

Relationship of photographic indexes and NDVI values to dry biomass production in triticale (*× Triticosecale wittmack*) in the Mexicali valley

Relación de índices fotográficos y NDVI con la producción de biomasa seca en triticale (*× Triticosecale wittmack*) en el valle de Mexicali

Velasco-López, José L.¹; Soto-Ortiz, Roberto^{1*}; Ail-Catzim, Carlos¹; Grimaldo-Juárez, Onécimo¹; Avilés-Marín, Silvia M.¹; Lozano-del Río, Alejandro J.²

¹Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, Baja California, México. C.P. 21100.²Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. C.P. 25315.

*Autor para correspondencia: roberto_soto@uabc.edu.mx

ABSTRACT

Objective: To determine the relationship of different photographic indexes and NDVI values with the production of dry biomass of leaves in triticale forages (*× Triticosecale wittmack*).

Design/methodology/approach: Ten triticale varieties were grown during two agricultural cycles, under different irrigation and fertilization conditions. Data was analyzed under a randomized complete block design. Three samples were taken to estimate the production of dry foliar biomass, before, and after anthesis. In each sampling, three photographs were taken with a digital camera and NDVI measurements were made with the GreenSeeker Handheld[®] spectroradiometer; subsequently, destructive sampling was carried out to estimate dry leaf biomass.

Results: The results showed a better fit to the simple linear regression equations between NDVI and leaf biomass before anthesis ($R^2=0.45$) in response to the effects of interaction between samples and varieties in both evaluation cycles. After anthesis, the statistical relationship between NDVI and leaf biomass was lower ($R^2=0.34$). In addition, the ratio between the GGA index and leaf biomass before anthesis was ($R^2=0.30$), similarly a higher relationship ($R^2=0.34$) was found between GGA with leaf biomass after anthesis.

Findings/conclusions: It is possible to effectively use either GGA or NDVI indexes as an indirect method to estimate dry biomass through the use of digital cameras or GreenSeeker Handheld[®], due to the positive linear relationship ($R^2=0.85$) between the two indexes.

Keywords: triticale, biomass production, photographic indexes, NDVI.

RESUMEN

Objetivo: determinar la relación de diferentes índices fotográficos y valores de NDVI con la producción de biomasa seca de hojas en triticales forrajeros (*× Triticosecale wittmack*).

Diseño/metodología/aproximación: diez variedades de triticale fueron cultivadas durante dos ciclos agrícolas, bajo diferente condición de riego y fertilización. La información fue analizada bajo un diseño en bloques completos al azar. Se realizaron tres muestreos para estimar la producción de biomasa foliar seca, antes y después de anthesis; en cada muestreo se tomaron tres fotografías con una cámara digital y se realizaron las mediciones de NDVI con el espectroradiómetro GreenSeeker Handheld[®]; posteriormente se realizaron los muestreos destructivos para estimar la biomasa foliar seca.

Resultados: los resultados mostraron mayor ajuste a las ecuaciones de regresión lineal simple entre NDVI y biomasa hojas antes de antesis ($R^2=0.45$) en respuesta a los efectos de interacción entre muestreos y variedades en ambos ciclos de evaluación. Después de antesis las relaciones de NDVI con biomasa de hojas fue menor ($R^2=0.34$). La relación entre el índice GGA y biomasa de hojas antes de antesis fue de ($R^2=0.30$), de forma similar se encontró una relación mayor ($R^2=0.34$) entre GGA con biomasa de hojas después de antesis.

Hallazgos/conclusiones: Es posible emplear indistintamente los índices GGA y NDVI, para determinar biomasa seca de manera indirecta mediante cámaras digitales o GreenSeeker Handheld[®], dada la relación lineal positiva ($R^2=0.85$) entre ambos.

Palabras clave: triticale, producción de biomasa, índices fotográficos, NDVI.

