

## Análise discriminante utilizando-se dados hiperespectrais no diferencial de doses de nitrogênio em cana-de-açúcar

Peterson Ricardo Fiorio<sup>1</sup>  
Ana Paula Barbosa Gady<sup>1</sup>  
Tiago Rodrigues Tavares<sup>1</sup>  
Mauricio Martello<sup>1</sup>  
José Alexandre M. Demattê<sup>1</sup>  
José Paulo Molin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP  
Avenida Pádua Dias, 11. CEP: 13418-900 – Piracicaba/SP - Brasil  
{fiorio, anap.barbosa, tiagosrt, mauriciomartello, jamdemat, jpmolin}@usp.br

**Abstract.** Nitrogen is one of the essential nutrients for crop production, interacting in a very complex environment, so its monitoring is important both in economic sphere as environmental. This work aimed to discriminate doses of nitrogen from hyperspectral data in sugarcane. The evaluations were conducted at different stages of development of plants under the effect of different nitrogen doses in sugarcane. Leaf spectral measurements were taken and sent to the laboratory of foliar analysis to determine the nitrogen content. The spectral curves were grouped according to the doses of nitrogen applied, showing that it is possible to estimate foliar nitrogen from hyperspectral data, when the culture reaches approximately 140 days after harvest.

**Palavras-chave:** Sensor, leaf nitrogen content; Sensor, conteúdo foliar de nitrogênio.

### 1. Introdução

A adubação nitrogenada é uma das operações de maior interesse em relação à produtividade das culturas, uma vez que o nitrogênio é um elemento requerido em altas quantidades e sua dinâmica no sistema solo-planta-atmosfera é muito complexo.

No atual sistema produtivo da cana-de-açúcar, onde não ocorre mais a queima da palha, na grande maioria das áreas, a administração do nitrogênio é ainda mais crítica, devido à palhada acumulada na superfície do solo, que expõe o mineral às intempéries ambientais, aumentando consideravelmente as perdas por volatilização, sendo que, segundo Cantarella et al. (2007) o percentual do N recuperado pela cultura em relação ao aplicado é de apenas 40%.

O nitrogênio acumulado na folha pode fornecer informações completas sobre a concentração de nitrogênio foliar e a matéria seca, e avaliar efetivamente o status do nitrogênio de culturas agrícolas (YI et al., 2012).

Devido à alta complexidade deste nutriente no ambiente, sua importância no rendimento das culturas e sua expressiva participação nos custos produção, alguns cuidados devem ser atentados em sua administração, sendo os três principais: sincronizar as aplicações com os períodos de demanda da cultura, considerar os diferentes potenciais de resposta ao nitrogênio e atender a variabilidade espacial da necessidade do nutriente (SOLARI et al., 2008).

As mudanças causadas na atividade fotossintética, estrutura celular, alongamento e componentes bioquímicos das plantas são partes do princípio envolvido no uso do sensoriamento remoto para determinar o estresse nutricional das culturas agrícolas (CURRAN, 1989), pois alteram a reflectância espectral das plantas nas regiões do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR) do espectro, respectivamente.

Sabe-se que folhas saudáveis apresentam um comportamento espectral semelhante. Porém, fatores como idade, doenças, deficiência de água e nutrientes podem alterar as propriedades espectrais da folha.

Algumas tecnologias já desenvolvidas e consagradas para o monitoramento de nitrogênio tais como clorofilômetro, análises de solo e foliar, se tornam inviáveis quando se trata de grandes áreas. A primeira, devido principalmente à agilidade do processo, já a segunda e a terceira além do tempo possuem alto custo quando grande número de amostragens é requerido por área.

Existem grandes variações na literatura em relação a melhor dose a ser aplicada na cana-de-açúcar, sendo que estas diferenças estão diretamente ligadas à variedade, tipo de solo, região de estudo e sistema de cultivo (KORNDÖRFER et al., 2002; BOLOGNA-CAMPBELL, 2006; FRANCO et al., 2010).

