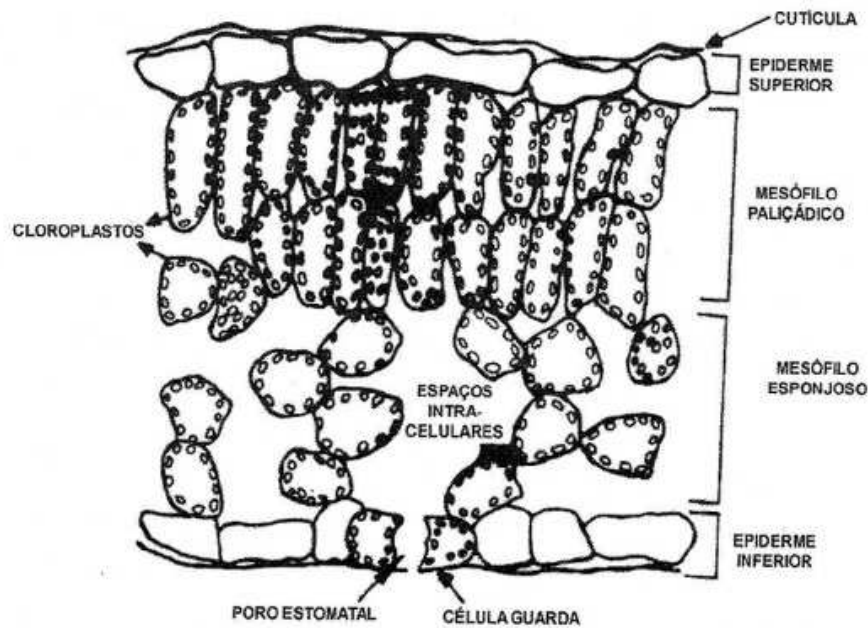


Figura 3. Seção transversal de uma folha.

Fonte: Ponzoni e Shimabukuro (2007).

O nitrogênio (N) é um nutriente essencial para a produção agrícola moderna, no entanto, o N é muitas vezes aplicado em excesso, não considerando-se a demanda das culturas ou o risco ambiental potencial, para assegurar que colheitas aceitáveis sejam alcançadas (HATFIELD et al., 2008).

A programação nutricional adequada na citricultura requer a aferição da disponibilidade de nutrientes por meio de análises de solo e folha e, também, leva em consideração a expectativa de produtividade e a exportação de nutrientes pela colheita. A disponibilidade de N não tem sido eficientemente avaliada por meio de análises do solo e, por essa razão, o N-foliar vem sendo empregado como guia para recomendação de nitrogênio em plantas cítricas (QUAGGIO et al., 2005).

O uso de medidas de reflectância vem sendo utilizado como indicador do estado nutricional das culturas referente ao N. Os aspectos positivos desta tecnologia referem-se à pequena necessidade de procedimentos laboratoriais e, conseqüentemente, menores custos. Além disso, o tempo entre amostragens e resultados é muito menor do que quando são feitas análises de indicadores do solo. Isto é essencial para a correção de deficiência de N (SCHRÖDER et al., 2000).

4.4.1 Medida indireta do conteúdo de clorofila foliar

A deficiência de nutrientes no vegetal afeta de forma significativa as propriedades ópticas das folhas, provocando clorose, a qual é responsável pelo aumento da reflectância na região do visível, devido ao decréscimo do teor de clorofila (PONZONI, 2001).

Segundo Ponzoni (2001), a reflectância espectral de uma folha verde é distinta e bastante variável de acordo com o comprimento de onda (Figura 4). Nos comprimentos de onda do visível, a pigmentação, em especial a clorofila, domina a resposta espectral de plantas. Esses pigmentos, clorofila, carotenos e xantofilas são geralmente encontrados nos cloroplastos e as porcentagens podem variar de espécie para espécie. A clorofila domina essa concentração com cerca de 65%.

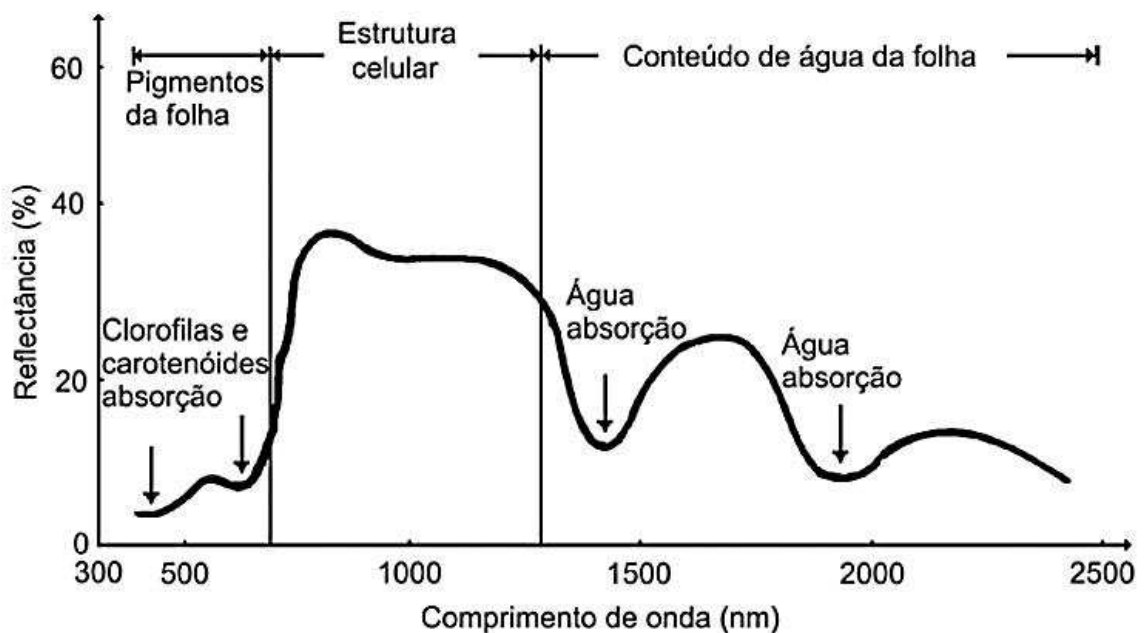


Figura 4. Curva de reflectância espectral típica de uma folha verde e sadia.

Fonte: Novo (1992).

Para Richardson et al. (1975), em se tratando de culturas agrícolas, o dossel das culturas exibem, no campo de visada do sensor, quatro componentes com diferentes propriedades de reflectância óptica: vegetação iluminada, solo iluminado, vegetação sombreada e solo sombreado. A magnitude de cada um desses componentes varia com a cobertura vegetal, orientação e espaçamento entre fileiras, morfologia do dossel, estrutura interna dos elementos que compõem o dossel, diâmetro da copa da planta, altura, teor de água

na planta e no solo, condição fitossanitária, ângulo zenital e azimutal do solo, latitude e tamanho do elemento e da resolução do equipamento utilizado.

Os parâmetros arquitetônicos da distribuição do ângulo foliar de dosséis afeta qualitativamente a reflectância da vegetação. Na região do visível, uma vez que muito da energia incidente sobre uma folha é absorvida, com o aumento do índice de área foliar, ainda mais energia será absorvida (PONZONI, 2001).

Um importante efeito da arquitetura do dossel sobre a reflectância ocorre quando os elementos da vegetação não se encontram uniformemente distribuídos. Quando as folhas estão agrupadas no dossel, ao invés de uniformemente distribuídas, esse agrupamento pode aumentar a ocorrência de lacunas em toda a extensão do dossel, o que aumentaria a influência do espalhamento dos elementos, localizados nas camadas mais próximas do solo (PONZONI, 2001).

Diversos estudos sobre citricultura utilizando técnicas de sensoriamento remoto são observados na agricultura de precisão. Blazquez et al. (1998) utilizaram fotografias aéreas para realizar inventário de árvores cítricas em uma propriedade na Flórida nos Estados Unidos, nas quais as informações adquiridas foram utilizadas para verificar a sanidade das árvores.

Com o objetivo de contribuir para uma correta compreensão dos fenômenos e variáveis que influenciam a resposta espectral dos citros, a partir de dados obtidos pelo satélite TM/Landsat-5, Covre (1989) estudou os parâmetros culturais, variedade, idade, índice de cobertura do terreno com árvores de citros, substrato (porção de vegetação nas entrelinhas), orientação das fileiras de plantio, altura das árvores, declividade do plantio, orientação do declive, tipo de solo e uniformidade do talhão. O autor concluiu que os parâmetros índice de cobertura do terreno com árvores de citros e substrato (porção de vegetação nas entrelinhas), são os que possuem influência mais significativa na resposta espectral dos pomares.

Ferramentas como medidores de clorofila (ARGENTA et. al, 2001; SILVEIRA et. al, 2003; FONSECA et. al, 2012) e medições de reflectância da cultura por meio de equipamentos que avaliam o espectro de reflectância dos objetos, como os radiômetros ou câmeras digitais, têm sido empregadas para identificar essa disponibilidade nutricional nas plantas. Sena Júnior (2005) citou que o uso de imagens digitais pode tornar-se a opção mais viável economicamente, devido à popularização das câmeras.

A medida SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) é altamente sensível às flutuações de nitrogênio (ROZANE et al., 2009), pois avalia dois pontos, um de

alta absorvância, na região do vermelho, onde há um pico da absorvância pela clorofila e outro na região do infravermelho, onde ocorre à máxima transmitância e remoção do efeito da espessura da folha e o seu grau de hidratação, podendo-se estimar indiretamente o teor de clorofila (SOUZA et al., 2011).

Em condições de campo, a utilização do clorofilômetro em culturas perenes como fruteiras mostrou-se uma ferramenta rápida para detecção do estado nutricional de N (VILLAS BÔAS et al., 2002; SOUZA et al., 2011; VALE; PRADO, 2009), pois quantifica o teor de N na planta de forma não destrutiva, medindo apenas a intensidade de luz na faixa do 650 nm a qual é refletida pela folha.

Com base em um Índice de Reflectância do Nitrogênio (NRI), derivado da reflectância do verde e infravermelho próximo de uma cultura de milho irrigado, Bausch e Diker (2001) verificaram que o NRI foi altamente correlacionado com o índice de suficiência de N, calculado a partir dos dados do medidor de clorofila SPAD, que forneceu uma avaliação rápida do estado das plantas de milho para o mapeamento do N no campo.

Villas Bôas et al. (2002) complementaram que, ao estudar a relação da adubação nitrogenada no desenvolvimento de plantas de videira e a leitura SPAD, a utilização do clorofilômetro deve ser criteriosa, definindo somente um tipo de folha a ser amostrada e tomando mais de uma medida por folha.

Silva Junior (2006) concluiu que o sistema de sensoriamento remoto foi capaz de detectar os diferentes níveis nutricionais em forrageiras aos 21 e 32 dias após a aplicação de fertilizantes nitrogenados e que existe boa relação entre os índices de vegetação e os valores estimados do teor de clorofila, pelo medidor de clorofila, o que leva a inferir que os índices testados tiveram potencialidade para identificar áreas com estresse nutricional ou com outro problema cuja consequência seja alteração da tonalidade foliar.

Souza et al. (2011) avaliaram a sensibilidade da medida indireta da clorofila como um método de monitoramento dos níveis de N em plantas cítricas e verificaram que leituras SPAD abaixo de 70 e acima de 75 estão relacionadas, respectivamente, com plantas muito responsivas e não responsivas a nitrogênio, enquanto plantas com leituras intermediárias devem ser adubadas com doses de N próximas daquelas extraídas com a colheita.

Souza (2010), ao monitorar o estado nutricional de plantas cítricas e solução do solo em sistema de fertirrigação, verificou que a leitura SPAD correlacionou-se de forma significativa com diferentes doses de N, P e K aplicadas e com o teor de N na planta.

Ao estudar a influência de medidas indiretas de clorofila em mudas de goiabeira, Rozane et al. (2009) observaram que as medidas SPAD são influenciadas pela cultivar, tipo de folha e época de avaliação. Ainda concluíram que o terceiro par de folhas mostrou-se mais adequado para avaliar o estado nutricional do nitrogênio.

Vale e Prado (2009) avaliaram a influência das doses de N, P e K no teor de clorofila em plântulas do porta-enxerto de citrumelo e verificaram que a medida indireta do teor de clorofila é adequada para a avaliação do estado nutricional de nitrogênio e estimativa da produção de matéria seca de plantas de citrumelo.

4.4.2 Índices de vegetação

A combinação da reflectância de objetos da superfície em dois ou mais comprimentos de onda, especialmente na região do visível e infravermelho, é chamada de índice de vegetação, cuja finalidade é destacar uma propriedade particular da vegetação (JENSEN, 2009).

Os Índices de Vegetação (IVs) são medidas radiométricas adimensionais, as quais indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde, incluindo índice de área foliar (IAF), porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde e radiação fotossinteticamente ativa absorvida (JENSEN, 2009).

Estes índices são relacionados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como biomassa e índice de área foliar, além de minimizarem os efeitos de iluminação da cena, declividade da superfície e geometria de aquisição que influenciam os valores de reflectância da vegetação (PONZONI, SHIMABUKURO, 2007).

Índices ópticos hiperspectrais sensíveis à variação de bioquímica foliar são utilizados para estimar o conteúdo de clorofila a partir de dados de reflectância de dossel. No entanto, alguns estudos desconsideram o fato de que estes índices são gerados em escala de folha, onde as relações obtidas entre dados espectrais e o componente bioquímico em questão são facilmente observadas (GITELSON et al., 1994; PEÑUELAS et al., 1997).

Diversos Índices de Vegetação foram desenvolvidos para estudar as condições das culturas na agricultura por sensoriamento remoto (UNO et al., 2005). Os IVs são agrupados em 3 categorias: os intrínsecos, os relacionados à linha do solo e os ajustados atmosféricamente. Os IVs utilizados neste estudo foram apenas os intrínsecos, que consideram apenas medidas de reflectância do visível e do infravermelho próximo.

Proposto por Rouse et al. (1974), o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) é um dos mais antigos, mais conhecidos e mais utilizados índices de vegetação. A combinação da sua formulação e utilização da diferença normalizada das regiões mais altas de absorção e reflectância da clorofila torna-o robusto ao longo de uma abrangente variedade de condições. É uma razão resultante da combinação das bandas da região do infravermelho próximo (ivp) e do vermelho (v). No entanto, este índice pode saturar em condições de vegetação densa, quando o índice de área foliar torna-se elevado. O NDVI é definido pela Equação 2:

$$\text{NDVI} = \frac{R_{\text{ivp}} - R_v}{R_{\text{ivp}} + R_v} \quad (2)$$

onde R é a reflectância da banda.

Uma variante do NDVI é o Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) é uma combinação de bandas usando banda larga e banda estreita para os comprimentos de onda nas regiões do infravermelho próximo e verde (HANSEN, SCHJOERRING, 2003). As bandas utilizadas nesta razão são encontradas exclusivamente na gama espectral da região do visível, principalmente na região azul, pois esta região caracteriza-se por apresentar uma forte absorção de luz devido às clorofilas a e b. Neste índice, bandas da faixa do azul (B – blue; 440-501 nm) e do verde (G – Green; 573-586 nm) são empregadas, como mostra a Equação 3:

$$\text{GNDVI} = \frac{R_G - R_B}{R_G + R_B} \quad (3)$$

No entanto, a concentração de clorofila e outros pigmentos nas folhas desempenha um papel importante na coloração do dossel durante a fase de crescimento vegetativo (BULLOCK, ANDERSON, 1998).

A reflectância na região da borda vermelha sempre foi considerada importante nas relações com parâmetros bioquímicos ou biofísicos (CHO, SKIDMORE, 2006). O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada na Borda Vermelha (*Red Edge Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI₇₀₅) é uma modificação do NDVI de banda larga tradicional.

Este índice foi desenvolvido para uso em dados de alta resolução espectral de reflectância, tais como sensores hiperespectrais e suas aplicações incluem

agricultura de precisão, monitoramento de florestas e detecção de estresse da vegetação. Este IV difere do NDVI por usar bandas ao longo da borda vermelha, em vez da absorção principal e picos de reflectância. O NDVI₇₀₅ utiliza a sensibilidade da vegetação da borda vermelha para pequenas variações no teor foliar do dossel, a fração de abertura e de senescência (GITELSON; MERZLYAK, 1994; SIMS; GAMON, 2002) e é definido pela Equação 4:

$$\text{NDVI}_{705} = \frac{R_{ivp} - R_v}{R_{ivp} + R_v} \quad (4)$$

O valor deste índice varia de -1 a 1 e a faixa comum de vegetação verde é de 0,2 a 0,9.

Em um pomar jovem de laranjeiras Hamlin, não-irrigado, Parise e Vettorazzi (2005) estudaram os índices de vegetação NDVI e SAVI, onde os níveis de cinza nas faixas espectrais do vermelho e do infravermelho foram relacionados com a produção por meio de regressões, cujos resultados mostraram que a resposta espectral apresentou relação significativa com a produção.

O SAVI (*Soil adjusted vegetation index*) foi proposto por Huete (1988), que observou que os valores da reflectância de um dossel sobre diferentes solos de fundo não são corretamente descritos pelo NDVI e PVI (*Perpendicular vegetation index*). Este índice é derivado do NDVI e consiste no deslocamento da origem do par ordenado V vs. IVP para o ponto de encontro da linha do solo com a linha da vegetação, pela adição de uma constante L.

Kim et al. (2010) analisaram imagens hiperespectrais para detecção de estresse em macieira, onde vários índices espectrais foram investigados e correlacionados com os níveis de estresse da planta. A maior correlação foi encontrada com o NDVI de Borda Vermelha em 705 nm e 750 nm nos índices de banda estreita e NDVI em 680 nm e 800 nm nos índices de banda larga.

Para medir a concentração de N, o *Double-peak Canopy Nitrogen Index* (DCNI) foi estudado por Chen et al. (2010), que propuseram acompanhar a mudança relativa dos dois picos de reflectância da borda vermelha encontrados para milho e trigo. O DCNI é uma adaptação do NDVI e é definido pela Equação 5:

$$\text{DCNI} = \frac{(R_{ivp} - R_{ivp}) / (R_{ivp} - R_{ivp})}{R_{ivp} - R_{ivp} + n} \quad (5)$$

onde uma constante n foi introduzida na fórmula para compensar a influência de fundo e o $(R_{ivp} - R_{ivp})$ foi incorporado ao denominador para minimizar a influência do IAF e aumentar a sua sensibilidade a mudanças na concentração de N na planta. (CHEN et al., 2010).

O Índice Razão Simples Modificado na Borda Vermelha (*Modified Red Edge Simple Ratio* - mSR₇₀₅) é uma modificação do índice tradicional de banda larga Razão Simples (*Simple Ratio* – SR), que é obtida pela divisão de valores referentes à região do infravermelho próximo por valores referentes à região do vermelho. Difere do SR padrão porque usa bandas na borda vermelha e incorpora uma correção para a reflexão especular da folha. As aplicações incluem agricultura de precisão, monitoramento de florestas e detecção de estresse na vegetação (DATT, 1999; SIMS, GAMON, 2002). O mSR₇₀₅ é definido pela Equação 6:

$$\text{mSR}_{705} = \frac{R_{ivp}}{R_B} \quad (6)$$

O valor deste índice varia de 0 a 30 e a faixa comum para a vegetação verde é de 2 a 8.

