

ÍNDICES ESPECTRALES EN PIMIENTO PARA EL DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL DE NITRÓGENO

Spectral Indexes in Sweet Pepper for Diagnosis of Nitrogen Nutrient Status

Jairo Aarón de la Cruz-Durán^{1‡}, Prometeo Sánchez-García¹,
Arturo Galvis-Spínola¹ y José Alfredo Carrillo-Salazar²

RESUMEN

El espectro de la reflectancia de luz por el follaje de las plantas es un indicador preciso de la fracción de la cobertura vegetal, que está altamente asociada con la captura de la radiación y el estado nutrimental de los cultivos. El objetivo de esta investigación fue relacionar las firmas espectrales en pimiento con el contenido de nitrógeno total en hojas. Se estableció un experimento en condiciones hidropónicas con el cultivo de pimiento y se generó un gradiente de concentración de nitrógeno nítrico en la solución nutritiva: 0, 4, 8, 12, 16 y 20 meq L⁻¹. Durante el crecimiento del pimiento se monitoreó la reflectancia de la planta en tres bandas del espectro visible y dos del infrarrojo cercano, se tomaron imágenes digitales para la determinación del índice de área foliar (IAF) y se colectaron muestras vegetales para el análisis de concentración de nitrógeno. La aplicación de los índices de vegetación, como el modelo verde (830 nm / 560 nm) -1 y tasa normalizada (NDVI 560) / (NDVI 660), en la interpretación de las firmas espectrales obtenidas con un espectroradiómetro, permitió establecer niveles críticos de reflectancia. Los índices de vegetación mostraron una alta correlación ($r^2 > 0.8$) con deficiencia de nitrógeno total en hojas menores de 3%.

Palabras clave: sensores remotos, NDVI, índices espectrales.

SUMMARY

The spectrum of the light reflectance for the plant's foliage is a precise indicator of the fraction of the vegetable coverage, which is highly associated with the

radiation interception and crop nutrimental condition. The objective of this research consisted in relating the spectral signatures in pepper to the nitrogen concentration in leaves. A pepper crop experiment was established in hydroponics conditions and a gradient of concentration of nitrate was generated in the nutrient solution: 0, 4, 8, 12, 16, and 20 meq L⁻¹. During the pepper growth cycle, the reflectance in the pepper was monitored in three bands of the visible spectrum and in two of the near infrared, digital images were taken to determinate the foliar area index (FAI) and vegetable samples were collected for the analysis of nitrogen concentration. The utilization of the indexes of vegetation, as the green model (830 nm / 560 nm) - 1 and normalized rate (NDVI 560) / (NDVI 660), in the interpretation of the spectral signatures obtained by the spectrometer, allowed to establish critical levels of reflectance. The indexes of vegetation showed a high correlation ($r^2 > 0.8$) with nitrogen deficiency minor of 3%.

Index words: remote sensors, NDVI, spectral index.

INTRODUCCIÓN

El uso de firmas espectrales, obtenidas mediante sensores remotos permite obtener información de nitrógeno, área foliar y biomasa que proporciona información del estado fisiológico de la planta. La valoración de estas variables será útil en la agricultura competitiva con productos agrícolas en mercados futuros. Los sensores remotos ópticos proveen información, específica y crítica, debido a su capacidad para medir indicadores biofísicos y detectar su variabilidad espacial (ASD, 1999).

Los cloroplastos contienen 70% del nitrógeno de la hoja (Madakadze *et al.*, 1999), por lo que la clorofila domina las propiedades de reflectancia y transmitancia de la radiación del espectro visible (Ritchie, 2003) y ofrece estrecha correlación con la concentración de nitrógeno del follaje de las plantas en la reflectancia de 550 a 660 nm (Costa *et al.*, 2001). Las formas

Colegio de Postgraduados, ¹ Postgrado de Edafología; ² Postgrado de Genética, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

‡ Autor responsable (jairocruz@colpos.mx)

Recibido: febrero de 2011. Aceptado: marzo de 2011.
Publicado en Terra Latinoamericana 29: 259-265.

de reflectancia en el espectro visible por las hojas cambian entre la máxima reflectancia a 550 nm y la mínima a 660 nm, cuando existen cambios de concentración de la clorofila; esos cambios de forma del espectro visible se usan para identificar clorosis asociada a deficiencias de nitrógeno (Carter y Spiering, 2002).

