

ÍNDICES DE REFLECTANCIA Y RENDIMIENTO DEL FRIJOL CON APLICACIONES DE NITRÓGENO

Spectral Reflectance Indices and Yield in Bean with Nitrogen Applications

M. Gutiérrez-Rodríguez¹, J. Alberto Escalante-Estrada^{1‡}, M. Teresa Rodríguez-González¹
y Matthew P. Reynolds²

RESUMEN

Se realizaron aplicaciones de nitrógeno (0, 100 y 200 kg ha⁻¹) en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno para buscar incrementos en la biomasa, en el rendimiento y su relación con el índice de reflectancia del dosel (NDVI). El estudio se llevó a cabo en Montecillo, estado de México durante el ciclo de lluvias (junio-septiembre, 2001) con una densidad de 25 plantas m⁻² y un diseño de bloques completos al azar. La reflectancia del dosel se midió con un radiómetro portátil (FieldSpec, USA) a 14, 25, 32, 39, 50, 84 y 88 días después de la siembra (dds). Los resultados señalan que el rendimiento agronómico más alto (549 g m⁻²) se logró con la aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N, mientras que el más bajo (323 g m⁻²) correspondió a N0. El número de racimos, número de vainas y semillas m⁻² fueron los componentes relacionados con estos cambios en el rendimiento. La biomasa y el índice de cosecha también fueron significativamente más altos en N200 (1003 g m⁻² y 46%, respectivamente), que con N0 (932 g m⁻² para biomasa y 35% para el índice de cosecha). El valor más alto de NDVI se presentó en la etapa de floración-llenado de vaina (50 a 84 dds) y, posteriormente, conforme el cultivo llegó a la madurez fisiológica, disminuyó. El NDVI mostró una correlación alta con la radiación interceptada ($r^2 = 0.62$ a 0.80), biomasa ($r^2 = 0.73$ a 0.98), índice de área foliar ($r^2 = 0.89$ a 0.91) y con el rendimiento final ($r^2 = 0.99$). El rendimiento y la biomasa del frijol incrementaron con la aplicación de N (200 kg ha⁻¹). Se observó que el NDVI puede ser un estimador del rendimiento biológico y agronómico en frijol.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris* L., radiometría, biomasa, leguminosas.

SUMMARY

Different nitrogen (N) rates (0, 100, and 200 kg ha⁻¹) were applied in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants cv. Flor de Durazno to determine whether the biomass and yield were related to the normalized difference vegetation index (NDVI). The study was carried out in Montecillo, Mexico under rainfed conditions (June-September, 2001) with a density of 25 plants m⁻² using a randomized complete block design. Canopy reflectance was measured with a portable radiometer (FieldSpec, USA) at 14, 25, 32, 39, 50, 84, and 88 days after sowing (das). The results showed that the high seed yield was increased with 200 kg ha⁻¹ N (549 g m⁻²), while N0 treatment had low seed yield (323 g m⁻²). Raceme number, pod number and seeds m⁻² were related to high yield. Biomass and harvest index were also higher in N200, 1003 g m⁻² and 46%, respectively, compared with 932 g m⁻² and 35% for the N0 treatment. The maximum NDVI values occurred during the flowering-pod filling stage (50 to 84 das); when the plants began senescence, the NDVI values decreased. NDVI showed a strong relationship with absorbed radiation ($r^2 = 0.62$ to 0.80), biomass ($r^2 = 0.73$ to 0.98), leaf area index ($r^2 = 0.89$ to 0.91), and seed yield ($r^2 = 0.99$). Seed yield and biomass production were increased with N fertilization rates. It was observed that NDVI estimated seed yield and biomass in bean plants.

Index words: *Phaseolus vulgaris* L., radiometry, biomass, legume.

INTRODUCCIÓN

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es la principal especie de las leguminosas que se utiliza como fuente de proteínas para la mayoría de la población en México y América Latina, aunque también se cultiva extensamente en otros países del

¹ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

[‡] Autor responsable (jasse@colpos.mx)

² International Maize and Wheat Improvement Centre (CIMMYT). Houston, TX 77205, USA.

tercer mundo (Huerta-Díaz *et al.*, 1997; Escalante-Estrada *et al.*, 1999).

El nitrógeno (N) es el principal elemento que limita el rendimiento de los cultivos (Liebman *et al.*, 1995). La aplicación de N en frijol incrementa su rendimiento (semilla) y la biomasa, debido a que estimula el crecimiento del dosel vegetal y del número de flores (Liebman *et al.*, 1995; Huerta-Díaz *et al.*, 1997; Escalante-Estrada *et al.*, 1999).

