



Terra Latinoamericana

ISSN: 0187-5779

ISSN: 2395-8030

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.

Paz Pellat, Fernando

Estimación de la cobertura aérea de la vegetación herbácea usando sensores remotos

Terra Latinoamericana, vol. 36, núm. 3, 2018, Julio-Septiembre, pp. 239-259

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.399>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57357279005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org



Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Estimación de la cobertura aérea de la vegetación herbácea usando sensores remotos

Estimation of herbaceous vegetation aerial cover estimation using remote sensing

Fernando Paz Pellat^{1‡}

¹ GRENASER, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km. 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

[‡] Autor responsable (ferpazpel@gmail.com)

RESUMEN

La estimación de variables biofísicas, particularmente la cobertura aérea foliar (f_v), con el uso de sensores remotos permite su uso en diferentes campos de aplicación y facilita la parametrización de modelos. Con una perspectiva de modelos de transferencia de radiación, el desarrollo de índices de vegetación (IV) debe estar basado en consideraciones teóricas y evidencia experimental, además debe tener una relación lineal con la variable biofísica de interés. En este trabajo se revisan las consideraciones teóricas para el diseño de IV con un formato de estandarización de la geometría sol-sensor y el uso de reflectancias normalizadas para considerar el efecto de escala. A partir del uso de simulaciones de radiación se introduce el Índice de Vegetación de Proporciones Estandarizadas en relación al Límite Asociado a espacios Normalizados y sus Atrayentes (IV_PELANA) para establecer una relación lineal con f_v . El índice desarrollado es validado con el uso de múltiples experimentos de vegetación herbácea, estableciéndose su robustez y estabilidad para ser usado en términos operativos.

Palabras clave: patrones lineales, reflectancias estandarizadas y normalizadas, IV_PELANA, simulaciones de radiación.

SUMMARY

To estimate biophysical variables, particularly foliage cover (f_v), remote sensors can be used in different fields of application and facilitate model parameterization. From the perspective of radiation

transfer models, the development of vegetation indexes (VI) should be based on theoretical considerations and experimental evidence, and there should be a linear relationship with the biophysical variable of interest. In this paper the theoretical considerations for the VI design are reviewed with a standardization format of the sol-sensor geometry and the use of normalized reflectances to consider the scale effect. From the use of radiation simulations, the Vegetation Index of Standardized Proportions in relation to the Limit Associated to Normalized spaces and their Attractors (VI_SPLANA) is introduced to establish a linear relationship with f_v . The developed index is validated through multiple experiments on herbaceous vegetation, establishing its robustness and stability to be used in operational terms.

Index words: linear patterns, normalized and standardized reflectances, VI_SPLANA, radiation simulations.

INTRODUCCIÓN

Los sensores remotos permiten obtener información del estado de la vegetación de la superficie terrestre con tiempos de revisita cortos, de días a meses, y con capacidades de muestreos espaciales exhaustivos con diferentes resoluciones. En esta perspectiva, el uso de esta tecnología permite generar mapas dinámicos de la vegetación para diferentes usos.

Las variables biofísicas asociadas a la vegetación, tales como la cobertura aérea foliar (f_v), el índice de área foliar (IAF) o la biomasa aérea (B) pueden ser usadas para sintetizar el estado y crecimiento de

Cita recomendada:

Paz Pellat, F. 2018. Estimación de la cobertura aérea de la vegetación herbácea usando sensores remotos. Terra Latinoamericana 36: 239-259.
DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.399>

Recibido: abril de 2018. Aceptado: junio de 2018.
Publicado en Terra Latinoamericana 36: 239-259.

la vegetación en forma adecuada, de tal forma que se pueden generar modelos biofísicos para diferentes aplicaciones (Goudriaan, 1977; Ross, 1981). El uso de los sensores remotos para estimar variables biofísicas permite reducir significativamente los costos asociados a muestreos en campo, siempre y cuando las relaciones establecidas entre los datos espectrales y los biofísicos sean robustas y estables en el tiempo.

Los sensores remotos, en plataformas espaciales o a nivel de campo, miden las interacciones de la vegetación con la radiación solar en las diferentes bandas electromagnéticas (sensores ópticos), de tal manera que captan información que puede utilizarse para estimaciones de variables biofísicas (Bunnik, 1978; Ross, 1981; Pinty *et al.*, 2004). La liga entre estas variables y la transferencia de radiación es función de lo que los sensores remotos pueden medir. En los procesos de transferencia de radiación los datos espectrales son función de las interacciones con la atmósfera y con el medio suelo-vegetación. Sin considerar las interacciones atmosféricas, la información espectral es función de la vegetación a la escala de un pixel o parcela (cobertura aérea, índice de área foliar, distribución angular del follaje de las plantas, agrupamiento espacial de las hojas o racimos de éstas, propiedades ópticas de las hojas, principalmente) y del fondo de la vegetación (propiedades ópticas del suelo o mezcla suelo-vegetación en la parte inferior); además de la geometría sol-sensor (Bunnik, 1978; Ross, 1981; Huete *et al.*, 1985). En este sentido, las observaciones de los sensores remotos dependen de múltiples y complejas interacciones del medio suelo-vegetación, por lo que, en general, es complicado extraer información biofísica (Baret y Guyot, 1991).

En términos estructurales (geometría de la distribución de la vegetación en un pixel o parcela), los sensores remotos captan información relacionada con el follaje (la parte fotosintética en las bandas fotosintéticamente activas y la estructural del mesófilo foliar en los infrarrojos, más otras variables asociadas), por lo que es importante conocer los alcances y limitaciones de la tecnología (Paz *et al.*, 2007 y 2015). Una variable típica usada en las relaciones entre los datos espectrales y la estructura de la vegetación es el IAF, con el uso de diferentes aproximaciones en relación a su definición. Un problema asociado con el IAF es que típicamente esta variable no es suficiente para caracterizar la distribución espacial del follaje,

por lo que se requiere de la cobertura aérea para tener información completa (Specht y Specht, 1989; Paz *et al.*, 2011). Por un lado, el IAF es determinado en campo a nivel global (superficie de una cara de las hojas en relación a la superficie del terreno) por lo que existe un número grande de posibles arreglos geométricos de las plantas en la parcela que generan un mismo IAF (Paz *et al.*, 2013). Con el uso del IAF a escala de plantas individuales (IAF local), lo que generalmente se mide en campo, más la cobertura de la vegetación o del suelo (entre el dosel del follaje de las plantas individuales), es posible tener información completa del follaje y su distribución espacial en un pixel o parcela (Carlson y Ripley, 1997; Paz *et al.*, 2013). Al contrario del IAF (global), la cobertura aérea foliar o f_v , es una variable global más adecuada para caracterizar a la vegetación (Specht, 1972; Carlson y Ripley, 1997; Specht y Specht, 1989; Paz *et al.*, 2013). En este caso, la f_v está definida como la cobertura del follaje visto a nadir por un sensor, también denominada cobertura proyectiva foliar (Specht y Specht, 1989), por lo que tiene información del follaje de las plantas individuales y de su distribución espacial. La cobertura proyectiva foliar (densidad del follaje) es una variable crítica en las interacciones atmósfera-vegetación-suelo en procesos ecológicos e hidrológicos (Specht, 1972; Eagleson, 1982).

Con la perspectiva de la estimación de f_v de la distribución del follaje en un pixel o parcela, en este trabajo se revisa el uso de los datos espectrales para este fin, además de la revisión de la relación entre el IAF y la f_v . Los desarrollos teóricos que fundamentan la estimación de f_v son revisados en función de diferentes bases de datos experimentales, para analizar su robustez y estabilidad en el tiempo y espacio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los sensores remotos pueden tomar datos de radiancias (reflectancias) en diferentes bandas espectrales, que en el espectro electromagnético de onda corta van de 400 a 2500 nm, generalmente. En las aplicaciones asociadas a caracterizar el medio suelo-vegetación típicamente se utilizan las bandas del rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC), dado el alto contraste de estas bandas para diferenciar la vegetación del suelo (Richardson y Wiegand, 1977; Tucker, 1979). Este par de bandas espectrales están disponibles en la gran

mayoría de los satélites comerciales o gratuitos, así como en radiómetros espectrales de campo, por lo que en adelante la discusión estará centrada en estas bandas.

Patrones Espectrales del Crecimiento de la Vegetación

Los procesos de transferencia de radiación en el medio suelo-vegetación pueden ser aproximados de diferentes maneras para su análisis y comprensión. Para poder generar simulaciones de radiación, un primer paso es establecer la condición de frontera, la cual está definida por el caso de suelo desnudo ($IAF = 0$, $f_v = 0$). En una determinada región o espacio, las reflectancias de los suelos presentan un patrón lineal de variación conocido como línea del suelo (Baret *et al.*, 1983), que permite introducir simetrías en las simulaciones de radiación. La Figura 1 muestra una línea con seis suelos con propiedades ópticas (reflectancias) diferentes, que pueden estar asociadas a condiciones de humedad del suelo, rugosidad superficial, contenido de materia orgánica, óxidos de hierro; principalmente (Baumgardner *et al.*, 1985).