La interacción de la radiación solar con las moléculas foliares de las plantas controlan las reflectancias del espectro visible (VIS) y del infrarrojo (IR). Los componentes bioquímicos (pigmentos, proteínas, carbohidratos aceites, agua), morfología de la hoja (mesófilo) y arquitectura de la planta, influyen en la tendencia de las plantas para absorber, transmitir y reflejar la radiación solar de distintas longitudes de onda corta de 280 a 2800 nm (Curran *et al.*, 2001).

Las radiaciones de longitudes de onda corta, absorbidas por las plantas son reguladas por la interacción molecular dentro del tejido vegetal, donde los electrones de las moléculas absorben longitudes de onda controladas por estructuras y enlaces químicos (Jones, 1997). La clorofila, el principal pigmento fotosintético en las plantas, controla la absorbancia de la luz visible por que la transición de los electrones en sus moléculas ocurre en; 430, 460, 640 y 660 nm, por tanto, la clorofila es un absorbente efectivo del espectro azul (400 - 500 nm) y del rojo (600 - 700 nm) (Curran, 1989).

Los índices de reflectancia de la vegetación son útiles para identificar el estado de salud de un cultivo (Ritchie, 2003).

La clorosis resulta de una absorbancia decreciente de la luz visible por la clorofila y en consecuencia un incremento de la reflectancia del espectro visible, resultando visualmente en el amarillamiento de la planta. La eficiencia de la absorbancia por la clorofila decrece en la región del infrarrojo cercano (NIR). El efecto combinado del decremento de la absorción por la clorofila y la dispersión de la luz por el mesófilo de las hojas muestran el espectro denominado rojo lejano o rojo profundo; este rojo es una línea delgada que incrementa su reflectancia entre la región del rojo e infrarrojo cercano de ese espectro, por las hojas de plantas sanas (Adams *et al.*, 1999).

El uso de niveles críticos de concentración de un elemento en las hojas para el diagnóstico nutrimental, es una herramienta que ha permitido establecer el estado de estrés por deficiencias de nutrimentos en los cultivos.

Con base en la tecnología de imágenes digitales, computadoras de alta velocidad, software y sensores remotos ópticos, es posible establecer niveles críticos de reflectancia (NCR), mediante la medición de espectros de reflectancia en la hoja o follaje y con bajo costo.

En este marco teórico, el objetivo de la investigación consistió en establecer NCR para el diagnóstico-pronóstico de la concentración de nitrógeno en el cultivo de pimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

La investigación se realizó de junio a diciembre de 2006 en los invernaderos del Colegio de Postgraduados, ubicado en el km. 36.5 de la carretera México-Texcoco, Montecillo, municipio de Texcoco, estado de México.

Manejo Experimental

El cultivo de pimiento cv. Orion se estableció en un invernadero tipo baticenital.

La fecha de siembra fue el 7 de junio de 2006, colocando 200 semillas pre-germinadas por charola de 200 cavidades. Para el riego de charolas se aplicó una lámina de riego promedio de 3 mm d⁻¹. Cuando las plántulas alcanzaron una altura aproximada de 15 cm aproximadamente, se transplantaron a vasos de unicele de 1 L de capacidad que contenían tezontle como sustrato, con una granulometría de 5 a 10 mm e irrigadas a capacidad de campo. Para tal efecto, se colocó una planta por vaso, posteriormente, cuando ésta alcanzó 30 cm de altura, se trasplantó a una bolsa de polietileno negra (30 × 35 cm).

El diseño de tratamientos consistió en 6 soluciones nutritivas con diferentes niveles de nitrógeno: 0, 4, 8, 12, 16 y 20 meq L⁻¹, a partir de la solución Steiner (Cuadro 1). Se generaron 108 unidades experimentales, provenientes de los 6 tratamientos por 3 repeticiones y 6 muestreos. El diseño experimental fue completamente al azar con tres repeticiones.

Los tratamientos se comenzaron a aplicar después del segundo mes después de germinación. El pH de las soluciones nutritivas se mantuvo diariamente en un rango de 5.5-6.5, mediante la adición de H₂SO₄ 1N. Los riegos con solución nutritiva se realizaron por las mañanas y por las tardes durante todo el experimento.

Cuadro 1. Diseño de tratamientos.