Otro método indirecto son las imágenes satelitales que son utilizadas en aplicaciones agrícolas para estudios de vegetación, evaluación de ecosistemas y rendimientos en los cultivos agrícolas (Huete *et al.*, 2002) sin embargo, se limita su aplicación a grandes extensiones debido a la menor capacidad de resolución óptica y del requerimiento de equipos especiales para su procesamiento. De esta manera, se han propuesto las cámaras digitales que logran obtener imágenes de alta resolución y que permiten determinar los índices de vegetación (pic-VIS) basándose en la saturación, intensidad y tonalidad de la imagen en diferentes espacios de color establecidos por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) para identificar y expresar el color de forma objetiva. Los índices fotográficos permiten cuantificar características de las plantas tales como área, senescencia de las hojas, la cobertura de pastizales y la calidad de césped (Lati *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2005). En base a lo anterior, se realizó el presente estudio para determinar la correlación entre el NDVI y los índices fotográficos con la producción de biomasa seca de hojas de triticale (\times Triticosecale wittmack), determinado por greenseeker y la cámara digital bajo diferentes números de riegos y niveles de fertilización nitrogenada.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el campo experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, en el ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, México ($32^{\circ} 24' N$ y $115^{\circ} 11' O$), a una altitud de 15 m. En un suelo de textura arcillosa. El clima del valle de Mexicali se clasifica como árido cálido, muy extremo, con una temperatura media anual de

INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de nuevas variedades de cereales con alta producción y calidad se requiere de una amplia evaluación de líneas donde el procedimiento más utilizado es el método directo que consiste en obtener muestras de forraje verde, procesarlas, para así determinar la biomasa seca. La principal desventaja de este método son altos costos en mano de obra y la pérdida de material vegetal para evaluaciones posteriores en los programas de mejoramiento (Royo *et al.*, 2004). También existe el método indirecto basado en la medición de la reflectancia, que se fundamenta en la cantidad de energía que es reflejada desde un objeto en relación a la energía incidente sobre el mismo. En el caso de las plantas, debido a la composición y estructura de hojas, protoplasmas y cloroplastos de la superficie foliar se genera una alta reflectancia de la energía cercana al infrarrojo, así también la presencia de clorofila causa que el color verde se refleje con mayor intensidad que el rojo y azul dentro del espectro electromagnético, estas propiedades de las plantas se correlacionan con los parámetros agronómicos y fisiológicos de las plantas que muestran de manera indirecta la actividad fotosintética y la productividad de la planta (Ma *et al.*, 2001; Adamsen *et al.*, 1999). En la actualidad las mediciones de reflectancia espectral son herramientas para calcular diferentes índices vegetativos; sin embargo, existen factores como la humedad del suelo y la etapa fenológica de la planta que dificultan las mediciones de reflectancia (Ma *et al.*, 2001).

Existen equipos diseñados para medir los espectros de luz reflejada por la superficie foliar y que no dependen de las condiciones de iluminación solar o nubosidad (Royo *et al.*, 2003), entre los más utilizados está el GreenSeeker Handheld[®] que determina el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), este índice permite la medición de la reflectancia de luz roja y cercana al infrarrojo, en consecuencia ha mostrado eficiencia en la predicción de la actividad fotosintética y por lo que fue propuesto para estimar la biomasa verde y el rendimiento de grano en diferentes cereales (Slafer *et al.*, 2005).

22.9 °C, máxima de 48.5 °C y mínima durante invierno de -7.0 °C, con una precipitación media anual de 60 mm (García 1988).

La fase experimental se realizó en los ciclos otoño-invierno O-I 2014/2015 y O-I 2015/2016 donde las variedades de triticale se evaluaron con dos láminas diferentes de riego y fertilización 120N-80P-00K y 60N-80P-00K (Cuadro 1).

Se evaluaron 10 variedades de triticale; cuatro de tipo primaveral (AN123, AN125, AN137, Eronga), dos de tipo facultativo (AN105, AN38) y cuatro de tipo invernal (AN31B, AN34, AN31P, ABT). La semilla de estos materiales fue proporcionada por el programa de cereales de la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro" para la siembra en el ciclo otoño invierno 2014/15 y el grano cosechado de este ciclo se utilizó como semilla para el ciclo otoño invierno 2015/16.