Molin et al. (2010) avaliando a capacidade de sensor ótico em quantificar na cana-de-açúcar a variação do nitrogênio, com doses de 0, 50, 100, 150 e 200 kg.ha<sup>-1</sup>, aos 30, 60 e 90 dias após o corte (DAC). Os autores obtiveram resposta somente aos 90 DAC, provavelmente devido à baixa demanda de nitrogênio pela cultura e conseqüentemente pouco tempo hábil para que as plantas apresentassem diferença entre os tratamentos.

Desta maneira fica evidente a necessidade atual do desenvolvimento de uma ferramenta capaz de determinar em diferentes condições de cultivo em tempo real, o estado nutricional da cana-de-açúcar em momentos chave, possibilitando uma tomada de decisão que minimize os custos, mantenha ou aumente a produtividade sem causar ao mesmo tempo impactos ambientais.

O objetivo deste trabalho foi discriminar doses de nitrogênio a partir de dados hiperespectrais em cana-de-açúcar.

## 2. Metodologia de Trabalho

O experimento foi conduzido em uma área de cultivo de cana-de-açúcar, denominada Yara, localizada no município de Piracicaba-SP, no Polo Centro-Oeste (APTA), em parceria com a equipe de pesquisa do IAC coordenada pelo Pesquisador Heitor Cantarella e Zaqueu Fernando Montezano, projeto temático FAPESP 2008/56147-1. Na Tabela 1 estão descritas as características da área em estudo.

Tabela 1. Localização e descrição do experimento.

Características	
Coordenadas	22°41'02"S; 47°38'44" O
Classificação do solo	Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA)
Variedade	IAC 95-5000
Textura do solo	textura argilosa (0-20 cm) e muito argilosa (20-40 cm)
Clima	Subtropical úmido (CWa), com pluviosidade média anual inferior a 1400 mm (Köppen)

O experimento foi conduzido ao longo da safra 2014/2015, quando a cultura da cana-de-açúcar se encontrava no 1º ciclo de soqueira. Foram realizados as correções de solo e tratos culturais seguindo o padrão adotado pelo sistema produtivo da cultura para a região.

Segundo os dados de precipitação acumulada mensal da estação meteorológica ESALQ/USP, no decorrer da safra 2014/2015, a distribuição das chuvas ficou abaixo da média esperada entre os meses de janeiro a abril de 2014, ocorrendo ligeiro aumento da precipitação para mês de maio e nova queda para mês de junho de 2014.

O experimento foi conduzido no delineamento experimental em blocos ao acaso (DBC), sendo os fatores de tratamento 2 fontes de nitrogênio (uréia e nitrato de magnésio) e 4 doses doses (0, 60, 120 e 180 kg.ha<sup>-1</sup>), aplicadas manualmente sobre a palhada logo após o primeiro corte da cana-de-açúcar.

Os dados espectrais foram coletados aos 144 dias após o corte (DAC) utilizando o sensor hiperespectral FieldSpec Spectroradiometer (ASD – Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, EUA) que opera no intervalo espectral de 350 a 2500 nm, com resolução espectral de 1,4 nm de 350 a 1050 nm e 2 nm de 1050 a 2500 nm, acoplado ao Leaf Clip (ASD – Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, EUA) para realização de leituras de reflectância da folha.

No campo, foram coletadas 10 folhas por parcela, cujas leituras foram realizadas no terço médio da folha diagnóstico para a cana-de-açúcar, isto é, a primeira folha completamente expandida a partir do ápice da cultura (“folha +1”).

Posteriormente, estas folhas foram enviadas ao laboratório para análise do Teor Foliar de nitrogênio (TFN), pelo do método semimicro Kjeldahl (MALAVOLTA et al., 1997), cujos dados foram analisados com base nos valores médios obtidos das amostragens por parcela.

Neste trabalho, a análise discriminante foi utilizada na diferenciação das doses, a fim de se determinar o comportamento espectral da cana-de-açúcar a partir de seus dados espectrais, ao longo da safra 2014/15. Os centróides foram submetidos à análise de variância pelo Teste F e as médias quando significativas, comparadas pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. A técnica multivariada foi implementada utilizando o ambiente R (versão 3.2.2).