A la escala de píxeles individuales, los cambios en las reflectancias del suelo, principalmente por cambios en la humedad del mismo o prácticas de labranza en cultivos agrícolas, se reflejan en un movimiento en la línea del suelo. Así, para un suelo claro (S11 en la Figura 1), su humedecimiento modifica su posición al punto definido por S9. Al secarse el suelo, se regresa al punto S11. Para un suelo oscuro (S12 en la Figura 1), el patrón va de S12 a S2 y, al secarse, de S2 a S12 (Baumgardner *et al.*, 1985; Paz *et al.*, 2005). De esta forma, en lo siguiente la discusión de simulaciones de radiación estará orientada a suelos claros y oscuros,

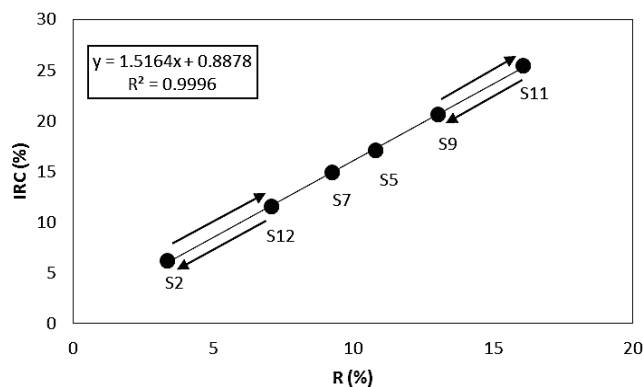


Figura 1. Línea del suelo con seis suelos con propiedades ópticas diferentes. IRC = infrarrojo cercano; R = rojo.

para considerar el patrón completo, en los extremos, de variabilidad en las propiedades ópticas de los suelos.

La Figura 2 muestra los patrones espectrales del crecimiento de un cultivo en el espacio del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC), discutidos ampliamente en Paz *et al.* (2005 y 2007), con el uso del modelo 1-D de transferencia radiación SAIL (Verhoef, 1984).

El modelo SAIL usa una aproximación de medio turbio (Ross, 1981) unidimensional que consiste en un medio semi-infinito compuesto por fitoelementos infinitesimales, sin sombreado entre ellos. En la realidad, modelos 3-D, la distribución del follaje tiene patrones más complejos y la aproximación de medio turbio está limitada. No obstante, lo anterior, las simulaciones 3-D de modelos de transferencia de radiación tienen patrones similares a los mostrados para el caso 1-D (Gao *et al.*, 2000), por lo que los patrones unidimensionales pueden ser convertidos a tridimensionales a través de transformaciones lineales (Pinty *et al.*, 2004). En esta situación, los parámetros de los modelos 1-D son considerados como efectivos con el concepto de medios equivalentes (Pinty *et al.*, 2004; Paz *et al.*, 2013). La Figura 3 muestra los patrones espectrales de mediciones en campo de diferentes propiedades ópticas de los suelos y de un cultivo de algodón (Huete *et al.*, 1985), donde se observan patrones similares a las simulaciones de radiación.

Para el caso de cultivos agrícolas o vegetación herbácea, si se unen los valores de igual IAF o f_v (iso-IAF o iso- f_v) de cada curva de igual suelo (iso-Suelo), se obtiene un patrón cuasi-lineal. Esto es

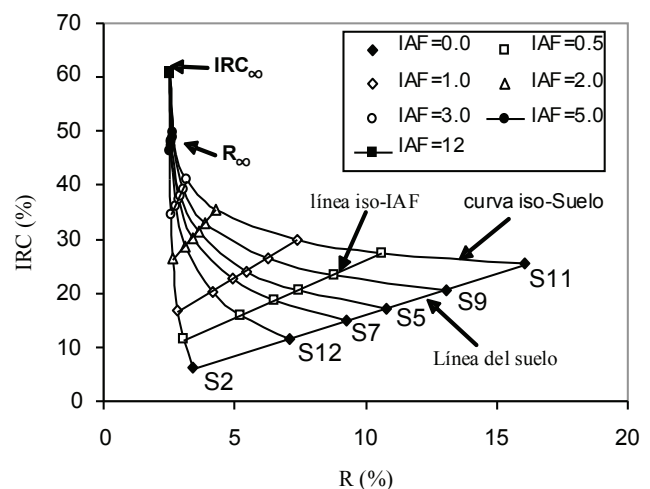


Figura 2. Patrones espectrales del crecimiento de un cultivo en el espacio del R (rojo)-IRC (infrarrojo cercano). IAF = índice de área foliar.

congruente con la información de campo y con otras aproximaciones teóricas (Huete *et al.*, 1985; Yoshioka *et al.*, 2000). En realidad, la curva de iso-IAF corresponde a un comportamiento tipo parabólico, que si no se consideran suelos muy claros, resulta en una línea recta (Paz *et al.*, 2014 y 2015). Así, un estado de crecimiento de un cultivo (IAF) se refleja en una línea recta, independientemente del tipo de suelo de fondo en el cultivo. La pendiente e intersección de las líneas rectas de iso-IAF varían con el valor del IAF, como se observa en las Figuras 2 y 3. La inclinación (pendiente) de las rectas de iso-IAF parte desde una pendiente igual a la de la línea del suelo (IAF = 0) y aumenta hasta alcanzar un ángulo de 90° en el sentido contrario a las manecillas del reloj. Esta última condición corresponde al caso de saturación de la reflectancia de la banda del R (R_{∞}), representada en la Figura 2 como los valores de reflectancia arriba del ápice del “sombrero de tres picos” o envolvente (IAF > 3 en la Figura 2). Los patrones de los espacios espectrales IRC-Visible (azul, verde y rojo) son similares para todas las bandas del espectro visible, dado que hay una relación lineal entre estas bandas (Paz *et al.*, 2005 y 2015). En consecuencia, no existe razón aparente, salvo el de la rapidez de saturación de las bandas, para preferir una banda visible en particular. Todas las curvas de iso-Suelos convergen al mismo punto de saturación de las bandas visibles. En realidad, el sombrero de tres picos tiene una línea recta como ápice, ya que cuando una banda visible se satura el IRC no lo hace y sigue

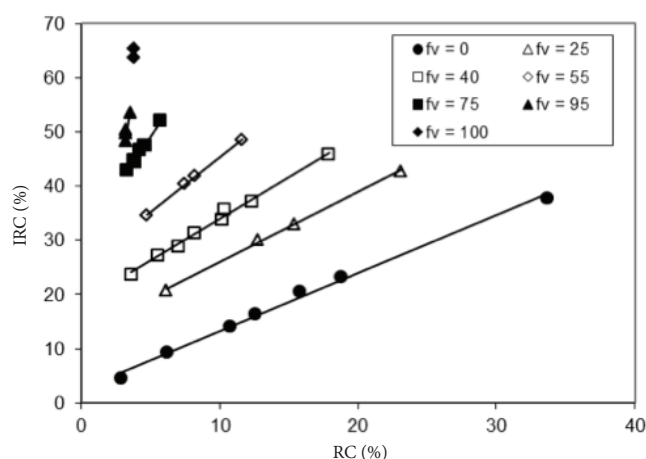


Figura 3. Patrones espectrales de las reflectancias de un cultivo de algodón en campo en el espacio del R (rojo)-IRC (infrarrojo cercano). fv = cobertura área foliar. Adaptado de Huete *et al.*, 1985.

creciendo hasta su propio punto de saturación (IRC_{∞}). Esta propiedad es muy importante para el diseño de algoritmos de índices de la señal del suelo y de la vegetación, además refleja la condición física obvia de que una superficie cubierta completamente por un cultivo se ve desde arriba como un cultivo denso y no como una mezcla de suelo-cultivo, por lo que ópticamente es un medio denso (Ross, 1981).

La estimación de f_v con el uso de sensores remotos ha sido aproximada mediante el análisis espectral de mezclas para extraer la variable biofísica de interés (van Leeuwen *et al.*, 1997), redes neuronales calibradas en función de los patrones de la Figura 2 (Baret *et al.*, 1995), soluciones numéricas y estadísticas de los patrones de la Figura 2 (Paz *et al.*, 2006a; Kallel *et al.*, 2007) o con índices de vegetación (IV), principalmente. Los IV utilizados han sido numerosos para aproximar f_v o IAF (Huete, 1988; Carlson y Ripley, 1997; Purevdorj *et al.*, 1998; Gitelson *et al.*, 2002; Paz *et al.*, 2007 y 2011; Odi *et al.*, 2010; Reyes *et al.*, 2011; Pascual *et al.*, 2012; Romero *et al.*, 2009; Villa *et al.*, 2014). Uno de los índices más utilizados es el NDVI = $(IRC-R)/(IRC+R)$ (Rouse *et al.*, 1974), el cual ha sido comparado con simulaciones de radiación y mediciones de campo para analizar su relación con f_v o IAF (Baret *et al.*, 1995; Carlson y Ripley, 1997; Purevdorj *et al.*, 1998). Los resultados de estos análisis muestran relaciones no lineales y con dispersión grande, particularmente cuando se varían las propiedades ópticas de las hojas y su distribución angular. Paz *et al.* (2007 y 2015) analizan una gran cantidad de índices de vegetación, incluido el NDVI, y señalan que este último es uno de los peores para ser usado en las estimaciones de variables biofísicas. De hecho, Paz *et al.* (2014 y 2015) muestran que solo el índice IV_CIMAS (Romero *et al.*, 2009) cumple con los patrones asociados a evidencia teórica y experimental, hasta el punto de máximo IAF (etapa vegetativa y reproductiva).