El manejo agronómico y diseño experimental, fue el siguiente: las fechas de siembra fueron el 8 de enero y el 30 de noviembre del 2015 para el primer y segundo ciclo agrícola respectivamente. El suelo se preparó con barbecho, rastra, floteo y surcado, posteriormente la siembra de las variedades se realizó de forma manual bajo el sistema tradicional (en plano) en suelo con una densidad de 120 kg de semilla ha⁻¹ (Lozano et al., 2009). Los experimentos se establecieron por separado en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, cada parcela experimental se estableció de 9.0 m² con 6 hileras de 5 m de largo y 0.30 m de distancia entre hilera.

Variables evaluadas. Las mediciones se realizaron en las etapas de amacollamiento, encañe, embuche, antesis, llenado de grano y madurez fisiológica, identificando las etapas en base a la escala fenológica propuesta por Zadoks et al. (1974) que son 25, 32, 43, 65, 75 y 90 en ambos ciclos, a medio día sin presencia de sombra y viento a una altura de 0.5 m sobre la cubierta vegetal y en posición cenital al centro de cada parcela del total de los experimentos. Se utilizó una cámara di-

gital marca SAMSUNG® de 12 mega pixeles en el cual se tomaron tres fotografías por parcela, posteriormente mediante el software Breedpix® 0.1 se calcularon los índices de vegetación GA y GGA. De igual manera, se utilizó el GreenSeeker Handheld® para determinar el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI). Finalmente, para determinar la producción de biomasa seca se realizaron muestreos destructivos que consistieron en retirar desde la raíz las plantas de 0.06 m² en una hilera con competencia completa; posteriormente en el laboratorio se separaron las hojas, tallos y espigas de cada muestra y se secaron en una estufa a 60 °C por 72 h y se registró su peso en gramos por parcela, el valor obtenido se transformó a toneladas por hectárea de biomasa seca. Los datos obtenidos se analizaron con el paquete estadístico SAS® 9.0 (SAS 2002) por medio de ANOVA y correlación lineal de las variables GA, NDVI y biomasa seca de hojas mediante el modelo de Pearson, finalmente se generó la ecuación de regresión lineal simple.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el ciclo OI 2014/15 se observó mayor rendimiento de biomasa seca de hojas en la etapa de embuche y antes de la antesis para todas las condiciones de riego y fertilización. El rendimiento más alto con 8.45 t ha⁻¹, se obtuvo en condiciones de cinco riegos y fertilización 120N-80P-00K en la etapa de embuche, con la misma cantidad de riegos y 60 unidades de nitrógeno menos se obtuvo rendimiento de 6.5 t ha⁻¹ en la etapa de antesis. En condiciones de cuatro riegos el mayor rendimiento de biomasa seca de hojas fue de 6.12 t ha⁻¹ con fertilización 60N-80P-00K en la etapa de embuche, con la misma cantidad de riegos y 60 unidades más de nitrógeno se obtuvo rendimiento de 4.75 t ha⁻¹ en la etapa de embuche. En el ciclo OI 2015/16 se observó mayor rendimiento de biomasa

seca de hojas en la etapa de embuche para todas las condiciones de riego y fertilización. El rendimiento más alto con 1.82 t ha⁻¹, se obtuvo en condiciones de cinco riegos y fertilización 120N-80P-00K, con la misma cantidad de riegos y 60 unidades de nitrógeno menos se obtuvo rendimiento de 1.47 t ha⁻¹. En condiciones de cuatro riegos el mayor rendimiento de

Cuadro 1. Condiciones de riego y fertilización del estudio en los ciclos O-I 2014/15 y O-I 2015/16 en el Valle de Mexicali, Baja California, México.

Experimentos	Etapas fenológicas de último riego	Número de riegos	Fertilización N P K
1	Llenado de grano	5	120-80-00
2	Llenado de grano	5	60-80-00
3	Antesis	4	120-80-00
4	Antesis	4	60-80-00

Las etapas fenológicas se identificaron en base a la escala de Zadoks, los riegos aplicados correspondieron a los valores 00; Germinación, 25; Amacollamiento, 32; Encañe, 65; Floración y 75; Llenado de grano, La fertilización fue 50% al momento de la siembra y el resto en amacollamiento N; unidades de nitrógeno, P; Unidades de fosforo, K; Unidades de Potasio.

biomasa seca de hojas fue de 1.75 t ha⁻¹ con fertilización 60-80-00 en la etapa de embuche, con la misma cantidad de riegos y 60 unidades más de nitrógeno se obtuvo rendimiento de 1.5 t ha⁻¹ en la etapa de embuche (Cuadro 2). En este estudio se confirma que los valores más altos de biomasa foliar en triticale se observan antes de antesis como reportan los autores Casadesús *et al.* (2014) y Royo *et al.* (2004).

