

# ESTIMACIÓN DE BIOMASA AÉREA EN CULTIVOS CON SENSORES REMOTOS

## Estimation of Aerial Biomass on Crops Using Remote Sensing

Fermín Pascual-Ramírez<sup>1</sup>, Fernando Paz-Pellat<sup>1‡</sup> y Martín Bolaños-González<sup>1</sup>

### RESUMEN

Para estimar la producción de biomasa aérea en cultivos utilizando sensores remotos se realizaron análisis de la producción de biomasa e información espectral en cinco cultivos medidos en campo, durante una campaña de muestreo en el Valle del Yaqui, Sonora. La información espectral fue procesada hasta la obtención del índice de vegetación iso-suelo (IVIS). Los análisis multitemporales muestran un comportamiento similar entre el desarrollo de los cultivos y el valor del IVIS, por lo que se obtuvo una relación lineal entre ellos. De manera similar fueron analizados el índice de cosecha y su relación con el IVIS. Los resultados mostraron que el IVIS es un índice adecuado para la estimación de biomasa y rendimiento en cultivos.

**Palabras clave:** biomasa, índice de cosecha, índice de vegetación, estimación de rendimientos.

### SUMMARY

To estimate the production of aerial biomass of crops using remote sensing, the production of biomass and spectral data in five crops measured in the field were analyzed during a sampling campaign in the Valle del Yaqui, Sonora. The spectral information was processed to obtain the vegetation iso-soil index (IVIS). Multitemporal analyses show a similar response between crop development and IVIS, and a linear relationship was obtained between them. Similarly, the harvest index and its relationship with IVIS were analyzed. The results showed that IVIS is a suitable index for estimating biomass and yield in crops.

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (pellat@colpos.mx)

**Index words:** biomass, harvest index, vegetation index, crop yield estimation.

### INTRODUCCIÓN

La estimación de la biomasa (Bm) aérea asociada al crecimiento de los cultivos agrícolas puede estimarse usando modelos biofísicos (Stockle *et al.*, 2003). El problema de esta aproximación es la cantidad de información necesaria para parametrizar los modelos, particularmente en aplicaciones en tiempo real o a niveles predictivos operacionales. Una alternativa para la estimación de la Bm es el uso de los sensores remotos. Así, los altos contrastes en la reflectancia de la vegetación en las bandas del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC) se usan para discriminar el crecimiento de ésta (Tucker, 1979), por lo que a partir de este par de bandas se han desarrollado numerosos índices espectrales de la vegetación o IV (Verstraete and Pinty, 1996; Gilabert *et al.*, 2002; Paz *et al.*, 2007). Los IV han sido relacionados empíricamente con la Bm (Tucker *et al.*, 1981; Calera *et al.*, 2004); sin embargo, este tipo de enfoque supone una relación fija y que los medios son física y radiativamente homogéneos. Por ello el objetivo del presente es mostrar un enfoque genérico de modelación de la relación entre la biomasa y los IV.

### MATERIALES Y MÉTODOS

La relación de las reflectancias de la vegetación entre R-IRC se ha utilizado para el desarrollo de índices de vegetación (Paz *et al.*, 2005, Paz *et al.*, 2007, y Romero *et al.*, 2009, entre otros). El diseño de los índices de vegetación se ha basado en la minimización del efecto del suelo (Huete, 1988). Bajo estas consideraciones, Paz *et al.* (2007) desarrollaron el índice NDVI<sub>cp</sub>. Similarmente, Romero *et al.* (2009) desarrollaron el índice IV\_CIMAS para modelar en forma conjunta la fase exponencial y lineal del crecimiento de la vegetación. Posteriormente, Paz *et al.* (2011)

desarrollaron el índice IVIS, el cual considera los patrones de las curvas iso-suelo (mismo suelo y cantidad variable de vegetación) aprovechando el IRC como banda de saturación más lenta posible, utilizando una transformación del espacio del R para hacerlo coincidir con la línea del suelo y una estructura matemática similar a índices de una sola banda espectral:

$$IVIS = -\ln\left(\frac{dIRC_{\infty} - dIRC}{dIRC_{\infty}}\right)$$

$$dIRC = IRC - (a_s + b_s R) \quad (1)$$

$$dIRC_{\infty} = IRC_{\infty} - (a_s + b_s R_{\infty})$$

donde  $a_s$ ,  $b_s$ , son los parámetros de la línea del suelo,  $dIRC_{\infty}$  es el valor asociado al IRC cuando se satura.

### Estimación de la Biomasa Aérea

Los cultivos presentan un modelo temporal de crecimiento como el que se muestra en la Figura 1, representado por dos fases en la etapa vegetativa: crecimiento exponencial y crecimiento lineal.

En la Figura 2 se presenta la evolución temporal de un cultivo (del experimento que se menciona más adelante) en sus componentes de la biomasa fresca aérea (medida después de cortar en campo), así como la fotosintética (hojas y tallos, en este caso); además del IVIS. Se observa que el IVIS y la Bm fresca aérea

siguen el patrón definido por la biomasa fotosintética (cantidad de follaje y propiedades ópticas asociadas). La biomasa fresca en la etapa vegetativa hasta IAFmx, el valor máximo del IAF, es principalmente “verde” y en la reproductiva es una mezcla de follaje verde y flores/órganos reproductivos. En la senescencia, el follaje verde disminuye y se torna “amarillento”. En esta etapa las mediciones de biomasa fresca incluyen partes “secas” en pie, por lo que el concepto de biomasa fresca y seca (pesada en horno) esta mezclado y resulta difícil de diferenciar. Esto implica que una relación entre la biomasa fresca y la seca se enmascara en la senescencia. No obstante lo anterior, el IVIS sigue el mismo patrón de la biomasa (follaje) y sus propiedades ópticas (envejecimiento o deterioro de pigmentos foliares, que se reflejan mayormente en la banda del R).

En la Figura 3 se muestra la evolución temporal de la biomasa fresca aérea, así como la seca; además de las biomásas reproductivas (flores + vainas + granos).

Puesto que el interés en la estimación de la biomasa es en la parte seca, es claro que el IVIS y la biomasa fresca se desacoplan (cambio de curvatura) de la seca. Asimismo, las partes reproductivas, frescas o secas, tienen un patrón temporal que se relaciona con el IVIS y la biomasa fresca solo hasta el pico de estas variables. Esta es una limitación intrínseca al uso de variables en fresco, donde puede presentarse material muerto y vivo (verde) y resulta difícil de resolver.

Para definir su relación con la biomasa reproductiva y la aérea total, debe ser caracterizada en un tiempo de inicio temporal común. Así, de la Figura 1 y 3 podemos

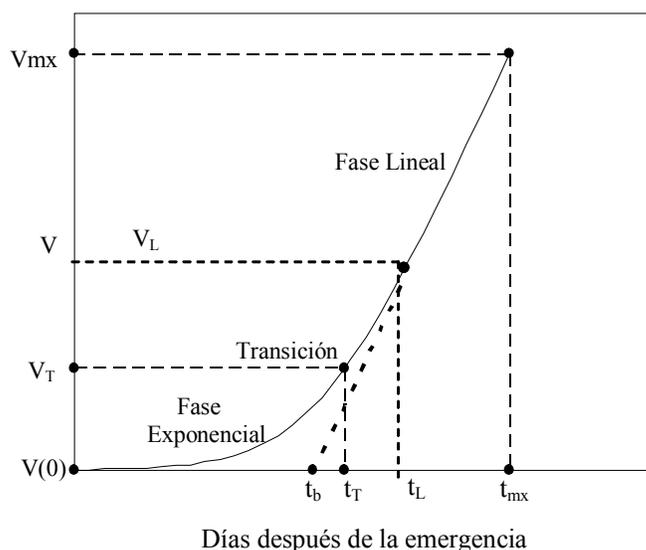


Figura 1. Modelo expo-lineal del crecimiento de los cultivos y sus parámetros.

