

## Análise quantitativa de nitrogênio foliar na cultura do milho a partir de dados de espectroscopia de reflectância

David de Holanda Campelo<sup>1</sup>  
Adunias dos Santos Teixeira<sup>1</sup>  
Luis Clenio Jário Moreira<sup>2</sup>  
Raimundo Alípio de Oliveira Leão<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Ceará – UFC  
Caixa Postal 12.168, CE 60450-760 Fortaleza, Brasil  
[davidcampelo@gmail.com](mailto:davidcampelo@gmail.com)

<sup>1</sup> Universidade Federal do Ceará – UFC  
Caixa Postal 12.168, CE 60450-760 Fortaleza, Brasil  
[adunias@ufc.br](mailto:adunias@ufc.br)

<sup>2</sup> Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE  
Limoeiro do Norte - CE, Brasil  
[cleniojario@ifce.edu.br](mailto:cleniojario@ifce.edu.br)

<sup>1</sup> Universidade Federal do Ceará – UFC  
Caixa Postal 12.168, CE 60450-760 Fortaleza, Brasil  
[alipioleao@yahoo.com.br](mailto:alipioleao@yahoo.com.br)

**Abstract.** The aim of this study was to evaluate the possibility of using reflectance spectroscopy to quantify leaf nitrogen concentration in irrigated corn. The experimental design was randomized blocks, in split plot parcels replicated four times, with the main plot composed of four levels of soil moisture solo L1=120%, L2=100%, L3=80% e L4=70% of the water requirement, based on field capacity (CC) and the subplot with four levels of nitrogen fertilization (N1= 0 kg, N2= 60 kg N3= 120 kg e N4=180 kg de N per hectare). To development of the vegetation index spectral measurements were made using the spectroradiometer FieldSpec Pro and determined to leaf nitrogen concentration. The measurements were performed in the laboratory for index calibration and in the field for validation. The index (NDSI) was obtained by linear regression between all possible normalized band ratio combinations and leaf nitrogen, where the index with the highest coefficient of determination ( $R^2$ ) was selected. The most promising normalized ratio was between 755 nm and 676 nm ( $R^2= 0.704$ ). The region located between 670 nm and 800 nm showed promise for obtaining spectral bands for N-related index formulation. Models similar to those obtained by NDSI have the potential to development of vegetation indexes that allow the quantification of nutritional status of plants from hyperspectral data.

**Palavras-chave:** hyperspectral, Nutrition Index, *Zea mays* L, precision farming, hiperespectral, índice de nutrição, *Zea mays* L, agricultura de precisão.

### 1. Introdução

O milho (*Zea mays*) é uma das culturas mais exploradas em todo o mundo, assumindo papel importante no cenário internacional da produção de alimentos. Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura - FAO (2015) é um dos principais cultivos irrigados e responsáveis pela utilização de insumos agrícolas. Atualmente grande parte das pesquisas está direcionada a eficiência do uso de recursos visando o aumento da produtividade e ao mesmo tempo diminuir os impactos ambientais gerados pela atividade agrícola (MUELLER et al., 2012).

Na maioria dos sistemas agrícolas o rendimento da cultura é limitado principalmente por fatores como baixa disponibilidade de nutrientes e água, pois comprometem processos fisiológicos relacionados com o crescimento das plantas (GONZALEZ-DUGO et al., 2010). O principal nutriente exigido pela cultura do milho é o nitrogênio (N), por está altamente relacionado com componentes de produção. Essa grande demanda de fertilizantes inorgânicos a base de N, frequentemente, resulta em altas taxas de aplicação no processo produtivo, necessitando assim de um manejo racional que considere os impactos econômicos e ambientais dessas práticas.

Nesse contexto, o sensoriamento remoto tem sido utilizado no estudo de parâmetros biofísicos em plantas, permitindo o entendimento de processos chaves ligadas à condição nutricional. A quantificação de componentes bioquímicos, como pigmentos fotossintéticos e nitrogênio, são amplamente investigados na cultura do milho (SCHLEMMER et al., 2013; CILIA *et al.*, 2014). Uma possível estratégia é o desenvolvimento de índices espectrais para o monitoramento e determinação das necessidades reais de nutrientes da cultura.