Nitrógeno	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	CE
----- meq L ⁻¹ -----									dS m ⁻¹
0	9	4	7	0	0	1	7	12	1.6
4	9	4	7	0	4	1	7	8	1.7
8	9	4	7	0	8	1	7	4	1.9
12	9	4	7	0	12	1	7	0	2
16	9	4	7	2	14	1	7	0	2.3
20	9	4	7	4	16	1	7	0	2.5

Solución nutritiva universal de Steiner al 100%, CE = conductividad eléctrica.

Las soluciones nutritivas se mantuvieron en recipientes con capacidad de 20 L, con su respectiva cubierta para evitar el contacto con los rayos solares, la evaporación del agua y la presencia de algas. La aplicación de los riegos se hizo mediante línea regante con goteros, dispuestos cada 30 cm y por gravedad.

En el Cuadro 2 se indican las fuentes y concentraciones de micronutrientes adicionados a las soluciones nutritivas.

Medición de Área Foliar

El índice de área foliar (IAF) se midió usando un medidor (LI-COR, Lincoln, NE, USA LI-3100 Area Meter). Cada valor obtenido sobre cada unidad experimental fue el promedio de tres mediciones y expresada como IAF.

El porcentaje de cobertura vegetal verde fue medido con una cámara digital (Canon PowerShot A300, 3.2 Mega-píxeles) colocada a 1 m sobre cada punto del monitoreo (unidad experimental).

Obtención de Reflectancias

La obtención de datos se realizó mediante el sistema pasivo de energía reflejada (espectroradiómetro, cámara digital y escáner), en el cual los sensores de este tipo miden energía en la porción reflectiva del espectro.

Cuadro 2. Micronutrientes empleados.

H ₃ BO ₃	MnCl ₂ 4H ₂ O	ZnSO ₄ 7H ₂ O	CuSO ₄ 5H ₂ O	H ₂ MoO ₄ H ₂ O	Fe-EDTA (7%)
----- g L ⁻¹ -----					
2.88	1.81	0.22	0.18	0.1	71.48

Para tal efecto, se aplicó un mL de micronutrientes por cada litro de solución Steiner.

Análisis Espectral y Muestreo de Hojas

La medición de la reflectancia de luz en hojas de pimiento se realizó con un espectroradiómetro (Cropscan). El espectrómetro mide tres bandas en la porción visible del espectro (485, 560 y 660 nm) y dos bandas en el rango del infrarrojo (830 y 1650 nm). También se usó una cámara digital y un escáner para la obtención de imágenes.

Esta información se analizó utilizando índices espectrales que han sido correlacionados con el estado de salud de la planta y varias concentraciones de compuestos bioquímicos de las hojas (Cuadro 3).

Análisis Químico de Nitrógeno en Tejido Vegetal

El muestreo de hojas para el análisis químico se realizó cada vez que se midió la reflectancia con el espectrómetro, estos muestreos fueron destructivos y se consideraron 3 repeticiones. Para la cuantificación de nitrógeno se utilizó la técnica de microkjeldahl (Brearen y Mulvaney, 1982).

Análisis Estadísticos

Los índices de vegetación y del IAF, el porcentaje de cobertura vegetal y nitrógeno, se expusieron a un análisis de varianza y modelación usando GLM

Cuadro 3. Índices espectrales para el análisis de las propiedades de reflectancia de la hoja.

Abreviación	Nombre	Índice vegetativo	Referencias
NDVI 660	Índice de vegetación diferencial normalizada roja	$(\text{NIR} - \text{ROJO}) / (\text{NIR} + \text{ROJO})$	Rouse <i>et al.</i> , 1973
NDVI 560	Índice de vegetación diferencial normalizada verde	$(\text{NIR} - \text{VERDE}) / (\text{NIR} + \text{VERDE})$	Gitelson y Merzlyak, 1998
NDVIverde / NDVIrojo	Tasa normalizada verde /rojo	NDVI560 / NDVI660	Ritchie, 2003
Mv	Modelo verde	$(830\text{nm}/560\text{nm}) - 1$	Gitelson <i>et al.</i> , 2005

del programa SAS (ver. 8.2) y Microsoft Excel. Se realizó una prueba de comparación de medias (Tukey, $P < 5\%$) entre tratamientos para la reflectancia y nitrógeno total. Además, se hizo un análisis de correlación entre ellos mediante el programa estadístico SAS para probar la hipótesis propuesta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparación de Índices Espectrales Contra Concentración de Nitrógeno Total para la Identificación de Clorosis