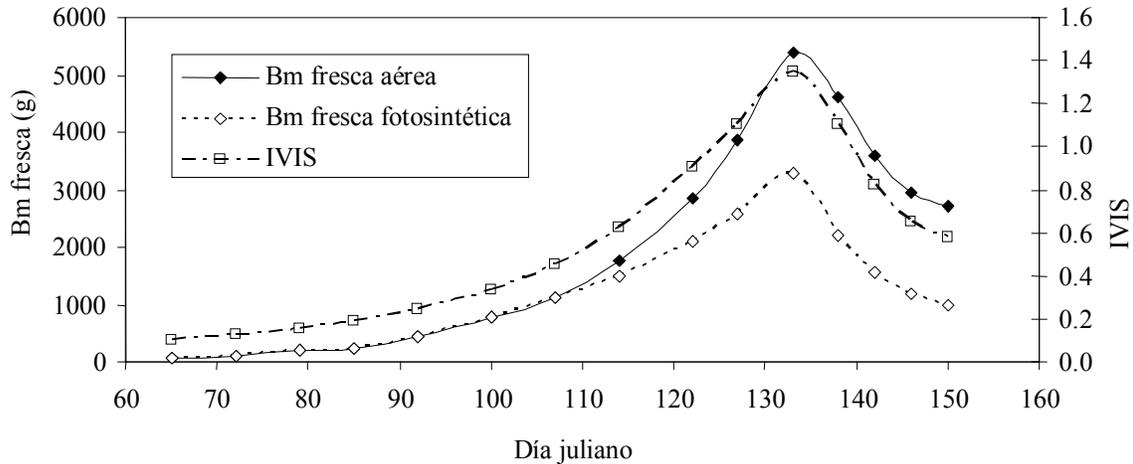


Figura 2. Evolución temporal de la biomasa fresca aérea, biomasa fresca aérea fotosintética e IVIS en un cultivo.

definir el inicio del crecimiento de la biomasa reproductiva en  $t_r$  (transición de la fase exponencial a la lineal) y al tiempo  $t_L$  (fase lineal en pleno) como el punto donde las fases lineales de la biomasa reproductiva y aérea coinciden, definiendo una relación lineal entre ambas variables.

Por otra parte el índice de cosecha (IC) (Charles-Edward, 1982) se define por:

$$IC = \frac{Bm\_aérea\_reproductiva}{Bm\_aérea\_total} \quad (2)$$

La biomasa aérea reproductiva se puede referir a granos o frutos solamente o, sin pérdida de generalidad, referirse a los órganos reproductivos del cultivo (flores, vainas, granos, frutos).

En la Figura 4 se muestra la relación entre la biomasa aérea y la reproductiva, secas ambas, para el cultivo analizado.

Puesto que la Bm aérea y la reproductiva no tienen un inicio temporal común, Figura 3, se presenta una etapa de retraso (“lag”) en la aparición de la última (hasta  $t_r$ ), con un periodo no lineal inicial (hasta  $t_L$ ). Después de  $t_L$  la relación es lineal y puede aproximarse por (ambas biomasa secas):

$$IC = \frac{Bm\_aérea\_reproductiva}{(Bm\_aérea\_total - BmL)} \quad (3)$$

donde BmL es la biomasa en la fase lineal en pleno. La agregación de la constante sigue una propuesta similar a la de Howell (1990).

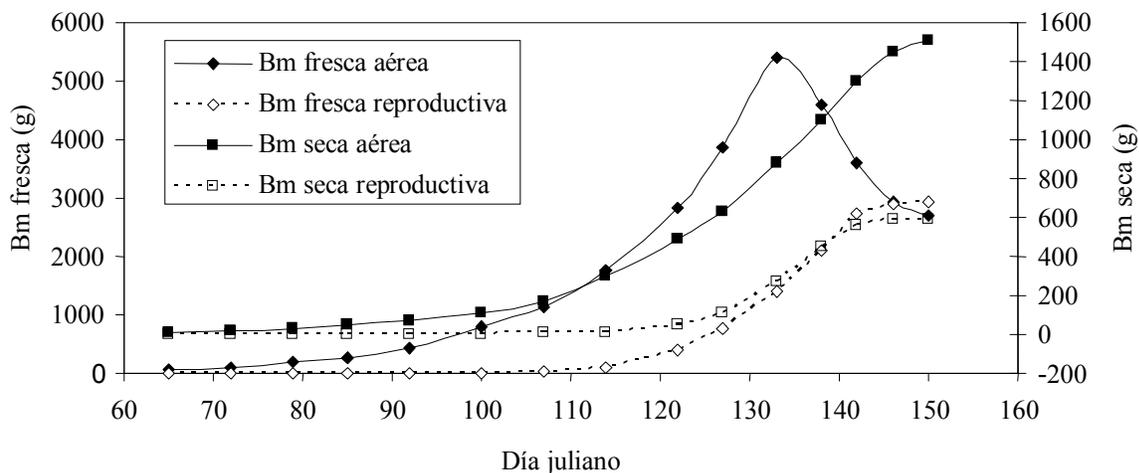


Figura 3. Evolución temporal de la biomasa fresca aérea, biomasa seca aérea y biomasa reproductivas de un cultivo.

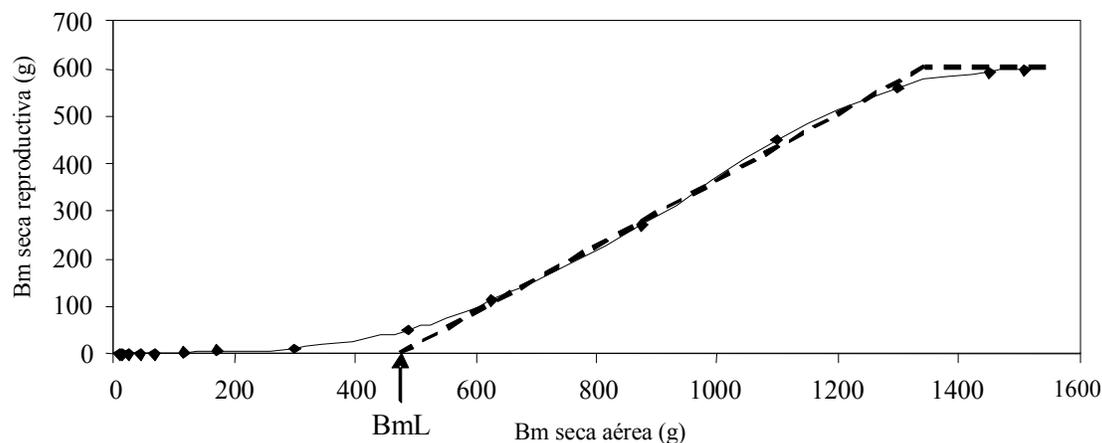


Figura 4. Relación entre la biomasa seca aérea y la reproductiva para un cultivo.