Em relação a uma abordagem detalhada do espectro eletromagnético, dados hiperespectrais tem sido utilizado para a análise regiões específicas relacionada com a condição nutricional de plantas. Para tanto, índices de vegetação específicos provenientes desse tipo de informações têm sido utilizados na diferenciação de níveis de adubação nitrogenada na cultura do milho (QUEMADA et al., 2014).

Diante do exposto, o estudo tem como objetivo avaliar a possibilidade do uso de dados obtidos por espectroscopia de reflectância para estimar a concentração de nitrogênio foliar na cultura do milho cultivado em diferentes níveis de adubação nitrogenada.

## 2. Metodologia de Trabalho

O estudo foi conduzido em uma área experimental no Laboratório de Hidráulica e irrigação do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Fortaleza, Ceará, coordenadas 3° 45' de latitude Sul e 38° 33' longitude Oeste, e altitude de 19 m. Segundo a classificação de Köppen, a área do experimento está localizada em uma região de clima Aw'. O solo da área é classificado como Podzólico Vermelho-Amarelo de textura franco-argilo-arenosa.

O delineamento adotado foi o de blocos aleatorizados, num esquema de parcelas subdivididas replicado quatro vezes, com a parcela principal composta de quatro níveis de umidade do solo com L1=120%, L2=100%, L3=80% e L4=70% do requerimento hídrico, baseados na capacidade de campo (CC) e a subparcela com quatro doses de adubação nitrogenada (N1= 0 kg, N2= 60 kg N3= 120 kg e N4=180 kg de N por hectare) considerando a dose de 120 Kg ha<sup>-1</sup> a quantidade necessária segundo análise de solo. A fonte de N utilizado foi a Ureia CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>. A adubação foi complementada em todos os tratamentos com 60 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 70 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O e 30 kg ha<sup>-1</sup> de FTE BR 12. A irrigação foi realizada por sistema de gotejamento e manejada por meio de sensores capacitivos de umidade. A variedade de milho utilizada foi a AG 1051, que tem características de ciclo semiprecoce e finalidade de uso para milho verde e silagem.

A obtenção de dados espectrais foi realizada a nível de laboratório (75 dias após o plantio) e campo (55 dias após o plantio), utilizando o espectrômetro FieldSpec Pro FR 3 (Analytical Spectral Devices Inc.), que opera na região de 350 a 2500 nm, com resolução de 1 nm. As leituras em laboratório tiveram como objetivo a obtenção de dados para calibração dos modelos, sendo coletadas em sala escura sem interferência da luz externa. A distância do sensor ao alvo foi de 5 cm, a distância da fonte luminosa (lâmpada de 250 Watts) ao alvo foi de 70,7 cm, com ângulo zenital de 45° e a distância da superfície do piso a fonte luminosa 50 cm. Foram realizadas, para cada amostra, três leituras. As leituras em campo tiveram como

objetivo a validação dos modelos gerados em laboratório, sendo realizadas a uma altura de 70 cm do dossel das plantas, procedendo três aferições por planta. A aquisição de dados ocorreu no período entre as 10:00 hs – 14:00 hs, sempre em dias com ausência de nebulosidade. Posteriormente, os dados espectrais gerados em número digital (ND) foram convertidos em reflectância utilizando o software ViewSpecPro 6.2.

Posteriormente à aquisição de dados espectrais, as folhas foram coletadas e transportadas para laboratório para determinação de nitrogênio foliar. Todo o material foi colocado em sacos de papel, secos em estufa de circulação de ar forçada a 60° C até atingir peso constante, trituradas em moinho tipo Willey (modelo MA 340, Marconi, BR), pesadas em balança de precisão e armazenadas em sacos plásticos à temperatura ambiente para posterior análise química. A solubilização das amostras de tecido vegetal foi realizada por meio de digestão sulfúrica e o N total determinado pelo método semi-micro Kjeldahl.

A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha$  de 0,05) e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. O modelo estatístico quantitativo do nitrogênio foliar (N) a partir dos dados de reflectância, foram gerados por meio de regressão linear usando a diferença normalizada entre as bandas espectrais.