Por otra parte, la búsqueda de estimadores físicos del rendimiento de los cultivos ha sido objeto de diversas investigaciones, dentro de éstas, las técnicas de percepción remota, que se basan en la radiometría (en particular la reflectancia) pueden proveer valiosa información con medidas instantáneas sobre el estado fisiológico de un cultivo (Araus, 1996; Peñuelas, 1998; Araus *et al.*, 2001). Los índices de reflectancia se basan en ecuaciones con operaciones simples y longitudes de onda específicas, que resumen gran cantidad de información, contenida en un espectro de reflectancia. El índice de reflectancia del dosel conocido como NDVI (normalized difference vegetation index) mide el contraste de reflectancia en el espectro rojo (680 nm) e infrarrojo (900 nm) y se calcula de la siguiente manera:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}$$

Donde: R_{NIR} y R_{RED} es la reflectancia en el espectro infrarrojo cercano y rojo, respectivamente (Araus, 1996; Peñuelas, 1998; Araus *et al.*, 2001).

El NDVI puede utilizarse como un indicador de la biomasa del dosel, índice de área foliar (IAF), radiación interceptada y capacidad fotosintética de un cultivo. Probablemente, es el índice más usado para analizar la vegetación a nivel continental y global (Gamon *et al.*, 1997).

Durante el ciclo de crecimiento de un cultivo, el índice NDVI puede evaluar la absorción de radiación, uno de los parámetros que determina biomasa y rendimiento final (Gamon *et al.*, 1997). Carlson y Ripley (1997) encontraron, en trigo, que la radiación interceptada y el IAF mostraron una correlación alta con el NDVI.

El rendimiento de grano también puede predecirse con medidas sucesivas de NDVI durante la estación de crecimiento (Wiegand *et al.*, 1991). En trigo, NDVI se asocia con el rendimiento de grano ($r^2 = 0.55$ a 0.66), desde la etapa de espigamiento, hasta la senescencia (Rudorff y Batista, 1990; Wiegand y Richardson, 1990).

También, es posible estimar el contenido de clorofila (el cual se relaciona con la actividad fotosintética) con los métodos de reflectancia a una longitud de 680 nm. Chappelle *et al.* (1992) desarrollaron los índices RARS (ratio analysis of reflectance spectra) para la determinación de clorofila a y b (RARSa y RARSb, respectivamente). Estos índices estimaron el contenido de clorofila a ($r = 0.93$) y clorofila b ($r = 0.82$) en hojas de soya.

En frijol, los estudios empleando radiometría son limitados, algunos de ellos miden el contenido de proteína total, área foliar y posición angular de las hojas (Wu *et al.*, 1993; Canteri *et al.*, 1998). Pero no existen estudios que se relacionen con la producción de biomasa y rendimiento de semilla.

Debido a que el crecimiento de un cultivo está determinado, en parte, por la disponibilidad de N, el cual influye en el tamaño del dosel (área foliar, biomasa, absorción de radiación y capacidad fotosintética), los índices de reflectancia pueden indicar diferencias en el crecimiento de frijol por aplicaciones de N y predecir el rendimiento final; por ello, los objetivos del presente trabajo fueron: (i) conocer el efecto de la aplicación de N (0, 100 y 200 kg ha⁻¹) sobre la producción de biomasa, rendimiento y sus componentes; (ii) determinar la relación entre NDVI con la radiación interceptada, IAF y biomasa a través del desarrollo del cultivo; (iii) determinar el índice RARSa como estimador del contenido de clorofila; y (iv) determinar la relación de los índices de reflectancia con el rendimiento de frijol.

MATERIAL Y MÉTODOS

Semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno de crecimiento determinado (Tipo I), proporcionadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Campos-Escudero *et al.*, 1998), se sembraron el 28 de mayo de 2001 en condiciones de temporal en Montecillo, estado de México (19°19' N, 98°54' O y 2250 m de altitud) con clima semiárido (BS1) y un Fluvisol (FAO, 1974; Escalante-Estrada *et al.*, 1999). Se aplicaron riegos de auxilio para germinación de semillas y establecimiento de plántulas. Las parcelas consistieron en tres surcos de 2 m de longitud con una separación de 0.6 m con una densidad de población de 25 plantas m⁻². Los tratamientos consistieron en la aplicación de 0 (N0), 100 (N100) y 200 (N200) kg ha⁻¹ de N. Del N, 50% se aplicó antes de la siembra y el resto al inicio de la

floración (37 dds). Además, todo el experimento se fertilizó con 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Durante el desarrollo del cultivo, se registró la temperatura máxima, mínima y media (media de cada 10 días) y la suma decenal de la precipitación (mm).