La relación entre la biomasa aérea y la reproductiva (IC) puede ser razonablemente aproximada por una relación lineal como la mostrada en la Figura 4, donde el valor máximo se truncó. El uso del modelo lineal es suficientemente simple y preciso para su uso operacional. La Figura 5 muestra la evolución temporal del IC para el cultivo analizado.

El patrón temporal del IC mostrado en la Figura 4 es consecuencia del acoplamiento de los modelos exponenciales de la biomasa aérea y la reproductiva. En caso de que ambas dinámicas de crecimiento iniciaran en un tiempo común, sin desfase, entonces el patrón del IC sería lineal. La parte inicial no lineal es producto del desfase de los crecimientos y la parte lineal se debe a la coincidencia de porciones de las fases lineales de ambas dinámicas.

El patrón temporal lineal del IC ha sido discutido por muchos autores para un amplio rango de cultivos (Spaeth y Sinclair, 1985; Muchow, 1988 y 1990; Hammer *et al.*, 1995; Moot *et al.*, 1996; Bange *et al.*, 1998; Vega *et al.*, 2000). Así, el uso del modelo lineal es lo suficientemente simple para usarse en los modelos de los cultivos (Hammer *et al.*, 1995).

El modelo lineal  $dIC/dt$  es estable para un gran rango de condiciones de crecimiento (diversos niveles de estrés nutrimental e hídrico) (Bindi *et al.*, 1999). Para poder comparar en forma robusta las biomásas aéreas y reproductivas, es necesario utilizar un mismo origen en el tiempo (recentrar), tal como el propuesto de  $t_L$  (biomasa aérea). El uso de  $t_T$  tiene el problema de que, en muchos casos, hay una relación no lineal (tipo exponencial) entre las biomásas de interés y no

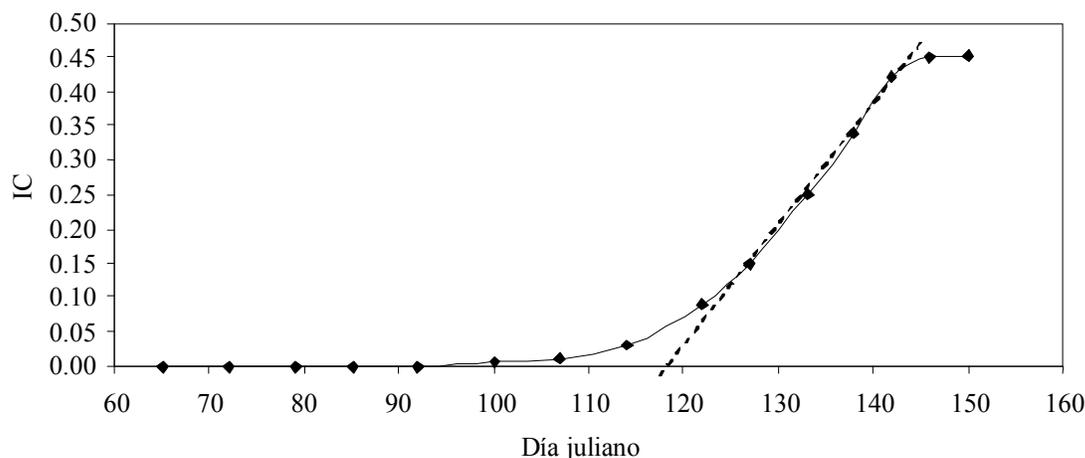


Figura 5. Evolución temporal del IC para un cultivo.

puede usarse en términos predictivos robustos. Esta situación deja un margen temporal estrecho para predicciones de solo unas semanas.

**Relación del IC con la Bm fresca aérea y el IVIS**

El índice de cosecha o IC esta definido en función de biomazas secas, por lo que el uso de la biomasa fresca o el índice IVIS esta aparentemente restringido solo hasta el pico del crecimiento verde, Figura 2. Una alternativa para evitar esta problemática es aproximar el patrón temporal de la biomasa fresca y del IVIS al de la biomasa seca. Para esto es necesario que la etapa de decrecimiento (senescencia) mostrada en la biomasa fresca y el IVIS se modifique a un patrón de

acumulamiento, solo para los datos posteriores al pico del crecimiento:

$$\begin{aligned}
 Bmfa_t &= Bmfa_{t-1} + (Bmfa_{t-1} - Bmfa_t), & Bmfa_t &\leq Bmfa_{t-1} \\
 IVIS_t &= IVIS_{t-1} + (IVIS_{t-1} - IVIS_t), & IVIS_t &\leq IVIS_{t-1}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

donde Bmfa es la biomasa fresca aérea y t es tiempo.

La Figura 6 muestra la relación entre el IVIS y la biomasa fresca y seca aérea, donde se presenta una relación lineal más o menos estable para el cultivo analizado. En el caso de la relación entre el IVIS (senescencia acumulada, relación 4) y la biomasa seca aérea, la relación lineal esta mejor definida que en el caso