Desarrollo de Índices Espectrales de la Vegetación

Aunque hay muchos enfoques para el diseño de IV, en esta sección solo se considera la situación de contar con bases teóricas de transferencia de radiación. El uso de otras bandas espectrales diferentes del R e IRC es discutido en Paz *et al.* (2015), donde se argumenta que no contribuyen con nueva información o reducción de los errores de estimación.

Para el caso de transformaciones del espacio del R-IRC, Paz *et al.* (2013) analizan sus relaciones en un marco teórico-experimental unificado, por lo que no se considerarán en esta sección. Asimismo, la situación de minimizar o eliminar los efectos atmosféricos no se considerará, dadas las revisiones y discusiones de diferentes autores (Myneni y Asrar, 1994; Yoshioka, 2004; Paz *et al.*, 2006b y 2008).

El diseño de los IV generalmente se plantea para reducir o eliminar los efectos del fondo (suelo) debajo de la vegetación (Huete, 1988), de tal manera que el IV tenga una relación lineal con la variable biofísica de interés (Huete *et al.*, 1994).

Los IV generalmente reducen en forma irreversible la información disponible (Verstraete *et al.*, 1996), ya que combinan las bandas del R e IRC en un solo valor (IV), que no puede ser invertido para recuperar las bandas espectrales. En este sentido, el diseño de los IV debe ser realizado con variables biofísicas relevantes que sean dependientes de la transferencia radiativa suelo-vegetación (Verstraete *et al.*, 1996) para evitar problemas de dependencias indirectas que pueden variar de caso a caso. Como se discute en lo siguiente, las reflectancias de las bandas del R e IRC están correlacionadas, no linealmente, con el IAF y esta relación depende de las propiedades ópticas del suelo y del follaje, además del arreglo de la distribución angular de las hojas.

Para un medio turbio con iluminación difusa, la reflectancia del sistema suelo-vegetación (hojas negras con distribución angular horizontal) puede ser estimada de (Kubelka y Munk, 1931; Bonhomme y Varlet-Grancher, 1977; Goudriaan, 1977; Ross, 1981; Price y Bausch, 1995):

$$R_{sv} = \frac{R_{\infty} - R_s R_{\infty}^2 + (R_s - R_{\infty}) \exp(-2K_h IAF)}{1 - [1 + \exp(-2K_h IAF)] R_s R_{\infty} + R_{\infty}^2 \exp(-2K_h IAF)} \quad (1)$$

donde: K_h es el coeficiente de extinción para hojas negras horizontales, sv se refiere al sistema suelo-vegetación y s a solo suelo. El termino K se usa en forma genérica para definir un coeficiente de extinción.

Para el caso de las bandas del visible, si se desprecian las contribuciones no significativas, la Ecuación 1 puede simplificarse como:

$$R_{sv} \approx R_{\infty} - (R_{\infty} - R_s) \exp(-2K_h IAF) \quad (2)$$

donde: R_s es la reflectancia del suelo debajo de la vegetación.

Para la banda del IRC, la Ecuación 2 es una buena aproximación (Paz *et al.*, 2013). En el caso de iluminación directa y difusa, y hojas no negras y no horizontales, la relación (2) sigue siendo válida, pero con parámetros ajustados a esta situación:

$$R_{sv} \approx R_{\infty} - (R_{\infty} - R_s) \exp(-2K_r IAF) \quad (3)$$

donde: K_r es el coeficiente de extinción para la reflectancia (rojo o infrarrojo cercano).

La inversión de la Ecuación 2 está dada por:

$$IAF = -\frac{1}{2K_r} \ln \left(\frac{R_{\infty} - R_{sv}}{R_{\infty} - R_s} \right) \quad (4)$$

y ha sido usada por Price (1992), Price y Bausch (1995), Paz *et al.* (2011 y 2014) para estimaciones del IAF o diseño de índices de vegetación proporcionales al IAF.

El formato de la Ecuación 3, después de la revisión de los patrones de los IV con el uso de simulaciones de radiación o datos experimentales, ha sido propuesto por Clevers (1989) y Baret y Guyot (1991) para caracterizar a los índices de vegetación:

$$IV \approx IV_{\infty} - (IV_{\infty} - IV_s) \exp(-2K_{IV} IAF) \quad (5)$$

Paz *et al.* (2011) propusieron el IVIS (índice de vegetación basado en curvas iso-suelo) con el uso de la formulación (5), para el caso de utilizar el índice dIRC = IRCsv - ($a_s + b_s R$), donde la línea del suelo de la Figura 1 y 2 está dada por:

$$IRC_s = a_s + b_s R_s \quad (6)$$

y el índice de vegetación IVIS por (s se refiere a la condición de suelo desnudo):

$$\begin{aligned} IVIS &= -\ln \left(\frac{dIRC_{\infty} - dIRC}{dIRC_{\infty} - dIRC_s} \right) \\ dIRC &= IRC - (a_s + b_s R) \\ dIRC_{\infty} &= IRC_{\infty} - (a_s + b_s R_{\infty}) \\ dIRC_s &= IRC_s - (a_s + b_s R_s) \end{aligned} \quad (7)$$

El índice dIRC es la distancia vertical proyectada de una reflectancia sobre una línea de iso-IAF o iso- f_v hasta la línea del suelo, Figura 4.

Conocidos los parámetros de la línea del suelo (o supuestos como asociados a una línea del suelo “virtual” con parámetros fijos), entonces tenemos que $dIRC_s = 0$, por lo que la Ecuación 7 se simplifica a:

$$IVIS = -\ln\left(1 - \frac{dIRC}{dIRC_{\infty}}\right) \quad (8)$$

De la discusión previa, el IVIS está relacionado linealmente con el IAF:

$$IVIS = \left(\frac{1}{2K_{IVIS}}\right) IAF \quad (9)$$

donde: el coeficiente de extinción se supone como constante.

Con el uso de simulaciones de radiación con el modelo SAIL, la Figura 5 muestra la relación del IVIS con el IAF para un suelo oscuro y uno claro, con cambios de humedad tal como los discutidos en la Figura 1.

Los resultados mostrados en la Figura 5 indican que el IVIS no tiene los problemas de saturación de los otros IV, además que muestra una relación lineal con valores altos del IAF (IAF = 8). Resulta claro que la relación (9) debe ampliarse para considerar el efecto de las propiedades ópticas del suelo debajo de la vegetación, ya que para un K_{IVIS} similar, la relación (9) cambia (Figura 5); aunque para el caso de datos experimentales la relación (9) se conserva (Paz *et al.*, 2011).

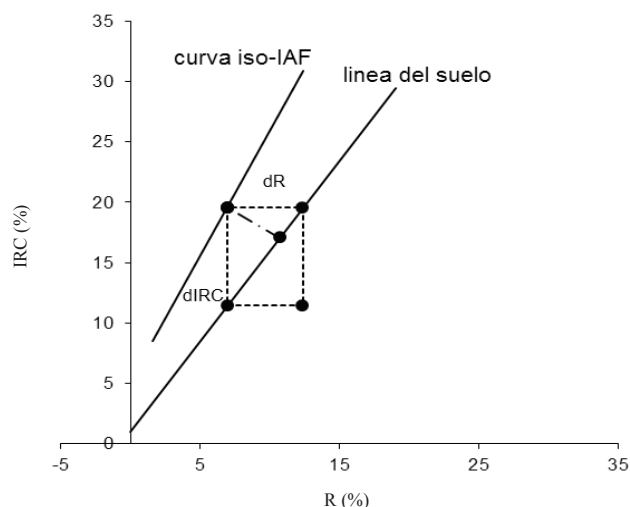
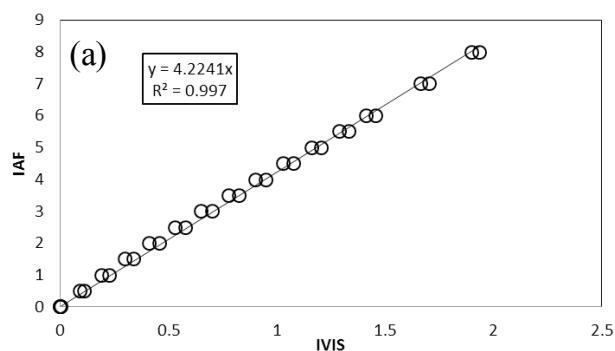


Figura 4. Definición de los índices dIRC y dR. IRC = infrarrojo cercano; R = rojo.

La relación entre el IAF y f_v (en %), de consideraciones teóricas y experimentales, está dada por (Nilson, 1971; Ross, 1981):

$$f_v = 100[1 - \exp(-K_v IAF)] \quad (10)$$

donde: K_v es el coeficiente de extinción de la parte fotosintética de la vegetación (bandas del visible).