Para Vogelmann et al. (1993), o Índice Vogelmann de Borda Vermelha 1 (*Vogelmann Red Edge Index 1* - VOG₁) é uma medida de reflectância de banda estreita, que é sensível aos efeitos combinados de concentração de clorofila na folha, área foliar da copa e teor de água. As aplicações incluem estudos de fenologia da vegetação (crescimento), agricultura de precisão e modelagem de produtividade da vegetação. O VOG₁ é definido pela Equação 7:

$$\text{VOG}_1 = \frac{R_{ivp}}{R_{ivp}} \quad (7)$$

O valor deste índice varia de 0 a 20 e a faixa comum de vegetação verde é 4 a 8.

Assim como o NDVI, o *Ratio Vegetation Index* (RV1 e RV2) é amplamente utilizado em estudos da vegetação. O RV é a razão simples entre as bandas do infravermelho próximo (ivp) e vermelho (v) (ROUSE et al., 1973; ZHU et al., 2008; XUE et al., 2004). Tal como acontece com o NDVI, pode saturar em vegetação densa quando o índice de área foliar torna-se muito elevado. O RV é definido pela Equação 8:

$$RV = \frac{R_{ivp}}{R_v} \quad (8)$$

O valor deste índice varia de 0 a mais de 30. A gama comum de vegetação verde é de 2 a 8.

Com o objetivo de encontrar um índice de vegetação capaz de prever o conteúdo de nitrogênio da cultura, Reyniers et al. (2006) calcularam o N esperado por meio de um modelo linear simples. Este modelo, o Índice de Vegetação Ótimo (*Optimal Vegetation Index - VI_{opt}*) é dado pela Equação 9:

$$VI_{opt} = (1 + L) \frac{R_{ivp}^2 + 1}{R_v + L} \quad (9)$$

onde R corresponde à reflectância dos comprimentos de onda das bandas, e L é um fator que varia de 0 a 100, que leva em consideração a cobertura do solo.

O Índice de Absorção de Clorofila (CARI) e seus variantes (MCARI e TCARI) são sensíveis ao teor de clorofila e resistentes ao efeito do solo (DAUGHTRY et al., 2000; HABOUDANE et al., 2004). O Índice de Absorção de Clorofila Modificado (*Modified Chlorophyll Absorption in the Reflectance Index - MCARI*) é dado pela Equação 10, proposta por Daughtry et al. (2000).

$$MCARI = (R_v - R_n) - 0,2(R_v - R_G) * (R_v/R_n) \quad (10)$$

Este índice relaciona a banda da absorção de clorofila em 670 nm aos espectros de maior reflectância em 550 nm e 700 nm (DAUGHTRY et al., 2000).

As diferenças na relação (R700/R550) estão intimamente ligadas às variações das características da reflectância de objetos da superfície (solo e componentes não fotossintetizantes). Para compensar estes efeitos, Haboudane et al. (2002) verificaram que a relação (R700/R670) é utilizada para neutralizar o efeito de fundo apenas para a diferença (R700/R550), de modo a que o Índice de Absorção de Clorofila Transformado (*Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index - TCARI*) é definido pela Equação 11:

$$TCARI = 3[(R_v - R_n) - 0,2(R_v - R_G) * (R_v/R_n)] \quad (11)$$

Os índices de vegetação são utilizados para determinação das relações destes com as características biofísicas do dossel das culturas agrícolas. No entanto, muitas dessas relações são determinadas para locais específicos, sendo dependentes da variabilidade causada por fatores externos, como condições atmosféricas, arquitetura do dossel, geometria de iluminação e de visada, propriedades espectrais dos solos (HABOUDANE et al., 2004; GITELSON et al., 2005).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Material

5.1.1 Caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido na safra 2012/2013 (setembro/2012 a agosto/2013). Foram escolhidos três talhões de laranjeira pertencentes ao Citrus Research and Education Center (CREC)/Universidade da Flórida, em Lake Alfred; e um talhão em pomar comercial de Auburndale, ambos localizados em Polk County, Flórida, EUA.

A região central do estado da Flórida (Figura 5) está localizada na zona subtropical úmida, com clima classificado como *Cfa* (clima quente e com pluviosidade significativa ao longo do ano), conforme sistema proposto por Köppen-Geiger (PEEL et al., 2007). A temperatura média anual é de 22,2°C, com precipitação média anual de 1225 mm e altitude média de 45 m. Os talhões encontram-se em Entisols (Neossolos), com drenagem excessiva.

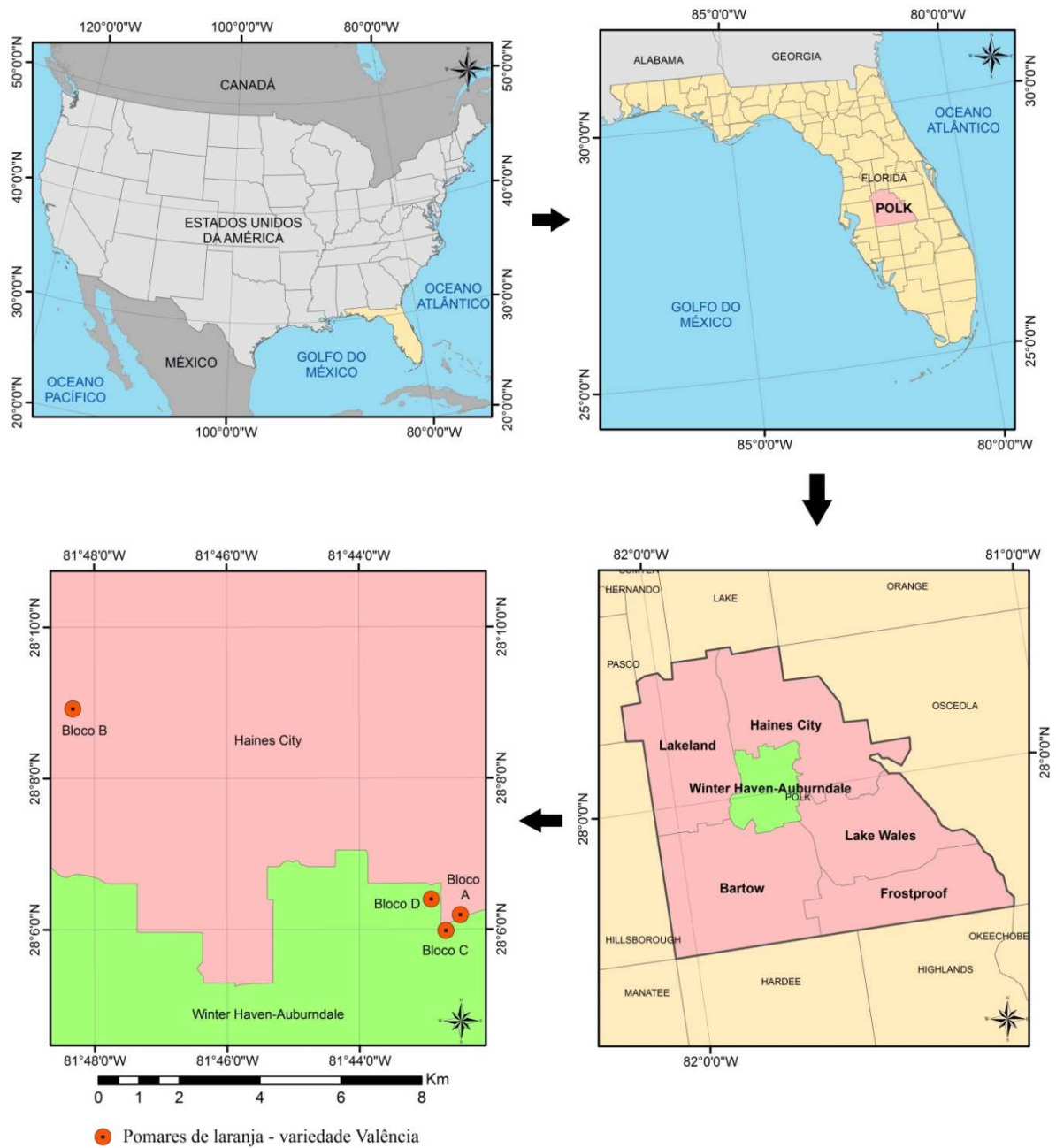


Figura 5. Localização da área de estudo nas cidades de Lake Alfred e Auburndale, Polk County, Flórida, EUA.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os talhões escolhidos para o estudo foram os cultivados com laranja da variedade de copa “Valência”, sobre diferentes tipos de porta-enxerto (Figura 6).

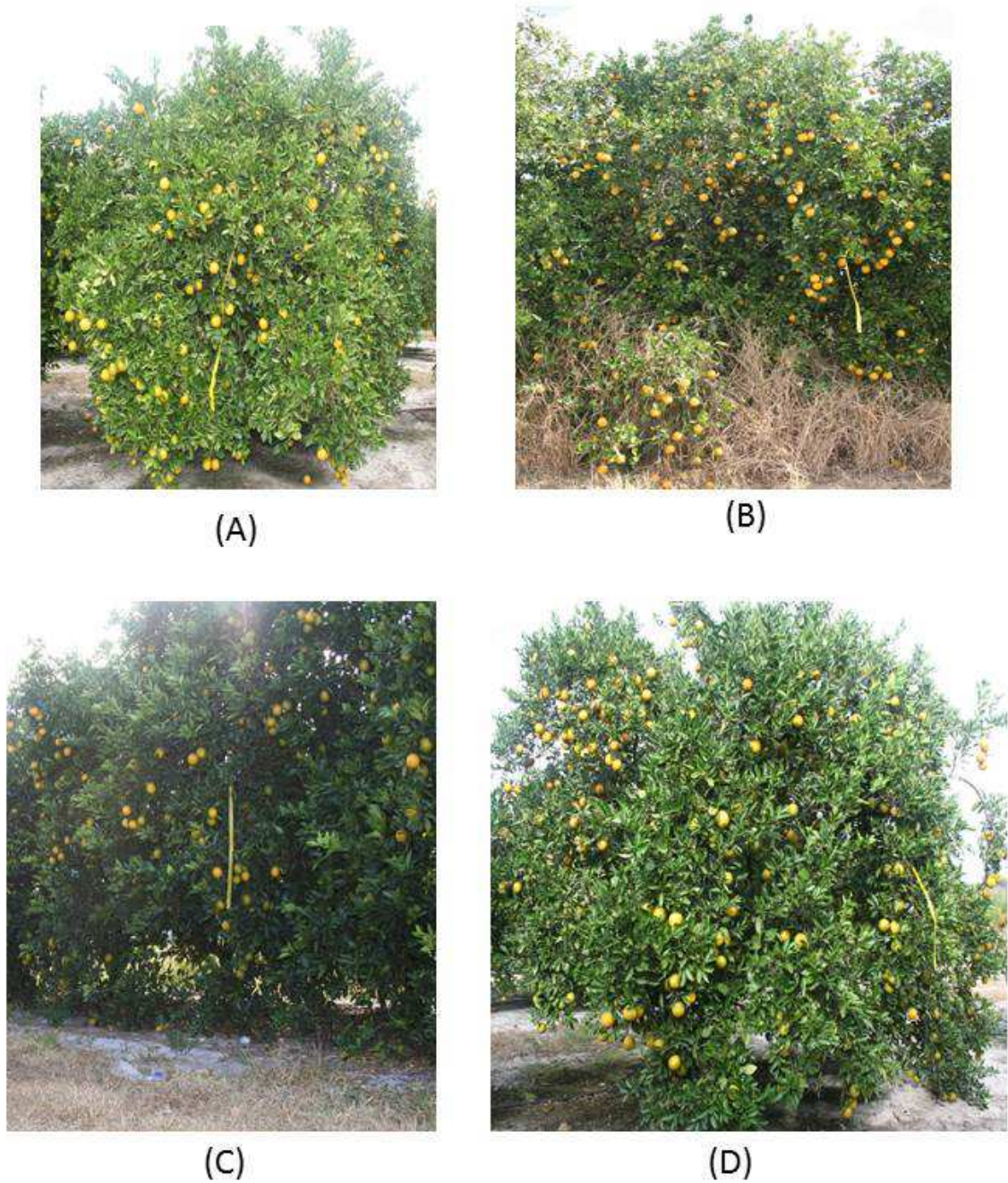


Figura 6. Ilustração das árvores amostradas nos blocos A, B, C e D.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Estes talhões foram divididos em quatro blocos, de acordo com o manejo da adubação utilizada, como descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos blocos quanto à idade de plantio, porta-enxerto, manejo da adubação, irrigação e localização

	Ano de plantio	Porta-enxerto	Adubação	Irrigação	Nível de Nitrogênio	Local
Bloco A	1994	Swingle	Granular, 5 vezes ao ano	Microjet	Médio	Lake Alfred
Bloco B*	-	-	-	-	Baixo	Auburndale
Bloco C	2009	925	Granular, 5 vezes ao ano	Microjet	Alto	Lake Alfred
Bloco D	2003	Sour orange	Granular, 5 vezes ao ano	Microjet	Médio	Lake Alfred

* o Bloco B é um pomar comercial cujos tratamentos culturais deixaram de ser realizados, contudo a colheita dos frutos ainda é realizada.

A adubação dos blocos A, C e D foram parceladas em 5 aplicações de fertilizantes, sendo a primeira no final de janeiro de 2012 e as seguintes em março, maio, julho e outubro, com doses de N de 50 (18,66 kg), 50, 50, 50 e 40 (14,93 kg) libras, respectivamente. As primeiras duas aplicações foram em sua maioria nitrato de cálcio e as 3 últimas foram em sua maioria nitrato de amônio.

Embora tenha recebido as mesmas doses de fertilizante que os demais talhões, o bloco C está inserido num talhão com idade mais jovem, por isso apresentou melhores respostas aos tratamentos culturais, além de possuir plantas sem sinais de infecção por HLB ou greening.

5.1.2 Aquisição das Imagens Hiperespectrais

Em 30 de novembro de 2012, o levantamento aéreo hiperespectral (HS) foi realizado nos pomares comerciais de laranja pertencentes ao Citrus Research and Education Center (CREC) e parceiros, onde os blocos estudados foram imageados.

Um sensor de imageamento hiperespectral Visível e Infravermelho Próximo (VNIR) da AISA EAGLE (Spectral Imaging, Ltd., Oulu, Finlândia) acoplado a uma aeronave foi utilizado para aquisição de imagens (Figura 7).



Figura 7. Aeronave utilizada no imageamento.

O sistema hiperespectral de imageamento foi configurado para capturar imagens de 12 bits em 128 bandas no visível e infravermelho próximo, na região do espectro de 457 a 922 nm, com uma largura de banda de 3,6 nm, resolução do pixel de 1 m e número digital (DN) variando de 0 a 4096 (Figura 8).



Figura 8. Sistema de imageamento hiperespectral e multiespectral.

Durante a aquisição das imagens, com o intuito de minimizar os ruídos e interferências nas imagens, as condições de iluminação foram as seguintes:

- a cobertura de nuvens: 0%;
- o tempo de aquisição: 12h00 – 13h00, horário local;
- elevação solar: maior que 35°;
- altitude de vôo: 640 m (2100 pés);
- velocidade de vôo: 120 km.h⁻¹ (65 nós).

5.1.3 Sistemas de Informação Geográfica e Equipamentos

Para o processamento dos dados e das imagens foram utilizados programas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), programa de análise estatística e diversos equipamentos, como:

- ENVI 5.0 (*Exelis Visual Information Solutions, Inc., Boulder, CO, EUA*): utilizado no pré-processamento das imagens, bem como na aplicação de índices de vegetação específicos;
- ArcGIS 10.1 – utilizado para quantificar as informações, na elaboração do banco de dados e também na apresentação dos mapas temáticos;
- Minitab® 17.1.0 (Minitab Inc., EUA) – utilizado nas análises estatísticas, análises de componentes principais, análises de correlação e geração do modelos de regressão múltipla;
- Surfer 8.0 – *Software* gráfico utilizado na aplicação da análise de tendência;
- SpectraWiz – *Software* de operação do espectrorradiômetro (StellarNet Inc., EUA, 2006);
- Medidor portátil de clorofila denominado *Soil Plant Analysis Development / SPAD-502*, desenvolvido pela Minolta no Japão (Minolta, 1989);
- GreenSeeker® RT100 (NTech Industries, Inc., Ukiah, Califórnia);
- Espectrorradiômetro portátil de fibra óptica de alta resolução - Modelo EPP2000-HR (StellarNet Inc., EUA) – utilizado na medição da curva espectral do nitrogênio das amostras e colorimetria. Possui alcance de 190 a 1100 nm (ultra-violeta, visível e infravermelho).

5.2 Métodos Empregados

5.2.1 Coleta e análise das folhas

Considerando a safra 2012/2013, a coleta das amostras foi feita em novembro de 2012, para realização das análises do conteúdo foliar de nitrogênio, do teor de clorofila foliar e também para coleta de medidas espectrais das plantas.

O GPS SX Blue II-B (Figura 9) foi utilizado no georreferenciamento das amostras. Este equipamento possui precisão sub-métrica em tempo real. Não houve necessidade de pós-processamento, pois utiliza correções SBAS - Satellite-Based Augmentation System (WAAS / EGNOS / MSAS / GAGAN) ou correções DGPS.



Figura 9. Equipamento GPS SX Blue II-B utilizado no georreferenciamento das amostras.

Para a coleta dos dados foi realizada uma amostragem georreferenciada em malha irregular, com 24 pontos coletados em cada bloco, com exceção

do Bloco C, cuja amostragem foi de 30 pontos, totalizando 102 árvores amostradas (Figura 10).