Los análisis de varianza en las etapas fenológicas antes de antesis en el ciclo O-I 2014/15, mostraron diferencias significativas (P≤0.05) en la interacción entre los muestreos y variedades en biomasa seca de hojas y NDVI en los cuatro experimentos, de manera similar los índices GA y GGA en el experimento cua-

tro. También se observó diferencias significativas entre variedades como en los muestreos en las respuestas a los índices GA y GGA en los experimentos uno, dos y tres. Asimismo, los análisis de correlación mostraron correlación positiva entre el NDVI y biomasa seca de hojas en un rango de 0.56 a 0.66 en los experimentos uno, dos y cuatro (Cuadro 3).

En las etapas fenológicas después de antesis se observó diferencias significativas en la interacción entre los muestreos y variedades en biomasa seca de hojas y NDVI (P≤0.05) en los cuatro experimentos, de manera similar el índice GA en los experimentos uno, dos y tres, el índice GGA en los experimentos tres y cuatro. De igual manera se observó diferencias estadísticas (P≤0.05) en

variedades y entre los muestreos en el índice GA en el experimento cuatro y GGA en los experimentos uno y dos. Asimismo, en los cuatro experimentos se observó correlación positiva entre los índices NDVI, GA y GGA con biomasa seca de hojas (r>0.50), los índices GA y GGA con NDVI (r>0.77) (Cuadro 3).

En el ciclo O-I 2015/16 antes de antesis se observó diferencias significativas (P≤0.05) en la interacción entre los muestreos y variedades en la respuesta a biomasa de hojas en los cuatro experimentos, el índice NDVI en los experimentos dos, cuatro y cinco, los índices GA y GGA en los experimentos cuatro y cinco. Así también, se registró diferencias significativas entre muestreos en biomasa seca de hojas en los cuatro

Cuadro 2. Rendimiento de biomasa seca de hojas de triticale (t ha⁻¹) en las diferentes etapas fenológicas bajo condiciones de riego y fertilización en los ciclos O-I 2014/15 y O-I 2015/16 en el Valle de Mexicali, Baja California, México.

Etapa	5 Riegos 120-80-00		5 Riegos 60-80-00		4 Riegos 120-80-00		4 Riegos 60-80-00	
	Ciclo1	Ciclo2	Ciclo1	Ciclo2	Ciclo1	Ciclo2	Ciclo1	Ciclo2
Amacollo	1.04	0.83	1.13	0.8	0.92	0.77	1.07	0.77
Encañe	4.79	1.15	4.63	1.11	3.34	1.06	3.79	1.12
Embuche	8.45	1.82	6.05	1.47	4.75	1.5	6.12	1.75
Antesis	6.8	1.19	6.5	1.09	4.44	1.37	4.25	1.24
Llenado de grano	4.66	1.28	4.24	1.02	3.32	1.2	3.06	1.04
Madurez fisiológica	3.07	1.12	3.34	0.97	2.58	1.04	2.31	1.08

Las etapas fenológicas se identificaron en base a la escala de Zadoks, 25; Amacollamiento, 32; Encañe, 43; Embuche 65; Floración, 75; Llenado de grano y 90; Madurez fisiológica; ciclo1: ciclo O-I 2014/15; ciclo2: ciclo O-I 2015/16.

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de los componentes de biomasa seca, NDVI e índices fotográficos evaluados en el ciclo O-I 2014/15, Valle de Mexicali, Baja California, México.