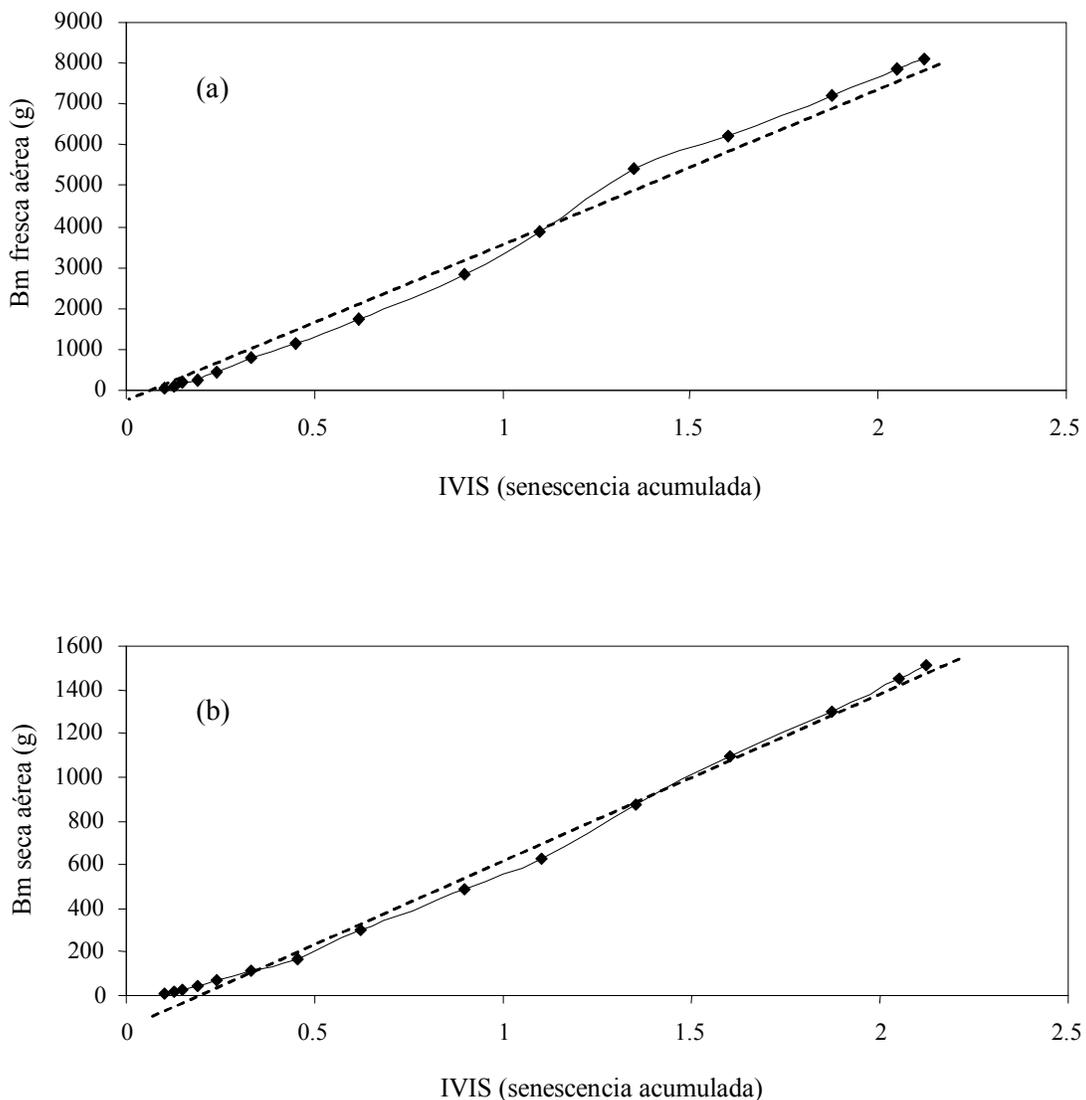


Figura 6. Relación entre el IVIS y las biomazas: (a) biomasa fresca aérea (senescencia acumulada) y (b) biomasa seca aérea.

de la biomasa fresca. Esto es atribuido a la problemática de medir la biomasa fresca en la etapa de senescencia.

En la Figura 7 se muestra el patrón entre la biomasa fresca aérea y el IVIS en relación al IC. Se observa que para los casos donde las fases lineales coinciden ( $t \geq t_L$ ), la relación lineal con el IC se manifiesta, definiendo así un esquema operacional para estimar el IC en función del IVIS.

La estimación de la biomasa seca aérea esta planteada en términos relativos basados en la pendiente de la fase vegetativa de la curva de crecimiento del IVIS, bajo el esquema de la equivalencia ambiental (Solorio *et al.*, 2008; Paz *et al.*, 2009).

Usando la estrategia del IVIS acumulado en la etapa de senescencia, la Figura 8 muestra el patrón temporal de este índice, donde se observa que el patrón

expo-lineal se mantiene y la fase lineal se prolonga hasta la etapa de senescencia, permitiendo así establecer una relación entre la biomasa seca aérea ( $Bmsa$ ) e IC (fase lineal del modelo expo-lineal):

$$\begin{aligned} Bmsa &= sIVIS, \quad t \geq t_L \\ IC &= tIVIS, \quad t \geq t_L \end{aligned} \quad (5)$$

donde  $s$  y  $t$  son constantes empíricas.

De acuerdo a lo discutido anteriormente, la relación entre el IVIS y el rendimiento después de  $t \geq t_L$  sería:

$$Bmr = uIVIS, \quad t \geq t_L \quad (6)$$

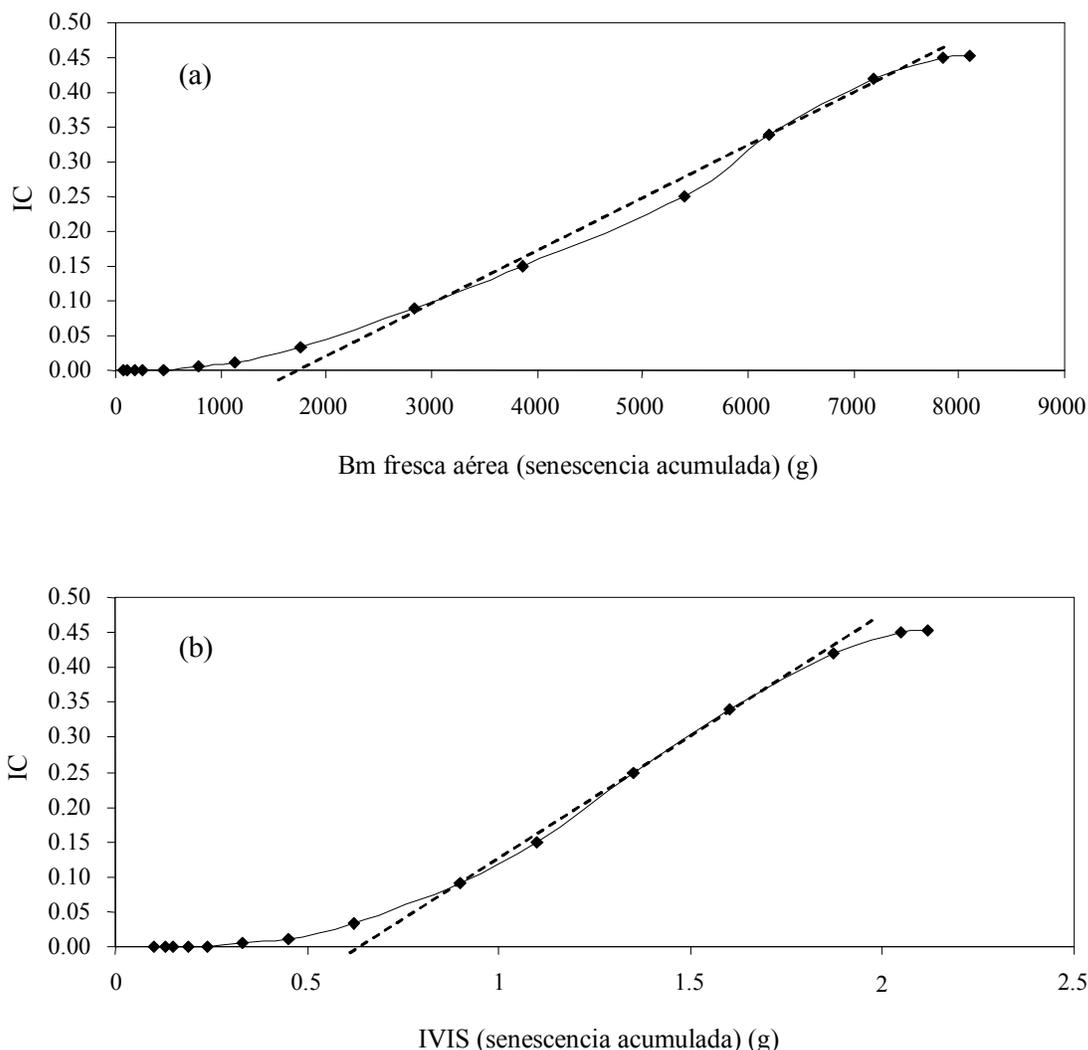


Figura 7. Relación entre el IC y variables con senescencia acumulada: (a) biomasa fresca aérea y (b) IVIS.