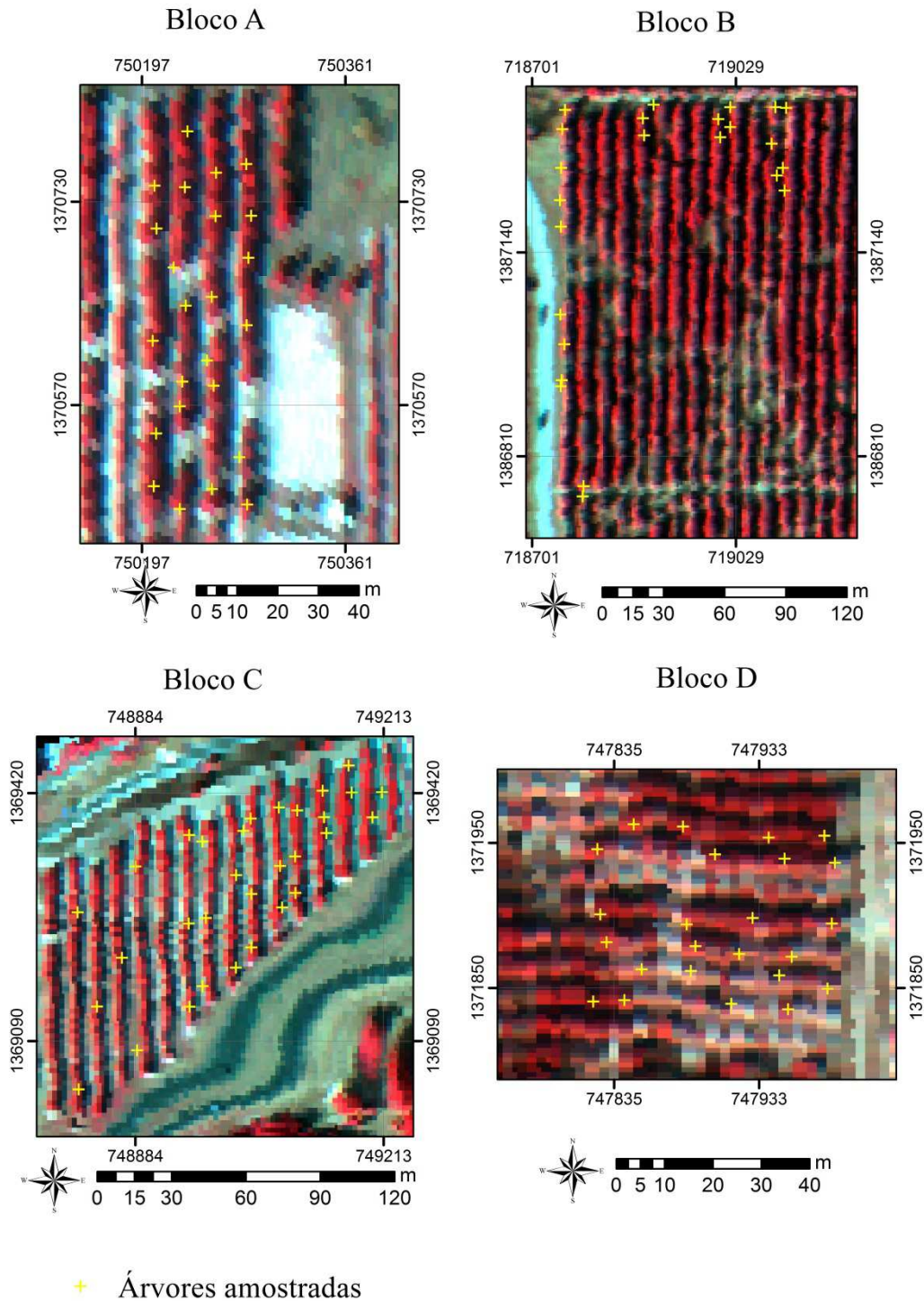


Figura 10. Amostragem georreferenciada do Bloco A, em um pomar de produção comercial de laranja – variedade Valência, nas cidades de Lake Alfred, Flórida, EUA.

Um total de 30 folhas foram coletadas de cada planta sem sintomas de deficiências ou sintomas de HLB (Huanglongbing, também conhecido como 'greening'). As folhas foram coletadas próximas aos frutos com 2 a 4 cm de diâmetro, nos quatro quadrantes e na altura mediana da planta.

As folhas foram acondicionadas em sacos plásticos identificados (2 a 4 horas após a coleta) e levadas para o laboratório onde foram registradas. As amostras foram mantidas em temperatura baixa (4°C) por um dia, antes do processamento.

Posteriormente, as folhas foram lavadas com água corrente (água da torneira), água deionizada, em solução de água com detergente (0,1% v/v) e em solução de ácido clorídrico (5% v/v). Após a lavagem as amostras foram colocadas novamente em sacos de papel identificados e submetidas à secagem em estufa com temperatura de 60°C, por 48 horas.

4.2.2 Estimativas do Teor de Clorofila Foliar

As folhas coletadas para realização da análise foliar foram utilizadas na determinação da medida indireta da clorofila. As estimativas do teor de clorofila foliar foram obtidas utilizando-se um medidor portátil de clorofila SPAD-502, não destrutivo, nas mesmas épocas de obtenção das medidas de reflectância das imagens.

Os valores medidos pelo equipamento (valores SPAD) correspondem às medidas indiretas do teor de clorofila na folha. As folhas das plantas são posicionadas entre o emissor e o receptor do equipamento de modo que a radiação transmitida através da folha seja convertida em sinais eletrônicos. Os valores são calculados com base na radiação transmitida pela folha na faixa do vermelho e do infravermelho próximo.

Este equipamento foi utilizado mediante calibração prévia de acordo com as recomendações do fabricante.

Após a coleta das folhas, estas foram acondicionadas em sacos de plásticos e levadas ao laboratório. No máximo 24 horas após a coleta das folhas eram feitas as leituras, realizadas com as folhas viradas para cima, em apenas um lado da nervura e aproximadamente no centro da folha, conforme Souza et al. (2007) (Figura 11).



Figura 11. Leituras dos valores SPAD correspondentes às medidas indiretas do teor de clorofila na folha.

5.2.3 Determinação do Nitrogênio Foliar

As folhas utilizadas na estimação do teor de clorofila foram utilizadas para determinar o teor de nitrogênio presente nas folhas. Esta medida é utilizada para validação do modelo de caracterização do comportamento espectral das plantas em função do nitrogênio.

As folhas amostradas foram moídas para garantir a homogeneidade e enviadas para análise em laboratório, para determinação da concentração de nitrogênio foliar, calculado em porcentagem (%).

Para interpretação do resultado do laboratório, os valores foram comparados com os teores padrões para análise foliar em citrus (Tabela 2).

Tabela 2. Diretrizes para a interpretação de análise foliar de laranjeira com base em folhas de 4 a 6 meses de idade, de ramos sem frutos (Koo et al., 1984)

Elemento	Deficiente	Baixo	Adequado	Alto	Excessivo
Nitrogênio (% [*])				
	< 2,2	2,2 – 2,4	2,5 – 2,7	2,8 – 3,0	> 3,0

* $\text{g.kg}^{-1} = \%$.

Estes padrões baseiam-se em observações de campo a longo prazo e experimentos conduzidos em diferentes países e diferentes variedades, porta-enxertos e práticas de manejo (OBREZA, MORGAN, 2011).

5.2.4 Pré-Processamento das imagens hiperespectrais

5.2.4.1 Georreferenciamento

As imagens hiperespectrais foram georreferenciadas no programa ENVI 5.0 no sistema de coordenadas NAD 83 State Plane – Florida West, com datum D NAD-83, em pés (feet), parâmetros estes que foram coletados de um mosaico de imagens georreferenciadas pertencente ao banco de dados geográficos do Departamento de Proteção Ambiental da Florida – LABINS (*Land Boundary Information System*; <http://www.data.labins.org>). Posteriormente, fez-se a projeção das imagens para o sistema de projeção UTM, fuso 17 N, com datum WGS-84, em metros.

5.2.4.2 Correção Atmosférica

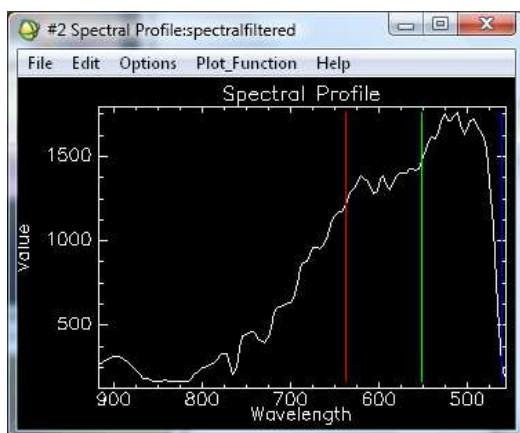
A Calibração Linear Empírica é usada para forçar os dados de uma imagem para um espectro de reflectância de uma área selecionada. Este método aplica a regressão linear de todas as bandas para determinar o nível de cinza e a reflectância, e necessita da definição de uma região de interesse para sua aplicação, de curvas de reflectância da biblioteca espectral e da radiância de trajetória.

Para a execução da correção atmosférica, cinco lonas de referência com tamanho de 3 m x 3 m, em diferentes níveis de cinza (3%, 10%, 30%, 45% e 60%) foram colocadas em uma área aberta ao lado dos pomares de laranjeira, paralelamente à tomada das imagens, como mostrado na Figura 12.

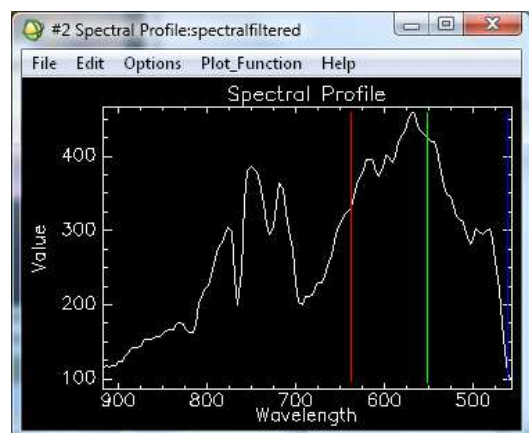


Figura 12. Lonas de calibração de diferentes níveis de cinza instaladas no pomar.

A reflectância das lonas foi medida utilizando-se um espectrômetro portátil (HR-1024, Spectra Vista Corporation, Poughkeepsie, Nova York, EUA). Ao combinar a reflectância das lonas 3% e 60% com as regiões de interesse (ROI – Region of Interest) – elaborado a partir das imagens, a Calibração Linear Empírica foi utilizado para calibrar radiometricamente o número digital (DN) para reflectância (Figura 13).



(a)



(b)

Figura 13. Curva espectral resultante da correção atmosférica por Calibração Linear Empírica correspondente a um ponto antes (a) e depois (b) da correção ser aplicada.

Segundo Smith e Milton (1999), o método Calibração Linear Empírica assume que dentro da imagem há um ou mais alvos com diferentes características de reflectância cobrindo uma ampla gama de valores de reflectância para as bandas registradas pelo sensor. A reflectância espectral de cada um dos alvos da calibração são medidos no chão com um espectrômetro de campo, e assim, a reflectância nas bandas utilizadas pelo sensor são calculadas.

As radiâncias registradas pelo sensor para cada um dos alvos de calibração são extraídas por sensoriamento remoto. As radiâncias e as reflectâncias para calibração dos alvos dentro de cada faixa de comprimento de onda são comparadas e equações são desenvolvidas para cada banda. Estas equações removem os efeitos da iluminação e atmosféricos, em seguida, são aplicadas aos dados de sensores remotos para produzir imagens em unidades de reflectância (SMITH, MILTON, 1999).

5.2.5 Medidas de reflectância espectral

5.2.5.1 Laboratório

O espectro do dossel foi obtido com o espectrorradiômetro portátil de fibra óptica de alta resolução - Modelo EPP2000-HR e processado no programa SpectraWiz, que registrou um intervalo de reflectância de 390 a 1110 nm.

Inicialmente, foi feita a calibração do equipamento, conforme instruções do fabricante. Posteriormente, colocou-se 20 g de folha moída de cada amostra em um recipiente descartável (a) e em seguida foi realizada a leitura da reflectância da mesma (b), como mostra a Figura 14. Por fim, gerou-se a curva de reflectância para cada uma das amostras foliares.

Com este equipamento também mediu-se a colorimetria das amostras. O método de colorimetria triestímulus foi empregado, no qual os sinais da amostra por reflexão ou transmissão são convertidos em unidades à maneira como o olho humano vê a cor (FRANCIS, 1995).

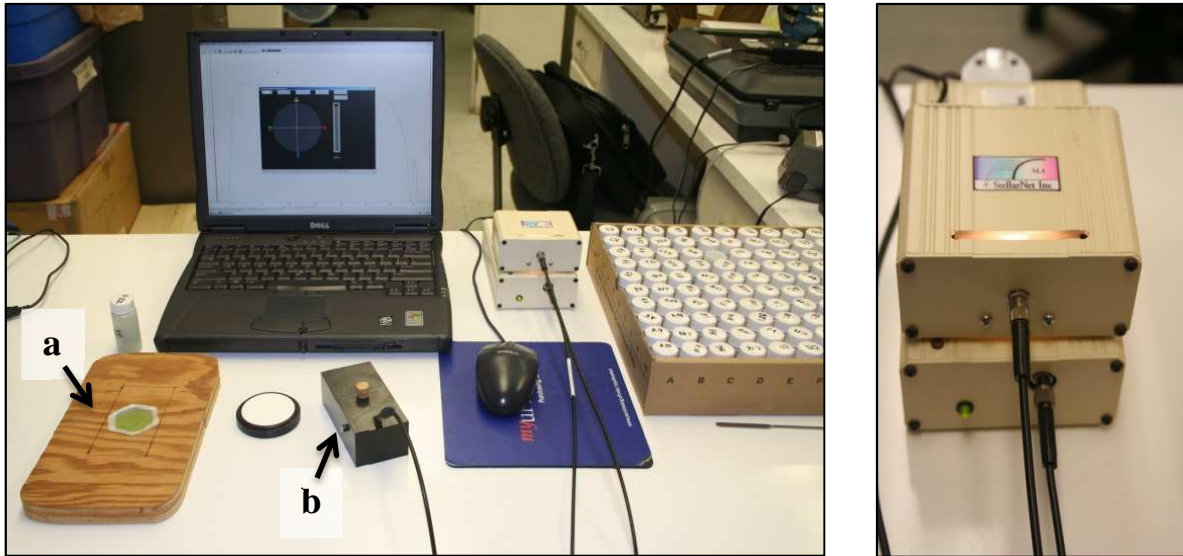


Figura 14. Espectrorradiômetro portátil de fibra óptica de alta resolução (Modelo EPP2000-HR) e programa SpectraWiz.

A cor das amostras foi avaliada pela reflectância utilizando-se a escala de cor CIE $L^*a^*b^*$ (ou CIE Lab), desenvolvido e regulamentado pela CIE (Comission Internationale de l'Eclairage ou Comissão Internacional de Iluminação), pois é uma escala mais uniforme e linear (Figura 15).

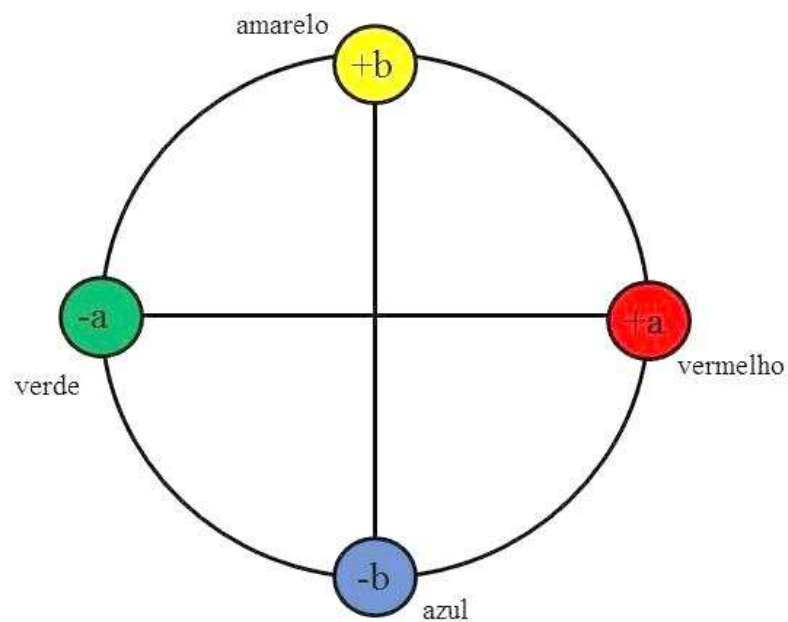


Figura 15. Representação do modelo CIE Lab.

Fonte: Adaptada de Hunterlab (2012).

O aplicativo do programa realiza a conversão dos dados espectrais para os valores de cor, obtendo-se uma função para a reflectância. Os parâmetros de cor indicam a luminosidade (L^*) com valor máximo de 100 (branco), que representa a perfeita reflexão difusa, enquanto o valor 0 representa o preto. A tonalidade a^* e b^* não possuem limites numéricos específicos, de forma que $+a$ (+90) representa o vermelho e $-a$ (-90) representa o verde; o amarelo é representado pelo $+b$ (+90) e o azul pelo $-b$ (-90) (HUNTERLAB, 1996).

5.2.5.2 Nível Terrestre (campo)

Além de medições feitas com a câmera hiperespectral, as medições também foram tomadas com o sensor óptico portátil GreenSeeker[®] RT100 (NTech Industries, Inc., Ukiah, Califórnia). O GreenSeeker é um instrumento que anula os efeitos de interferência atmosférica e geometria de satélite, uma vez que é mantido intimamente próximo às culturas (Figura 16). Além disso, o sensor portátil contém sua própria fonte de luz, permitindo que as medições possam ser realizadas durante o dia ou à noite, sem interferência da luz solar e posição do sol (VERHULST, GOVAERTS, 2010).



Figura 16. Unidade de sensor óptico portátil GreenSeeker.

As medições são dadas em Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), onde o infravermelho próximo (NIR) usa o comprimento de onda 774

nm e o vermelho (R) usa o comprimento de onda 656 nm. No procedimento de campo foi calculado o NDVI como um indicador de estresse da planta.

Após a amostragem das folhas, as leituras da unidade de sensor óptico portátil foram obtidas para cada árvore em condições de campo, cujas medidas de NDVI foram tomadas à 0,5 m de distância entre o sensor e as árvores, na parte central superior das árvores para todos os blocos.

5.2.5.3 Nível Sub-orbital (imagens)

5.2.5.3.1 Perfil Espectral

No programa ENVI 5.0 é possível traçar um perfil espectral para cada banda quando múltiplas bandas são exibidas na janela de visualização, para o pixel selecionado. Pode-se fazer a extração do perfil para qualquer conjunto de dados, sejam eles multiespectrais ou hiperespectrais.

5.2.5.3.2 Índices de Vegetação

Índices espectrais considerados bons candidatos para estimativa da concentração de N na planta foram testados. As medidas de reflectância espectral foram obtidas pelas combinações lineares de dados espectrais, cuja função é realçar o sinal da vegetação ao mesmo tempo em que minimizam as variações na irradiância solar e os efeitos do substrato do dossel vegetal (JACKSON; HUETE, 1991).

Os índices foram agrupados por categoria (Tabela 3), em função das informações inclusas em cada índice, como propriedades da vegetação para detectar a presença e abundância relativa de pigmentos, água e carbono, expressos no espectro óptico de energia solar reflectida.