Las medidas de reflectancia del dosel se realizaron en día soleado en todas las parcelas, con base en el diseño experimental. Se tomó la lectura al azar dentro de cada unidad experimental a 14 (V1), 25 (V4), 32 (aparición de racimos), 39 (aparición de botones florales), 50 (floración), 84 y 88 días después de la siembra (dds) (llenado de vaina). Para ello, se utilizó un radiómetro portátil FieldSpec (Analytical Spectral Devices, Boulder, CO) en el intervalo de 350 a 1100 nm. El equipo se calibró previamente con un panel blanco de referencia de sulfato de bario (Labsphere Inc., North Sutton, NH). Esto se midió a una altura de 0.5 m arriba del dosel del frijol, utilizando un lente de 10° de apertura.

Los índices de reflectancia que se calcularon fueron: índice de reflectancia del dosel (NDVI) y el índice del contenido de clorofila (RARSa), como a continuación se indica:

$$\text{NDVI} = (\text{R}_{900} - \text{R}_{680}) / (\text{R}_{900} + \text{R}_{680}) \text{ y } \text{RARSa} = \text{R}_{680} / \text{R}_{800}$$

Donde: R es la reflectancia a 680, 800 y 900 nm. Araus (1996), Peñuelas (1998), Chappelle *et al.* (1992) y Araus *et al.* (2001) describieron ambas ecuaciones.

Se determinó el área foliar en un integrador de área Hayashi (Denko, Japón). El índice de área foliar (IAF) se estimó mediante la ecuación:

$$\text{IAF} = \text{AF} * \text{DP} / \text{S}$$

Donde: AF es el área foliar por planta (en dm²), DP la densidad de población (plantas m⁻²) y S el área que ocupó el cultivo (m²).

Las determinaciones de radiación interceptada se hicieron con un sensor lineal de quantum (Lycor, USA), el cual se colocó de manera perpendicular a los surcos del cultivo arriba (AD) y debajo del dosel (BD). Primero, se calculó la luz transmitida (T) por el dosel:

$$\text{T} = \text{BD} * 100 / \text{AD}$$

A partir de T, se procedió a calcular GC mediante la ecuación:

$$\text{GC} = 100 - \text{T}(\%)$$

Donde: GC (ground cover) representa la radiación interceptada por el cultivo, en porcentaje (Adams y Arkin, 1977).

En la cosecha final, se determinó el rendimiento en semilla (peso seco del grano con 10% de humedad) y sus componentes como número de semillas m⁻², tamaño de semilla (peso de 100 semillas), número de vainas con semilla m⁻², número de semillas vaina⁻¹ y el número de semillas m⁻². La biomasa total (g m⁻²) se determinó sumando el peso seco de hojas caídas, tallo y estructuras reproductivas (secadas a 75 °C por 48 h) y el índice de cosecha (IC) (materia seca de la semilla/materia seca total de la parte aérea del cultivo), se calculó siguiendo el criterio de Escalante-Estrada *et al.* (1995, 1999).

A las variables de estudio se les aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y un análisis de regresión mediante el paquete estadístico SAS (SAS Institute, 1990).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el desarrollo del frijol, la temperatura máxima osciló entre 23 y 27 °C, la temperatura mínima entre 11 y 14 °C y la temperatura promedio entre 17 y 19 °C. La precipitación que se acumuló durante toda la estación de crecimiento fue de 445 mm.

Rendimiento y sus Componentes

El rendimiento en semilla, los racimos m⁻², número de semillas m⁻² y vainas m⁻² incrementaron con la aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N (N200), mientras que los tratamientos N0 y N100 no presentaron diferencias significativas (P ≤ 0.05) (Cuadro 1). No se observaron diferencias significativas en semillas vaina⁻¹ y peso de 100 semillas por efecto del N. El tamaño de semilla y el número de semillas por vaina son los componentes del rendimiento más estables y están más relacionados con las características propias del cultivar (Escalante-Estrada *et al.*, 1995).

En las parcelas donde se aplicó N200, se presentó el rendimiento más alto; éste se relacionó con mayor

Cuadro 1. Rendimiento y sus componentes en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno en función de la aplicación de nitrógeno a la cosecha final (98 dds).

Tratamiento	Racimos ----- m ² -----	Vainas -----	Semillas vaina ⁻¹	Semillas m ⁻²	100 semillas g	Rendimiento ----- g m ⁻² -----	Biomasa	IC
N100	508.3 b [†]	410.0 b	3.9 a	835.0 b	39.8 a	332.3 b	897.9 b	0.37 b
N200	558.3 a	454.2 a	4.0 a	1042.9 a	44.0 a	459.1 a	1002.9 a	0.46 a
DMS	46.93	37.56	0.23	36.72	1.07	15.84	26.85	0.02

[†] Medias con la misma letra no son significativamente diferentes en una misma columna literal (Tukey a P ≤ 0.05).

número de vainas y semillas m⁻² (Huerta-Díaz *et al.*, 1997; Escalante-Estrada *et al.*, 1999). Una tendencia similar se observó en la producción de biomasa y en el IC, que también se incrementó con la aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N (Cuadro 1). El N tiene un efecto estimulante en el desarrollo vegetativo de la planta, ya que incrementa el desarrollo del tallo, área foliar, número de hojas y ramas (Huerta-Díaz *et al.*, 1997; Escalante-Estrada *et al.*, 1999).