Usando o mesmo princípio do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), determinou-se dentro do espectro das amostras de calibração, os melhores posicionamentos de bandas para descrever a relação entre a razão da diferença normalizada e o N foliar. Esse índice hiperespectral foi obtido a partir de um processo iterativo em ambiente Matlab, onde cada banda do espectro foi combinada com as demais (Equação 1) para escolher a combinação com maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Em seguida foi feita uma equação de regressão para o índice normalizado vs N foliar para o resultado mais significativo das amostras de calibração. A equação linear foi então validada com o conjunto amostral de validação.

$$NDSI = \frac{(\rho_j - \rho_i)}{(\rho_j + \rho_i)} \quad (1)$$

Onde:  $\rho_j$  e  $\rho_i$  são reflectâncias de quaisquer dois comprimentos de ondas do espectro.

### 3. Resultados e Discussão

Na Figura 1 foi plotado o contorno do  $R^2$  obtido das regressões lineares de cada combinação normalizada com N foliar para o conjunto amostral de calibração. A razão normalizada mais promissora foi entre 755 nm (banda i) e 676 nm (banda j) apresentando coeficiente de determinação de 0,704 (Figura 3). Dentre todas as combinações, os melhores resultados foram obtidos em torno de 670 nm da banda i com vários comprimentos de ondas da banda j.

Outra região significativa foi a faixa localizadas entre 450 nm até 1200 nm, faixas correspondentes ao pico de reflectância dos pigmentos clorofilados, e infravermelho, respectivamente. A região entre 450 nm e 500 nm é altamente sensível a mudanças na concentração de clorofila, sendo o nitrogênio o principal elemento que induz essas alterações. A região do infravermelho (IR) é influenciada pela estrutura celular do mesófilo, no qual ocorre elevado espalhamento da radiação. Dessa forma, mudanças estruturas no tecido foliar devido a variações no suprimento nutricional, a exemplo da disponibilidade de N tem efeito considerável na resposta nessa faixa .

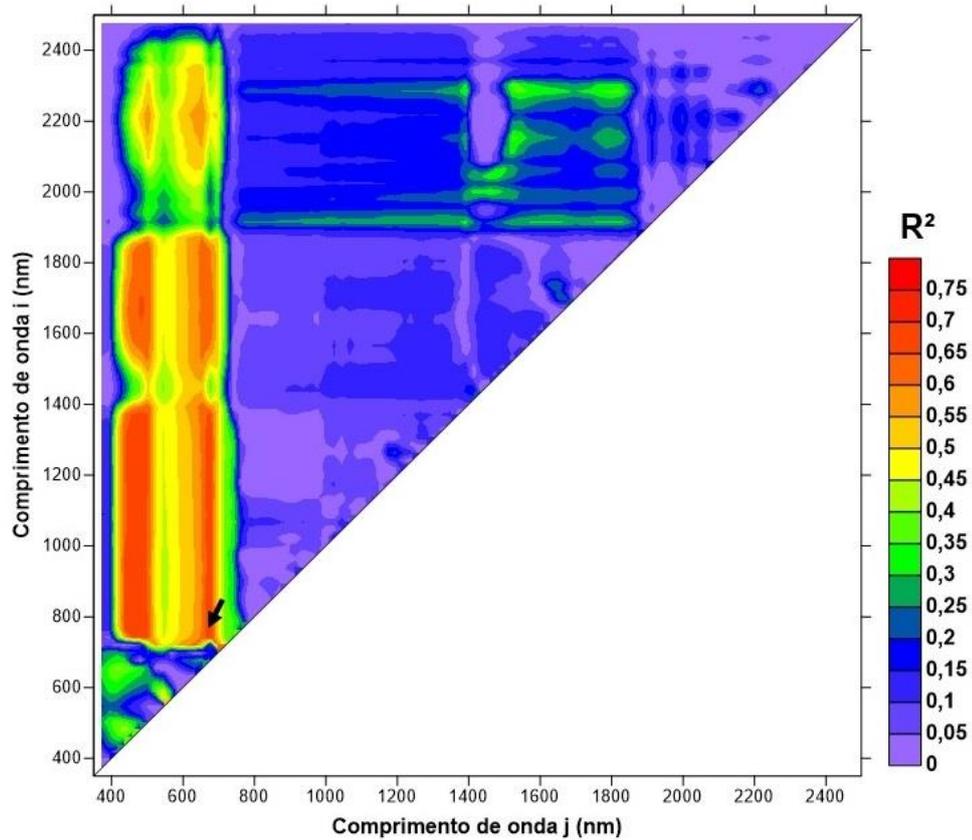


Figura 1. Coeficiente de determinação entre todas as combinações de reflectância de bandas usadas para obter NDSI e N foliar para o conjunto amostral de calibração. A seta indica a posição do melhor índice. O  $i$  e  $j$  representam o  $i$ -ésimo e  $j$ -ésimo comprimentos de ondas usados para compor todos os possíveis NDSIs.