Modelo Generalizado de los Patrones Espectrales del R-IRC

Con el uso como referencia de los patrones espectrales de los cambios en el follaje de la vegetación (Sinclair *et al.*, 1971; Boyer *et al.*, 1988; Gitelson y Merzlyak, 1994; Merzlyak y Gitelson, 1995),

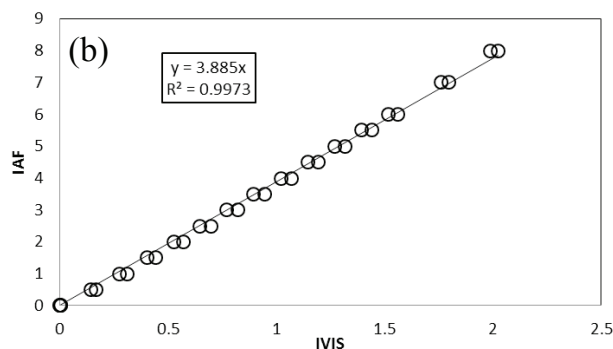


Figura 5. Relación entre el IVIS y el IAF (índice de área foliar) para (a) suelo oscuro y (b) suelo claro, con cambios de suelo seco a suelo húmedo.

se puede modelar la respuesta de los fitoelementos de una planta durante su dinámica de crecimiento (Jacquemoud y Baret, 1990; Jacquemoud *et al.*, 1996). Con este conocimiento, es posible plantear un modelo generalizado de patrones espectrales del R-IRC, que considere el ciclo de crecimiento de los cultivos (vegetación herbácea), desde su emergencia hasta su senescencia. Baret (1986)¹ presenta evidencia experimental en cultivos de cereales de este tipo de patrones; aunque solo a niveles informativos.

La Figura 6 muestra la dinámica del IAF durante el ciclo de crecimiento de un cultivo, que utiliza el espacio temporal; y, la Figura 7 usa el espacio espectral del R-IRC, con el uso de dos tipos de suelos como fondos. De estas figuras podemos definir tres patrones generales:

a).- Patrón A: Esta etapa va desde la emergencia a la madurez fisiológica del cultivo, hasta la antesis. En el espacio temporal se caracteriza por un crecimiento exponencial del follaje, hasta lograr el cubrimiento máximo del suelo y después hay una transición a un crecimiento tipo lineal, Figura 6. El patrón discutido puede ser modelado en forma simple con el uso de un modelo expo-lineal de crecimiento (Goudriaan, 1977; Goudriaan y Monteith, 1990). En el espacio espectral, esta dinámica se caracteriza por la evolución de las curvas iso-IAF hasta alcanzar el punto de saturación del rojo (reflectancia de medio denso), Figura 7. En relación a las propiedades ópticas de las hojas, estas sufren cambios (patrones exponenciales), que reflejan los cambios en las concentraciones de pigmentos (clorofilas y carotenoides, principalmente) en la región visible (espacio del R). En el IRC, los cambios son más pequeños.

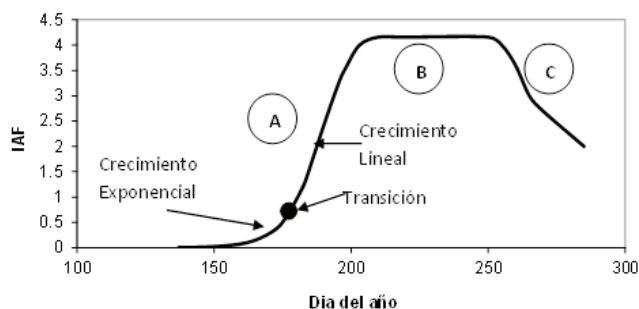


Figura 6. Patrón temporal del IAF (índice de área foliar) de un cultivo.

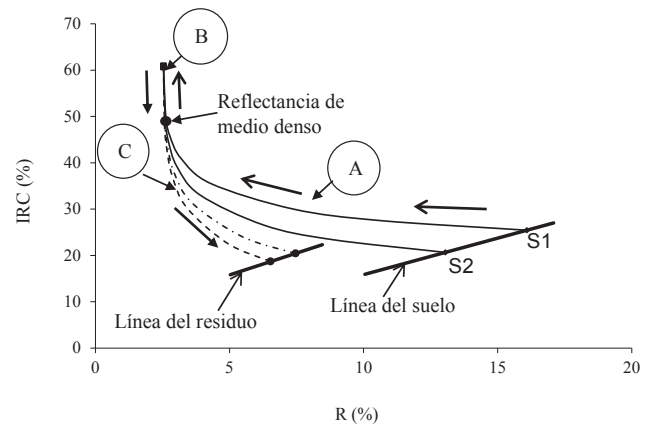


Figura 7. Patrón espectral en el espacio R-IRC del crecimiento de un cultivo. R = rojo; IRC = infrarrojo cercano.

b).- Patrón B. Va desde la antesis hasta antes del inicio de la senescencia y se caracteriza por un IAF constante (nacimiento y muerte de hojas en equilibrio), Figura 6. En el espacio espectral del R-IRC, este patrón se caracteriza porque la reflectancia del R permanece relativamente constante y el IRC se incrementa y después disminuye, Figura 7, que refleja los cambios que se producen en el follaje de las plantas, donde la etapa de disminución del IRC refleja una degradación inicial del mesófilo de las hojas (Gausman *et al.*, 1978; Gitelson y Merzlyak, 1994; Jacquemoud y Baret, 1990). Es importante enfatizar, que en muchos cultivos en que no se logra el cubrimiento total del suelo (y la densidad del follaje suficiente), la línea recta que caracteriza este patrón está ligeramente inclinada. Adicionalmente, la línea recta mostrada en la Figura 7 generalmente forma un óvalo alargado, producto de la floración / llenado de grano que se presenta al inicio de esta etapa del crecimiento.

c).- Patrón C. Va desde el inicio de la senescencia hasta la cosecha o muerte del cultivo. El espacio temporal se caracteriza por un patrón tipo exponencial, Figura 1. El patrón es similar en espacio del R-IRC y se caracteriza por el incremento del R debido a la degradación de los pigmentos de las hojas y la reducción del IRC por el deterioro de la estructura del mesófilo.

En el caso de la muerte del cultivo y su transformación a residuo vegetal cubriendo el suelo, la curva final de residuos es lineal (Wanjura y Bilbro, 1986; Baird y Baret, 1997).

¹ Baret, F. 1986. Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales. Thèse de doctorat en Sciences biologiques. Université de Paris-Sud. Faculté des Sciences d'Orsay. Orsay, Paris. 182 pp.

Un punto importante de señalar es que, al inicio de la etapa de senescencia, el patrón espectral de las curvas iso-IAF es muy similar al de la etapa B, por lo que es posible caracterizar la etapa B, con el uso de esta información.

De acuerdo a lo mostrado en la Figura 6, después de la fase lineal del patrón A, se presenta una fase exponencial hasta llegar al punto de la meseta en el IAF. La fase lineal se representa en la Figura 6 como el patrón B en su etapa creciente y el exponencial posterior como la fase decreciente de este patrón. En esta situación, el modelo expo-lineal requiere generalizarse para una nueva fase.

En relación al uso de los índices de vegetación para estimar f_v , los resultados muestran relaciones diferentes para la etapa vegetativa-reproductiva y la de senescencia (Gilabert *et al.*, 1996; Odi *et al.*, 2010), por lo que es importante el desarrollo de un IV que tenga una relación única con la vegetación, durante todo el ciclo de crecimiento.

Estandarización de los Efectos de la Geometría Sol-Sensor

La estandarización de los efectos de la geometría sol-sensor es un requisito para la obtención de índices espectrales de la vegetación homogéneos, particularmente para el caso de sensores remotos que cambian sus ángulos de observación, diferentes a nadir. Así, con el uso de la geometría definida en la Figura 8, donde θ_s es el ángulo cenital solar, ϕ_s es el ángulo acimutal solar, θ_v es el ángulo cenital de

visión y ϕ_v el ángulo acimutal de visión, podemos usar un esquema de modelación asociado a esta geometría, pero simplificado al utilizar simetrías angulares.

Para desarrollar un modelo general de la BRDF (función de distribución de la reflectancia, por sus siglas en inglés) aplicable a todas las bandas espectrales, se utilizó un plano de simetría genérico. El plano de simetría seleccionado fue $\chi = 90 - \theta_v + \theta_s$, donde θ_v no tiene signo. Las reflectancias normalizadas están definidas como $R_n = R \cos(\chi)$ (más adelante se utiliza R para referirse a solo la banda del R).

Bolaños *et al.* (2007) y Bolaños y Paz (2010) plantearon el uso de un modelo de los ángulos cenitales de visión e iluminación de un solo parámetro, reduciendo así la complejidad de los esquemas de clasificación de la vegetación. Así, si definimos el vector de visión (θ_v, ϕ_v) y el de iluminación (θ_s, ϕ_s), donde θ es un ángulo cenital y ϕ el acimutal, v significa visión y s iluminación solar, el modelo definido está dado por:

$$\begin{aligned}\chi &= 90 - \theta_v + \theta_s \\ R_n &= \ln(R) \cos(\chi) \\ \chi &= f + g_R R_n\end{aligned}\tag{11}$$

donde: se utiliza un valor de $f = 90$ para obtener un punto adicional y poder estimar g_R . El uso de la función $\cos(\chi)$ como factor multiplicativo de R permite definir un punto del patrón $R_n - \chi$, ya que $\cos(90^\circ) = 0$, por lo que $R_n = 0$ en $\chi = 90^\circ$ ($\theta_v = \theta_s$; es decir, el plano del *Hot Spot*). El ángulo θ_v no tiene signo.