Fase		5 Riegos 120-80-00		5 Riegos 60-80-00		4 Riegos 120-80-00		4 Riegos 60-80-00	
		BHOJ	NDVI	BHOJ	NDVI	BHOJ	NDVI	BHOJ	NDVI
Antes de antesis	NDVI	0.587		0.638		0.449		0.626	
	GA	0.156	0.114	0.359	0.142	0.157	0.140	0.155	0.053
	GGA	0.180	0.143	0.258	0.068	0.254	0.179	0.077	-0.053
Después de antesis	NDVI	0.618		0.642		0.612		0.645	
	GA	0.525	0.780	0.580	0.817	0.547	0.851	0.507	0.841
	GGA	0.497	0.778	0.611	0.791	0.580	0.829	0.534	0.814

BHOJ=biomasa seca de hojas; NDVI=índice de vegetación de diferencia normalizado; GA=área verde; GGA=área más verde.

experimentos, GA en los experimentos uno, dos y tres, y se observaron diferencias significativas entre variedades en biomasa seca de hojas en los experimentos tres y cuatro, GA y GGA en el experimento dos.

En estas etapas fenológicas, se registró correlación positiva de los índices GA y GGA con NDVI ($r > 0.6$) en los cuatro experimentos (Cuadro 4). Después de antesis, se observaron diferencias significativas en la interacción entre los muestreos y las variedades en la respuesta a biomasa de hojas en los experimentos uno y cuatro, los índices GA y GGA en los experimentos dos y cuatro. También se obtuvieron diferencias significativas entre los muestreos en la respuesta a NDVI en los cuatro experimentos, GA y GGA en los experimentos uno y tres. De manera similar se registraron diferencias significativas entre variedades en NDVI en los experimentos uno y dos, biomasa de hojas en los experimentos dos y tres. Se observó correlación positiva de los índices GA y GGA con NDVI en los cuatro experimentos ($r > 0.7$) (Cuadro 4).

Se observó mayor ajuste a las ecuaciones de regresión lineal simple entre NDVI y biomasa hojas antes de antesis en respuesta a los efectos de interacción entre muestreos y variedades en ambos ciclos de evaluación (Figura 1 A). La relación de NDVI con biomasa de hojas fue de $R^2 = 0.44$. Después de antesis las relaciones de NDVI con biomasa de hojas fue menor $R^2 = 0.33$.

Asimismo, la relación entre el índice GGA y biomasa de hojas fue de $R^2 = 0.30$ antes de antesis en los dos ciclos de evaluación, de forma similar se encontró una relación entre GGA con biomasa de hojas de $R^2 = 0.34$ después de antesis (Figura 1 B). Del total de los experimentos en ambos ciclos de evaluación se observó relación alta entre el índice fotográfico GGA y NDVI ($R^2 = 0.85$), obteniéndose mayor ajuste a la ecuación de regresión lineal simple (Figura 2).

En este estudio se observaron diferencias en los valores de NDVI, GA y GGA en las variedades de triticales a través de las diferentes etapas fenológicas, similar a lo que documenta Álvaro et al. (2007), donde los valores de NDVI en los triticales se diferenciaron entre las etapas de primer nudo, embuche y principio de espigamiento. Asimismo, los diferentes valores de biomasa de hojas, NDVI, GA, GGA fueron efecto del número de riegos, la cantidad de fertilizante nitrogenado y la etapa fenológica, como documenta Casadesús et al. (2007). Por su parte la relación entre NDVI con biomasa seca de hojas en este estudio es similar con lo reportado por los autores Cabrera et al. (2011) y Marti et al. (2007) quienes encontraron mayor relación de biomasa en la etapa cercana a antesis debido también a que el NDVI mide la proporción entre la luz reflejada por la clorofila y la luz reflejada por otras estructuras celulares (Ma et al., 2001, Aparicio et al., 2002.). Sin embargo, la baja relación de NDVI, GA y GGA con biomasa seca de hojas en este estudio se debió por la diferenciación de las variedades en cuanto a su tipo de crecimiento ya que presentaron diferencias entre los diferentes regimenes de riego y cantidad de fertilizante nitrogenado (Cabrera et al., 2011). Así también se encontró mayor explicación de NDVI, GA y GGA con biomasa seca a ecuaciones de regresión lineal simple similar a lo que reporta Cabrera et al. (2011) y diferentes a lo que reportan otros autores como son relaciones exponenciales (Aparicio et al., 2000; Alvaro et al., 2007). El greenseeker que determina el NDVI y las cámaras convencionales el índice fotográfico GGA pueden ser una herramienta practica y más económica para evaluar líneas o variedades de triticale forrajero en diferentes condiciones de riego y fertilización nitrogenada en las etapas