El modelo verde $(830 / 560) - 1$ y la tasa normalizada $\text{NDVI}_{560} / \text{NDVI}_{660}$ se utilizaron para identificar alguna clorosis en el cultivo a priori a la percepción con la vista, ambos índices son simples y presentan un alto coeficiente de determinación al correlacionar con las concentraciones de nitrógeno, mientras que la tasa normalizada también lo tiene con las imágenes digitalizadas de cobertura vegetal. Por efectos de la cobertura vegetal, el índice NDVI_{560} fue comparado con NDVI_{660} ; ambos índice normalizados por la reflectancia del infrarrojo cercano (830 nm) minimizan el efecto de la fracción de la cobertura vegetal sobre la comparación

directa de la reflectancia del verde (560 nm) y del rojo (660 nm) (Ritchie, 2003).

Los resultados de la comparación del NDVI_{560} con el NDVI_{660} durante la etapa de crecimiento fueron previsible porque la reflectancia del verde es sensible a rangos amplios de concentración de clorofila (Cuadro 4), mientras que la reflectancia del rojo es insensible a concentraciones altas de clorofila (Gitelson y Merzlyak, 1998). Desviaciones a partir de la relación entre estos índices para un cultivo sin estrés hídrico pueden presentar cambios de firmas espectrales en NDVI_{560} debido a cambios en la concentración de clorofila. La regresión lineal de NDVI_{560} contra NDVI_{660} para los tratamientos mostraron altos coeficientes de determinación (Cuadro 4).

El comportamiento en cambio de pendientes, mostrados en el Cuadro 4 y Figura 1 se debe a que las deficiencias de nitrógeno se asocian a bajos contenidos de clorofila total. Por tanto, el porcentaje de reflectancia del verde es alto y resulta un valor bajo del NDVI_{560} . El resultado de NDVI_{660} (valor tendiente a uno) es un caso contrario.

El modelo verde es un estimador remoto de la clorofila propuesto por Gitelson *et al.* (2005). En el Cuadro 5 se representa este modelo ajustado por

Cuadro 4. Relación entre el NDVI_{560} y el NDVI_{660} .

Experimento	Días después del trasplante	Coficiente de correlación	Modelo	r^2
1	45	0.85386	$y = 0.6322x + 0.2153$	0.6972
1	37	0.88969	$y = 0.6041x + 0.2399$	0.9059
1	30	0.85891	$y = 1.0207x + 0.1287$	0.8966
1	23	0.83692	$y = 0.7303x + 0.2016$	0.9618
2	60	0.84117	$y = 0.7472x + 0.1972$	0.7521
2	51	0.8714	$y = 0.8299x + 0.1863$	0.9973
2	46	0.88506	$y = 0.819x + 0.188$	0.9918
2	36	0.81159	$y = 0.8202x + 0.1841$	0.9696

x = NDVI 660nm; y = NDVI 560nm.