### 3. Resultados e Discussão

Neste estudo, os dados hiperespectrais e TFN foram obtidos aos 144 DAC, na safra 2014/2015. Com o déficit hídrico extremo que a região sudeste presenciou nesta safra, o aproveitamento do nitrogênio e, conseqüentemente, o desenvolvimento da plantação de cana-de-açúcar na safra em estudo podem ter sido comprometidos.

A deficiência de nutrientes na cana-de-açúcar como o nitrogênio e potássio alteram a resposta espectral da planta (JACKSON et al., 1980). Miphokasap et al. (2012) verificaram que bandas centradas na região do azul (410 e 430 nm), do “red-edge” (720 nm) e do infravermelho próximo (754 e 1216 nm) foram utilizadas para obter uma predição da qualidade nutricional da cana-de-açúcar, sendo altamente correlacionadas com a concentração de nitrogênio na planta.

Observou-se que as curvas hiperespectrais médias das 4 doses de nitrogênio estudadas apresentaram feição típica da vegetação, como mostra a Figura 1A. As diferenças nos valores médios de reflectância das doses foram observadas nas faixas espectrais do visível (Figuras 1B e 1C), na transição do azul para o verde (480-530 nm) e na transição do verde para o vermelho (550-690 nm); e do infravermelho próximo (Figura 1D), na transição do red-edge para o infravermelho próximo (750-1300 nm).

A característica geral da curva espectral da cana-de-açúcar é mantida com a baixa reflectância na banda da luz visível (400-700 nm) e com picos entre 550 nm a 560 nm região do comprimento de onda da luz verde. Assim, a absorção de pigmentos presentes nas folhas da cana-de-açúcar fazem com que a reflectância e a transmitância apresentem-se baixas (CHEN et al., 2012).

Na figura 1B, as curvas espectrais dos tratamentos com doses mais altas apresentaram maior resposta na faixa do verde, o que pode ser justificado pela grande presença de pigmentos, principalmente as clorofilas, xantofilas, carotenóides e antocianinas (RABIDEAU et al., 1946). Segundo MERZLYAK et al. (2003), esses pigmentos também são responsáveis pelas variações na coloração nas plantas.