Cuadro 4. Coeficientes de correlación de los componentes de biomasa seca, NDVI e índices fotográficos evaluados en el ciclo O-I 2015/16, Valle de Mexicali, Baja California, México.

Fase fenológica		5 Riegos 120-80-00		5 Riegos 60-80-00		4 Riegos 120-80-00		4 Riegos 60-80-00	
		BHOJ	NDVI	BHOJ	NDVI	BHOJ	NDVI	BHOJ	NDVI
Antes de antesis	NDVI	0.197		0.159		0.253		-0.115	
	GA	0.220	0.649	0.273	0.600	0.293	0.607	0.000	0.649
	GGA	0.216	0.682	0.180	0.601	0.327	0.606	-0.018	0.669
Después de antesis	NDVI	-0.010		0.075		0.213		0.001	
	GA	0.124	0.863	0.123	0.907	0.260	0.885	0.057	0.864
	GGA	0.126	0.821	0.087	0.875	0.262	0.846	0.045	0.797

BHOJ=biomasa seca de hojas; NDVI=índice de vegetación de diferencia normalizado; GA=área verde; GGA=área más verde.

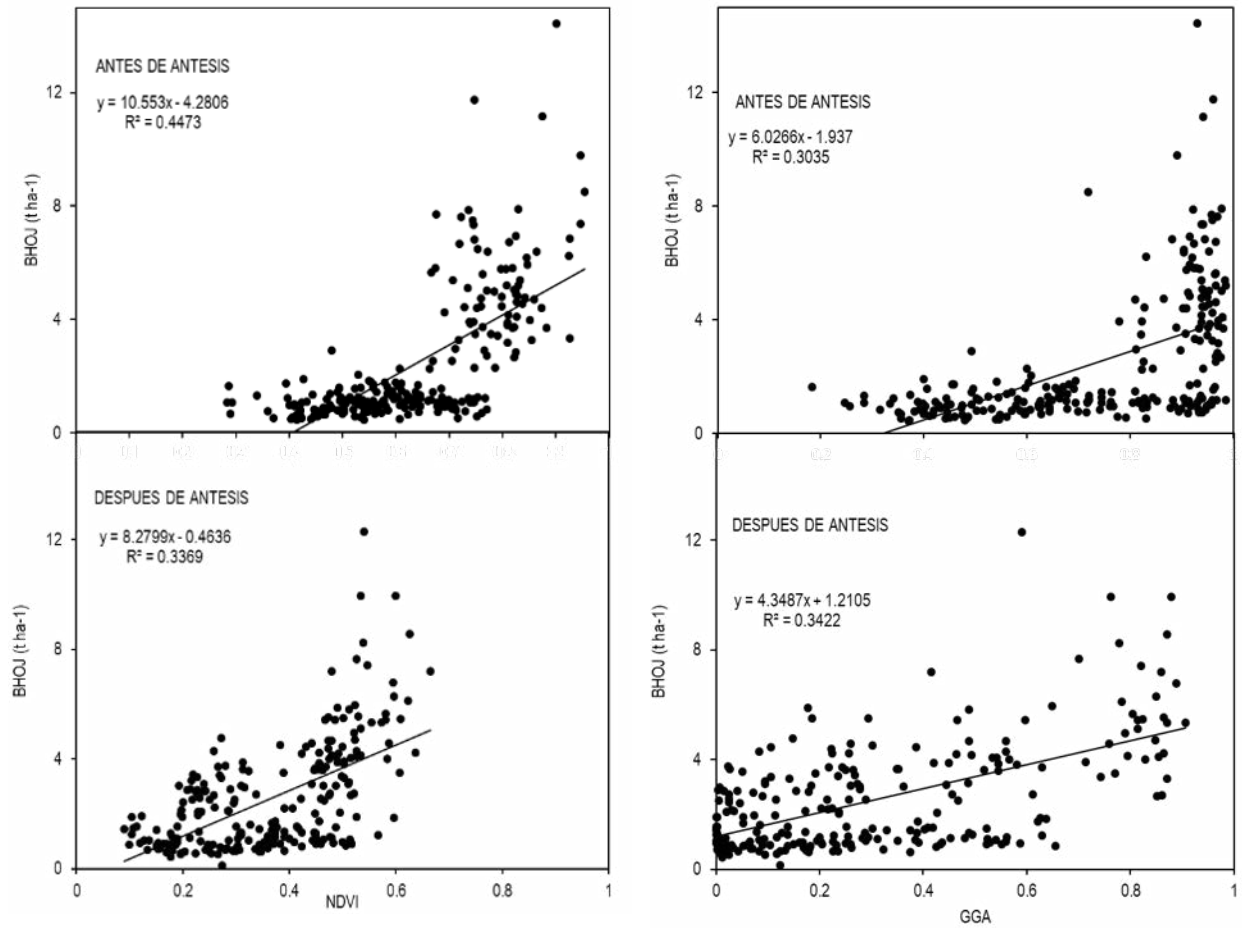
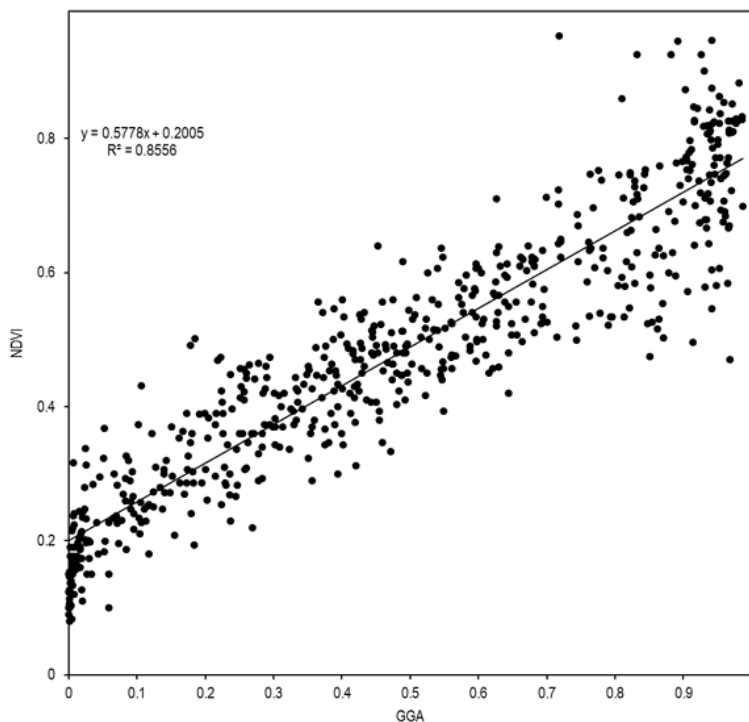


Figura 1. A: Relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) y biomasa seca de hojas (BHOJ) antes y después de anthesis del total de experimentos evaluados en los ciclos O-I 2014/15 y O-I 2015/16. B: Relación entre el índice fotográfico (GGA) y biomasa seca de hojas (BHOJ) antes y después de anthesis del total de experimentos evaluados en los ciclos O-I 2014/15 y O-I 2015/16 en el valle de Mexicali, Baja California, México.



fenológicas antes de anthesis (Royo *et al.*, 2004; Cabrera *et al.*, 2011; Casadesús *et al.*, 2014).

CONCLUSIONES

Los valores de los índices de vegetación GA, GGA y NDVI varían por la etapa de muestreo y condiciones de manejo del cultivo. Se obtuvo una relación directa entre los valores de los índices de vegetación con la acumulación de biomasa seca durante el desarrollo del cultivo. Es posible

Figura 2. Relación del índice área verde (GGA) y el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) antes y después de anthesis del total de experimentos evaluados en los ciclos O-I 2014/15 y O-I 2015/16 en el valle de Mexicali, Baja California, México.

emplear indistintamente los índices GGA y NDVI, para determinar biomasa seca de manera indirecta mediante cámaras digitales o GreenSeeker Handheld®, dada la relación lineal positiva entre ambos.