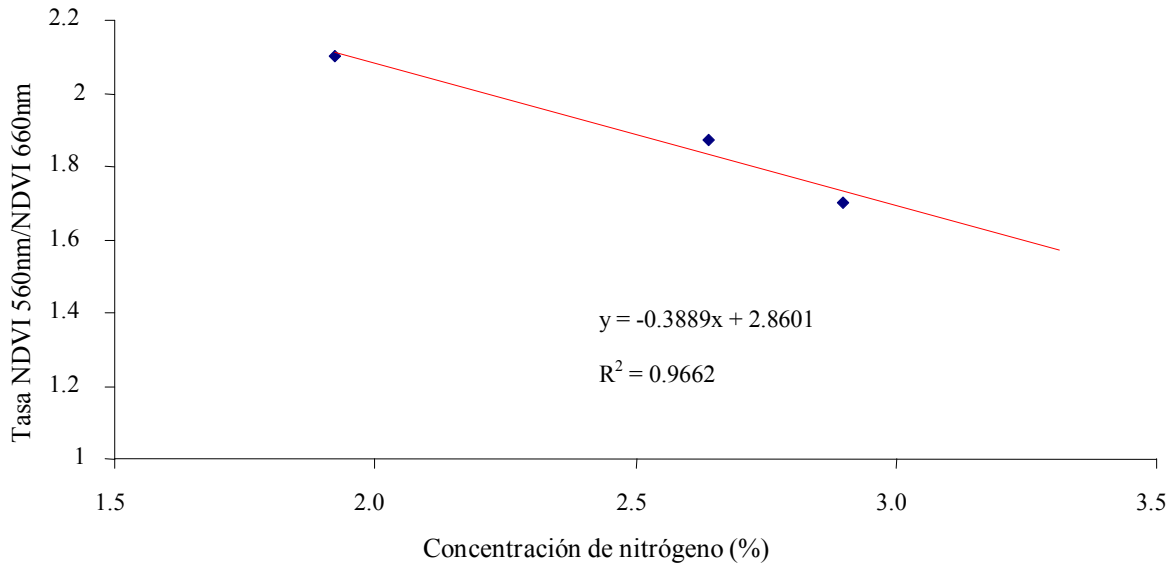


Figura 1. Relación lineal de la tasa NDVI560 / NDVI660 y concentración de nitrógeno total en hojas de pimiento.

la expresión $y = ax + b$, con diferentes niveles de nitrógeno, el cual tiene una alta correlación ($r^2 > 0.8$) y residuales menores de 0.1 (diferencia entre lo observado y lo predicho).

Aunque ambos índices muestran buen ajuste a las funciones no lineales, estas fueron analizadas como funciones lineales.

El Cuadro 5 establece el nivel crítico de la concentración de nitrógeno total (3%), abajo del cual la planta presentará deficiencia del nutrimento y que se encuentra asociado con índices de reflectancia del modelo verde menores de 1.3 (nivel crítico de reflectancia-NCR).

Los parámetros estadísticos de una regresión lineal se señalan en el Cuadro 5. Por tanto, el uso de este modelo permitirá diagnosticar la concentración de nitrógeno en la fase del crecimiento del pimiento.

Cuadro 5. Modelo verde para la identificación oportuna de la clorosis.

Experimento	DDT	Modelo	r^2	NCR
1	30	$y = 0.088x + 0.9601$	0.8023	1.224
2	60	$y = 0.1415x + 0.7229$	0.7857	1.147
2	51	$y = 0.2494x + 0.4911$	0.8826	1.239
2	46	$y = 0.2219x + 0.5538$	0.9033	1.220
2	36	$y = 0.1056x + 0.6548$	0.9352	0.972
2	2	$y = 0.2178x + 0.4601$	0.8876	1.114

x = N%; y = modelo verde (830nm/560nm)-1; NCR = nivel crítico de reflectancia; DDT = días después del trasplante.

Actualmente el modelo verde se utiliza en los sensores aéreos y espaciales, como MODIS y MERIS (Gitelson *et al.*, 2005).

Los dos índices tienen comportamiento lineal significativo con diferencias marcadas en sus coeficientes de determinación y residuales. Esto se debe a que la tasa normalizada, propuesta por Ritchie (2003), es un índice que permite identificar deficiencias de nitrógeno a partir de la cobertura vegetal digitalizada; no así el modelo verde ajustado para la estimación de la clorofila usando las longitudes de onda 545-565 nm (Gitelson *et al.*, 2005). Ambos índices de reflectancia vegetal han sido desarrollados para sensores de espectroradiómetros pasivos instalados en satélites. Los resultados presentados en esta investigación con el uso de un espectroradiómetro pasivo, demuestra la factibilidad de establecer niveles críticos de reflectancia confiables ($P < 0.05$) que coadyuven en el diagnóstico-pronóstico de la nutrición nitrogenada y rendimiento de los cultivos, a escala pequeña de una agricultura de precisión, abierta o protegida.

Identificación de Deficiencia de Nitrógeno a Partir de datos del Espectroradiómetro

La reflectancia de la radiación roja y verde por las plantas es fuertemente influenciada por la absorción de luz de la clorofila, de igual manera la deficiencia de nitrógeno está altamente correlacionada con una

reducción en el contenido de clorofila y el incremento de la reflectancia de la radiación del espectro verde (Costa *et al.*, 2001).

En el Cuadro 6 se muestra una función de ajuste lineal de la concentración de nitrógeno total en hojas y la reflectancia de la radiación con longitud de onda 560 nm (verde). El cultivo desarrollado en un medio deficiente de nitrógeno presentó un nivel crítico de reflectancia mayor al 9.5%, asociado con concentraciones menores de 3% de nitrógeno. Cuando el cultivo encontró con suficiente nitrógeno, la reflectancia fue menor a 9.5%.