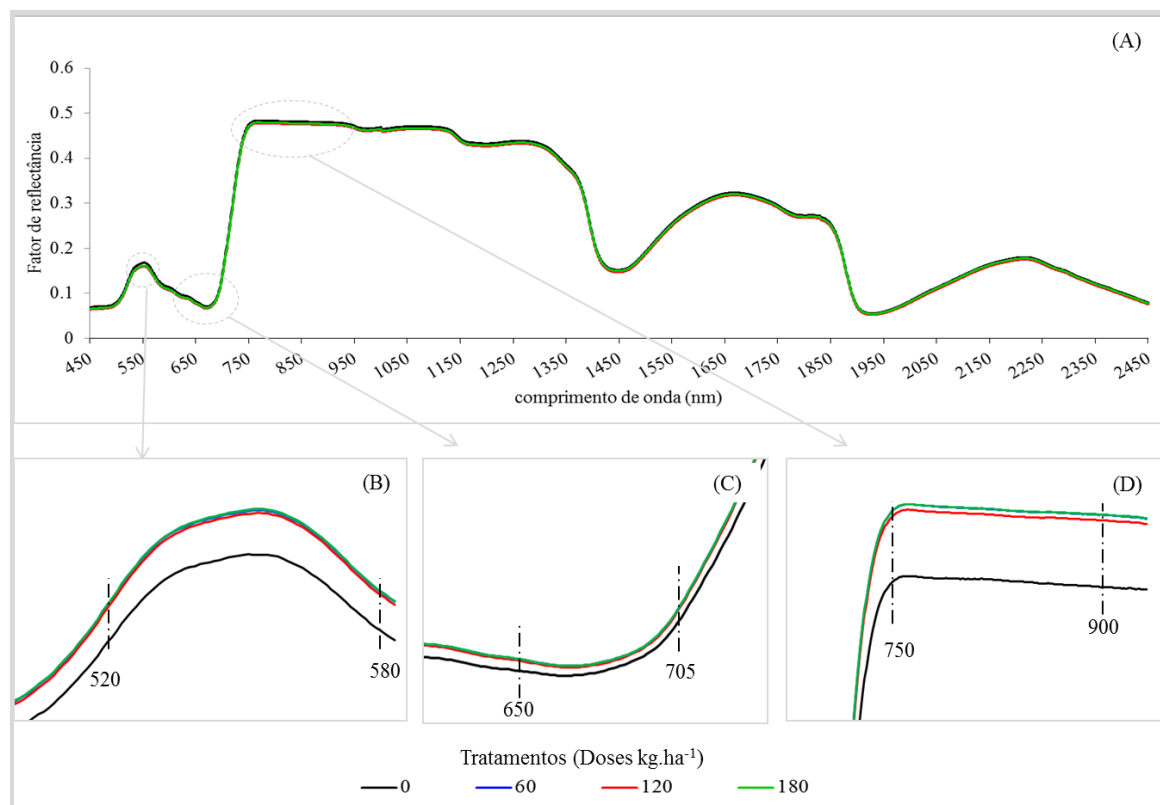


Figura 1. Curva espectral média por dose de N aplicado aos 144 DAC (A); região do verde em detalhe (B); região do vermelho e RedEdge em detalhe (C); região do infravermelho próximo em detalhe (D).

Já a dose testemunha ( $0 \text{ kg.ha}^{-1}$ ) apresentou valores médios de reflectância abaixo das demais, efeito este que pode estar associado à ocorrência do déficit hídrico, fazendo com que as plantas estivessem em diferentes estádios de desenvolvimento no momento da coleta.

Aos 144 DAC as plantas encontravam-se em transição da fase de máximo desenvolvimento para a fase de maturação. Desse modo, as plantas que receberam a dose testemunha podem ter sofrido um atraso no desenvolvimento, podendo-se justificá-lo com a Figura 2, que mostra o gráfico das alturas de plantas.

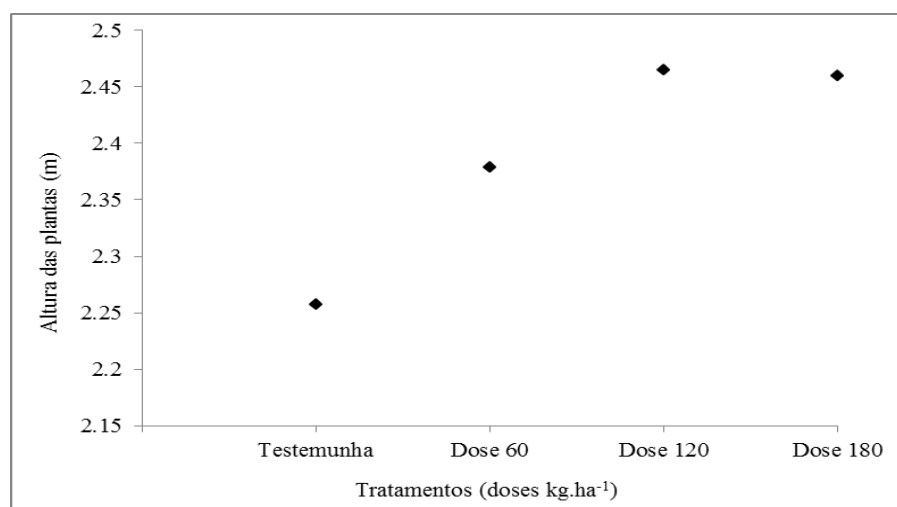


Figura 2. Altura média das plantas, no cultivo de cana-soca, em função das doses de nitrogênio aplicadas.