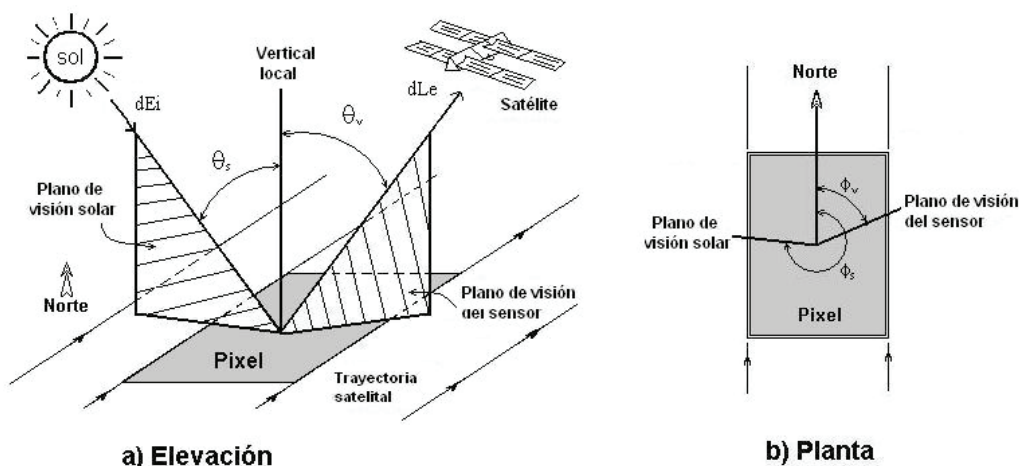


Figura 8. Geometría sol-sensor de iluminación y visión.

El modelo uni-paramétrico de la BRDF ha sido analizado en relación a modelos más complejos (más parámetros) y operativos, comportándose en forma excelente en reproducir los parámetros de estos modelos (Medrano *et al.*, 2013).

De las relaciones (11), el parámetro g_R puede ser estimado con un solo dato de R (cualquier banda espectral):

$$g_R = \frac{90 - \chi}{Rn} \quad (12)$$

Con el uso de la notación de ángulos acimutales positivos en la dirección de las manecillas del reloj, es posible un modelo general de la BRDF que considera al parámetro g de los efectos de los ángulos cenitales de visión e iluminación:

$$\text{Si } \phi_s < \phi_v, d\phi = 360 - (\phi_v - \phi_s)$$

$$\text{Si } \phi_s > \phi_v, d\phi = (\phi_v - \phi_s)$$

$$\text{Si } d\phi \leq 180, d\phi_p = d\phi$$

$$\text{Si } d\phi > 180, d\phi_p = 360 - d\phi$$

$$\text{Si } d\phi_p \leq 90, \zeta = d\phi_p + \theta_s \quad (13)$$

$$\text{Si } d\phi_p > 90, \zeta = d\phi_p - \theta_s$$

$$g_R n = g_R \cos(\zeta)$$

$$\zeta = 90 + G_R g_R n$$

El modelo de las relaciones (13) sigue el mismo esquema que el de las (11), donde ζ es una variable de posición que hace simétricos los patrones de g . Los ángulos cenitales θ_s son considerados en términos de sus posiciones: plano (semi-hemisferio) de iluminación y sombreado.

Al igual que en el caso del parámetro g_R , G_R puede ser estimada de:

$$G_R = \frac{\zeta - 90}{gn} \quad (14)$$

Conocido el valor de g_R de la relación (12) y el de G_R de la relación (14), con el uso de un solo dato de R e IRC, para una geometría sol-sensor dada, el siguiente paso es estandarizar la geometría. Para eso podemos usar el plano principal, $d\phi = 0$ y usar las relaciones (11)

para estimar el parámetro g_R , para el ángulo cenital de iluminación actual:

$$g_R \{d\phi = 0\} = \frac{\theta_s - 90}{G_R \cos(\theta_s)} \quad (15)$$

Con el valor de g_R para $d\phi = 0$, se puede estimar el valor de la reflectancia normalizada a nadir ($\theta_v = 0$) de las relaciones (11):

$$Rn \{\theta_v = 0; d\phi = 0\} = -\frac{\theta_v}{g_R \{d\phi = 0\}} \quad (16)$$

Así, para una geometría estandarizada de $\theta_v = 0$ y $d\phi = 0$, podemos ahora definir un valor de las reflectancias para un θ_v estandarizado. En nuestro caso, el valor usado es $\theta_v = 0$. En el algoritmo discutido más adelante se considera la estandarización de la geometría sol-sensor con el uso de $\theta_s = 30$, $\theta_v = 0$ y $d\phi = 0$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diseño de Índices de Vegetación en Espacios Normalizados y Estandarizados

Con el uso de las simulaciones de radiación de la Figura 2, normalizándolas (con multiplicación por -1 para hacerlas positivas) y estandarizándolas a la geometría sol-sensor definida, la Figura 9 muestra los patrones iso-IAF o iso- f_v en el espacio Rn -IRCn.

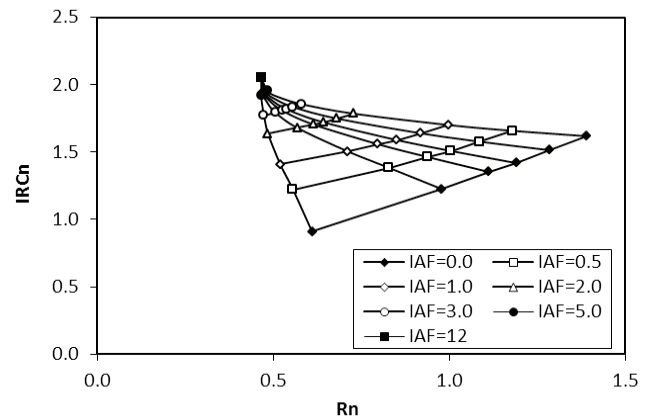


Figura 9. Patrones del crecimiento de la vegetación en el espacio Rn -IRCn. IAF = índice de área foliar.

Con el uso de los análisis previos, una primera propuesta puede ser utilizar reflectancias normalizadas (letra n) y definir el índice IVIS en función de estas:

$$IVISn = -\ln\left(\frac{dIRC_{\infty n} - dIRCn}{dIRC_{\infty n} - dIRCsn}\right)$$

$$dIRCn = IRCn - (a_{sn} + b_{sn} Rn)$$

$$dIRC_{\infty n} = IRC_{\infty n} - (a_{sn} + b_{sn} R_{\infty n})$$

$$dIRCsn = IRCsn - (a_{sn} + b_{sn} Rsn)$$
(17)

Conocidos los parámetros de la línea del suelo (o supuestos como asociados a una línea del suelo “virtual”), espacios normalizados y estandarizados, entonces tenemos que $dIRCsn = 0$, por lo que la Ecuación 17 se simplifica a:

$$IVISn = -\ln\left(1 - \frac{dIRCn}{dIRC_{\infty n}}\right)$$
(18)

El uso de reflectancias normalizadas y estandarizadas evita el problema asociado a los errores en el espacio R-IRC al realizar estas estimaciones a partir de Rn e $IRCn$ (Bolaños *et al.*, 2007). Con este enfoque es posible reducir fuertemente la propagación de errores.

La Figura 10 muestra la relación entre el índice de área foliar (IAF) y el IVISn para el caso de las simulaciones de radiación de la Figura 9, caso de suelo claro (seco y húmedo).

Se observa de la Figura 10 que la relación entre el IAF y el IVISn es aproximadamente exponencial, por lo que se requiere realizar una transformación logarítmica del IAF. Dado que $\ln(IAF = 0)$ no está definido, se usó la variable $IAF+1$, $\ln(IAF = 0 + 1) = 0$, tal como se muestra en la Figura 11.

De la Figura 11, es claro que la transformación logarítmica usada genera una relación lineal; aunque para valores del $IAF > 5$ se nota una desviación del patrón lineal.

De los patrones iso-suelo de la Figura 9, cuasi-lineales, es posible introducir un nuevo índice espectral de la vegetación que este armonizado a la normalización de las reflectancias, convirtiendo los patrones exponenciales de las líneas iso-suelo en lineales. El índice IV_PELANA (Índice de Vegetación de Proporciones Estandarizadas en relación al Límite Asociado a espacios Normalizados y sus Atrayentes) definido por:

$$IV_PELANA = \frac{dIRCn}{dIRC_{\infty}} \quad (19)$$

cumple el objetivo planteado en relación a la variable f_v .

La Figura 12, similar a la Figura 5, pero con reflectancias normalizadas y estandarizadas, muestra que la relación entre el IV_PELANA y f_v cumple los objetivos planteados para un IV (Huete *et al.*, 1994). La Figura 12 muestra valores del IAF de 0 a 8, convertidos a f_v .

Validación de la Relación del IV_PELANA con f_v con el uso de Datos Experimentales

Para validar el modelo lineal entre el IV_PELANA y f_v , en lo siguiente se analizan diferentes experimentos publicados previamente, bajo diferentes perspectivas. En los análisis siguientes no se consideró realizar un análisis comparativo con otros índices de vegetación dado que esto ya fue realizado en otras contribuciones

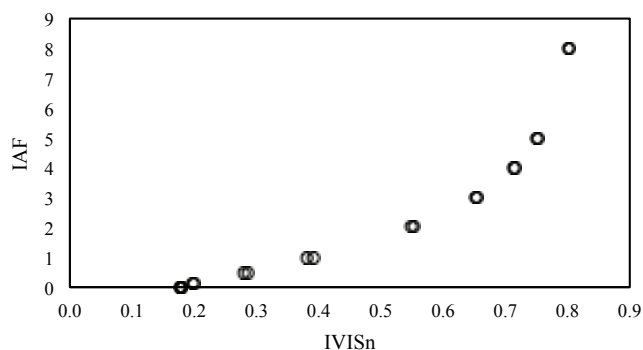


Figura 10. Relación entre el IAF e IVISn para las simulaciones radiativas (suelo claro).