La aplicación de 100 kg ha⁻¹ de N no ocasionó incremento significativo en el rendimiento de semilla del frijol. Probablemente, el alto contenido inicial de N en el suelo (durante la siembra) pudo ser determinante en la falta de respuesta de las plantas de frijol a esta dosis de N. Sin embargo, este nivel no se determinó en el presente estudio.

Radiación Interceptada, Índice de Área Foliar (IAF) y Biomasa

Debido a que el Tratamiento N100 no presentó diferencias significativas con Tratamiento N0 en biomasa, rendimiento de semillas, radiación interceptada, IAF y tampoco en los índices de reflectancia, sólo se discuten los Tratamientos N0 y N200 que fueron los más contrastantes.

La radiación interceptada fue superior en N200 desde 50 dds (66.2%) en relación con el Tratamiento N0 (61.2%) como se muestra en la Figura 1a. La máxima radiación interceptada (83.6%) se registró en N200 durante la etapa de llenado de vaina (84 dds) y fue significativamente superior (P ≤ 0.05) a N0 (71.1%). Al inicio de la madurez fisiológica (88 dds), la abscisión de hojas provocó que la radiación interceptada disminuyera, pero N200 mantuvo un valor significativamente más alto (52.6%) que N0 (40.5%). Una tendencia similar se observó en el IAF, que se evaluó hasta 84 dds. En esta fecha,

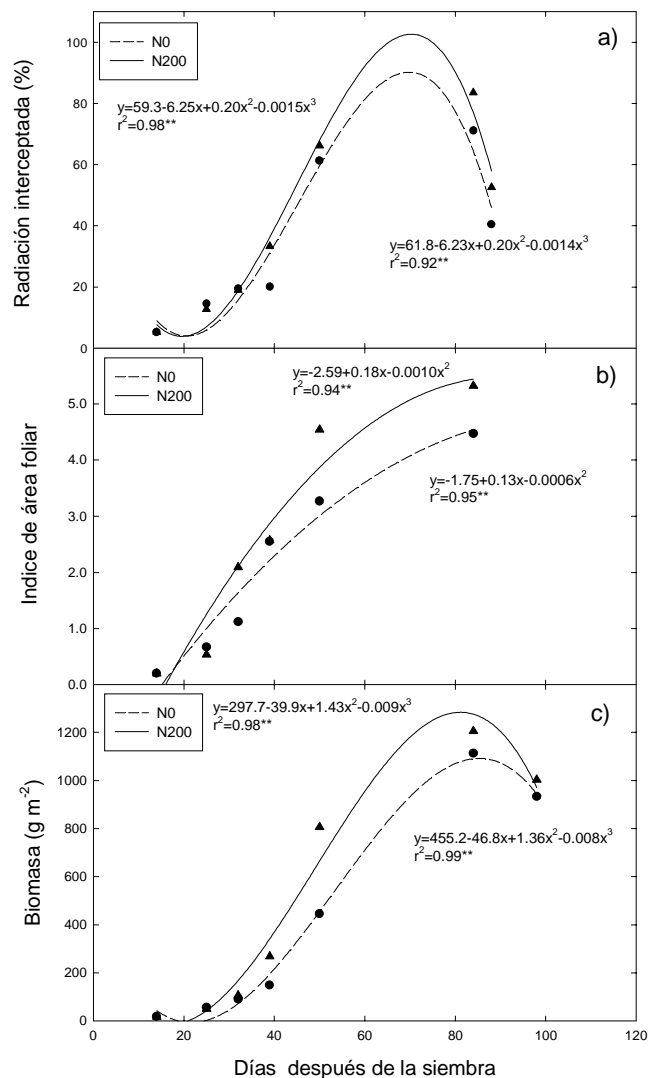


Figura 1. Dinámica de la radiación interceptada, índice del área foliar (IAF) y biomasa producida en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno en función de la aplicación de nitrógeno. () significativo a P ≤ 0.01. Montecillo, México. Verano, 2001. (•, • corresponden a 0 y 200 kg ha⁻¹ de N, respectivamente).**

N200 fue significativamente superior (5.3) a N0 (4.5) (Figura 1b). La estimación de la eficiencia de la radiación interceptada y el IAF son componentes importantes para estimar el potencial de rendimiento de un cultivo (Carlson y Ripley, 1997; Gamon *et al.*, 1997).