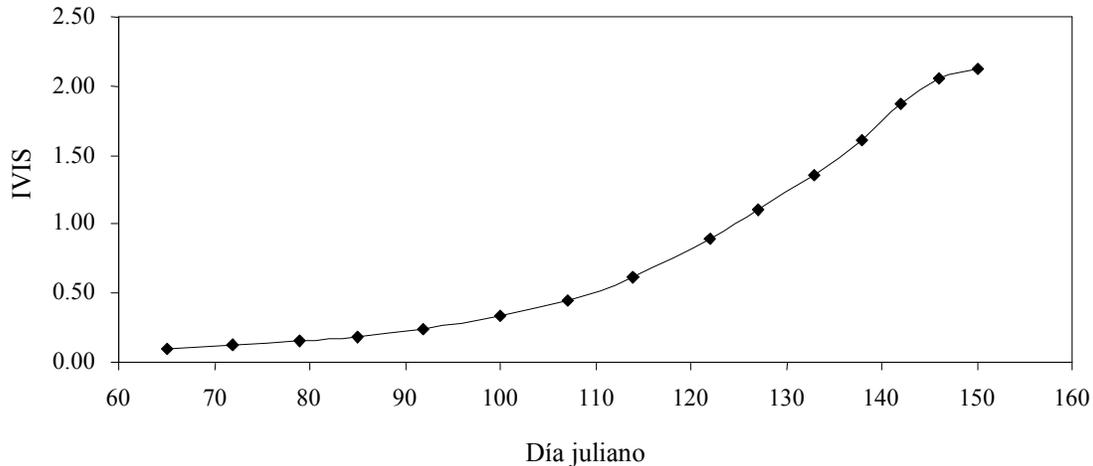


Figura 8. Evolución temporal del IVIS con senescencia acumulada para un cultivo.

donde  $B_{mr}$  es la biomasa aérea reproductiva o rendimiento y  $u$  es una constante dependiente de cada cultivo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el 2007 se realizó una campaña experimental en el Valle del Yaqui en Sonora, Mexico, donde se midieron variables biofísicas y se tomaron datos de reflectancias en cultivos de sorgo, cártamo, frijol, maíz y trigo. Para poder estandarizar las mediciones de las reflectancias por efectos de la geometría sol-sensor, se utilizó un modelo de BRDF (Bolaños *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2009), utilizando  $\theta_s = 30^\circ$  y  $\theta_v = 0^\circ$  para la estandarización:

$$\begin{aligned} \chi &= 90 - \theta_v + \theta_s \\ Rn &= \ln(R) \cos(\chi) \\ \chi &= 90 + gRn \end{aligned} \quad (7)$$

donde  $\theta_v$  es el ángulo cenital de visión y  $\theta_s$  es el de iluminación o solar.  $R$  se refiere a reflectancias en cualquier banda espectral.

Para el cálculo del IVIS se usó  $a_s = 0$  y  $b_s = 1$  y  $dIRC_\infty = 65\%$ . En la Figura 9 se muestran los patrones temporales del IVIS y de la biomasa aérea fresca para las parcelas experimentales.

El caso de la Bm aérea fresca del cultivo de cártamo muestra un patrón incremental en la etapa de senescencia, que probablemente es debido al mezclado

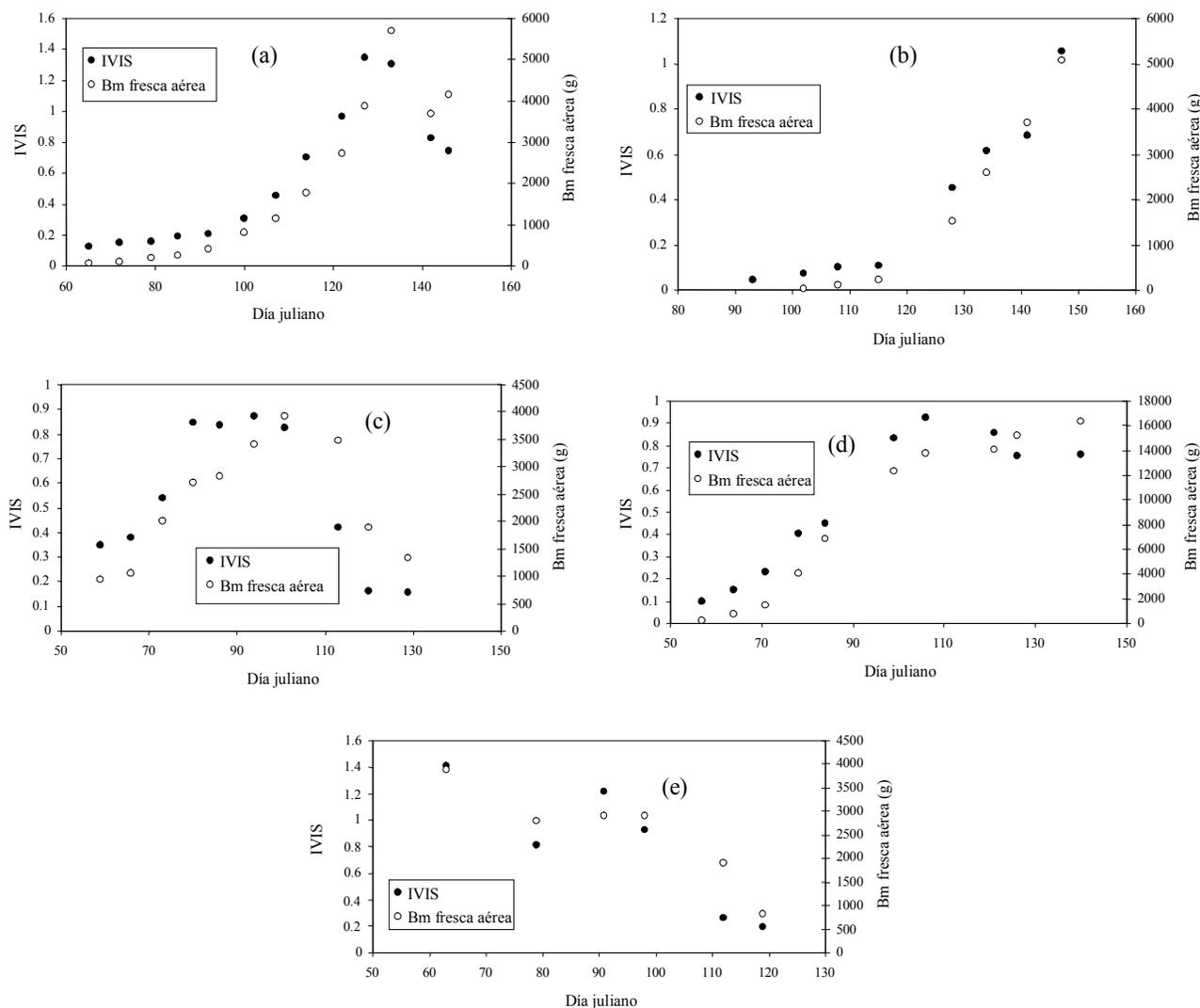
de sitios de muestreo con patrones temporales diferentes.