Tabela 3. Índices de vegetação estudados

Índice	Nome	Fórmula	Autor
<i>Índices de Nitrogênio</i>			
VI _{opt}	Índice de vegetação ótimo	$(1+0,45)(R_{800}^2+1)/(R_{670}+0,45)$	Reyniers et al. (2006)
GNDVI	Normalized difference vegetation index green-blue	$(R_{573}-R_{440})/(R_{573}+R_{440})$	Hansen, Schjoerring (2003)
RVI ₁	Ratio Vegetation Index I	$(R_{918})/(R_{620})$	Este estudo
RVI ₂	Ratio Vegetation Index II	$(R_{918})/(R_{707})$	Este estudo
DCNI	Double-peak canopy nitrogen index	$(R_{720}-R_{700})/(R_{700}-R_{670})/(R_{720}-R_{670}+0,03)$	Chen et al. (2010)
<i>Índices de Clorofila</i>			
MCARI	Modified chlorophyll absorption ratio index	$[(R_{700}-R_{670})-0,2(R_{700}-R_{550})](R_{700}/R_{670})$	Daughtry et al. (2000)
TCARI	Transformed chlorophyll absorption in reflectance index	$3\{[(R_{700}-R_{670})-0,2(R_{700}-R_{550})](R_{700}/R_{670})\}$	Haboudane et al. (2004)
<i>Outros índices</i>			
NDVI	Normalized difference vegetation index	$(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670})$	Rouse et al. (1974)
NDVI ₇₀₅	Red Edge Normalized difference vegetation index	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705})$	Gitelson, Merzlyak (1994)
mSR ₇₀₅	Modified Red Edge Simple Ratio	$(R_{750}-R_{445})/(R_{705}-R_{445})$	Sims et al. (2002)
VOG ₁	Vogelmann Red Edge Index I	$(R_{740})/(R_{720})$	Vogelmann et al. (1993)

* R_i denota a reflectância da banda i (nanômetro).

Cada categoria de índices normalmente fornece várias técnicas para estimar a ausência ou a presença de uma única propriedade da vegetação. Para diferentes

propriedades e condições de campo, alguns índices dentro de uma categoria fornecem resultados com maior validade do que outros.

5.3 Análise dos dados

Os dados de verdade terrestre (teor de N-foliar, SPAD, $NDVI_{(campo)}$ e 670 nm) foram analisados pelo método de correlação de Pearson, que avalia a relação linear entre 2 variáveis contínuas. Esta relação é linear quando a mudança de uma variável está proporcionalmente relacionada à mudança da outra, cujo coeficiente de correlação linear é calculado para cada par de variáveis.

Para estudo do comportamento espectral do citros em imagens hiperespectrais, a seleção das bandas que melhor representam os objetos da superfície fez-se necessária.

Dados de sensoriamento remoto hiperespectral necessitam de um processamento rápido denominado redução de dimensionalidade. Esta é uma transformação de uma dimensão de ordem elevada para uma dimensão de baixa ordem. A Análise de Componentes Principais (Principal Components Analysis - PCA) é a técnica de redução de dimensionalidade mais popular para os dados de sensoriamento remoto (KOONSANIT et al. 2012).

A Análise de Componentes Principais (PCA) identifica as combinações lineares das variáveis originais que contém a maior parte das informações, no sentido da variabilidade, contidas nos dados (BAJORSKI, 2012).

A PCA foi conduzida nas 128 bandas das imagens obtidas, a fim de selecionar as bandas mais significativas para a caracterização da variabilidade espacial dos objetos representados pelos dados de campo (Figura 17).

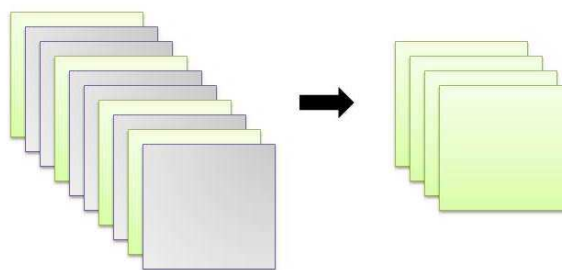


Figura 17. Exemplificação da técnica de Análise de Componentes Principais utilizada na redução da dimensionalidade em dados de sensoriamento remoto hiperespectral.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Este método condensa toda a informação de um conjunto de dados da banda original que é "N", ajustados em um número menor do que "N" de bandas novas (ou de componentes principais), de tal maneira que maximiza a covariância e reduz a redundância, a fim de alcançar um nível baixo, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Alcance das bandas selecionadas pela Análise de Componentes Principais

Banda	Comprimento de onda (nm)		
	Inicial	Médio	Final
1	919,9	918,1	921,7
2	916,3	914,4	918,1
32	807,4	805,6	809,2
42	771,1	769,3	772,9
45	760,2	758,4	762,0
46	756,6	754,8	758,4
51	738,4	736,6	740,3
55	723,9	722,1	725,7
63	694,9	693,1	696,7
64	691,3	689,4	693,1
70	669,5	667,7	671,3
86	611,4	609,6	613,2
88	604,2	602,3	606,0
89	600,5	598,7	602,4
92	589,7	587,8	591,5
113	513,4	511,6	515,3
115	506,2	504,4	508,0
116	502,6	500,7	504,4
125	469,9	468,1	471,7
128	459,0	457,2	460,8

A PCA transformou as bandas da imagem hiperespectral auto-correlacionadas em componentes principais descorrelacionadas, com base na matriz de covariância da banda. As bandas mais significativas foram identificadas a partir de seus autovetores correspondentes com a componente principal que apresentou máxima correlação

com dados de campo. O autovalor representa o grau de variância representada por cada componente principal. A máxima variância da imagem é carregada pela primeira componente principal e a variância das componentes principais diminui em ordem decrescente (BAJWA et al, 2004).

Dentre as bandas selecionadas pela PCA, as bandas 32, 45, 55, 70, 116 e 128 (em destaque na Tabela 4) foram utilizadas na aplicação dos índices de vegetação, por apresentarem comprimentos de onda que demonstraram-se satisfatórios a esta análise e máxima correlação com os dados de campo.

O efeito dos diferentes níveis de nitrogênio na coloração das árvores foi testado por análise de variância (ANOVA) e o teste de comparação de médias dos blocos pelo teste de Tukey, com nível de 5% de significância. Para discriminar o comportamento da coloração entre blocos foi aplicada a PCA.

Com o intuito de conhecer o efeito dos níveis de nitrogênio sobre o comportamento espectral das plantas, foi realizada uma análise de regressão linear múltipla, pelo método *backward stepwise*, para os dados de verdade terrestre (N-foliar, SPAD, NDVI_(campo) e 670 nm), com nível de significância de 5%, para escolha do subconjunto que melhor representasse o modelo.

A regressão linear múltipla é uma técnica multivariada cuja finalidade principal é obter uma relação matemática entre uma das variáveis estudadas (variável dependente ou resposta) e o restante das variáveis que descrevem o sistema (variáveis independentes ou explicativas), e reduzir um grande número de variáveis para poucas dimensões com o mínimo de perda de informação, permitindo a detecção dos principais padrões de similaridade, associação e correlação entre as variáveis. Sua principal aplicação, após encontrar a relação matemática, é produzir valores para a variável dependente quando se têm as variáveis independentes - cálculo dos valores preditos (SASSI et al., _).

A inclusão de novas variáveis na equação de ajuste pode ser feita para aumentar o grau de correlação entre os dados teóricos e reais, Tal modelo apresenta a Equação 12:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p + e \quad (12)$$

sendo X_p a p-ésima variável observada, β_p o coeficiente associado à p-ésima variável e $e = Y - \hat{Y} = Y - \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p$ o erro que apresenta distribuição normal com média zero e variância σ^2 .

A escolha dos modelos foi feita com base na análise de variância (teste F). Quando houve significância do teste F para a falta de ajuste, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade; e também pela significância de seus coeficientes de determinação, testados pelo teste t, a 5% de probabilidade. Não foram testados modelos superiores ao segundo grau, por não representarem o fenômeno biológico da cultura, pois em geral a resposta do nitrogênio foliar a doses de nitrogênio tende a ser quadrática (PRIMAVESI et al., 2004).

Os modelos para os níveis de nitrogênio foram gerados por análise de regressão linear simples, comparando-se os dados de verdade terrestre com os índices de vegetação selecionados anteriormente.

Segundo Camargo et. al (2004), as superfícies de tendência são interpoladores determinísticos globais. A superfície é aproximada por um ajuste polinomial aos dados, através de um processo de regressão múltipla entre os valores do atributo e as localizações geográficas. Essa função polinomial é então utilizada para estimar os valores dos pontos em todas as localizações de uma grade regular que aproxima a superfície.

Por sua vez, as superfícies de tendência buscam modelar a variação espacial em larga escala através de uma regressão múltipla entre os valores de atributo e as localizações geográficas (CAMARGO et. al, 2004).

Ainda segundo os mesmo autores, a suposição implícita nos interpoladores por superfícies de tendência é que, para a caracterização do fenômeno em estudo, predomina a variação em larga escala, e que a variabilidade local não é relevante. Neste modelo, a função de autocorrelação continua decaindo mesmo após ultrapassar a distância onde há influências locais; a covariância não se estabiliza com a distância e assim o fenômeno analisado é não-estacionário.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise Foliar

Como a disponibilidade de N não tem sido eficientemente avaliada pelas análises do solo, o N-foliar vem sendo empregado como guia para recomendação de nitrogênio em plantas cítricas (QUAGGIO, 2005).

Os resultados da análise foliar estão dispostos no Apêndice 1, Os valores são referentes às 102 árvores amostradas em novembro de 2012, paralelamente à coleta dos dados espectrais.

No experimento, os teores de N-foliar variaram do nível excessivo, em plantas do Bloco C, ao nível deficiente, em plantas do Bloco B, conforme tabela de nutrientes da cultura do citros recomendada por OBREZA et al. (2011). Este parâmetro foi utilizado como uma variável de verdade terrestre para aferir a metodologia aplicada.

Na Tabela 5 verifica-se que o teor de N-foliar resultante da análise foi significativamente menor nos blocos A e B, apresentando valores médios semelhantes. Já os blocos C e D apresentaram diferença significativa entre médias, em resposta aos diferentes níveis nutricionais presentes.

As médias dos dados de verdade terrestre, seguidas de letras iguais, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, nível de 5% de probabilidade.

Tabela 5. Valores médios de teor de N-foliar nas plantas

	Nitrogênio (%)
Bloco C	2,9 A
Bloco D	2,8 B
Bloco A	2,6 C
Bloco B	2,4 C

O SPAD é um índice cujo valor não apresenta unidade. Neste estudo as medidas SPAD variaram de 53,8 a 78,1, enquanto as concentrações de N-foliar são representadas em porcentagem, variando neste estudo de 2,18 a 3,19%, com média de 2,68%.

As medidas SPAD realizadas nas folhas amostradas apresentaram diferença significativa entre todos os blocos, devido à sensibilidade das leituras quanto às características fisiológicas das árvores (Tabela 6). O blocos C e D apresentam folhas com coloração verde mais intensa e copa mais densa. Já os blocos A e B diferem em idade, nível nutricional e arquitetura das plantas, cujas copas são menos densas, quando comparadas aos outros blocos.

Tabela 6. Valores médios de das medidas SPAD nas plantas

	SPAD
Bloco D	72,4 A
Bloco C	70,0 B
Bloco A	67,5 C
Bloco B	62,3 D

Na Tabela 7 verifica-se que o $NDVI_{(campo)}$ mensurado não apresentou diferença significativa nos blocos C e D, devido à densidade das copas serem elevadas, enquanto os blocos A e B apresentaram diferença significativa entre médias.

Tabela 7. Valores médios de teor de $NDVI_{(campo)}$ nas plantas

	$NDVI_{(campo)}$
Bloco C	0,9 A
Bloco D	0,9 A
Bloco A	0,8 B
Bloco B	0,8 C

No bloco B, o $NDVI_{(campo)}$ pode ter sofrido influência espectral das plantas invasoras presentes na entrelinha do plantio, ocasionada pela carência de tratamentos culturais neste pomar, cuja altura alcançava as copas das árvores.

6.2 As relações entre teor de N-foliar, medidas SPAD, $NDVI_{(campo)}$ e 670 nm

Como a absorção de água obscurece as características de absorção de N em bandas de comprimento de onda curto, é difícil detectar a concentração de N na planta em algumas regiões do visível do espectro eletromagnético. É pertinente utilizar a reflectância nas bandas do visível e borda do vermelho para estimar a concentração de N, considerando-se o bom relacionamento entre concentração de clorofila e a concentração de N na planta. Como a reflectância do visível e infravermelho próximo são dominadas pelas características de absorção de clorofila, a relação entre SPAD e o teor de N-foliar na planta foi avaliada, usando dados de campo e de sensoriamento remoto para pomares de laranja (variedade Valência).

Foram encontradas correlações significativas entre as medidas SPAD, teor de N-foliar e 670 nm (Tabela 8 e Figura 18). Souza et al. (2005) também encontraram uma correlação significativa ($R^2 = 0,95$) entre a concentração de clorofila e de N-foliar em plantas cítricas.

Tabela 8. Correlações entre teores de N-foliar (%), medidas SPAD, $NDVI_{(campo)}$ e comprimento de onda 670 nm

	N-foliar	SPAD	$NDVI_{(campo)}$	670 nm
N-foliar	1			
SPAD	0,96*	1		
$NDVI_{(campo)}$	0,58	0,53	1	
670 nm	0,73*	0,67	0,52	1

* dados significativos ao nível de 5% de probabilidade, pela correlação de Pearson.

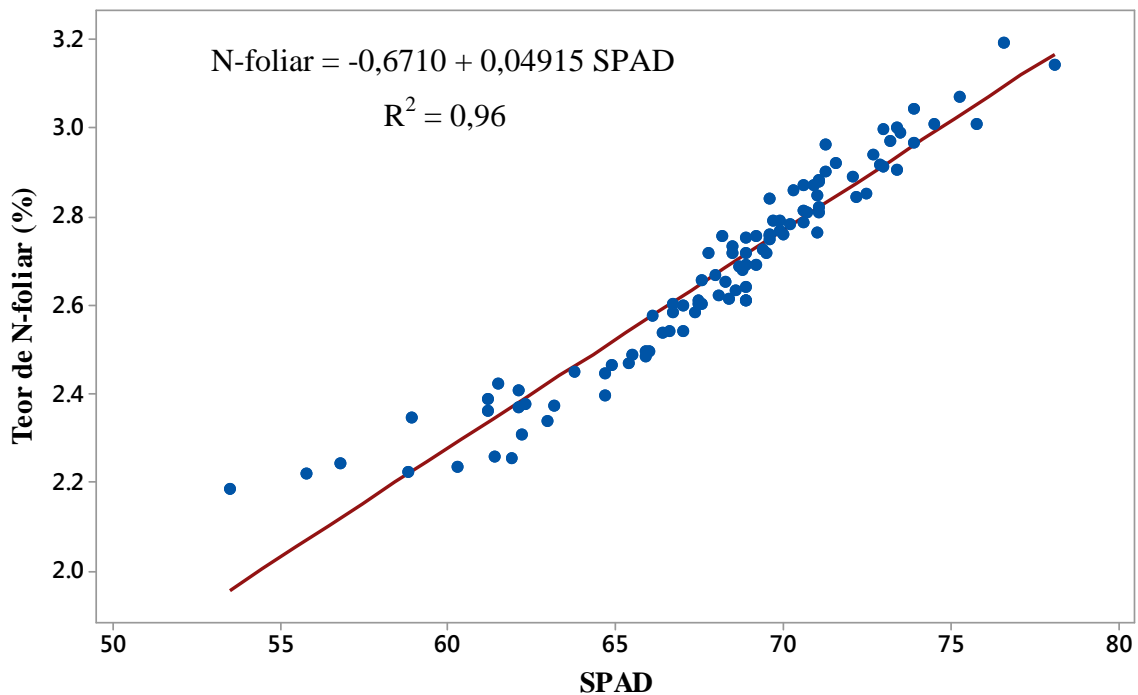


Figura 18. Correlação entre teores de N-foliar (%) e medidas SPAD.

O $NDVI_{(campo)}$ teve correlações moderadas com o teor de N-foliar (0,58), com as medidas SPAD (0,53) e com o comprimento de onda 670 nm (0,67). Já o comprimento de onda 670 nm, resultante da análise da colorimetria, apenas apresentou uma forte correlação com o teor de N-foliar (0,73).

6.3 Colorimetria

A curva de reflectância das amostras apresentou pico no comprimento de onda 670 nm, correspondente à região do visível (vermelho), onde há maior absorção da energia pela clorofila, conforme detectado por Min e Lee (2005), quando desenvolveram um sensor espectral de N em tempo real para plantas de citros e selecionaram as bandas 447 e 676 nm, por estas bandas estarem claramente relacionadas às bandas de absorção da clorofila.

O estudo da colorimetria foi aplicado para discriminar a coloração das plantas em diferentes níveis de teor de N-foliar. A cor foi avaliada pela reflectância no espaço de cor CIE Lab, observando-se os valores médios das coordenadas cromáticas L^* , a^* e b^* para os 4 blocos (Tabela 9).

As médias das variáveis de colorimetria, seguidas de letras iguais, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, nível de 5% de probabilidade.

Tabela 9. Valores médios de luminosidade, intensidade a* e intensidade b*

	670 nm	L	a	b
Média				
Bloco A	0,8 B	57,2 A	-12,2 B	43,8 A
Bloco B	0,8 C	58,7 A	-12,0 B	42,4 A
Bloco C	0,9 A	52,0 B	-10,8 A	33,5 B
Bloco D	0,9 A	51,7 B	-10,6 A	31,4 B

A análise colorimétrica das folhas de laranjeira indicou que a luminosidade (L) das árvores dos blocos C e D não diferem significativamente e apresentaram o valor médio de L mais baixo (52 e 51,7, respectivamente), caracterizando tons mais escuros. Os parâmetros a* e b* indicaram uma tendência de menor de retenção da coloração verde nas folhas e menor amarelecimento.

Os blocos A e B não diferem significativamente entre si quanto à luminosidade e apresentaram valores de L* elevados, indicando uma coloração mais clara. Assim, como nos demais blocos, os parâmetros a* e b* indicaram uma tendência de redução na perda de coloração verde das folhas, porém mais elevado processo de amarelecimento da folha.

Niero et al. (2013) obtiveram resultados significativos ao utilizarem o método de avaliação de cor para discriminar variedades de cana-de-açúcar, épocas e posição da folha.

A perda de coloração verde da folha está ligada à quebra da estrutura da molécula de clorofila, envolvendo, principalmente, a atividade da enzima clorofilase, que é modulada pelo etileno (YAMAUCHI et al., 1997; MENDONÇA et al., 2003). Assim, o baixo teor de N-foliar tem influência direta na redução da coloração verde da folha.

Turrel et al. (1961) analisaram o teor de clorofila e a reflectância espectral de folhas cítricas e verificaram que é possível detectar diferenças na coloração foliar entre diferentes variedades, cujo valor mais elevado da cor de folhas de limão Eureka é mostrado em função de menores concentrações de clorofila a + b e, conseqüentemente maior refletividade de luz visível na região verde do espectro solar.

Uma PCA foi realizada a partir da seleção de 4 blocos, com diferentes níveis de teor de N, mostrando o primeiro eixo fortemente influenciado pelo parâmetro de coloração verde, o que responde ao teor de clorofila presente nas folhas (Figura 19).