En los Cuadros 6 a 9 se presentan resultados de los parámetros estadísticos de la regresión lineal, aplicados a los porcentajes de reflectancia simple del espectro verde (560 nm), obtenidos con el espectrómetro, cámara, escáner y SPAD los cuales establecieron significancia y residuales aceptables para el diagnóstico nutrimental de nitrógeno en plantas de pimiento.

Cuadro 6. Comparación de la concentración de nitrógeno de la hoja de pimiento con la reflectancia simple del espectro verde del radiómetro.

Experimento	DDT	Modelo	r ²	NCR
1	45	y = -0.1512x + 10.298	0.861	9.844
1	37	y = -0.1529x + 9.5366	0.688	9.078
1	30	y = -0.3159x + 10.831	0.639	9.883
2	60	y = -0.2232x + 9.8395	0.903	9.170
2	51	y = -0.3088x + 10.013	0.822	9.087
2	46	y = -0.1428x + 9.5452	0.158	9.117
2	36	y = -0.4417x + 11.094	0.822	9.769

x = N%; y = reflectancia del espectro verde del radiómetro; NCR = nivel crítico de reflectancia; DDT = días después del trasplante.

Cuadro 7. Comparación de la concentración de nitrógeno de la hoja de pimiento con la reflectancia simple del espectro verde de fotografías.

Experimento	DDT	Modelo	r ²	NCR
1	45	y = -11.381x + 185.77	0.917	59.229
1	37	y = -4.7832x + 181.98	0.680	65.481
1	30	y = -7.355x + 178	0.737	60.912
2	60	y = -8.2855x + 192.12	0.996	65.337
2	51	y = -20.148x + 221.89	0.995	63.065
2	46	y = -7.8042x + 188.33	0.981	64.421
2	36	y = -3.6496x + 177.42	0.518	65.028

x = N%; y = reflectancia del espectro verde en fotografías (256 es el 100%); NCR = nivel crítico de reflectancia; DDT = días después del trasplante.

Sims y Gamon (2002) explicaron el comportamiento de la relación de la tasa normalizada verde/rojo y la concentración de nitrógeno, señalando que concentraciones relativamente bajas de clorofila fueron suficientes para saturar la absorción luminosa en el intervalo 660 - 680 nm, lo cual reduce la sensibilidad de estas longitudes de onda para diagnosticar situaciones de altos niveles de clorofila. Los datos de este experimento coinciden con esta idea, porque las desviaciones (saturación) ocurren también a contenidos altos de clorofila.

Por último, los factores de reflectancia en 560 nm, mostraron alta correlación con la concentración de nitrógeno de la hoja, en los tres casos estudiados y utilizando un espectrómetro. Otros autores, usando un espectroradiómetro pasivo, señalan a los factores de reflectancia en el intervalo 550 y 660 nm con alta correlación a la concentración de nitrógeno total de

Cuadro 8. Comparación de la concentración de nitrógeno de la hoja de pimiento con la reflectancia simple del espectro verde en escáner.

Experimento	DDT	Modelo	r ²	NCR
1	45	y = -3.5726x + 29.461	0.955	18.743
1	37	y = -1.7526x + 26.138	0.802	20.880
1	30	y = -1.8362x + 34.515	0.693	29.006
2	60	y = -2.3497x + 24.809	0.732	17.760
2	51	y = -5.1806x + 32.752	0.942	17.210
2	46	y = -3.277x + 26.735	0.958	16.904
2	36	y = -1.0946x + 28.471	0.998	25.187
2	29	y = -3.643x + 32.795	0.754	21.866

x = N%; y = reflectancia del espectro verde en escáner; NCR = nivel crítico de reflectancia; DDT = días después del trasplante.

Cuadro 9. Comparación de la concentración de nitrógeno de la hoja de pimiento con las lecturas SPAD.

Experimento	DDT	Modelo	r ²	NC
1	45	y = 8.9008x + 22.873	0.932	49.575
1	30	y = 4.6294x + 34.006	0.534	47.894
2	60	y = 9.5019x + 19.813	0.898	48.319
2	51	y = 12.667x + 12.334	0.971	50.335
2	46	y = 9.3207x + 20.965	0.993	48.927
2	36	y = 3.7749x + 35.865	0.583	47.190
2	2	y = 5.3611x + 30.505	0.741	46.588

x = N%; y = lecturas SPAD; NC = nivel crítico; DDT = días después del trasplante.

la hoja (Fernández *et al.*, 1994) y contenido de clorofila, respectivamente (Adams *et al.*, 1999).