La Figura 10 muestra las relaciones entre el IVIS y la Bm aérea fresca, hasta el pico del crecimiento del follaje verde. En lo general, los resultados muestran un patrón lineal entre ambas variables. Definiendo el valor de  $IVIS_0$ , valor inicial del IVIS antes de la emergencia de las plantas (suelo desnudo), solo es necesario restar este valor al IVIS para que las relaciones lineales queden del tipo: Bm fresca aérea =  $kIVIS$ , de tal manera que el IVIS puede ser usado como un sustituto (indirecto) de las estimaciones de la biomasa aérea fresca. El uso de  $IVIS_0$  corrige la situación de usar  $a_s = 0$  y  $b_s = 1$  como parámetros de la línea del suelo.

Para el caso de los patrones entre la biomasa aérea fresca y seca, hasta el pico del crecimiento del follaje verde, la Figura 11 muestra relaciones lineales significativas. Los ajustes estadísticos fueron forzados a pasar por el origen, de tal manera que el uso de la biomasa fresca o seca puede utilizarse en forma directa.

Para el caso del IC, la Figura 12 muestra los patrones temporales para los cultivos analizados. En general, la relación lineal en el tiempo del IC está razonablemente representada en los experimentos con los cultivos agrícolas.

En el caso de la biomasa seca aérea, curva completa, el uso del IVIS acumulado en la parte de senescencia muestra una relación lineal con esta variable, Figura 13. El caso del cártamo, mencionado anteriormente, muestra un patrón bi-lineal, que es producto del crecimiento, y no decrecimiento, de la biomasa fresca aérea en la etapa de senescencia.



**Figura 9. Patrones temporales del IVIS y la biomasa aérea fresca: (a) frijol, (b) sorgo, (c) garbanzo, (d) cártamo y (e) trigo.**

Finalmente, en la Figura 14 se muestran la relación del IVIS (acumulado en la senescencia) y el IC, que muestran patrones lineales a partir de  $t_L$ .

## CONCLUSIONES

- Usando una conceptualización de índices espectrales de la vegetación basados en las líneas iso-suelo, el índice IVIS fue introducido como un esquema para relacionar las variables asociadas al follaje verde de los cultivos, de tal forma que modele el patrón de crecimiento y decrecimiento (senescencia). El IVIS, al igual que la biomasa fresca aérea, muestra un patrón creciente y decreciente, asociado a la cantidad de follaje verde y sus propiedades ópticas.

- El uso del índice IVIS como sustituto de variables biofísicas implica una relación lineal con éstas, pasando por el origen. Así, usando una acumulación del IVIS en la etapa de senescencia, se planteó una relación directa con la biomasa seca aérea, permitiendo su estimación en forma directa. Para el caso del índice de cosecha o IC, un cambio en el origen del IVIS cuando la fase lineal del crecimiento vegetativo está en pleno, permite obtener una relación lineal (origen cero) entre el IVIS y el IC o la biomasa seca reproductiva, facilitando la estimación de los rendimientos de los cultivos usando información espectral de sensores remotos en plataformas espaciales (satélites). Los resultados mostrados del experimento en el Valle del Yaqui, Sonora, México permiten validar la propuesta teórica-metodológica planteada.

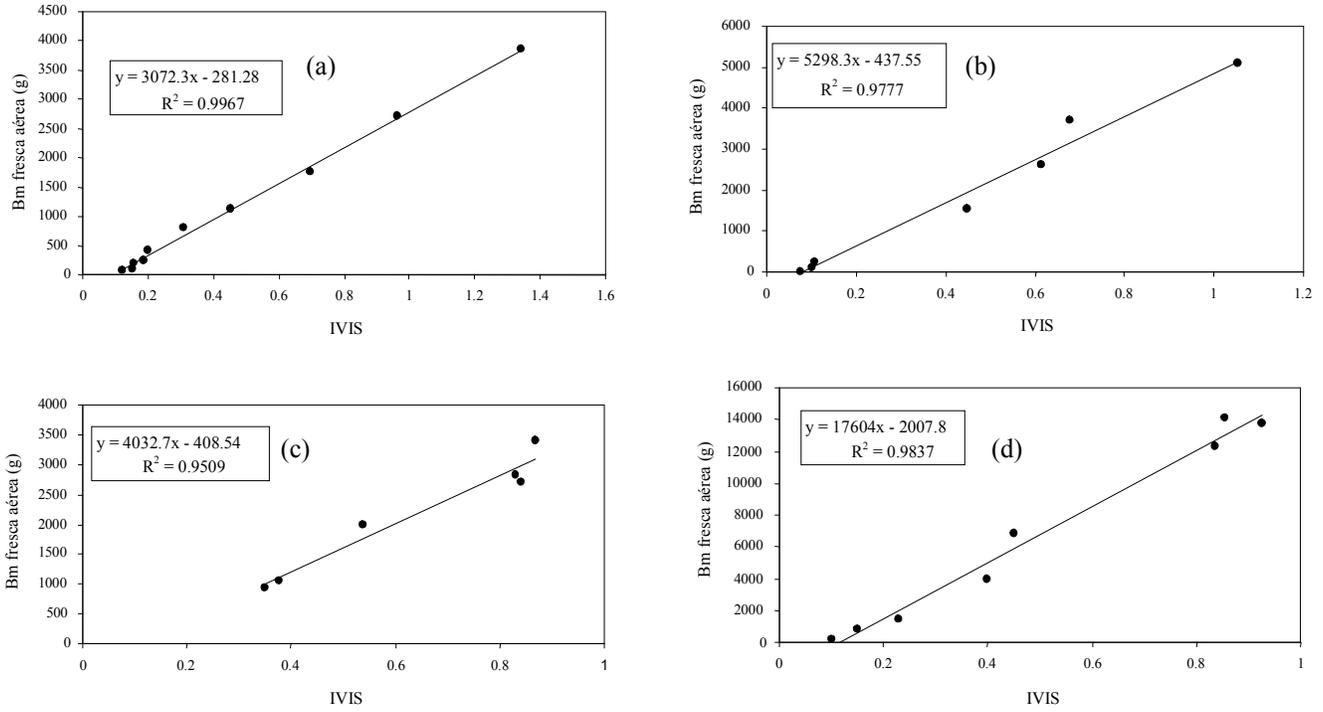


Figura 10. Relación entre el IVIS y la biomasa aérea fresca: (a) frijol, (b) sorgo, (c) garbanzo y (d) cártamo.