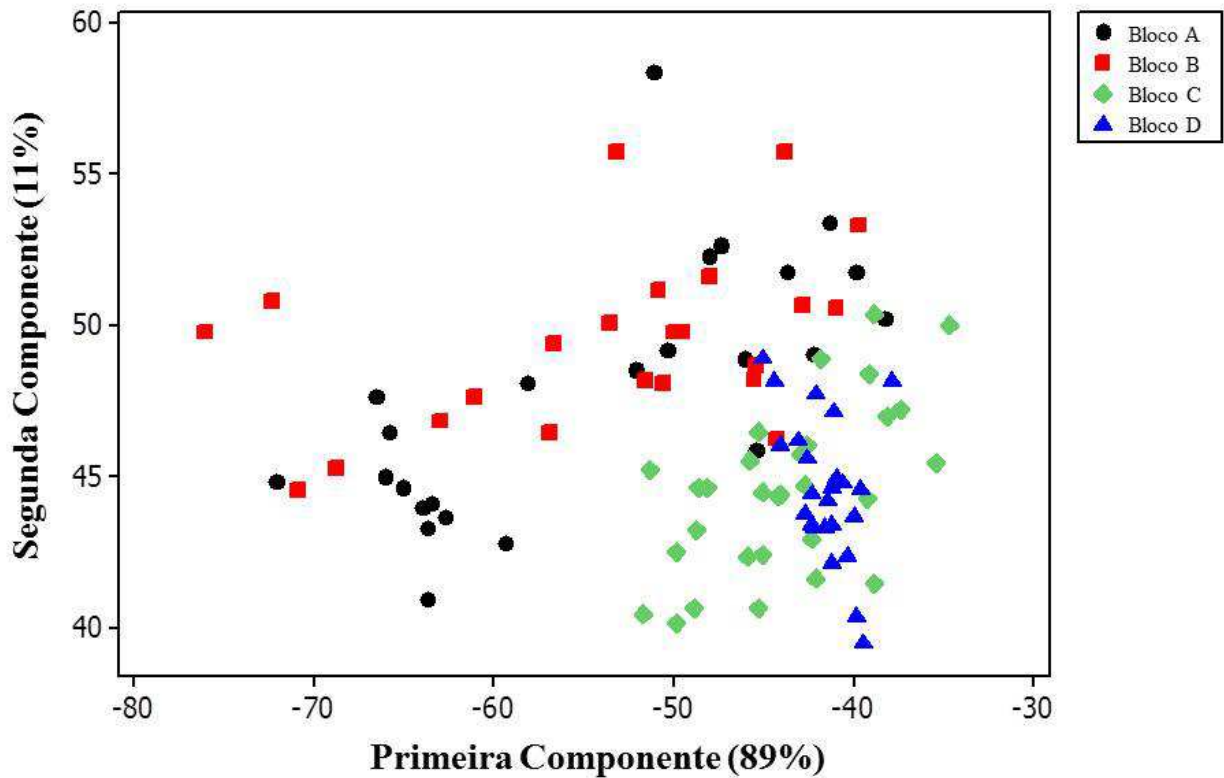


Figura 19. Análise de componentes principais de parâmetros de colorimetria, considerando 102 amostras distribuídas em 4 blocos e 5 níveis de teor de nitrogênio.

Com o primeiro eixo da PCA explicando 89% da variação dos dados, observa-se que o parâmetro b^* é responsável pela distinção da coloração entre os blocos B (baixos teores de nitrogênio foliar) e C (altos teores de nitrogênio foliar). O parâmetro de luminosidade fica responsável pelas variações ao longo do segundo eixo, que são consideradas como de pequeno significado (Tabela 10).

De modo geral, o estudo da colorimetria é geralmente aplicado à estudos de determinação de nutrientes (FRAIGE et al., 2007; NOGUEIRA et al., 2007; AMARAL et al., 2011), caracterização de propriedades físicas dos alimentos (ABREU et al., 2013), indústria, entre outros.

Tabela 10. Resultado da análise de componentes principais para a colorimetria

	Componentes Principais			
	1	2	3	4
Autovalor	89,450	13,752	0,584	0,000
Variabilidade (%)	0,862	0,132	0,006	0,000
% Acumulada	0,862	0,994	1,000	1,000
Variáveis	Correlação com os componentes principais			
670 (μm)	0,004	-0,019	0,001	-1,000
L	-0,182	0,982	0,042	-0,019
a	0,155	0,071	-0,985	-0,001
b	-0,971	-0,173	-0,165	-0,000

Constatou-se que, embora esta análise seja promissora para a análise da coloração quanto ao comportamento nutricional do citros, trabalhos com a mesma finalidade da metodologia empregada neste estudo não foram encontrados na literatura.

6.4 Análise do perfil espectral das imagens hiperespectrais para as bandas selecionadas

Determinar as bandas principais e a aplicação dos índices de vegetação é a chave para o monitoramento não-destrutivo de estado do teor de N em uma cultura. Em estudos anteriores, a determinação de bandas principais exige um conhecimento a priori dos parâmetros fisiológicos estudados (HABOUDANE et al., 2002; SIMS, GAMON, 2002). Porém, a limitação do conhecimento prévio impede que esses métodos sejam utilizados para determinar as bandas principais para os outros parâmetros fisiológicos sem conhecimento correspondente (WANG et al., 2012).

A análise do perfil espectral dos blocos mostrou que o comportamento espectral das árvores foi influenciado por características do dossel e/ou do ambiente (Figura 20).

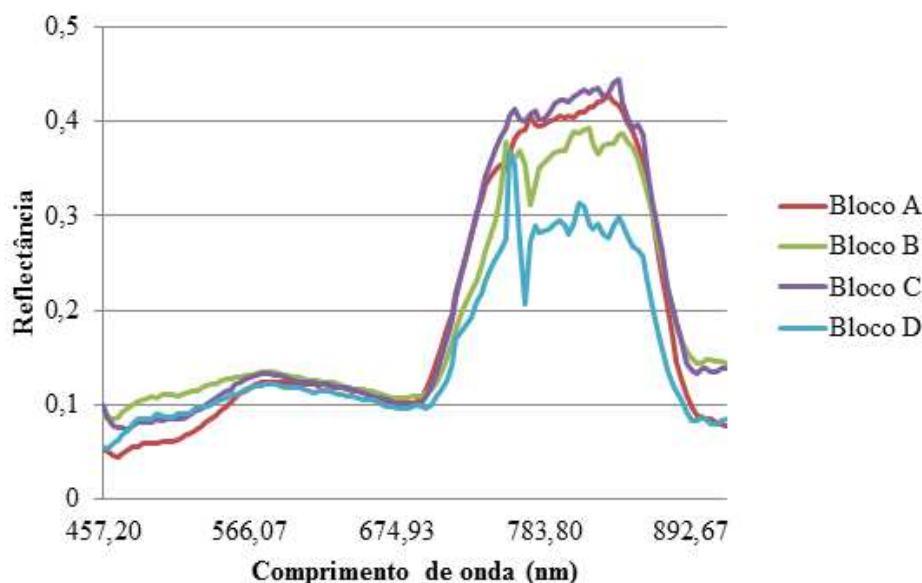


Figura 20. Comportamento do perfil espectral das amostras distribuídas nos blocos A, B, C e D.

No bloco A, as árvores apresentaram teores de N-foliar distribuídos de baixo a adequado, enquanto que no bloco B esta distribuição foi de deficiente a baixo, quanto à interpretação do resultado da análise foliar.

As curvas espectrais referentes aos blocos A e B apresentaram reflectâncias elevadas na região do infravermelho. Este comportamento dos perfis espectrais pode ser explicado pela influência de propriedades fisiológicas do dossel, como idade das plantas (Bloco A) e estresse (Bloco B). Quanto mais avançada a idade da planta, maior será a reflectância na região do infravermelho e menor na região do vermelho. A condição de estresse, neste caso causada por menores teores de N-foliar, também podem aumentar a reflectância na região do infravermelho, causada pelo aumento da superfície de contato interna (PONZONI, 2001).

Os blocos C e D apresentam teores de N-foliar distribuídos entre adequado e excessivo. As curvas espectrais apresentaram picos de reflectância menores na região do infravermelho. O bloco D apresentou este comportamento espectral na região do infravermelho, pois a copa das árvores deste bloco apresentavam melhor condições de sanidade e, conseqüentemente, maior absorção de energia pelo dossel.

Todos os blocos apresentaram pico da curva espectral com comportamento semelhante na região do vermelho, em razão da quantidade de luz vermelha absorvida indicar a quantidade de clorofila, enquanto a quantidade de luz absorvida no

infravermelho próximo serve como referência interna na compensação da espessura da folha e do conteúdo de água (Zotarelli et al., 2002).

É importante destacar que a diferença fenológica entre árvores na época da tomada das imagens pode ter comprometido a obtenção de melhores relações entre os dados da resposta espectral e o N-foliar, visto que não foram implementados tratamentos por diferentes doses de aplicação.

6.5 Os resultados da análise de regressão linear múltipla entre os dados de verdade terrestre os índices de vegetação

Para ser um bom estimador da concentração de N, um índice de vegetação deve ser bem correlacionado com o teor de N-foliar e deve mostrar baixa sensibilidade a outros fatores de confusão (DAUGHTRY et al., 2000).

Os teores de N-foliar e os índices de vegetação ajustaram-se a modelos de primeiro grau, o que indica que os dosséis das plantas foram influenciados pelos níveis de nitrogênio.

Da mesma forma, Silva Júnior (2006) encontrou resposta linear positiva para o teor de nitrogênio total foliar até a maior dose de nitrogênio aplicada em capim-braquiária, cujo teor de nitrogênio total variou de 1,619 a 2,839% nos limites das doses de nitrogênio estudadas (0 a 200 kg/ha) por esse autor.

O coeficiente de determinação ou poder explicativo do modelo (R^2) representa a porcentagem da variabilidade de Y que pode ser explicada por sua relação com X. Quanto mais próximo de 100%, melhor a qualidade do ajuste. Se o poder explicativo for, por exemplo 98%, isto significa que 98% das variações são explicadas por X através da função escolhida e 2% são atribuídas a causas aleatórias.

Apenas as relações entre os melhores índices de vegetação e os dados de verdade terrestre foram selecionados. O melhores modelos de regressão para os índices de vegetação foram obtidos com uma função linear, que apresentaram relação positiva com o teor de N-foliar, SPAD, NDVI_(campo) e 670 nm. Para os índices que apresentaram coeficiente de determinação significativo foram elaborados modelos de regressão linear referentes a cada nível de teor de N-foliar avaliado.

Embora o NDVI seja o índice de vegetação mais popular dentre os demais, há um conjunto de índices que apresentam diferentes respostas à concentração de

clorofila. Muitos desses índices foram desenvolvidos para capturar as características mais importantes de reflectância ou absorção, utilizando as intervalos de comprimento de onda estreitos, podendo proporcionar uma maior sensibilidade à disponibilidade de nutrientes.

Os índices aplicados neste estudo foram selecionados para avaliar possíveis melhorias em medições foliares futuras, especialmente aqueles que são baseados em medidas de reflectância de banda estreita nos comprimentos de onda visível e infravermelho próximo.

Dentre os índices estudados, dois dos índices sensíveis à detecção de clorofila (MCARI e TCARI) mostraram-se promissores tanto na detecção do teor de N-foliar, quanto na detecção indireta da clorofila (SPAD), apresentando diversos modelos de regressão linear, que foram ajustados para cada índice, com nível de nitrogênio como a variável independente para determinar o coeficiente de determinação (Tabela 11).

Tabela 11. Resultados da análise de regressão linear entre os dados de verdade terrestre e os índices de vegetação

Índices de Vegetação	Teor N-foliar	SPAD	NDVI _(campo) 670 nm	
			R ²	
VI _{opt}	0,45	0,42	0,35	0,00
RVI ₁	0,07	0,10	0,04	0,52
DCNI	0,10	0,60	0,35	0,06
MCARI	0,90	0,87	0,12	0,24
TCARI	0,91	0,87	0,15	0,19
NDVI	0,12	0,03	0,03	0,56
mSR ₇₀₅	0,20	0,87	0,05	0,02
VOG ₁	0,36	0,29	0,33	0,10

Os modelos cujo coeficiente de determinação não foi significativo, não foram demonstrados neste estudo.

Os resultados foram significativos em um nível de 0,01 ou superior para 8 índices de vegetação, cujas coeficiente de determinação de MCARI e TCARI tiveram valores de R² de 0,90 e 0,91, respectivamente, para o teor de N-foliar, apresentados pelos modelos abaixo, propostos para o monitoramento nutricional:

Deficiente	N-foliar = 2,2207 - 0,0208 MCARI	N-foliar = 2,1884 + 0,1877 TCARI
Baixo	N-foliar = 2,3985 - 0,0208 MCARI	N-foliar = 2,3435 + 0,1877 TCARI
Adequado	N-foliar = 2,6822 - 0,0208 MCARI	N-foliar = 2,6281 + 0,1877 TCARI
Alto	N-foliar = 2,9123 - 0,0208 MCARI	N-foliar = 2,8555 + 0,1877 TCARI
Excessivo	N-foliar = 3,1385 - 0,0208 MCARI	N-foliar = 3,0872 + 0,1877 TCARI

Dentre os índices sensíveis às variações de clorofila, aproximadamente 90% da variação dos valores de MCARI e TCARI, para a variedade Valência, pode ser atribuída à variação do nível de nitrogênio encontrado nos pomares.

Os índices MCARI, TCARI e mSR₇₀₅ são os mais afetados pela variabilidade de clorofila, mostrando alta sensibilidade, mesmo quando em níveis elevados de clorofila. Isto pode ser explicado por suas equações serem altamente correlacionadas com o teor de clorofila na folha e copa (WU et. al, 2008).

Geralmente, as reflectâncias de 705 nm e 750 nm são mais apropriadas para estimar a quantidade de clorofila do que a de 800 nm e 670 nm (DAUGHTRY et al., 2000).

Daughtry et al. (2000) e Haboudane et al. (2002) verificaram que a razão dos índices sensíveis às variações de clorofila com índices de vegetação tradicionais podem minimizar os efeitos do dossel e do solo, enquanto aumentam a sensibilidade à detecção da concentração de clorofila para o dossel. Estes índices mostram melhor desempenho para estimar a concentração de N, baseando-se na correlação entre concentração de N e concentração de clorofila.

Abrahão et al. (2013) estudaram a discriminação de teores de nitrogênio e clorofila foliares do feijoeiro por meio de bandas e índices de vegetação espectrais e verificaram que o MCARI, quando associado a índices de vegetação sensíveis ao comportamento do dossel apresentam resultados satisfatórios.

Ao aplicar diversos índices de vegetação para as culturas do arroz e do trigo, Wang et al. (2012) verificaram que o índice TCARI apresentou correlação moderada para a estimativa da concentração de N-foliar.

Os índices de vegetação MCARI (Figura 21), TCARI (Figura 22) e mSR₇₀₅ (Figura 23) apresentaram uma relação forte com as medidas SPAD, cujas equações de regressão tiveram valores de R² de 0,87, conforme os modelos apresentados a seguir:

Deficiente	SPAD = 57,230 - 0,91 MCARI	SPAD = 61,844 + 4,06 TCARI
Baixo	SPAD = 63,136 - 0,91 MCARI	SPAD = 56,464 + 4,06 TCARI
Adequado	SPAD = 68,668 - 0,91 MCARI	SPAD = 67,426 + 4,06 TCARI
Alto	SPAD = 72,288 - 0,91 MCARI	SPAD = 70,988 + 4,06 TCARI
Excessivo	SPAD = 76,791 - 0,91 MCARI	SPAD = 75,62 + 4,06 TCARI

O mSR₇₀₅ e o NDVI, índices sensíveis ao comportamento do dossel, foram selecionados quanto às leituras SPAD e perfil espectral obtido pelo método colorimétrico, estes modelos de regressão linear são:

Deficiente	SPAD = 56,240 + 0,1111 mSR ₇₀₅	670 nm = 0,8342 - 0,0954 NDVI
Baixo	SPAD = 62,402 + 0,1111 mSR ₇₀₅	670 nm = 0,8469 - 0,0954 NDVI
Adequado	SPAD = 67,908 + 0,1111 mSR ₇₀₅	670 nm = 0,9288 - 0,0954 NDVI
Alto	SPAD = 71,528 + 0,1111 mSR ₇₀₅	670 nm = 0,9819 - 0,0954 NDVI
Excessivo	SPAD = 76,123 + 0,1111 mSR ₇₀₅	670 nm = 1,0338 - 0,0954 NDVI

Como foi esperado, mSR₇₀₅ superou o NDVI em termos de sensibilidade da folha à parâmetros biofísicos, devido à sua combinação de bandas pela razão simples (JORDAN, 1969; WU et. al, 2008).

A radiação infravermelha é fortemente refletida pelos tecidos foliares e a radiação vermelha é fortemente absorvida pela clorofila, resultando em valores positivos de NDVI para vegetação sadia (CURRAN, 1981; TUCKER et. al, 1985).

O NDVI e suas variações apresentaram valores mais baixos quanto maior foi a influência do solo, Isso ocorreu porque o NDVI é mais sensível na faixa do vermelho que no infravermelho. Os blocos A, C e D apresentaram menor ou ausência de cobertura vegetal na entrelinha (Figura 24), Na presença do solo há um aumento na reflectância na faixa do vermelho, diminuindo os valores deste índice, visto que a faixa do vermelho é subtraída do numerador (EPIPHANIO, HUETE, 1995).

O estresse nas plantas promove redução da área foliar, causa alteração da coloração verde para amarela, induz a queda e/ou reduz a densidade foliar, levando a um decréscimo na diferença entre a reflectância no infravermelho próximo e no vermelho, causando assim redução nos valores de NDVI (FLETCHER et. al, 2004).

O NDVI é amplamente empregado na agricultura por sua potencialidade. Entretanto, Hansen e Schjoerring (2003) verificaram que este índice apresenta melhores resultados quando aplicado à bandas longas. Para a aplicação em bandas estreitas, a

seleção das bandas adequadas combinadas a variáveis da cultura, podem melhorar o desempenho deste índice.

Abraão et al. (2009) obtiveram resultados semelhantes ao discriminar doses de nitrogênio em capim-tanzânia e concluíram que o NDVI apresentou correlação moderada (0,66) com as leituras de clorofila e massa seca.

Na área, o $NDVI_{(campo)}$ mostrou limitada influência ($0,33 \leq R^2 \leq 0,35$) para os índices VI_{opt} , DCNI e VOG_1 . O comprimento de onda 670 nm também teve uma influência moderada (R^2 entre 0,52 e 0,56) para os índices RVI_1 e NDVI, cujo modelo de regressão para os diferentes níveis nutricionais é:

Deficiente	$670 \text{ nm} = 0,7809 - 0,00293 RVI_1$
Baixo	$670 \text{ nm} = 0,7979 - 0,00293 RVI_1$
Adequado	$670 \text{ nm} = 0,8879 - 0,00293 RVI_1$
Alto	$670 \text{ nm} = 0,9389 - 0,00293 RVI_1$
Excessivo	$670 \text{ nm} = 0,9834 - 0,00293 RVI_1$

Embora os índices de vegetação sensíveis à concentração de N não tenham apresentado coeficiente de determinação significativo, apenas o RVI_1 mostrou-se aplicável quanto às medidas do perfil espectral obtido pelo método colorimétrico.