LITERATURA CITADA

- Álvaro, F., García-del-Moral, L. F., & Royo, C. (2007) Usefulness of remote sensing for the assessment of growth traits in individual cereal plants grown in the field. *International Journal Remote Sensing* 28:2497–2512.
- Aparicio, N., Villegas, D., Araus, J. L., Casadesus, J., & Royo, C. (2002) Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. *Crop Science* 42: 1547–1555.
- Aparicio, N., Villegas, D., Casadesus, J., Araus, J. L., & Royo, C. (2000) Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal* 92: 83–91.
- Cabrera-Bosquet, L., Molero, G., Stellacci, A. M., Bort, J., Nogues, S., & Araus, J. L. (2011) NDVI as a potential tool for predicting biomass, plant nitrogen content and growth in wheat genotypes subjected to different water and nitrogen conditions. *Cereal Res. Commun.* 39:147–159. doi:10.1556/CRC.39.2011.1.15
- Casadesús, J., Kaya, Y., Bort, J., Nachit, M., Araus, J., Amor, S., et al. (2007) Using vegetation indices derived from conventional digital cameras as selection criteria for wheat breeding in water-limited environments. *Annals of Applied Biology* 150:227–236. Doi:10.1111/j.1744-7348.2007.00116.x
- Casadesús, J., & Villegas, D. (2014) Conventional digital cameras as a tool for assessing leaf area index and biomass for cereal breeding. *Journal Integrative of Integrative Plant Biology* 56:7–14. Doi: 10.1111/jipb.12117
- García, E. (1988) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM, México. 217p.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodríguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83: 195–213.
- Lati, R. N., Filin, S., & Eizenberg, H. (2011) Robust methods for measurement of leaf-cover area and biomass from image data. *Weed Science* 59: 276–284.
- Li, X. B., Chen, Y. H., Yang, H., & Zhang, Y. X. (2005) Improvement, comparison, and application of field measurement methods for grassland vegetation fractional coverage. *Journal of Integrative Plant Biology* 47: 1074–1083.
- Lozano-del Río, A.J., Zamora, V.V.M., Ibarra, J.L., Rodríguez, H.S.A., De-la cruz, L.E., & De-la Rosa, I.M. (2009) Análisis de la interacción genotipo-ambiente mediante el modelo AMMI y potencial de producción de triticales forrajeros (× *Triticosecale* Wittmack). *Universidad y Ciencia* 25:81-92.
- Ma, B., Dwyer, L., Costa, E., & Cober, M. (2001). Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. *Agronomy Journal* 93:1227-1234. Doi: 10.2134/agronj2001.1227.
- Martí, J., Bort, J., Slafer, G. A., & Araus, J. L. (2007) Can wheat yield be assessed by early measurements of Normalized Difference Vegetation Index? *Annals of Applied Biology* 150:253–257. Doi: 10.1111/j.1744-7348.2007.00126.x
- Royo, C., Aparicio, N., Blanco, R., & Villegas, D. (2004) Leaf and green area development of durum wheat genotypes grown under Mediterranean conditions. *European Journal Of Agronomy* 20:419–430. Doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00058-3.
- Royo, C., Aparicio, N., Villegas, D., Casadesús, J., Monneveux, P., & Araus, J. L. (2003) Usefulness of spectral reflectance indices as durum wheat yield predictors under contrasting Mediterranean conditions. *International Journal of Remote Sensing* 24: 4403–4419.
- SAS-Institute, Inc. (2002) Version 9.0 of system SAS for Windows, copyright. SAS Institute Inc. Cary, NC. USA.
- Slafer, G.A., Araus, J.L., Royo C., & García, L.F. (2005) Promising ecophysiological traits for genetic improvement of cereal yields in Mediterranean environments. *Annals of Applied Biology* 146: 61–70.
- Zadoks, J.C., Chang, T.T., & Konzak, C.F. (1974) A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14: 415-421.