Ponzoni e Shimabukuru (2007) relatam que na região do infravermelho próximo ocorre uma absorção pequena da radiação e considerável espalhamento interno da radiação da folha. Na Figura 1D vemos o comportamento da curva espectral dos tratamentos na região do infravermelho próximo. Nela pudemos observar que a dose testemunha apresentou valores médios de reflectância menores que os outros 3 tratamentos. Isso se dá pelo fato de que nesta região, a disponibilidade de água na folha pode causar alterações na relação água-ar no mesófilo, o que pode alterar quantitativamente a reflectância de uma folha.

No gráfico resultante da análise discriminante (Figura 3), cada ponto representa uma curva espectral obtida das plantas demarcadas em cada tratamento, sendo que a primeira e a segunda função explicam a variabilidade dos dados em porcentagem.

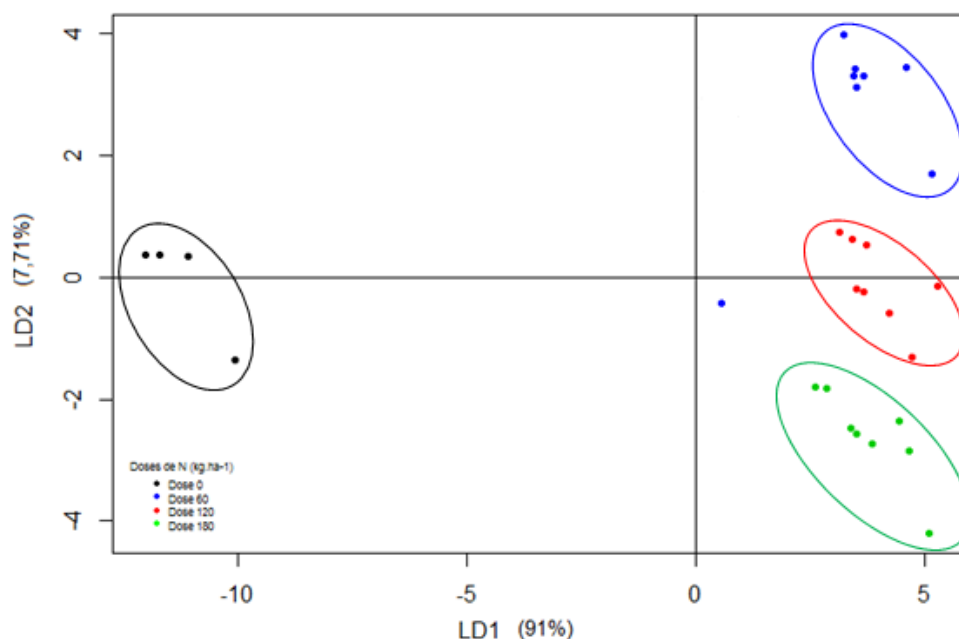


Figura 3. Análise discriminante das doses de nitrogênio da cultura da cana de açúcar, no município de Piracicaba – SP.

Na Figura 3 observou-se que houve diferenciação entre todos os tratamentos (doses) quando comparadas entre si pela análise discriminante, aos 144 DAC, mostrando que a análise pelas respostas espectrais foi eficaz.

Para todas as datas analisadas, observou-se que os gráficos gerados pelo cruzamento das funções 1 e 2 mostraram claramente a diferenciação da dose 0  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  em relação as outras doses.

A análise discriminante explicou a variabilidade dos dados hiperespectrais aos 144 DAC (98,71%) nas duas primeiras funções (Figura 2). A primeira função (LD1) apresentou 91 % e a segunda função (LD2) 7,71 %. Formaram-se 4 grupos, distinguindo-se as doses 0, 60, 120 e 180  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , tanto visivelmente quanto estatisticamente.

Nos resultados obtidos pelo teste Tukey à 5% de probabilidade (Tabela 2), pode-se observar que na LD1 (primeira função das médias dos centróides) houve 2 agrupamentos, diferenciando a dose testemunha das demais doses de nitrogênio.