La aplicación de N a un cultivo acelera la cobertura de la superficie del suelo y aumenta la intercepción de radiación (Serrano *et al.*, 2000). Una mayor cobertura del suelo por el cultivo significa un incremento del área foliar y esto fue lo que ocurrió en N200, donde la radiación interceptada se incrementó, debido a un mayor IAF provocando, a su vez, mayor acumulación de biomasa (superior a N0) (Figura 1b).

En cuanto a la biomasa producida, el frijol con 200 kg ha⁻¹ de N mostró mayor acumulación de biomasa hasta la madurez fisiológica (1003 g m⁻²) en comparación con N0 (932 g m⁻²) (Cuadro 1; Figura 1c). Los valores más altos de biomasa ocurrieron en la etapa de llenado de vaina (84 dds) para los dos tratamientos de N, pero N200 mostró el valor más alto (significativo a P ≤ 0.05) con 1206 g m⁻², mientras que el testigo (N0) produjo 1051 g m⁻². Las diferencias en producción de materia seca entre cultivares puede atribuirse a la absorción de radiación incidente y a su conversión a materia seca (Tollenaar, 1992). La biomasa y el IAF se acumularon más rápidamente con 200 kg ha⁻¹ de N.

Dinámica del Índice de Reflectancia del Dosel (NDVI) durante el Desarrollo de Frijol

La Figura 2 muestra la dinámica del índice de reflectancia del dosel (NDVI) durante el desarrollo del frijol en función de la aplicación de N. Antes de 50 dds, el NDVI fue similar entre los tratamientos. A partir de 50 dds y hasta la madurez fisiológica, el NDVI de N200 fue superior a N0. En trigo, los valores de NDVI se incrementan en las primeras etapas de crecimiento, alcanzando un máximo en antesis y después disminuyen cerca de la madurez fisiológica (Shanahana *et al.*, 2001).

Relación del Índice de Reflectancia del Dosel (NDVI) con Radiación Interceptada, Índice de Área Foliar (IAF), Biomasa y Rendimiento de Semilla

El comportamiento de la relación entre NDVI-radiación interceptada y de NDVI-biomasa se

muestra en las Figuras 3a y 3c. En ambos casos, los valores aumentan en las primeras etapas de crecimiento hasta alcanzar su máximo en floración y llenado de vaina, posteriormente disminuyen conforme se avanza a la madurez del frijol (abscisión de hojas) (Figuras 2 y 3). La relación de NDVI con radiación interceptada y biomasa se describió con el modelo $y = ax/b+x$ hasta la etapa de llenado de grano (84 dds) (Figuras 3a y 3c). El frijol con N200 fue el que mostró mayores valores en ambas relaciones en comparación con el Tratamiento N0. La relación entre NDVI y radiación interceptada mostró una $r^2 = 0.62$ para N0 y $r^2 = 0.81$ para N200 (significativa a $P \leq 0.05$). La relación entre NDVI y biomasa mostró una $r^2 = 0.73$ para N0 y una $r^2 = 0.98$ para N200 (significativa a $P \leq 0.01$).

En el caso de la relación entre NDVI y el IAF, también, los valores incrementaron al inicio del desarrollo del cultivo y después alcanzaron un máximo en la etapa de floración-llenado de vaina (50 y 84 dds), y la relación entre ambas variables mostró una $r^2 = 0.89$ para N0 y $r^2 = 0.91$ para N200 (ambos significativos a $P \leq 0.05$ y 0.01, respectivamente) (Figura 3b).

En cuanto a la relación entre el índice NDVI (valores de la etapa de llenado de vaina, 84 dds) y el rendimiento de semilla, se observó que fue lineal, lo cual demuestra que el índice NDVI está estrechamente relacionado con el rendimiento del frijol, debido a la aplicación de N ($r^2 = 0.99$), pues un valor alto de NDVI significa un alto rendimiento

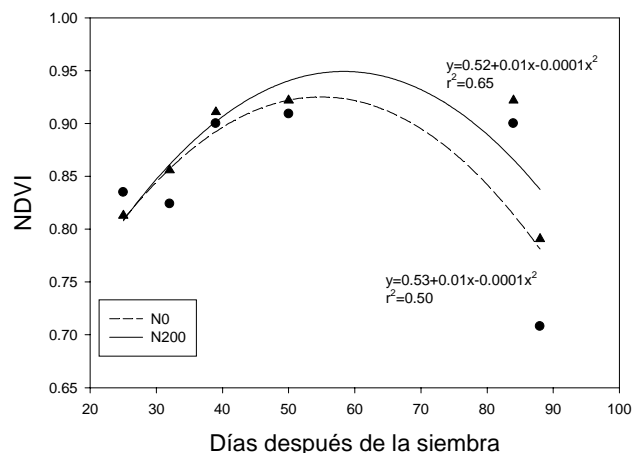


Figura 2. Dinámica del índice de reflectancia del dosel (NDVI) en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno en función de la aplicación de nitrógeno. Montecillo, México. Verano, 2001. (•, • corresponden a 0 y 200 kg ha⁻¹ de N, respectivamente).