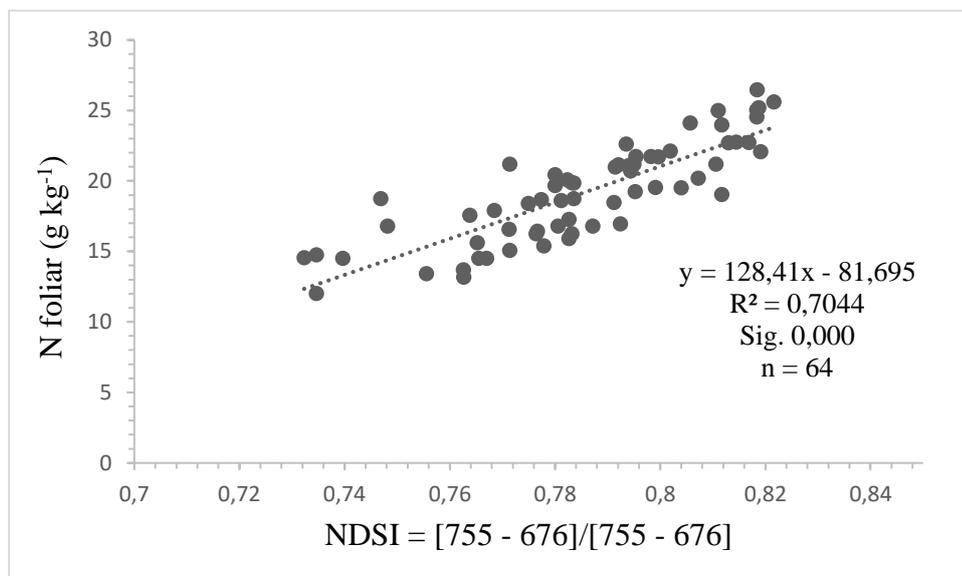


Figura 2. Equação de calibração obtida a partir da relação entre NDSI e concentração de N foliar no milho.

Na Figura 3, encontram-se os resultados da validação com dados de campo, a equações de validação apresentou um coeficiente de determinação  $R^2= 0,6639$ .

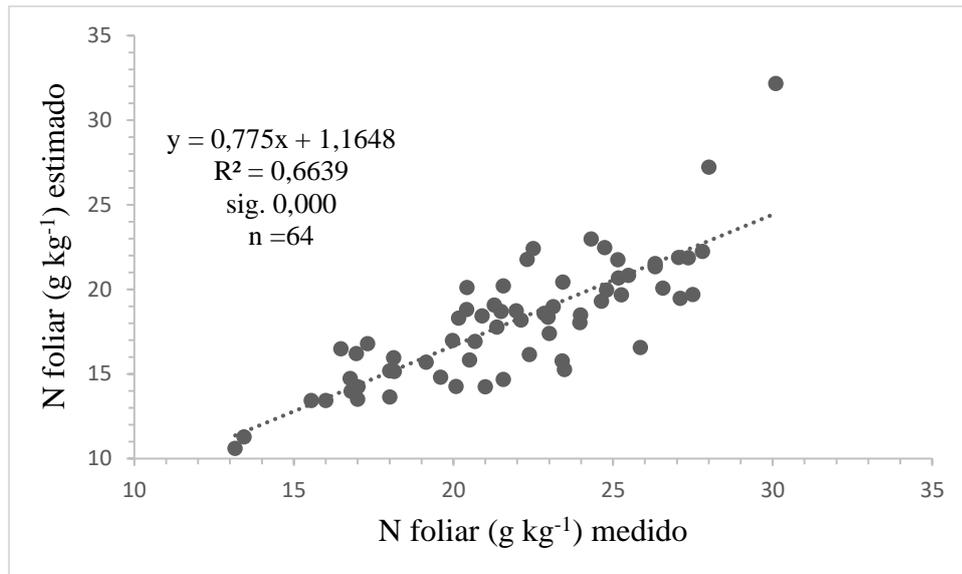


Figura 3. Validação do  $NDSI = [755 - 676]/[755+676]$ , para o conjunto de dados de obtidos em campo.