Tabela 2. Média dos centróides obtidos na análise discriminante e agrupamentos resultantes pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Dose	LD1		LD2	
0	-11.2242	a	-0.06342	a
60	3.457301	b	2.733264	b
120	3.965022	b	-0.06923	c
180	3.731099	b	-1.351	d

\* Médias que apresentam letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No caso da LD2 (segunda função das médias dos centróides), nota-se que existe uma diferença significativa entre todos os tratamentos. Possivelmente, esta diferença significativa ocorreu devido ao estágio de desenvolvimento das plantas, e consequentemente, aumento da biomassa, causado pela influência das doses de nitrogênio aplicadas.

#### 4. Conclusões

A discriminação das quatro doses (0, 60, 120 e 180 kg.ha<sup>-1</sup>) foi feita com análise discriminante, usando valores de reflectância dos comprimentos de onda do sensor FieldSpec. Embora todas as doses tenham sido discriminadas em 4 diferentes grupos, a dose testemunha (0 kg.ha<sup>-1</sup>) foi a dose que melhor se diferenciou das demais, com menores valores de reflectância nas faixas da região do vermelho e do infravermelho próximo.

Os resultados preliminares deste trabalho mostraram que é possível estimar o nitrogênio foliar a partir de dados hiperespectrais, quando a cultura atinge aproximadamente 140 dias de desenvolvimento.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão do auxílio à pesquisa (Processo nº 2013/22435-9), na qual este projeto está inserido e também à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), que por meio do projeto PROSENSAP, possibilitou a aquisição do radiômetro utilizado neste trabalho.

#### Referências Bibliográficas

BOLOGNA-CAMPBELL, I. R. **Balço de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta**. 2006. 110 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, SBCS, 2007. p.375-470

CHEN, H.; WANG, P.; LI, J.; ZHANG, J.; ZHONG, L. Canopy spectral reflectance feature and leaf water potential of sugarcane inversion. In: Physics procedia, v. 25, 2012, p. 595-600. International Conference on Solid State Devices and materials Science, 2012.

FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OTTO, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. **Scientia Agricola**, v.67, p.579-590, 2010.

KORNDÔRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; CAMARGO, M.S. **Silicatos de Cálcio e Magnésio na Agricultura**. 2.ed. Uberlândia, GPSi/ICIAG/UFU, 2002. 24 p. (Boletim Técnico, 1).

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 201p.

MOLIN, J. P. Use of active optical sensors for crops in Brazil. **Better Crops**, v. 94, p. 18-20, 2010.

SOLARI, F. et al. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, v.100, p.571-579, 2008.

YI, Q.; HUANG, J.; WANG, F.; WANG X. Evaluating the performance of PC-ANN for the estimation of rice nitrogen concentration from canopy hyperspectral reflectance.

**International Journal of Remote Sensing**. v. 32, n. 4, p. 931-940, 2012.

JACKSON, R. D.; JONES, C. A.; UEHARA, G.; SANTO, L. T. Remote detection of nutrient and water deficiencies in sugarcane under variable cloudiness. **Remote Sensing of Environment**, v.11, 1980, p. 327-331.

MIPHOKASAP, P.; HONDA, K.; VAIPHASA, C.; SOURIS, M.; NAGAI, M. Estimating canopy concentration in sugarcane using Field imaging spectroscopy. **Remote Sensing**, n.4, 2012, p. 1651-1670.

MERZLYAK, M. N.; GITELSON, A. A.; CHIVKUNOVA, O. B.; SOLOVCHENKO, A. E.; POGOSYAN, S. I. Application of reflectance spectroscopy for analysis of higher plant pigments. **Journal of Virological Methods**, n. 167, 2003, p. 140-145.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007, 127 p. (ISBN 978-85-60507-02-3)

RABIDEAU, G. S.; FRENCH, C. S.; HOLT, A. S. The absorption and reflection spectra of leaves, chloroplast suspensions, and chloroplast fragments as measured in an Ulbricht sphere. **American Journal Bot.**, n. 33, 1946, p. 769-777.