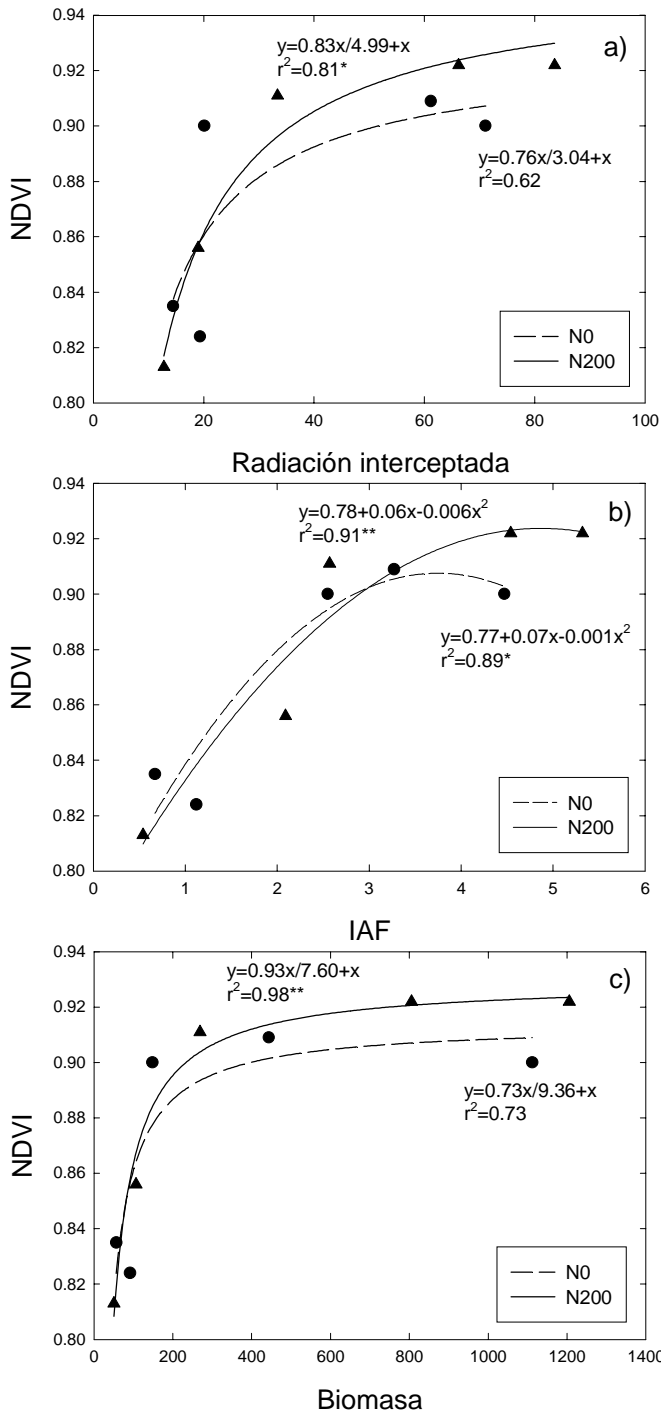


Figura 3. Relación del índice de reflectancia del dosel (NDVI) con radiación interceptada, índice de área foliar (IAF) y biomasa hasta la etapa de llenado de vaina (84 dds) en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno en función de la aplicación de nitrógeno (*,**) significativo a $P \leq 0.05$ y 0.01 respectivamente. Montecillo, México. Verano, 2001. (•, • corresponden a 0 y 200 kg ha⁻¹ de N, respectivamente).

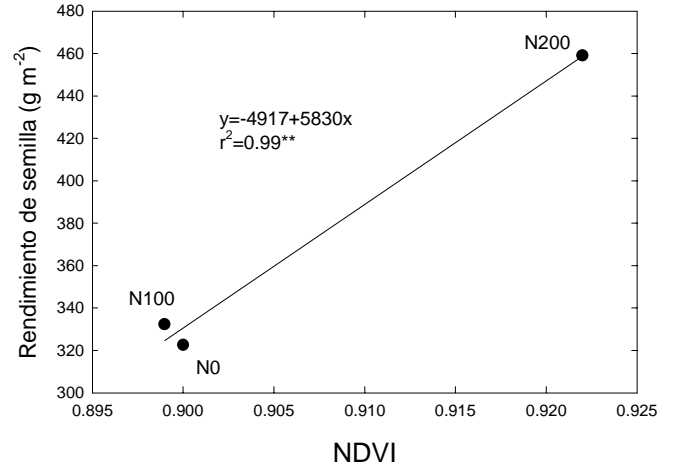


Figura 4. Relación entre el índice de reflectancia del dosel (NDVI) con el rendimiento de semilla en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno con aplicaciones de nitrógeno. (**) significativo a $P \leq 0.001$ Montecillo, México. Verano, 2001.