CONCLUSIONES

Las variaciones del espectro de reflectancia visible 560 nm, fueron ocasionadas por alteraciones en la concentración de clorofila relacionadas con concentraciones de nitrógeno total. Por tanto, estos cambios se pueden usar para identificar clorosis en tiempo real y antes de ser percibidos visualmente. El porcentaje de reflectancia del espectro verde (560 nm) es un indicador confiable para diagnosticar el estado de nitrógeno total en el tejido vegetal, ya que un nivel crítico de reflectancia (NCR) del espectro mayor del 9.5, 64 y 21%, para espectroradiómetro, cámara y escáner respectivamente, indica que el cultivo tiene concentraciones menores de 3% de nitrógeno. En consecuencia, es una condición de deficiencia nutrimental respecto a ese elemento. Las lecturas SPAD son un indicador confiable para diagnosticar el estado de nitrógeno total en el tejido vegetal, ya que un nivel crítico (NC) menor de 48.5 indica que el cultivo tiene concentraciones menores de 3% de nitrógeno. En consecuencia, es una condición de deficiencia nutrimental respecto a ese elemento. El modelo verde fue un buen estimador de la concentración de nitrógeno total, mediante firmas espectrales obtenidas con el espectrómetro. Un NCR menor de 1.3 se correlaciona con niveles de concentración menores de 3% de nitrógeno total. La tasa normalizada verde/rojo permitió identificar en tiempo real el estado de la cobertura vegetal digitalizada.

LITERATURA CITADA

Adams, M. L. W. D. Philpot, and W. A. Norvell. 1999. Yellowness index: an application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation. *Int. J. Remote Sens.* 20: 663-3675.

- ASD (Analytical Spectral Devices). 1999. Technical guide. Analytical Spectral Devices. Boulder, CO, USA.
- Brearen, L. and C. S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. pp. 595-634. *In*: A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties (Agronomy 9)*. ASA, SSSA. Madison, WI, USA.
- Carter, G. A. and B. A. Spiering. 2002. Optical properties of intact leaves for estimating chlorophyll concentration. *J. Environ. Qual.* 31: 1424-1432.
- Costa, C., L. M. Dwyer, P. Dutilleul, D. W. Stewart, B. L. Ma, and D. L. Smith. 2001. Inter-relationships of applied nitrogen, spad and yield of leafy and non-leafy maize genotypes. *J. Plant Nutr.* 24: 1173-1194.
- Curran, P. J. 1989. Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sens. Environ.* 30: 271-278.
- Curran, P. J., J. L. Dungan, and D. L. Peterson. 2001. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: Testing the Kokaly and Clark methodologies. *Remote Sens. Environ.* 76: 349-359.
- Fernández, S., D. Vidal, E. Simón, and L. Solé-Sugrañes. 1994. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. Astral under water and nitrogen stress. *Int. J. Remote Sens.* 15: 1867-1884.
- Gitelson, A. A. and M. N. Merzlyak. 1997. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *Int. J. Remote Sens.* 18: 2691-2697.
- Gitelson, A. A., A. Viña, V. Ciganda, D. C. Rundquist, and T. J. Arkebauer. 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophys. Res. Lett.* 32: L08403. doi: 10.1029/2005GL022688 (disponible en línea desde abril 22 de 2005).
- Jones, M. Jr. 1997. *Organic chemistry*. W. W. Norton and Company. New York, NY, USA.
- Madakadze, I. C., K. A. Stewart, R. M. Madakadze, P. R. Peterson, B. E. Couldman, and D. L. Smith. 1999. Field evaluation of the chlorophyll meter to predict yield and nitrogen concentration of switchgrass. *J. Plant Nutr.* 22: 1001-1010
- Ritchie, L. G. 2003. Use of ground-based canopy reflectance to determine ground cover, nitrogen and water status and final yield in wheat. Utah State University. Logan, UT, USA.
- Rouse, J. W., R.H. Hass, J. A. Schell, and D. W. Deering. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA. NASA SP 1: 309-317.
- Sims, D. A. and J. A. Gamon. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and development stages. *Remote Sens. Environ.* 81: 337-354.