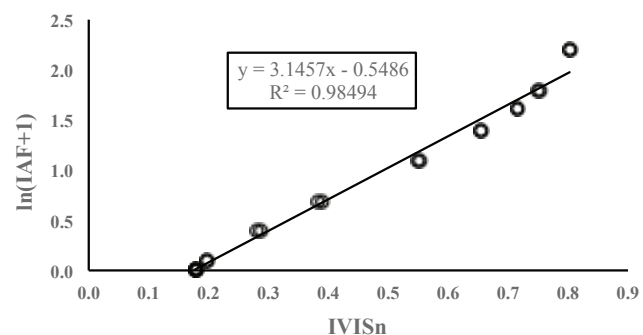


Figura 11. Relación entre $\ln(IAF+1)$ e IVISn para las simulaciones radiativas (suelo claro con cambios de humedad).

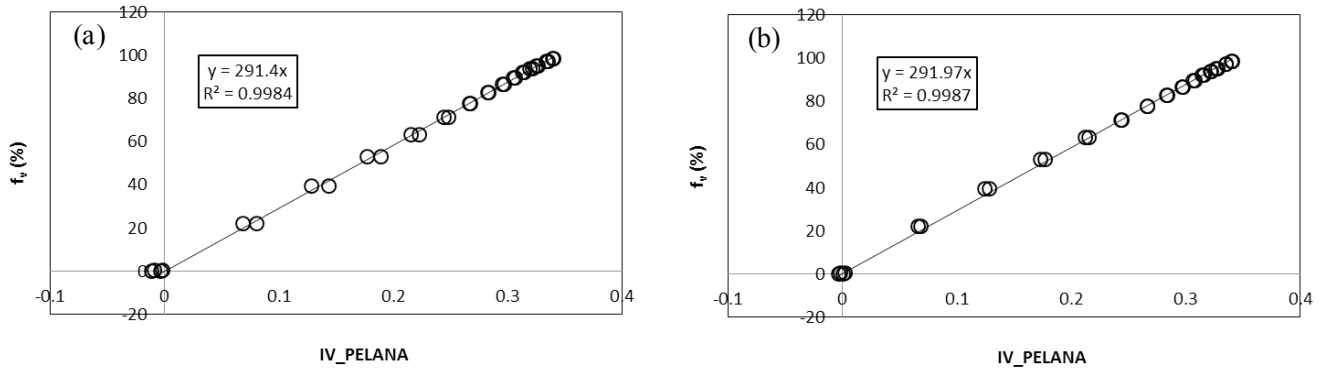


Figura 12. Relación entre el IV_PELANA y f_v para (a) suelo oscuro y (b) suelo claro, con cambios de suelo seco a suelo húmedo (IAF (índice de área foliar) de 0 a 8).

(Huete, 1988; Gilabert *et al.*, 1996; Paz *et al.*, 2007, 2011 y 2015; Romero *et al.*, 2009; Odi *et al.*, 2010).

Experimentos de Cultivos Agrícolas con Diferentes Suelos

Los experimentos de algodón de Huete *et al.* (1985) y el de maíz de Bausch (1993), discutidos ampliamente en Paz *et al.* (2007 y 2011), utilizaron charolas rellenas de suelos diferentes puestos debajo de los cultivos, por lo que simulan los patrones mostrados en la Figura 2. La Figura 13 muestra la evolución temporal del f_v de los cultivos, los cuales cubren la etapa vegetativa y reproductiva, hasta el valor máximo de crecimiento (IAF o f_v). En lo siguiente, todos los valores de reflectancia están en porcentajes.

La Figura 14 muestra la relación IV_PELANA con el f_v para el algodón, con distintos tipos de suelos

(oscuros y claros), que considera cambios de humedad en cada uno de ellos.

Se observa de la Figura 14, que la relación lineal esperada entre IV_PELANA y f_v se presenta, aunque para el caso de un suelo oscuro (Figura 14a) se presenta un patrón con tendencia no lineal, la estimación del IV_PELANA usó un suelo virtual ($a_{sn} = 0$ y $b_{sn} = 0.8$), por lo que el valor mínimo no es 0.0.

La Figura 15 muestra la relación IV_PELANA con f_v para el caso del cultivo de algodón, de un suelo oscuro y uno claro, con variaciones de humedad en cada uno de ellos.

En el caso del cultivo de maíz no se midió f_v , por lo que fue estimada la relación (10) con el uso de un coeficiente de extinción estimado. Paz *et al.* (2011) muestran relaciones lineales entre el IVIS y el IAF, lo que valida en forma indirecta las relaciones de la Figura 15.

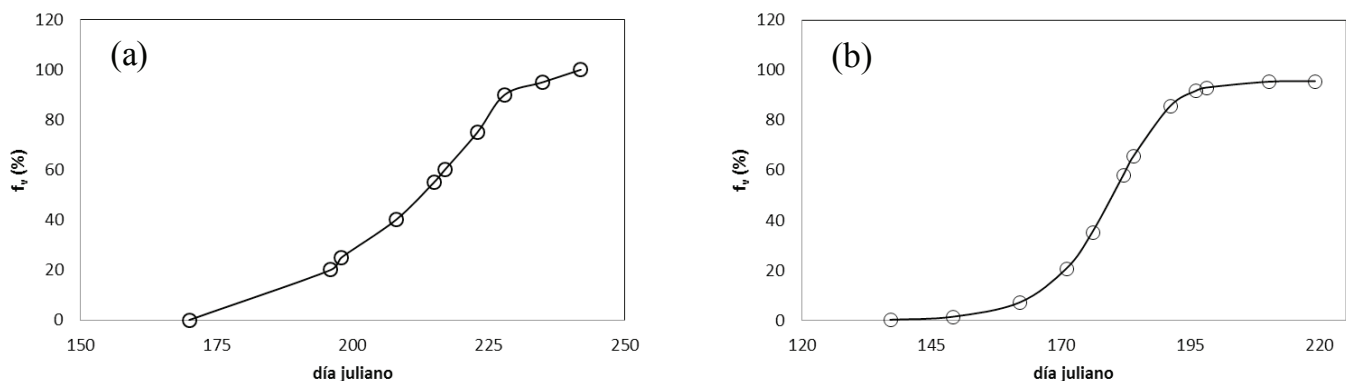


Figura 13. Evolución temporal de f_v : (a) algodón y (b) maíz.

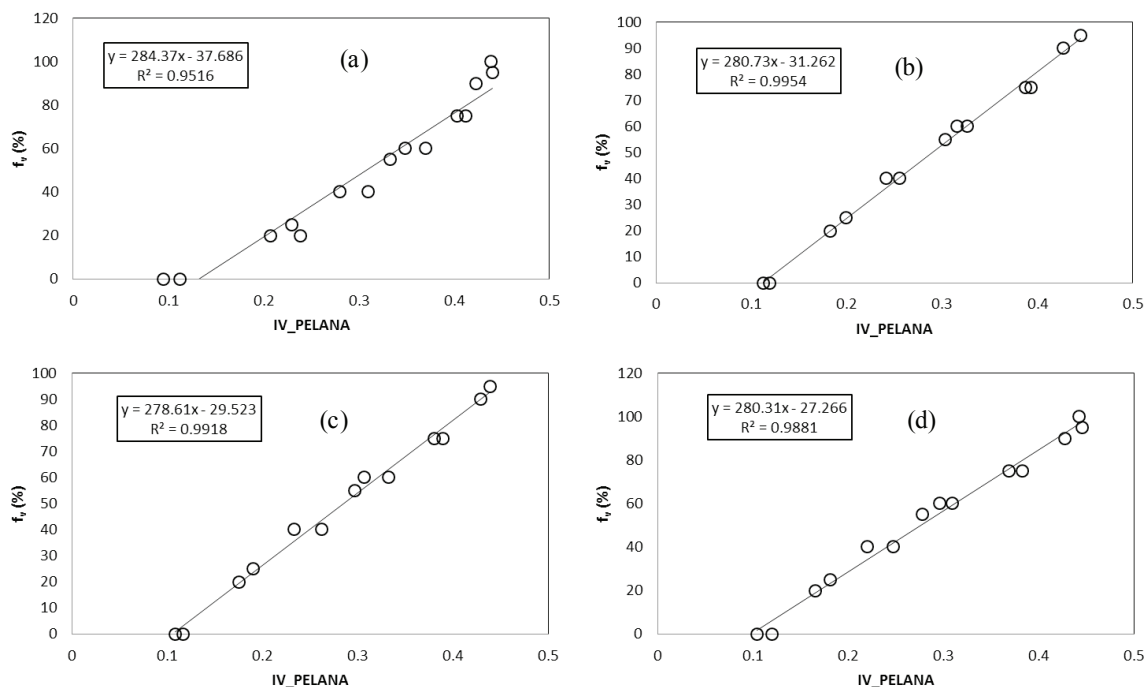


Figura 14. Relación entre el IV_PELANA y f_v para el cultivo de algodón con distintos tipos de suelos debajo del cultivo: (a) oscuro 1 ($R_s = 2.9$ a 6.2); (b) oscuro 2 ($R_s = 12.6$ a 15.8); (c) claro 1 ($R_s = 10.7$ a 18.8); (d) claro 2 ($R_s = 18.7$ a 33.7).