A maior concentração de índices normalizados, com alto  $R^2$ , localizou-se entre as faixas 600 nm e 800 nm, posição denominada pela literatura como “borda vermelha”, região importante na estimativa de parâmetros bioquímicos e biofísicos por meio de dados espectrais. Essa faixa tem sido utilizada para extração de comprimentos de onda relacionadas com estresse por deficiência nutricional. Em estudo com plantas de milho, Cho e Skidmore (2006), avaliaram a resposta espectral em função da adubação nitrogenada por meio de dados hiperespectrais. Nesse estudo os autores verificaram alta sensibilidade da concentração de N foliar na faixa entre 680 nm a 725 nm. Clevers e Gitelson (2013) constataram por meio do coeficiente de variação do espectro de reflectância, que as bandas centradas em 724 e 800 nm são mais eficiente para descrever alterações na borda vermelha em relação a mudanças no nitrogênio foliar. Ainda para cultura do milho, Chen et al. (2010), observaram que o índice calculado a partir da relação dos pontos médios das bandas entre 670 nm a 700 nm pelo valor médio entre 700 nm a 720 nm, denominado DCNI, mostrou-se sensível a alterações de N em plantas de milho, a partir de dados hiperespectrais, com recomendações para utilização de mapas de fertilidade nessa cultura. Resultados semelhantes foram demonstrados por Cilia et al. (2014), que obtiveram melhor estimativa de do N foliar em milho explorando índices sensíveis a respostas espectrais da borda vermelha, como o MCARI/MTVI2 e MTVI2, por meio de dados hiperespectrais. Esses trabalhos mostram a importância da região da borda vermelha na construção de índices de vegetação para estimar o nitrogênio foliar na cultura do milho.

A relação entre bandas centradas na região de máxima reflectância do infravermelho, também demonstram potencialidade para estimativa de nitrogênio foliar, no presente estudo verificou-se o aumento nos coeficientes de determinação próximos a essa região. Essa faixa apresentou resultados significativos em estudo realizado por Quemada et al. (2014), utilizando dados de imagens hiperespectrais na diagnose nutricional do milho, constataram que a relação entre as bandas 750 e 710 nm, foram mais precisas na diferenciação de plantas em relação as doses de N.

#### 4. Conclusões

Dados de espectroscopia de reflectância podem ser utilizados para calibrar modelos preditivos da concentração de nitrogênio foliar no milho. Equações de regressão com boa

capacidade de previsão podem ser obtidas de através de índices hiperespectrais (NDSI). A melhor faixa para a obtenção de bandas espectrais para a formulação do índice de nutrição de nitrogênio está localizada entre 670 nm a 800 nm. Modelos semelhantes aos obtidos pelo NDSI tem potencialidade para desenvolvimento de índices de vegetação que permitam a quantificação do estado nutricional de plantas, a partir de dados hiperespectrais.

## 5. Referências

CHEN, P.; HABOUDANE, D.; TREMBLAY, N.; WANG, J.; VIGNEAULT, P.; LI, B. 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, n. 2, p. 181-193, 2006.

CILIA, C.; PANIGADA, C.; ROSSINI, M.; MERONI, M.; Busetto, L.; AMADUCCI, S.; COLOMBO, R. Nitrogen status assessment for variable rate fertilization in maize through hyperspectral imagery. **Remote Sensing**, v. 6, n. 7, p. 6549-6565, 2014.

CLEVERS, J. G.P.W.; GITELSON, A. A. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and-3. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 23, p. 344-351, 2013.

GONZALEZ-DUGO, V.; DURAND, J.; GASTAL, F. Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 30, n. 3, p. 529-544, 2010.

MUELLER, N. D.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; RAY, D. K.; RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J. A. Closing yield gaps through nutrient and water management. **Nature**, v. 490, n. 7419, p. 254-257, 2012.

Organização das nações unidas para alimentação e agricultura. Statistics Division. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/>>. Acesso em: 18 de Abr. 2016.

QUEMADA, M.; GABRIEL, J. L.; ZARCO-TEJADA, P. Airborne hyperspectral images and ground-level optical sensors as assessment tools for maize nitrogen fertilization. **Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 2940-2962, 2014.

SCHLEMMER, M.; GITELSON, A.; SCHEPERS, J.; FERGUSON, R.; PENG, Y.; SHANAHAN, J.; RUNDQUIST, D. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 25, p. 47-54, 2013.