(Figura 4). Con medidas periódicas de NDVI durante el ciclo de crecimiento de un cultivo, puede evaluarse la absorción de radiación, pues determina biomasa total y el rendimiento final (Gamon *et al.*, 1997). La fertilización nitrogenada promueve una disminución en la reflectancia del rojo y un incremento en el infrarrojo; lo contrario sucede cuando no se aplica N. Esto ocurre por que la radiación es interceptada por un dosel más grande (mayor área foliar) y, por ello, la reflectancia en el infrarrojo aumenta (Serrano *et al.*, 2000). NDVI puede ser utilizado para predecir el rendimiento del cultivo con el empleo de ecuaciones empíricas de regresión (Wiegand *et al.* 1991; Serrano *et al.*, 2000). Wiegand y Richardson (1990) reportaron una $r^2 = 0.55$ para predecir rendimiento de grano en trigo, cuando se midió este índice en cuatro etapas de crecimiento. De manera similar, Rudorff y Batista (1990) reportaron una $r^2 = 0.66$ entre el rendimiento de trigo y una integración del índice de reflectancia del dosel, desde el embuche, hasta que las plantas estuvieron completamente senescentes. En el presente estudio, la aplicación de N al cultivo de frijol incrementó la producción de biomasa y el rendimiento de semilla, y el NDVI.

Estimación del Contenido de Clorofila a (RARSa)

El índice que estima el contenido de clorofila (RARSa) muestra una relación inversa a través del desarrollo de las plantas de frijol (Figura 5). Los

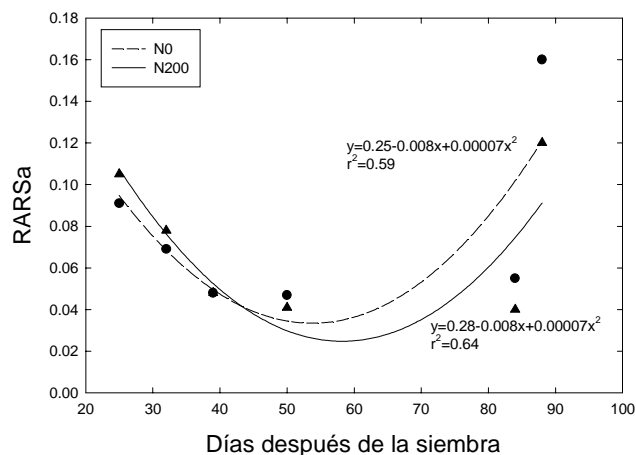


Figura 5. Dinámica del índice que estima el contenido de clorofila (RARSa) en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno en función de la aplicación de nitrógeno. Montecillo, México. Verano, 2001.

(•, • corresponden a 0 y 200 kg ha⁻¹ de N, respectivamente).

valores más altos se presentan en la etapa vegetativa y cerca de la madurez fisiológica, mientras que los valores más bajos corresponden a la etapa de floración y llenado de vaina. Esto se debe a que la molécula de clorofila absorbe radiación a 680 nm y, en una etapa joven o de senescencia, hay menor contenido de clorofila y, en consecuencia, la radiación a esta longitud de onda se refleja. Durante la etapa de floración y de llenado de vaina, cuando se tiene la máxima área foliar, hay mayor contenido de clorofila en el dosel del frijol y se absorbe más radiación a 680 nm.

El frijol con N200 presentó mayor contenido de clorofila a 84 y 88 dds (0.041 y 0.120, respectivamente), mientras que N0 mostró el contenido de clorofila más bajo (0.055 a 84 dds y 0.160 a 88 dds). El N está estrechamente asociado con la cantidad de clorofila en las hojas. Esta última puede ser un indicador del contenido de N en cultivos como maíz y la reflectancia del dosel puede ayudar a determinar este contenido de N en hojas de algodón, soya y trigo (Tarpley *et al.*, 2000).

CONCLUSIONES

El rendimiento de semilla, la biomasa y el índice de cosecha incrementaron con la aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N. El frijol con ese tratamiento mostró mayor número de racimos m⁻², vainas m⁻² y número de semillas m⁻². Asimismo, estimuló el crecimiento de las hojas (mayor índice de área foliar) con una mayor

intercepción de radiación y producción de biomasa. El índice de reflectancia del dosel (NDVI) puede ser un estimador de la radiación interceptada del crecimiento foliar (índice del área foliar), de la producción de biomasa y del rendimiento de semilla del frijol cv. Flor de Durazno.