Chen et al. (2010) desenvolveram o DCNI para estimar a concentração de N para as culturas de milho e trigo e verificaram que este índice apresentou desempenho satisfatório, com R^2 de 72%, principalmente quando utilizado em conjunto com outros índices de vegetação. Entretanto, para a cultura do citros o DCNI não apresentou um modelo satisfatório, possivelmente devido às características fenológicas das plantas.

A posição das plantas no dossel pode ter influenciado nos resultados, devido à distribuição da energia refletida no dossel. As plantas em posições mais externas no pomar tendem a interceptar mais luz e serem menos sombreadas do que as plantas em posições internas. As plantas mais externas tendem a conter mais clorofila do que as plantas internas do pomar, desenvolvendo um gradiente horizontal no teor de clorofila.

Os outros índices apresentaram baixa ou nenhuma correlação com o teor de N-foliar e concentração de clorofila (SPAD), o que pode estar relacionado ao fato de o índice não ser normalizado por uma banda que tenha correlação com a estrutura da folha e do dossel da planta. Além disso, havia variabilidade entre as plantas no terreno em função da presença do greening e idade das plantas. Estes efeitos podem ser vistos na relação entre o teor de N-foliar e a coloração das folhas.

Como os valores utilizados pelos IVs utilizam escalas diferentes, a escala de cores de 0 a 255 foi utilizada para tornar possível a comparação entre os diferentes índices. Como os índices MCARI, TCARI, mSR705, NDVI e RVI1 apresentaram correlação com os dados de verdade terrestre, os mapas de distribuição foram elaborados apenas para estes índices.

Os valores representam maiores IVs quando estão mais próximos ao 255 correspondem à vegetação mais densa e sadia, representados nos mapas temáticos na tonalidade verde escuro, enquanto os valores que apresentam baixos índices de vegetação estão representados nos mapas na tonalidade amarelo. Os valores mais próximos do zero, representados nas tonalidades laranja e amarelo, correspondem à ausência de vegetação, ou seja, solo em exposição.

Ao compararmos os índices aplicados à área correspondente ao bloco A (Figura 21) foi possível verificar que o MCARI mostrou-se mais sensível ao teor de clorofila e detectou nas árvores suas partes mais vigorosas, representadas pelo tom verde escuro, bem como as áreas sob efeito de estresse, representadas pela coloração amarela.

Para o índice TCARI, aproximadamente 90% da vegetação encontra-se sob algum tipo de estresse, pois este índice detectou não apenas as árvores de laranjeira Valência, mas também as plantas invasoras presentes na entrelinha do pomar.

O mSR₇₀₅ mostrou-se muito sensível à presença das plantas invasoras nas entrelinhas, não diferenciando adequadamente as plantas de interesse, como podemos ver representado pela tonalidade verde. Para este índice, apenas as áreas de solo com total ausência de cobertura foi diferenciada, indicadas pela cor vermelha.

Já os índices NDVI e RVI₁ apresentaram um desempenho satisfatório na detecção da vegetação mais densa, sofrendo pouco ou nenhuma influência da reflectância do solo e plantas invasoras.

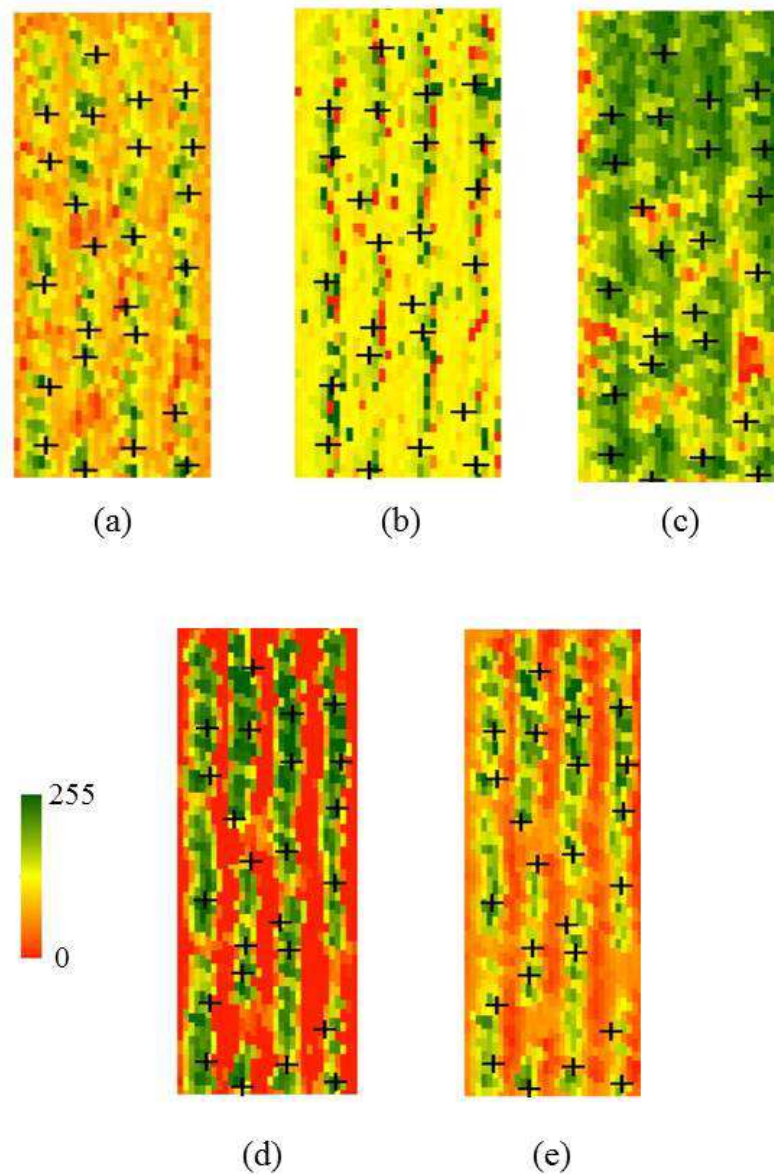


Figura 21. Índices de vegetação (a) MCARI, (b) TCARI, (c) mSR₇₀₅, (d) NDVI e (e) RVI₁ aplicados ao bloco A.

No bloco B, representado pela Figura 22, verificou-se que com a aplicação do MCARI e do RVI₁ foi possível confirmar a maior condição de estresse das árvores presentes neste bloco, pois estes índices foram muito sensíveis na detecção da atividade do tecido foliar, nos dando condições para distinguir as plantas mais vigorosas (verde escuro) das mais deficientes (verde claro – amarelo).

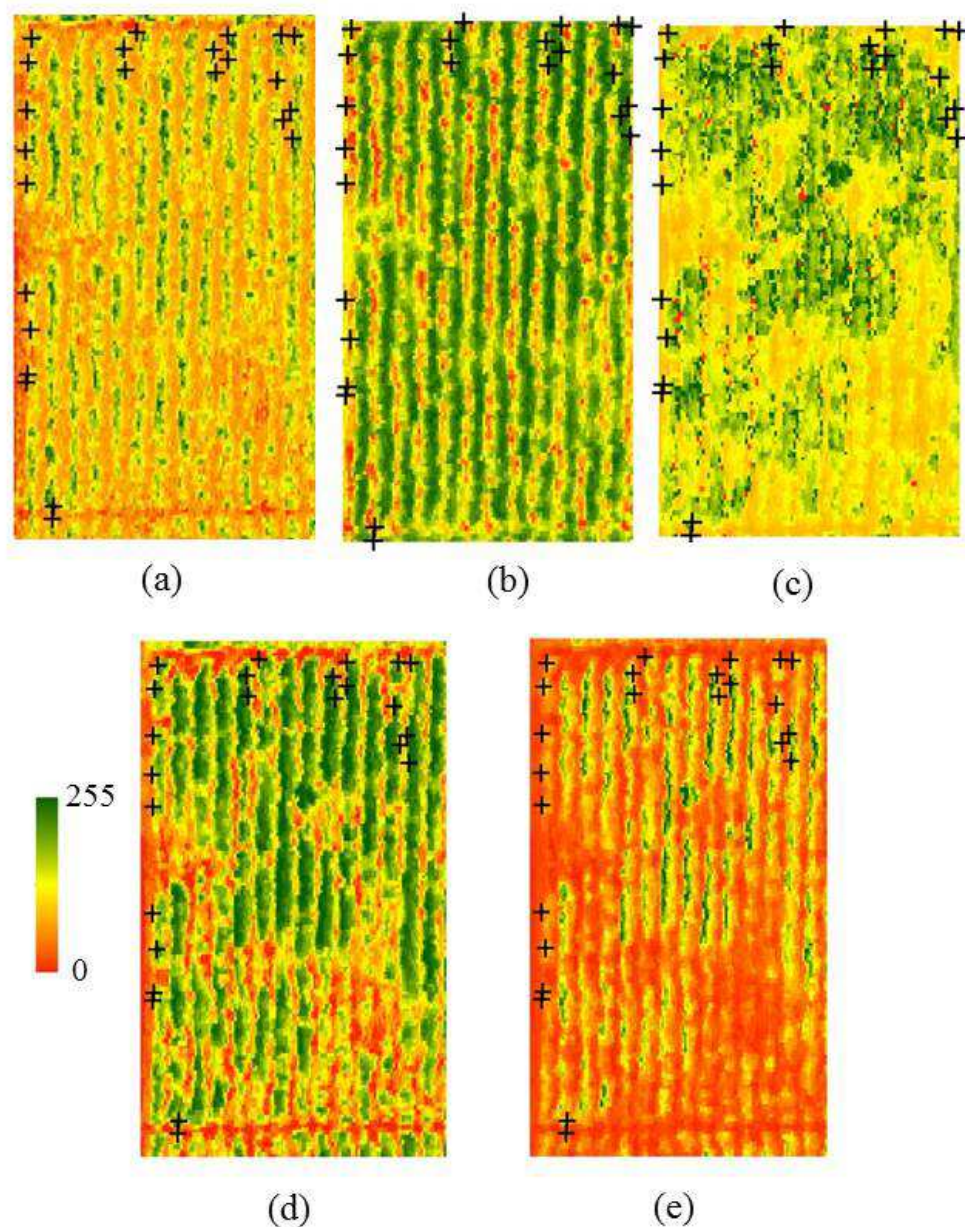


Figura 22. Índices de vegetação (a) MCARI, (b) TCARI, (c) mSR₇₀₅, (d) NDVI e (e) RVI₁ aplicados ao bloco B.

Para este bloco, o TCARI e o NDVI apresentaram um desempenho pouco satisfatório, pois verificamos que para estes dois índices não foi possível distinguir as árvores das plantas invasoras, o que modifica a escala de valores que acompanha cada índice, apesar da utilização das mesmas bandas no algoritmo.

O mSR₇₀₅ detectou “ilhas” cuja presença de plantas invasoras era mais intensa (verde), resultando numa mistura espectral da vegetação sadia, devido à influência da banda azul no cálculo deste índice. Isto aconteceu porque nesta região do espectro

eletromagnético há maior absorção da radiação, em função dos pigmentos foliares detectados por esta banda.

Nas Figuras 23 e 24 observamos que todos os IVs utilizados tiveram resultados semelhantes para os blocos C e D, respectivamente. Este resultado é sustentado pelo teste de médias que foi aplicado aos dados de verdade terrestre, onde verificou-se que ambos os blocos apresentaram comportamento espectral semelhante, mesmo com o bloco C apresentando altos teores de N-foliar e melhor condições fitossanitárias quando comparado ao bloco D, cujas árvores encontram-se em diferente idade de plantio.

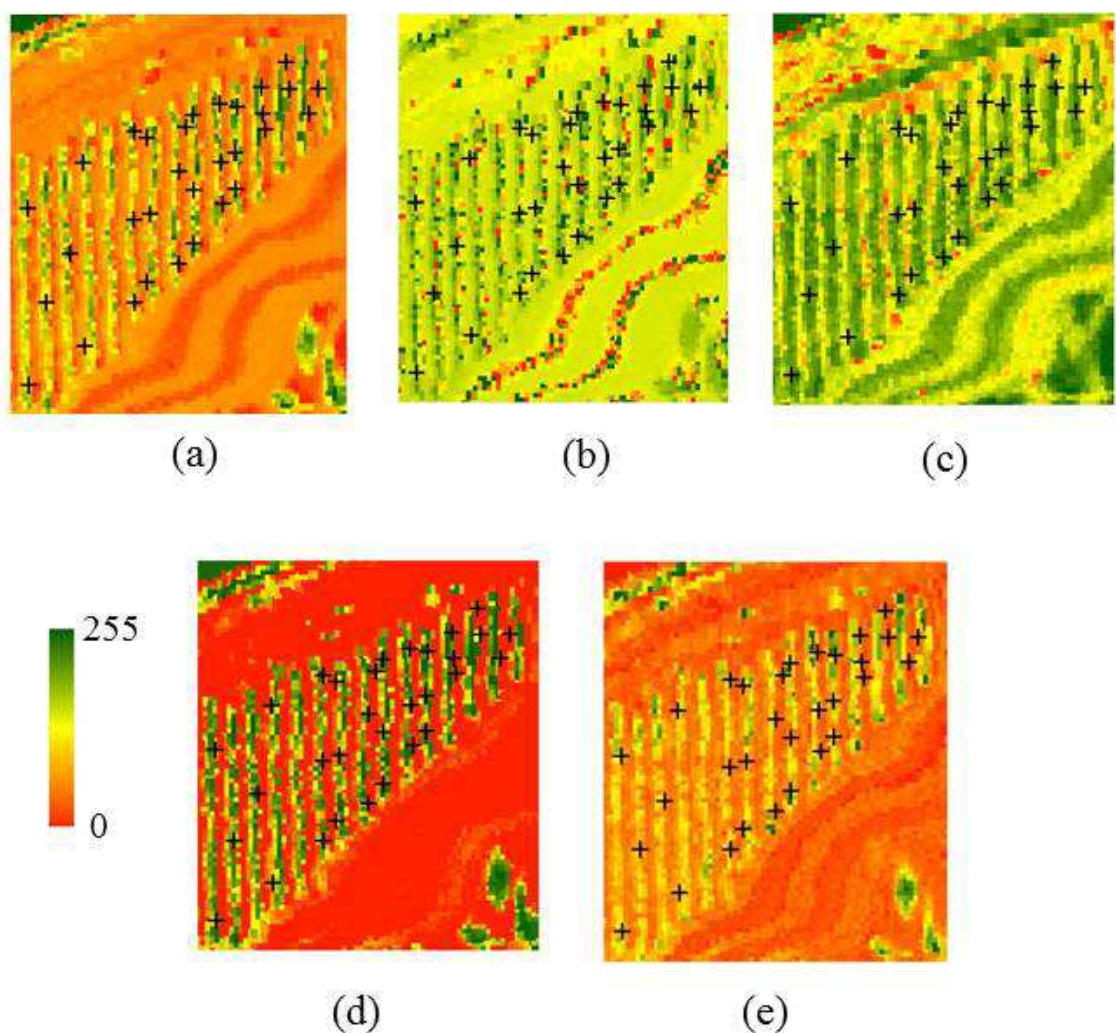


Figura 23. Índices de vegetação (a) MCARI, (b) TCARI, (c) mSR₇₀₅, (d) NDVI e (e) RVI₁ aplicados ao bloco C.

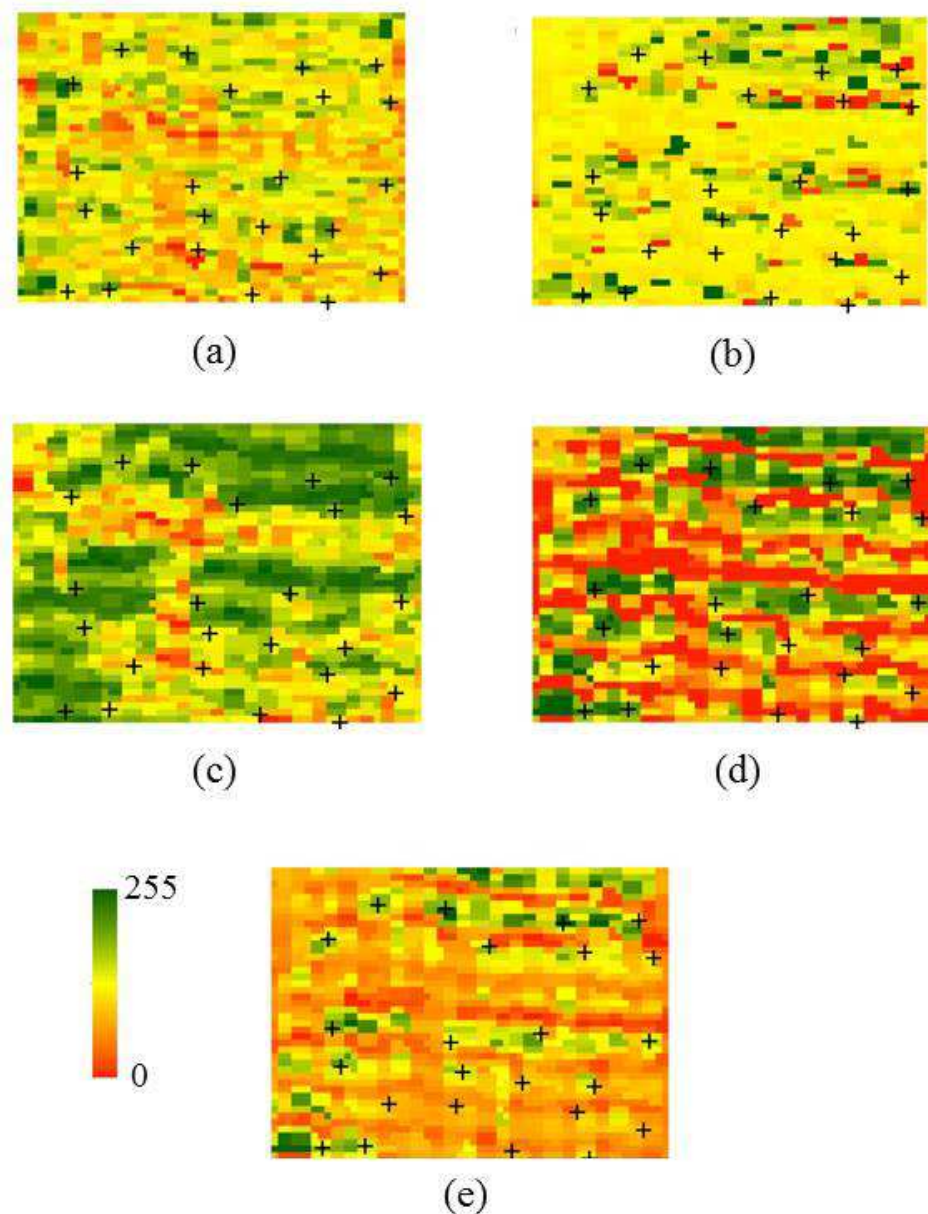


Figura 24. Índices de vegetação (a) MCARI, (b) TCARI, (c) mSR₇₀₅, (d) NDVI e (e) RVI₁ aplicados ao bloco D.