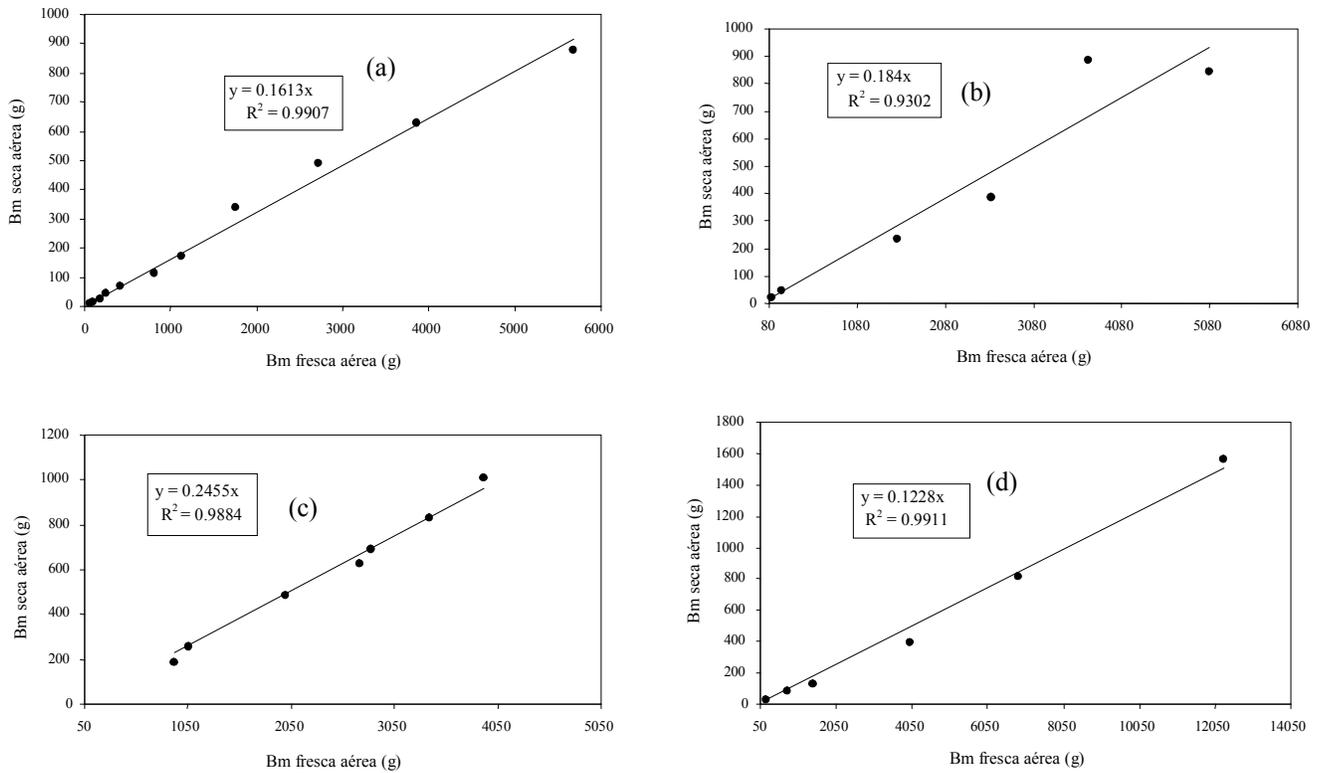


Figura 11. Relación entre la biomasa aérea fresca y la seca: (a) frijol, (b) sorgo, (c) garbanzo y (d) cártamo.

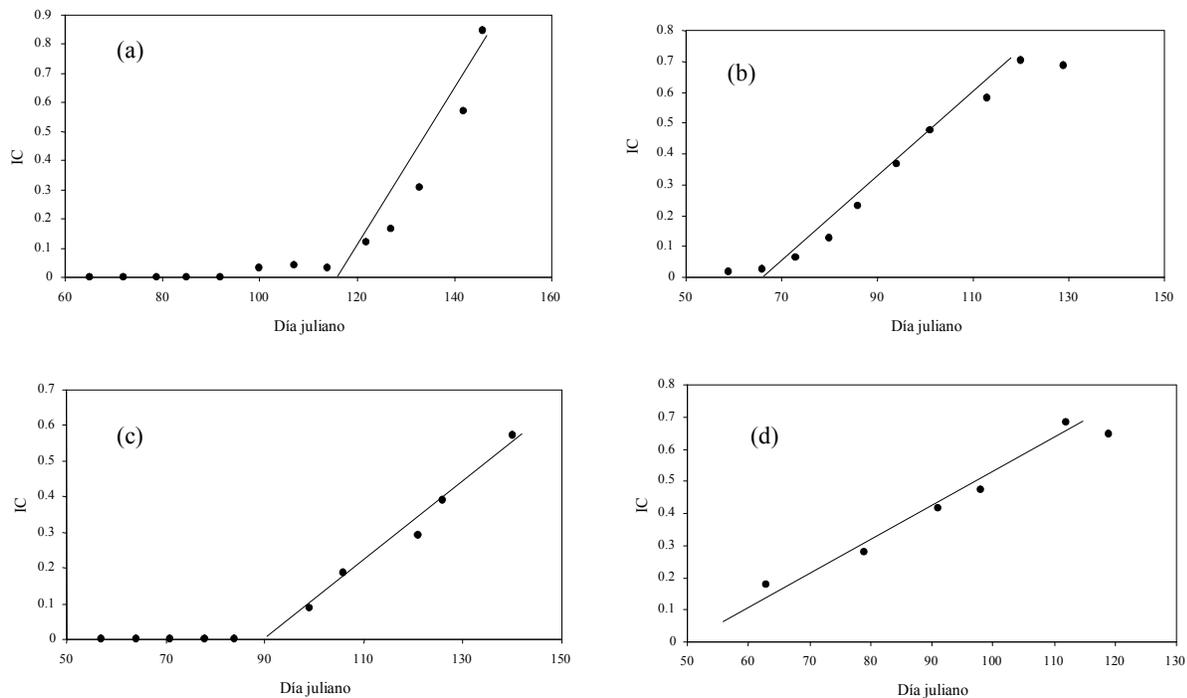


Figura 12. Patrones temporales del IC: (a) frijol, (b) garbanzo, (c) cártamo y (d) trigo.