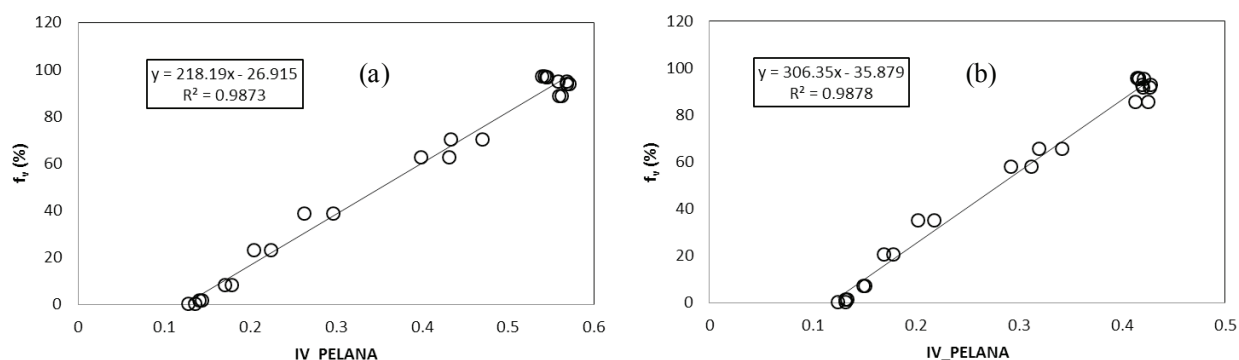


Figura 15. Relación entre el IV_PELANA y f_v para el cultivo de maíz con distintos tipos de suelos debajo del cultivo: (a) oscuro ($R_s = 6.0$ a 12.0); (b) claro ($R_s = 16.0$ a 30.1).

Experimentos de Cultivos Agrícolas con Suelos Similares y Diferentes Niveles de Estrés

En un experimento realizado el 2008 en el Valle del Yaqui, Sonora, México, se midieron las reflectancias semanales en parcelas homogéneas (PH) en cinco cultivos agrícolas (sorgo, trigo, frijol, garbanzo y cártamo). Los suelos tuvieron propiedades ópticas similares entre sí. La Figura 16 muestra el arreglo experimental usado por PH, donde se establecieron dos líneas de muestreo y en cada una de ellas cinco puntos

de muestreo. Las mediciones durante toda la campaña fueron realizadas en los mismos puntos establecidos, lo cuales quedaron fijos. Reyes *et al.* (2011) y Pascual *et al.* (2012) detallan la campaña de muestreo y resultados obtenidos.

Las variables biofísicas medidas fueron la biomasa fresca y seca y la f_v . Aunque existen diferentes formas de medir la cobertura del área foliar (Coulloudon *et al.*, 1996), en este caso se usaron fotografías digitales a nadir, las cuales fueron procesadas con el uso de técnicas de clasificación estadística supervisada

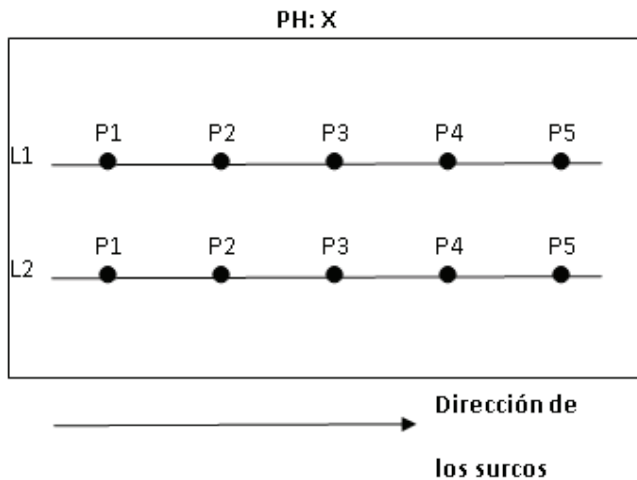


Figura 16. Diseño experimental de muestreo en las parcelas homogéneas en la campaña del Valle del Yaqui, Sonora, México.

(Calera *et al.*, 2001) para determinar f_v . Este tipo de método se compara relativamente bien con otros de mayor esfuerzo y tiempo; aunque es dependiente de los algoritmos usados para determinar la fracción de vegetación verde (Booth *et al.*, 2006).

Los cultivos sorgo, trigo, frijol, garbanzo y cártamo fueron evaluados en diferentes etapas de su crecimiento (sembrados en fechas diferentes), tal como se muestra en la Figura 17. Los gráficos de la evolución temporal de f_v son solo representativos a nivel genérico, donde para cultivos específicos los diferentes puntos de muestreo muestran fechas diferentes de alcance del f_v máximo, así como del valor de éste. Reyes *et al.* (2011) analizaron los puntos de muestreo en forma individual para caracterizar los niveles de estrés a que estuvieron sujetos, por lo que en lo siguiente se considera un formato similar.

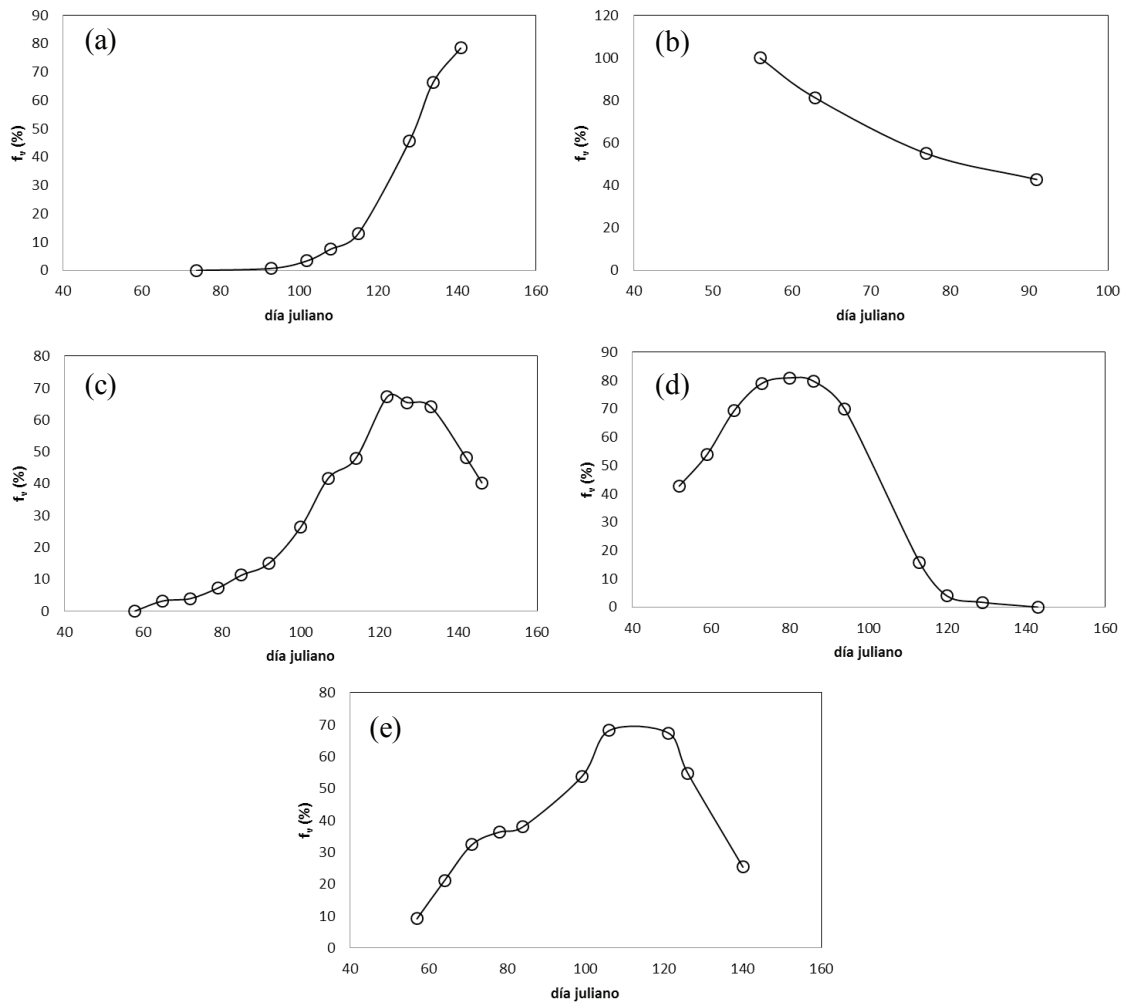


Figura 17. Patrones típicos de la evolución temporal del f_v de los cultivos agrícolas de la campaña del Valle del Yaqui, Sonora, México: (a) sorgo, (b) trigo, (c) frijol, (d) garbanzo y (e) cártamo.