O MCARI e o RVI₁ detectaram apenas as árvores mais vigorosas do pomar, representadas pelo tom verde escuro, e também aquelas que estavam sob estresse, representadas por tons de amarelo. Já os índices NDVI apresentou desempenho esperado, separando a vegetação mais densa dos demais alvos da superfície terrestre, sem detalhamento.

O TCARI apresentou melhor desempenho para estes blocos, porém não foi totalmente eficaz, com seus intervalos na escala muito próximos, de modo que não se consegue diferenciar os alvos, como as árvores, as plantas invasoras e os solos.

O mSR_{705} apresentou o mesmo comportamento apresentado no bloco A, mostrando-se muito sensível à presença das demais plantas ao redor do pomar e também nas entrelinhas, não permitindo que a distinção das árvores seja corretamente realizada.

Para aferição dos mapas temáticos resultantes dos IVs fez-se uma análise de tendência, cujos mapas temáticos das medidas SPAD pelo método de interpolação do vizinho natural com os pontos amostrais está apresentado na Figura 25.

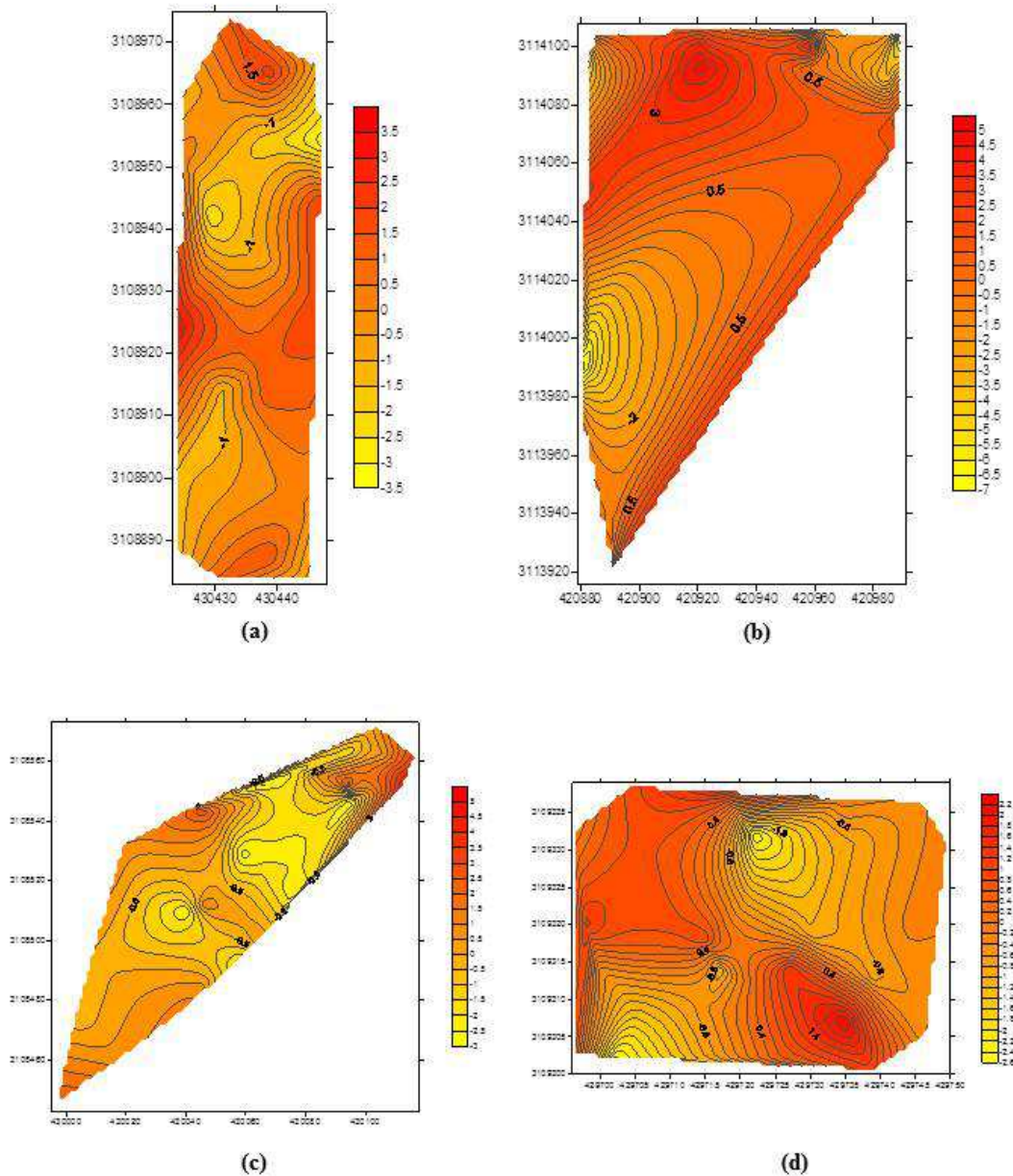


Figura 25. Mapas temáticos da análise de tendência para os blocos A, B, C e D, respectivamente.

Conforme os mapas obtidos observa-se que os valores dos resíduos seguem no sentido dos valores encontrados nos mapas de índice de vegetação. Os bloco A e C

são aqueles que apresentaram maior uniformidade dos dados, como previamente esperado, visto que suas condições de manejo eram as mais homogêneas se comparados aos demais blocos.

Dada a alta infestação de plantas invasoras e, conseqüentemente, a dificuldade encontrada em campo durante a realização da amostragem do bloco B, não foi possível evitar as extremidades do mapa, o que faz com que os resíduos encontrados para este bloco possam apresentar distorções.

O bloco D apresentou maior tendência à apresentar maior teor de N-foliar e clorofila na região central do pomar, devido ao estágio de desenvolvimento das árvores, que apresentou-se bastante heterogêneo, em razão da presença de doenças fitossanitárias.

7 CONCLUSÃO

Pelas análises da reflectância foliar das plantas de citros pode-se concluir:

As plantas que apresentaram teores altos de nitrogênio foram as que tiveram os maiores valores aferidos, independente do método de avaliação;

Foi possível o estabelecimento das correlações significativas entre os teores de clorofila e de nitrogênio na planta e os valores espectrais obtidos por sensoriamento remoto sub-orbital e terrestre;

Com a análise da colorimetria foi possível detectar diferenças na coloração das folhas, confirmando os resultados obtidos pela análise espectral;

Com base na utilização de dados espectrais de campo, imagens aéreas hiperespectrais e a comparação dos muitos índices de vegetação, o TCARI foi determinado como o melhor índice para estimar o teor de nitrogênio foliar neste estudo.

Os índices de vegetação indicados para o monitoramento do nitrogênio em citros são MCARI, TCARI e mSR₇₀₅, pois foram os índices que melhor se correlacionaram com método indireto de medição de clorofila – SPAD. Qualquer um dentre estes índices de vegetação utilizado em conjunto com o método SPAD, mostra-se uma alternativa simples e rápida, o que torna a metodologia mais acessível;

Foi possível obter modelos para cada nível nutricional da planta com referência ao nitrogênio, por meio dos parâmetros radiométricos da planta, representados pelos índices de vegetação.

O uso de imagem hiperespectral apresentou-se uma ferramenta consistente na discriminação dos melhores índices de vegetação para a cultura de citros, sendo uma área que merece maiores estudos ao longo do ciclo da cultura e em ambientes diversos.

Embora ainda sejam relativamente poucos os trabalhos que avaliam o nível de nitrogênio foliar na cultura do citros por imageamento hiperespectral, a aplicabilidade desta técnica segue os princípios da agricultura de precisão, o que torna a utilização deste tipo de sensor promissora na identificação de deficiências nutricionais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, S. A. et al. Determination of nitrogen and chlorophyll levels in bean-plant leaves by using spectral vegetation bands and indices. **Revista Ciência Agronômica**. v. 44, n. 3, p. 464-473, 2013.

ABRAHÃO, S. A. et al. Índices de vegetação de base espectral para discriminar doses de nitrogênio em capim-tanzânia. **Revista Brasileira de Zootecnia**. Viçosa, v. 38, n. 9, p. 1637-1644, 2009.

ABREU, G. F. et al. Colorimetria em grãos de café submetidos a diferentes métodos de processamentos e armazenados em ambiente resfriado. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 8, 2013, Salvador – BA. **Anais...** p. 1-6, 2013.

AGÊNCIA SEBRAE de notícias (ASN). Produção integrada chega à citricultura. 2004. Capturado em 18 out. 2004. [online]. Disponível em: <<http://asn.interjornal.com.br/site/noticia.kmf?noticia=23004&canal=199&total=57&indice=10>>. Acesso em: 18 dez. 2008.

AMARAL, J. F. T. do et al. Produtividade e eficiência de uso de nutrientes por cultivares de cafeeiro. **Coffee Science**. Lavras, v. 6, n. 1, p. 65-74, jan./abr. 2011.

ARGENTA, G. et al. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*. vol.13, no.2, p.158-167. 2013. BAJORSKI, P. **Statistics for imaging, optics, and photonics**. Hoboken, N.J.: Wiley, XIV, 379 p., 2012.

BAJWA, S. G., BAJCSY, P., GROVES, P., TIAN L. F. Hyperspectral image data mining for band selection in agricultural applications. **Transactions of the ASAE**. v. 47, n. 3, p. 895–907, 2004.

BAPTISTA, G. M. M. Processamento de dados hiperespectrais. In: MENESES, P. R., ALMEIDA, T. (org.) **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília – DF. p. 221 – 238, 2012. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>. Acesso em: 18 nov. 2013.

- BAUSCH, W.C., DIKER, K. Innovative remote sensing techniques to increase nitrogen use efficiency of corn. **Communications in Soil Science & Plant Analysis**. v. 32, p. 1371–1390, 2001.
- BLAZQUEZ, C. H., ADAIR Jr, R. C., DENNIS, G. D., BUTTS, J., BRADY, D., WHITTAKER, H. M. Application of aerial photography and videograph to citrus tree inventory. In: Florida State Horticultural Society Meeting. 1-3, St. Petersburg. **Proceedings...** St. Petersburg: 1998, p. 173-177.
- BOVÉ, J. M. Huanglongbing: a destructive, newly-emerging, century-old disease of citrus. **Journal of Plant Pathology**. v. 88, n. 1, p. 7–37, 2006.
- BULLOCK, D. G.; ANDERSON, D. S. Evaluation of the Minolta SPAD 502 chlorophyll meter for nitrogen management in corn. *Journal of Plant Nutrition*. v.21, p.741-755, 1998.
- CAMARGO, E. et al. Análise de Superfícies por Geoestatística Linear. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. (eds). "**Análise Espacial de Dados Geográficos**". Brasília, EMBRAPA, 2004.
- CHEN, P. et al. New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat. **Remote Sensing of Environment**. v. 114, p. 1987–1997, 2010.
- 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**. v. 101, p. 181–193, 2006.
- COVRE, M. **Influência de parâmetros culturais de citrus sobre os dados TM/Landsat**. 1989. 241 p. (INPE-4856-TDL/367). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 1989. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.18.23.38.59>>. Acesso em: 10 mai. 2010.
- CURRAN P. J. Multispectral remote sensing for estimating biomass productivity. In: Smith, H. (ed.). *Plants and the light spectrum*. Academic Press. London. P. 65-69. 1981.
- CURRAN, P. J., WINDHAM, W. R., GHOLZ, H. L. Exploring the Relationship Between Reflectance Red Edge and Chlorophyll Concentration in Slash Pine Leaves. **Tree Physiology**. v. 15, p. 203-206, 1995.
- DATT, B. A. New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests Using Eucalyptus Leaves. **Journal of Plant Physiology**. v. 154, p. 30-36, 1999.
- DAUGHTRY, C. S. T. et al. Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. **Remote Sensing of Environment**. v.74, p. 229–239, 2000.
- DEPARTMENT of Primary Industries. Citrus nutrition. 2002. Disponível em: <<http://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/horticulture/citrus/management/nutrition/nutrition>>. Acesso em: 21 nov. 2013.
- EPIPHANIO, J. C. N., HUETE, A. R. Influence of sun and sensor geometry on the relationship between vegetation indices and fapar in alfafa. **Remote Sensing of Environment**. v. 51, p. 351-360, 1995.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH INSTITUTE, ARC/INFO. v.10, Redlands. 2010. Programa de computador. DVD-ROM.

FENG, W., YAO, X., ZHU, Y., TIAN, Y. C., CAO, W. X. Monitoring leaf nitrogen status with hyperspectral reflectance in wheat. **European Journal of Agronomy**. v. 28, p. 394–404, 2008.

FLORIDA (State). Florida Agricultural Statistics Service. **Florida Citrus Statistics 2011-2012**. FASS. Washington, D.C.: USDA. 2013. 118 p. Disponível em: <http://www.nass.usda.gov/Statistics_by_State/Florida/Publications/Citrus/fcs/2011-12/fcs1112.pdf>. Acesso em: fev. 2014.

FLORIDA DEPARTMENT OF CITRUS – FDOC. Citrus Reference Book. 2012. Disponível em: <https://fdocgrower.box.com/s/dt42f2c7kk/1/76187836/2379827846/1>>. Acesso em: 3 ago. 2012.

FONSECA, P. R. B. et. al. Uso do SPAD-502 na avaliação dos teores foliares de clorofila, em híbridos de milho, (*Zea mays* l.) bt e isogenico. *Revista Verde*, Mossoró – RN, v. 7, n. 1, p. 56 – 60. 2012.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. 2012. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/home/index.html#DOWNLOAD>>. Acesso em: 3 ago. 2012.

FOURTY, T., BARET, F., JACQUEMOUD, S., SCHMUCK, G., VERDEBOUT, J. Leaf Optical Properties with Explicit Description of Its Biochemical Composition: Direct and Inverse Problems. **Remote Sensing of Environment**. v. 56, p. 104-117, 1996.

FRAIGE, K., CRESPILO, F. N., REZENDE, M. O. O. Determinação de zinco em solo utilizando colorimetria. **Química Nova**. São Paulo. v. 30, n. 3, jun. 2007. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000300016&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 16 abr. 2013.

FRANCIS, F. J. Quality as influenced by color. **Food Quality and Preference**. v. 6, p. 1449-155, 1995.

GITELSON, A. A. et al. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**. v. 32, p. 1-4, 2005.

GITELSON, A. A., MERZLYAK, M. N. Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus Hippocastanum* L, and *Acer Platanoides* L, Leaves, Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation. **Journal of Plant Physiology**. v.143, p. 286-292, 1994.

GONÇALVES, C. F. F. **Estatística**. Londrina: Editora UEL. 304 p., 2002.

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

- HABOUDANE, D. et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**. v. 81, p. 416–426, 2002.
- HANSEN, P. M., SCHJOERRING, J. K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. **Remote Sensing of Environment**. v. 86, p. 542–553, 2003.
- HATFIELD, J. L., GITELSON, A. A., SCHEPERS, J. S., WALTHALL, C. L. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. **Agronomy Journal**. v. 100, p. 117 – 131, 2008.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**. v. 25, p. 295–309, 1988.
- HUNTERLAB. **CIE L*a*b* color scale**: applications note. v. 8, n. 7, 1996. Disponível em: <http://www.hunterlab.com/color_theory.php>. Acesso em: 12 ago. 2013.
- HUNTERLAB. Measuring color using Hunter L, a, b versus CIE 1976 L*a*b*. 2012. Disponível em: <<http://www.hunterlab.com/an-1005b.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2013.
- JACKSON, R. D., HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**. v. 11, p. 185-200, 1991.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres** (Tradução da Segunda Edição). São José dos Campos. Parêntese Editora. 598 p., 2009.
- JORDAN, C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*. v. 50, p. 663–666, 1969.
- KIM, Y., GLENN, D. M., PARK, J., NGUGI, H. K., LEHMAN, B. L. Hyperspectral Image Analysis for Plant Stress Detection. ASAE Meeting Presentation. Pittsburgh. Pennsylvania. ASAE Annual International Meeting. (Paper: 1009114), 2010.
- KOONSANIT, K., JARUSKULCHAI, C., EIUMNOH, A. Band Selection for Dimension Reduction in Hyper Spectral Image Using Integrated Information Gain and Principal Components Analysis Technique. **International Journal of Machine Learning and Computing**. v. 2, n. 3, 2012.
- LILLESAND, T., KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 3.ed. New York: John Wiley & Sons. 1994.
- LOPES, F. A. **Adubação em doses variadas em citros**. 2010. 76 f. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba. 2010.
- MATTOS JUNIOR, D. et al. Citros: principais informações e recomendações de cultivo. **Boletim Técnico 200 (IAC)**. 2005. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/Tecnologias/Citros/Citros.htm>>. Acesso em: 18 dez. 2008.

- MENDONÇA, K. et al. Concentração de etileno e tempo de exposição para desverdecimento de limão 'Siciliano'. **Brazilian Journal of Food Technology**. Campinas. v. 6, n. 2, p. 179-183, 2003.
- MENESES, P. R. Fundamentos de Radiometria Óptica Espectral. In: MENESES, P. R., NETTO, J. S. M. (org.) **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília – DF: Editora Universidade de Brasília – UNB. Embrapa Cerrados. p. 15- 40, 2001.
- MIN, M. et al. Design of a hyperspectral nitrogen sensing system for orange leaves. **Computers and electronics in agriculture**. v. 63, p. 215–226, 2008.
- MIN, M., LEE, W. S. Hyperspectral Nitrogen Sensing System for Citrus. In: ASAE Annual International Meeting. Tampa: **ASAE** (Paper: 051068), 2005.
- MIN, M., LEE, W. S. Spectral-based nitrogen sensing for citrus. In: ASAE Annual International Meeting. Las Vegas: **ASAE** (Paper: 031137), 2003.
- MOLIN, J. P. Agricultura de Precisão. Parte 1: o que é o estado da arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola**. v. 17, n. 2, p. 97-107, 1997.
- NEVES, M. F. et al. O retrato da citricultura brasileira. 2012. Disponível em: <http://www.citrusbr.com.br/download/biblioteca/o_retrato_da_citricultura_brasileira_baixa.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2012.
- NIERO et al. Análise de cor para discriminação de seis variáveis de cana-de-açúcar em quatro épocas de colheita no ano. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE. p. 274-281, 2013.
- NOGUEIRA, T. A. R. et al. Nutrientes em cana-de-açúcar de 5º corte cultivada em solo tratado com lodo de esgoto e vinhaça por quatro anos consecutivos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. v. 7, n. 2, p. 7-19, 2007.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 3ª edição. São Paulo: Edgard Blucher Ltda. 2008. 388 p.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 2ª edição. São Paulo: Edgard Blucher Ltda. 1992. 308 p.
- OBREZA, T. A., et al. Soil and Leaf Tissue Testing for Commercial Citrus Production. **Nutrition of Florida Citrus Trees**. 2ª ed. UF-IFAS. Soil and Water Science Dept, SL 253.04, 12 p., 2010
- OBREZA, T. A., MORGAN, K. T. **Nutrition of Florida Citrus Trees**. 2ª ed. UF-IFAS. Soil and Water Science Dept, SL 253, 100 p., 2011.
- OBREZA, T. A., SCHUMANN, A. W. Keeping Water and Nutrients in the Florida Citrus Tree Root Zone. **HortTechnology**. v. 20, n. 1, p. 67-73, 2010.
- PARISE, F. J. DE O., VETTORAZZI, C. A. Análise de dados de produção em um pomar jovem de laranjeiras hamlin: Classificação de dados espaço-temporais. **Revista Brasileira de Fruticultura**. v. 27, n. 1, p. 48-51, 2005.

- PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L., MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Science**. v. 11, p. 1633–1644, 2007.
- PEÑUELAS, J. et al. Photochemical reflectance index and leaf photosynthetic radiation-use-efficiency assessment in Mediterranean trees. **International Journal of Remote Sensing**. v. 18, p. 2863-2868, 1997.
- PLATTNER, K., PEREZ, A. **Fruit and Tree Nuts Outlook**. United States Department of Agriculture: Economic Research Service. 2013.
- PONZONI, F. J., ALMEIDA, E. S. A estimativa do parâmetro kappa (k) da análise multivariada discreta no contexto de um SIG. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8, 1996, Salvador, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 729-733, 1996.
- PONZONI, F. J. Comportamento Espectral da Vegetação. In: MENESES, P. R., NETTO, J. S. M. (org.) **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília – DF: Editora Universidade de Brasília - UNB, Embrapa Cerrados. p. 157-199, 2001.
- PONZONI, F. J., SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: A. Silva Vieira Ed. 2007. 127 p.
- PRIMAVESI, A. C., PRIMAVESI, O., CORRÊA, L. A. et al. Nitrogen fertilization in coastcross grass: effects on nutrient extraction and apparent nitrogen recovery. **Revista Brasileira de Zootecnia**. v. 33, n. 1, p. 68-78, 2004.
- QIN, J., BURKS, T. F., RITENOUR, M, A., BONN, G. W. Detecting citrus canker by hyperspectral reflectance imaging and spectral information divergence. **Journal of Food Engineering**. v. 93, p. 183–191, 2009.
- QUAGGIO, J. A., MATTOS JUNIOR, D., CANTARELLA, H. Manejo da fertilidade do solo na citricultura. In: MATTOS JUNIOR, D., DE NEGRI, J. D., PIO, R. M., POMPEU JUNIOR, J. **Citros**. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundag. p. 483-507, 2005.
- RICHARDSON, A. J., WIEGAND, C. L., GAUSMAN, H. W., CUELLAR, J. A., GERBERMANN, A. H. Plant, soil and shadow reflectance components of row crops. **Photogrammetric Engineering Remote Sensing**. v. 4, p. 1401–1407, 1975.
- RODRIGUEZ, O. Aspectos fisiológicos nutrição e adubação dos citros. In: RODRIGUEZ, O., VIÉGAS, R. F., POMPEU JÚNIOR, J., AMARO, A. S. **Citricultura brasileira**. 2.ed. Campinas: Fundação Cargill. p. 419-475, 1991.
- ROUSE, J. W. et al. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation, In: NASA/GSFC. **Final Report, Greenbelt**. MD, USA. p. 1–137, 1974.
- ROZANE, D. E., SOUZA, H. A., PRADO, R. M., NATALE, W., FRANCO, C. F., LEAL, R. M. Influência do cultivar, do tipo de folha e do tempo de cultivo na medida indireta da clorofila (SPAD) em mudas de goiabeira. **Ciência Agrotécnica**. Lavras. v. 33, n. 6, p. 1538-1543, 2009.
- RSI - Research Systems Inc. The Environment for Visualizing Images – ENVI. Boulder, CO, USA, 2009.

SANCHES, I. et al. Discriminação de variedades de citros em imagens CCD CBERS-2. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2005, Goiânia, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 277-284, 2005.

SASSI, C. P., et al. Modelos de regressão linear múltipla utilizando os softwares R e Statistica: uma aplicação a dados de conservação de frutas. Disponível em: <http://www.icmc.usp.br/CMS/Arquivos/arquivos_enviados/BIBLIOTECA_113_RT_377.pdf> Acesso em: 21 nov. 2013.

SCHRÖDER, J. J. et al. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. **Field Crops Research**. v. 66, n. 1, p. 151-164, mai. 2000.

SENA JÚNIOR, D. G. **Utilização de técnicas de visão artificial para ajuste da adubação nitrogenada em trigo**. 2005. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

SERRANO, L., PENUELAS, J., USTIN, S. L. Remote Sensing of Nitrogen and Lignin in Mediterranean Vegetation from AVIRIS Data: Decomposing Biochemical from Structural Signals. **Remote Sensing of Environment**. v. 81, p. 355-364, 2002.

SILVA JR., M. C. **Detecção do efeito da adubação nitrogenada em brachiaria decumbens utilizando técnicas de sensoriamento remoto**. 2006. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

SILVEIRA, P. M. et. al. Uso do clorofilômetro como indicador da necessidade de adubação nitrogenada em cobertura no feijoeiro. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, Brasília, v. 38, n. 9, p. 1083-1087. 2003.

SIMS, D. A., GAMON, J. A. Relationships between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages. **Remote Sensing of Environment**. v. 81, p. 337-354, 2002.

SMITH, G. M., MILTON, E. J. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. **International Journal of Remote Sensing**. v. 20, n. 13, p. 2653-2662, 1999.

SOUZA FILHO, C. R. **Sensoriamento Remoto Hiperespectral**. 2004. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2004/08/23/sensoriamento-remoto-hiperespectral/>>. Acesso em: 19 nov. 2013.

SOUZA, T. R. et al. Variação da medida SPAD, determinada pelo clorofilômetro em um pomar de citros fertirrigado. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007, Gramado - RS, 2007. 1 CD-ROM.

SOUZA, T. R. **Monitoramento do estado nutricional de plantas cítricas e da solução do solo em sistema de fertirrigação**. 2010. 131 f. Tese (Doutorado - Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

SOUZA, T. R., SALOMÃO, L. C., ANDRADE, T. F., VILLAS BÔAS, R. L., QUAGGIO, J. A. Medida indireta da clorofila e sua relação com o manejo da adubação nitrogenada em

plantas cítricas fertirrigadas. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Jaboticabal – SP. v. 33, n. 3, p. 993-1003, 2011.

STEFFEN, C. A. Técnicas radiométricas com o SPECTRON SE-590. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8. 1996. Salvador, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 9-14, 1996.

SURFER, version 8.0. Contouring, Gridding, and Surface Mapping Package for Scientists and Engineers. 2002. <<http://www.goldensoftware.com>>.

THE ULTIMATE citrus page: Your Source for Citrus Information. Disponível em: <<http://www.ultimatecitrus.com/varieties.html>>. Acesso em: 17 ago. 2013.

TIAN, Y. C., YAO, X., YANG, A. J., CAO, W. X., HANNAWAY, D. B., ZHU, Y. Application of airborne hyperspectral imagery to estimating fruit yield in citrus. **Field Crops Research**. v. 120, p. 299–310, 2011.

TISOT, D. A. et al. Dados Hyperion e ETM+ na classificação de alvos agrícolas com diferentes níveis de distinção espectral. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. 2005. Goiânia, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 439-446, 2005.

TUCKER et. al. Sattelite remote sensing of total herbaceous biomass in the Senegalese Sahel. *Remote Sensing of Environment*. v. 17, p. 233-249, 1985.

TURRELL, F. M., WEBER, J. R., AUSTIN, S. W. Chlorophyll Content and Reflection Spectra of Citrus Leaves. **Botanical Gazette**. v. 123, n. 1, p. 10-15, 1961.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Citrus January Forecast**. 2013. 4 p. Disponível em: <http://www.nass.usda.gov/Statistics_by_State/Florida/Publications/Citrus/cit/2012-13/cit0113.pdf>. Acesso em: fev. 2014.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Crop Production**. 2014. 58 p. Disponível em: <<http://www.usda.gov/nass/PUBS/TODAYRPT/crop1113.pdf>>. Acesso em: fev. 2014.

UNIVERSITY OF FLORIDA. IFAS Extension. Disponível em: <http://www.crec.ifas.ufl.edu/extension/greening/ndccg.shtml>. Acesso em ago. 2014.

UNO, Y., PRASHER, S. O., LACROIX, R., GOEL, P. K., KARIMI, Y., VIAU, A. A., PATEL, R. M. Artificial neural networks to predict corn yield from Compact Airborne Spectrographic Imager data. **Computers and electronics in agriculture**. v. 47, p.149–16, 2005.

VALE, D. W., PRADO, R. M. Adubação com NPK e o estado nutricional de ‘citrumelo’ por medida indireta de clorofila. **Revista Ciência Agrônômica**. v. 40, n. 2, p. 266-271, 2009.

- VERHULST, N., GOVAERTS, B. The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeeker™ handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management. Part A: **Concepts and case studies**. Mexico, D.F., CIMMYT, 16 p., 2010.
- VILLAS BÔAS, R. L., GODOY, L. J. G., PANTANO, S. C. Índice Relativo de Clorofila: um indicativo auxiliar no manejo do nitrogênio em Videira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 17, 2002, Belém. **Anais...** Belém: EMBRAPA-DOT/CNPq, p. 18-22, 2002.
- VOGELMANN, J. E., ROCK, B. N., MOSS, D. M. Red Edge Spectral Measurements from Sugar Maple Leaves. **International Journal of Remote Sensing**. v. 14, p. 1563-1575, 1993.
- WANG, W. et al. Estimating leaf nitrogen concentration with three-band vegetation indices in rice and wheat. **Field Crops Research**. v. 129, p. 90–98, 2012.
- XUE, L. et al. Monitoring rice leaf nitrogen status with remote sensing. **Agronomy Journal**. v. 96, p. 135–142, 2004.
- WU, C. et al. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*. v. 148, p. 1230–1241, 2008.
- YAMAUCHI, N. et al. Chlorophyll degradation in Wase satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) fruit with on-tree maturation and ethylene treatment. **Scientia Horticulturae**. Amsterdam. v. 71, n. 1, p. 35-42, 1997.
- YANG, C. H., EVERITT J., BRADFORD, J. Airborne hyperspectral imagery and yield monitor data for estimating grain sorghum yield variability. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**. v. 47, p. 915–924, 2004.
- YANG, C. H., EVERITT J., BRADFORD, J., MURDEN, D. Airborne hyperspectral imagery and yield monitor data for mapping cotton yield variability. **Precision Agriculture**. v. 5, p. 445–461, 2003.
- YE, X., SAKAI, K., MANAGO, M., ASADA, S., SASAO, A. Prediction of citrus yield from airborne hyperspectral imagery. **Precision Agriculture**. v. 8, p. 111–125, 2007.
- ZEKRI, M., OBREZA, T. A. **Macronutrient deficiencies in citrus: Nitrogen, Phosphorus, and Potassium**. Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. 2002. 3^a ed.: 2012. Disponível em: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/SS/SS42000.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2013.
- ZHU, Y. et al. Analysis of common canopy vegetation indices for indicating leaf nitrogen accumulations in wheat and rice. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. v. 10, p. 1–10, 2008.

ANEXOS

Anexo 1. Resultado da análise do foliar realizada na área da variedade de copa Valência, realizada em novembro de 2012

Amostras	Nitrogênio (%)	Amostras	Nitrogênio (%)	Amostras	Nitrogênio (%)
A-01	2,6110	B-12	2,4964	C-24	2,8409
A-02	2,6561	B-13	2,6046	C-25	2,9677
A-03	2,8526	B-14	2,4976	C-26	2,9401
A-04	2,4879	B-15	2,3486	C-27	2,9128
A-05	2,6362	B-16	2,2603	C-28	2,9210
A-06	2,6023	B-17	2,4514	C-29	2,8233
A-07	2,6922	B-18	2,5417	C-30	3,0117
A-08	2,6060	B-20	2,2218	D-01	2,8815
A-09	2,5839	B-21	2,3707	D-02	2,7894
A-10	2,5870	B-22	2,3097	D-03	2,9023
A-11	2,5442	B-23	2,4239	D-04	2,7173
A-12	2,7205	B-24	2,4852	D-05	2,6127
A-13	2,6121	C-01	3,1453	D-06	2,7619
A-14	2,6546	C-02	3,0100	D-07	2,8902
A-15	2,6160	C-03	2,9904	D-08	2,7256
A-16	2,5768	C-04	3,1924	D-09	2,7522
A-17	2,3977	C-05	3,0430	D-10	2,8120
A-18	2,7175	C-06	2,7856	D-11	2,6881
A-19	2,4475	C-07	2,9635	D-12	2,7478
A-20	2,4105	C-08	3,0029	D-13	2,7661
A-21	2,6217	C-09	2,8705	D-14	2,8133
A-22	2,6690	C-10	2,8479	D-15	2,7208
A-23	2,5382	C-11	2,7610	D-16	2,7579
A-24	2,4646	C-12	2,8605	D-17	2,6431
B-01	2,1888	C-13	2,8730	D-18	2,7558
B-02	2,3740	C-14	2,7924	D-19	2,6034
B-03	2,2567	C-15	2,8843	D-20	2,6905
B-04	2,3776	C-16	2,9163	D-21	2,7687
B-05	2,2431	C-17	2,7918	D-22	2,8119
B-06	2,2351	C-18	2,7575	D-23	2,6825
B-07	2,3635	C-19	2,8442	D-24	2,7358
B-08	2,2254	C-20	3,0694		
B-09	2,4707	C-21	2,9710		
B-10	2,3887	C-22	2,9998		

Anexo 2. Comprimentos de onda referentes às bandas hiperspectrais resultantes do levantamento aéreo realizado em novembro de 2012

Banda	Comprimento de onda (nm)			Banda	Comprimento de onda (nm)		
	Inicial	Médio	Final		Inicial	Médio	Final
1	918,1	919,9	921,7	40	776,5	778,4	780,2
2	914,4	916,3	918,1	41	772,9	774,7	776,5
3	910,8	912,6	914,4	42	769,3	771,1	772,9
4	907,2	909,0	910,8	43	765,6	767,5	769,3
5	903,5	905,4	907,2	44	762,0	763,8	765,7
6	899,9	901,7	903,6	45	758,4	760,2	762,0
7	896,3	898,1	899,9	46	754,8	756,6	758,4
8	892,7	894,5	896,3	47	751,1	753,0	754,8
9	889,0	890,9	892,7	48	747,5	749,3	751,1
10	885,4	887,2	889,0	49	743,9	745,7	747,5
11	881,8	883,6	885,4	50	740,2	742,1	743,9
12	878,1	880,0	881,8	51	736,6	738,4	740,3
13	874,5	876,3	878,2	52	732,9	734,8	736,6
14	870,9	872,7	874,5	53	729,4	731,2	733,0
15	867,3	869,1	870,9	54	725,7	727,6	729,4
16	863,6	865,5	867,3	55	722,1	723,9	725,7
17	860,0	861,8	863,6	56	718,5	720,3	722,1
18	856,4	858,2	860,0	57	714,8	716,7	718,5
19	852,7	854,6	856,4	58	711,2	713,0	714,9
20	849,1	850,9	852,8	59	707,6	709,4	711,2
21	845,5	847,3	849,1	60	703,9	705,8	707,6
22	841,8	843,7	845,5	61	700,3	702,2	704,0
23	838,2	840,0	841,9	62	696,7	698,5	700,3
24	834,6	836,4	838,2	63	693,1	694,9	696,7
25	830,9	832,8	834,6	64	689,4	691,3	693,1
26	827,3	829,2	831,0	65	685,8	687,6	689,5
27	823,7	825,5	827,3	66	682,2	684,0	685,8
28	820,1	821,9	823,7	67	678,6	680,4	682,2
29	816,5	818,3	820,1	68	674,9	676,7	678,6
30	812,8	814,6	816,5	69	671,3	673,1	674,9
31	809,2	811,0	812,8	70	667,7	669,5	671,3
32	805,6	807,4	809,2	71	664,0	665,9	667,7
33	801,9	803,8	805,6	72	660,4	662,2	664,0
34	798,3	800,1	801,9	73	656,8	658,6	660,4
35	794,7	796,5	798,3	74	653,1	655,0	656,8
36	791,1	792,9	794,7	75	649,5	651,3	653,2
37	787,4	789,2	791,1	76	645,9	647,7	649,5
38	783,8	785,6	787,4	77	642,3	644,1	645,9
39	780,2	782,0	783,8	78	638,6	640,5	642,3

Banda	Comprimento de onda (nm)			Banda	Comprimento de onda (nm)		
	Inicial	Médio	Final		Inicial	Médio	Final
79	635,0	636,8	638,6	118	493,5	495,3	497,1
80	631,4	633,2	635,0	119	489,8	491,7	493,5
81	627,7	629,6	631,4	120	486,2	488,0	489,9
82	624,1	625,9	627,8	121	482,6	484,4	486,2
83	620,5	622,3	624,1	122	478,9	480,8	482,6
84	616,9	618,7	620,5	123	475,3	477,2	479,0
85	613,2	615,1	616,9	124	471,7	473,5	475,3
86	609,6	611,4	613,2	125	468,1	469,9	471,7
87	605,9	607,8	609,6	126	464,5	466,3	468,1
88	602,3	604,2	606,0	127	460,8	462,6	464,5
89	598,7	600,5	602,4	128	457,2	459,0	460,8
90	595,1	596,9	598,7				
91	591,5	593,3	595,1				
92	587,8	589,7	591,5				
93	584,2	586,0	587,8				
94	580,6	582,4	584,2				
95	576,9	578,8	580,6				
96	573,3	575,1	577,0				
97	569,7	571,5	573,3				
98	566,1	567,9	569,7				
99	562,4	564,3	566,1				
100	558,8	560,6	562,4				
101	555,2	557,0	558,8				
102	551,5	553,4	555,2				
103	547,9	549,7	551,6				
104	544,3	546,1	547,9				
105	540,7	542,5	544,3				
106	537,0	538,9	540,7				
107	533,4	535,2	537,0				
108	529,8	531,6	533,4				
109	526,1	528,0	529,8				
110	522,5	524,3	526,1				
111	518,9	520,7	522,5				
112	515,3	517,1	518,9				
113	511,6	513,4	515,3				
114	508,0	509,8	511,6				
115	504,4	506,2	508,0				
116	500,7	502,6	504,4				
117	497,1	498,9	500,7				