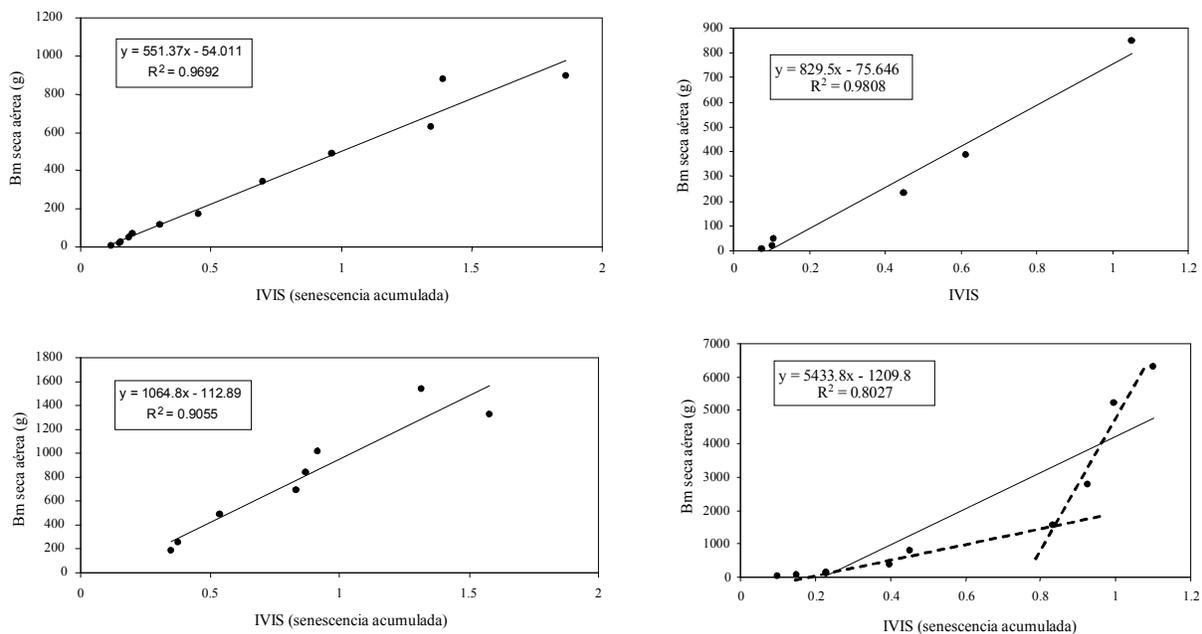


Figura 13. Relación entre el IVIS (acumulado en la senescencia) y la biomasa seca aérea: (a) frijol, (b) sorgo, (c) garbanzo y (d) cártamo.

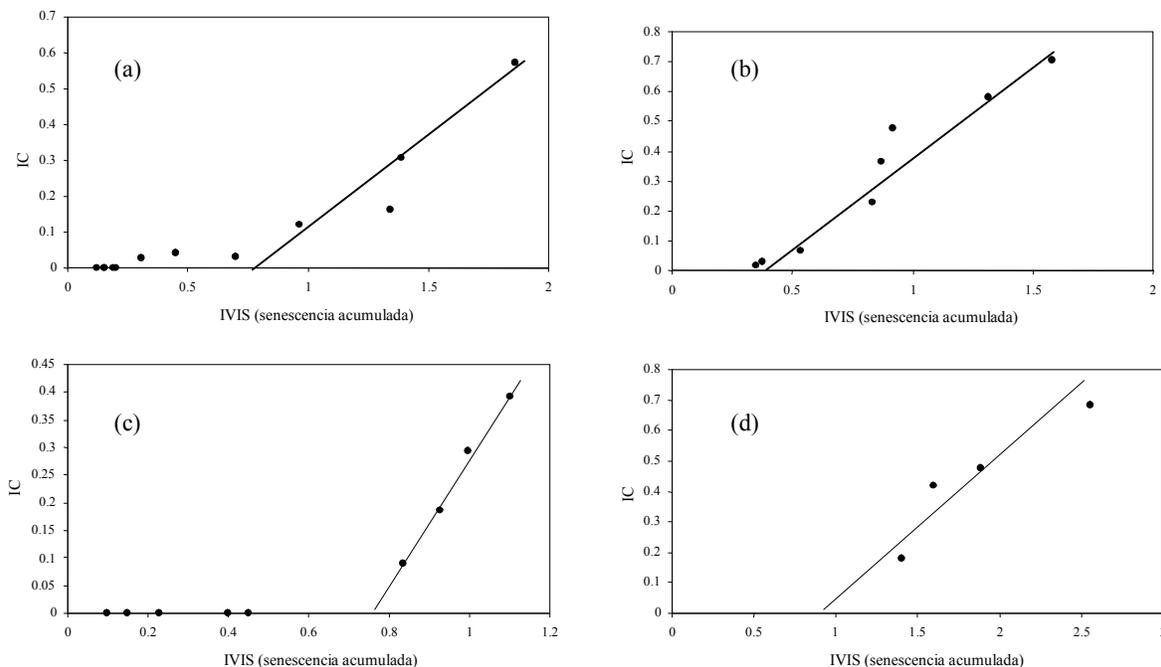


Figura 14. Relación entre el IVIS (acumulado en la senescencia) y el IC: (a) frijol, (b) garbanzo, (c) cártamo y (d) trigo.

## LITERATURA CITADA

- Bange, M. P., G. L. Hammer, and K.G. Rickert. 1998. Temperature and sowing date affect the linear increases of sunflower harvest index. *Agron. J.* 90: 324-328.
- Bindi, M., T. R. Sinclair, and J. Harrison. 1999. Analysis of seed growth by linear increase in harvest index. *Crop Sci.* 39: 486-493.
- Bolaños, M., F. Paz, E. Palacios, E. Mejía y A. Huete. 2007. Modelación de los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. *Agrociencia* 41: 527-537.
- Calera, A., J. Gonzalez, and J. Meliá. 2004. Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *Int. J. Remote Sens.* 25: 97-109.
- Charles-Edwards, D. A. 1982. *Physiological determinants of crop growth.* Academic Press, Sydney, Australia.
- Gilabert, M. A., J. González, F. J. García, and J. Meliá. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 82: 303-310.
- Hammer, G. L., T. R. Sinclair, K. J. Boote, G. C. Wright, H. Meinke, and M. J. Bell. 1995. A peanut simulation model: I. model development and testing. *Agron. J.* 87: 1085-1093.
- Howell, T. A. 1990. Grain, dry matter yield relationships for winter wheat and grain sorghum – Southern High Plains. *Agron. J.* 82: 914-918.
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 25: 295-309.
- Moot, D. J., P. D. Jamieson, A. L. Henderson, M. A. Ford, and J. R. Porter. 1996. Rate of change of harvest index during grain-filling of wheat. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 126: 387-395.
- Muchow, R. C. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. III Grain yield and nitrogen accumulation. *Field Crops Res.* 18: 31-43.
- Muchow, R. C. 1990. Effect of high temperature on grain-growth in field-grown maize. *Field Crops Res.* 23: 145-158.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez y L. A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, L. A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVI<sub>cp</sub>. *Agrociencia* 41: 539-554.
- Paz, F., M. Odi, A. Cano, M. A. Bolaños y A. Zarco. 2009. Equivalencia ambiental en la productividad de la vegetación. *Agrociencia* 43: 635-648.
- Paz, F., M. Reyes y E. Medrano. 2011. Diseño de índices espectrales de la vegetación usando curvas iso-suelo. *Agrociencia* 45: 121-134.
- Romero, E., F. Paz, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2009. Diseño de un índice espectral de la vegetación desde una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales del crecimiento. *Agrociencia* 43: 291-307.
- Solorio, N., F. Paz, M. Odi y M. Bolaños. 2008. Modelo exponencial del crecimiento y equivalencia de la productividad de un tomate cultivado en invernadero. *Terra Latinoamericana* 27: 143-151.
- Spaeth, S. C. and T. R. Sinclair. 1985. Linear increase in soybean harvest index during seed-filling. *Agron. J.* 77: 207-211.
- Stöckle, C. O., M. Donatelli, M., and R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18: 289-307.

- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8: 127-150.
- Tucker, C. J., B. N. Holben, J. H. Elgin, and J. E. McMurtrey. 1981. Remote sensing of total dry matter accumulation on winter wheat. *Remote Sens. Environ.* 11: 171-189.
- Vega, C. R. C., V. O. Sadras, F. H. Andrade, and S. A. Uhart. 2000. Reproductive allometry in soybean, maize and sunflower. *Ann. Bot.* 85:461-468.
- Verstraete, M. M. and B. Pinty. 1996. Designing optical spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 34:1254-1265.