LITERATURA CITADA

- Adams, J.E. y G.E. Arkin. 1977. A Light interception method for measuring row crop ground cover. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 789-792.
- Araus, J.L. 1996. Integrative physiological criteria associated with yield potential. pp. 150-167. *In: Reynolds, M.P., S. Rajaram y A. McNab (eds.). Increasing yield potential in wheat: Breaking the barriers.* Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. México, D.F.
- Araus, J.L., J. Casadesus y J. Bort. 2001. Recent tools for the screening of physiological traits determining yield. pp. 59-77. *In: Reynolds, M.P., J.I. Ortiz-Monasterio y A. McNab (eds.). Application of physiology in wheat breeding.* Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. México, D.F.
- Campos-Escudero, A., L. Osoria-Rodríguez, A. Espinosa-Calderón. 1998. Flor de Durazno-90, variedad de frijol de temporal para valles altos de la mesa central. Folleto Técnico 13. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chapingo, México.
- Canteri, M.G., M.D. Pria, L.M. Schiebelbein, O.C. Silva, L. Amorim y F.A. Bergamin. 1998. Relationships among healthy leaf area, yield, reflectance and severity of angular leaf spot in bean plants. *Fitopatología Brasileira* 23: 498-501.
- Carlson, N.T. y D.A. Ripley. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing Environ.* 62: 241-252.
- Chappelle, E.W., M.S. Kim e I.E. McMurtrey. 1992. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of Chl a, b and carotenoids in soybean leaves. *Remote Sensing Environ.* 39: 239-247.
- Escalante-Estrada, J.A., E. Martínez-Villegas, L.E. Escalante-Estrada y J. Kohashi-Shibata. 1995. Relación fuente-demanda en frijol. I. Efecto de la remoción foliar sobre los componentes del rendimiento. *Rev. Fitot. Mexicana* 18: 54-60.
- Escalante-Estrada, J.A., M.T. Rodríguez-González y L.E. Escalante-Estrada. 1999. Efecto del nitrógeno en la producción y abscisión de órganos reproductivos en frijol. *Agronomía Mesoamericana* 10: 47-53.
- FAO. Food and Agricultural Organization. 1974. Approaches to land classification. *Soils Bulletin* 22. Rome, Italy.
- Gamon, I.A., L. Serrano y J. Sforus. 1997. The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation-use efficiency across species, functional types and nutrient levels. *Oecologia* 112: 492-511.
- Huerta-Díaz, J., J.A. Escalante-Estrada, J.Z. Castellanos-Ramos, R. Robles-Sánchez y J.A. Flores-Reyes. 1997. Producción de biomasa y grano en frijol *Phaseolus vulgaris* L. En función de la fertilización nitrogenada y la inoculación con *Rhizobium*

- leguminosarum* Biovar *phaseoli*. Rev. Fitot. Mexicana 20: 45-56.
- Liebman, M., S. Corson, R.J. Rowe y W.A. Halteman. 1995. Dry bean responses to nitrogen fertilizer in two tillage and residue management systems. Agron. J. 87: 538-546.
- Peñuelas, J. 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. Trends in Plant Sci. 3: 151-156.
- Rudorff, B.F.T. y G.T. Batista. 1990. Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region. Remote Sensing Environ. 31: 53-63.
- SAS Institute. 1990. SAS/STAT user's guide. Version 6. Cary, NC.
- Serrano, L., I. Filella y J. Peñuelas. 2000. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. Crop Sci. 40: 723-731.
- Shanahan, J.F., J.S. Schepers, D.D. Francis, G.E. Varvel, W.W. Wilhelm, J.M. Tringe, M.R. Schlemmer y D.J. Major. 2001. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. Agron. J. 93: 583-589.
- Tarpley, L., K.R. Reddy y G.F. Sassenrath-Cole. 2000. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. Crop Sci. 40: 1814-1819.
- Tollenaar, M. 1992. Radiation use efficiency of an old and a new maize hybrid. Agron. J. 84: 536-541.
- Wiegand, C.L. y A.J. Richardson. 1990. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield. II. Results. Agron. J. 82: 630-636.
- Wiegand, C.L., A.J. Richardson, D.E. Escobar y A.H. Gerbermann. 1991. Vegetation indices in crop assessments. Remote Sensing Environ. 35: 105-119.
- Wu, X.Q., D.S. Liang, Y.F. Wu, H.F. Yang y X.Q. Wang. 1993. Determination of crude protein and fibre contents in French bean by means of near infrared reflectance spectroscopy. Crop Genet. Resour. 1: 28-29.