El Cuadro 1 muestra los resultados de los ajustes de la relación IV_PELANA con f_v ($f_v = a + bIV_PELANA$) para los cultivos analizados, para la etapa vegetativa-reproductiva y la de senescencia como un todo, cuando las etapas estaban presentes. En el caso del trigo solo se muestreo la etapa de senescencia y solo se consideraron los muestreos que tuvieran cuatro datos temporales. Para el caso del sorgo, solo se realizó medición en la etapa vegetativa-reproductiva. El IV_PELANA mínimo representa el valor del índice para la condición sin cultivo (suelo desnudo), ya que se usó una línea virtual del suelo.

En el Cuadro 1 se muestran los valores de f_v máximo, que pueden ser usados como una medida del nivel de estrés de cada punto de muestreo, que concuerda con lo planteado por Reyes *et al.* (2011).

Las Figuras 18 a 22 muestran el mejor y peor ajuste estadístico a la relación lineal entre el IV_PELANA y f_v , para los cultivos analizados, de acuerdo a los errores asociados a las mediciones en campo y los patrones observados, la hipótesis de la relación lineal se puede considerar como válida para este experimento.

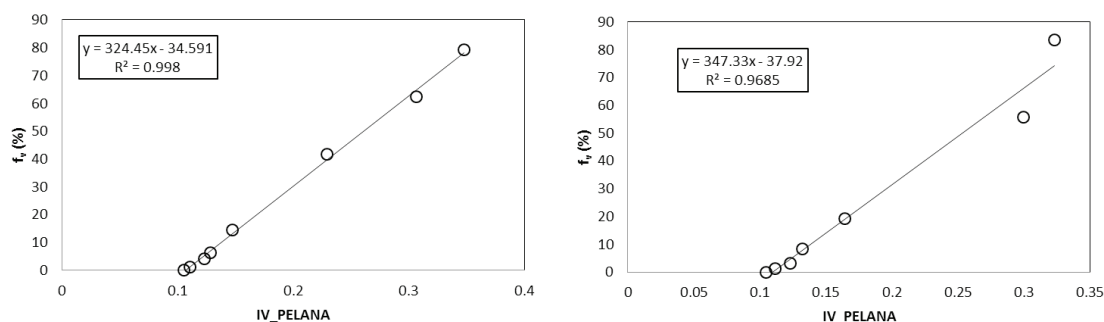


Figura 18. Relación IV_PELANA con f_v , cultivo sorgo, para el mejor y peor ajuste estadístico.

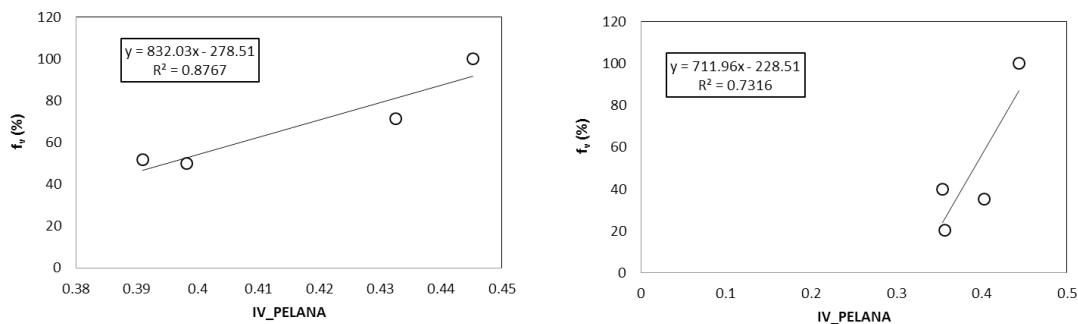


Figura 19. Relación IV_PELANA con f_v , cultivo trigo, para el mejor y peor ajuste estadístico

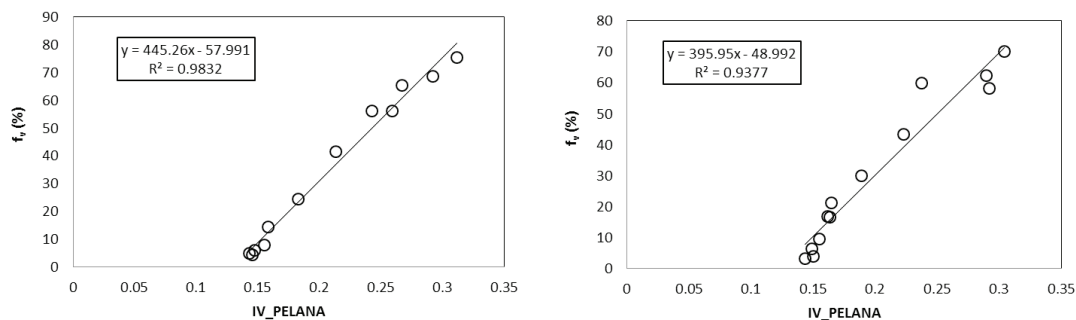


Figura 20. Relación IV_PELANA con f_v , cultivo frijol, para el mejor y peor ajuste estadístico.

Cuadro 1. Resultados del ajuste de la relación IV_PELANA con fv en Valle del Yaqui.

Cultivo	Línea	Punto	a	b	R ²	IV_PELANA Min	fv max
Sorgo	1	1	-29.666	290.49	0.9889	0.102	63.371
	1	2	-28.808	300.36	0.9769	0.096	75.177
	1	3	-30.284	290.79	0.9974	0.104	70.136
	1	4	-28.899	286.42	0.9775	0.101	67.431
	1	5	-30.011	297.81	0.9800	0.101	74.295
	2	1	-37.162	343.36	0.9921	0.108	78.522
	2	2	-34.591	324.45	0.9980	0.107	79.149
	2	3	-34.726	323.09	0.9932	0.107	75.085
	2	4	-28.776	276.32	0.9970	0.104	79.873
	2	5	-37.920	347.33	0.9685	0.109	83.575
Trigo	1	4	-253.25	770.47	0.8305	0.329	100.000
	1	5	-228.51	711.96	0.7316	0.321	100.000
	2	3	-278.51	832.03	0.8767	0.335	100.000
Frijol	1	1	-49.243	408.19	0.9733	0.121	70.904
	1	2	-42.866	363.24	0.9751	0.118	68.949
	1	3	-38.880	342.25	0.9537	0.114	67.214
	1	4	-50.029	405.85	0.9751	0.123	75.083
	1	5	-48.992	395.95	0.9377	0.124	69.924
	2	1	-44.257	360.08	0.9586	0.123	66.986
	2	2	-41.767	344.52	0.9636	0.121	75.704
	2	3	-57.991	445.26	0.9832	0.130	75.535
	2	4	-39.867	339.93	0.9559	0.117	65.073
	2	5	-50.589	385.13	0.9725	0.131	61.906
Garbanzo	1	1	-43.886	371.57	0.9781	0.118	80.925
	1	2	-40.318	367.81	0.9071	0.110	77.157
	1	3	-41.953	371.69	0.9401	0.113	60.045
	1	4	-33.798	335.34	0.9295	0.101	61.740
	1	5	-36.178	331.18	0.8888	0.109	55.120
	2	1	-50.612	397.96	0.9669	0.127	85.348
	2	2	-56.372	424.42	0.9783	0.133	88.235
	2	3	-44.332	377.36	0.9614	0.117	81.918
	2	4	-44.007	373.03	0.9444	0.118	80.929
	2	5	-51.232	413.1	0.9778	0.124	71.419
Cártamo	1	1	-21.348	252.46	0.9612	0.085	69.787
	1	2	-26.744	259.23	0.9617	0.103	73.348
	1	3	-21.543	236.48	0.9728	0.091	61.739
	1	4	-20.355	232.24	0.9215	0.088	63.172
	1	5	-19.821	229.69	0.8445	0.086	68.136
	2	1	-35.465	316.96	0.9407	0.112	87.623
	2	2	-30.779	291.29	0.9256	0.106	81.656
	2	3	-37.827	329.46	0.9750	0.115	88.039
	2	4	-29.919	289.52	0.9546	0.103	72.376
	2	5	-39.765	330.89	0.9478	0.120	87.028

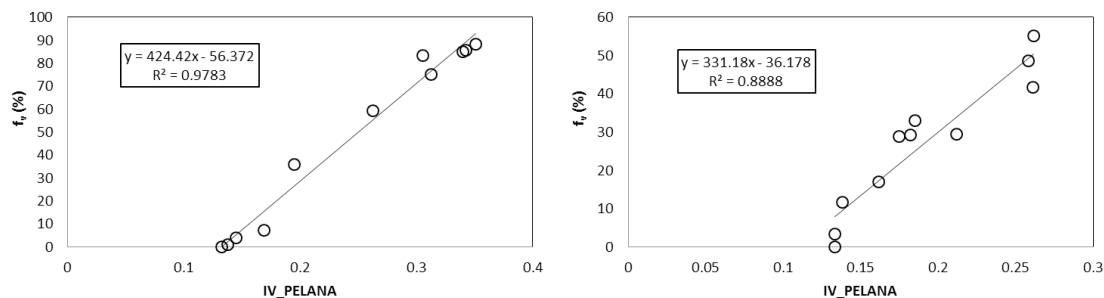


Figura 21. Relación IV_PELANA con f_v , cultivo garbanzo, para el mejor y peor ajuste estadístico.

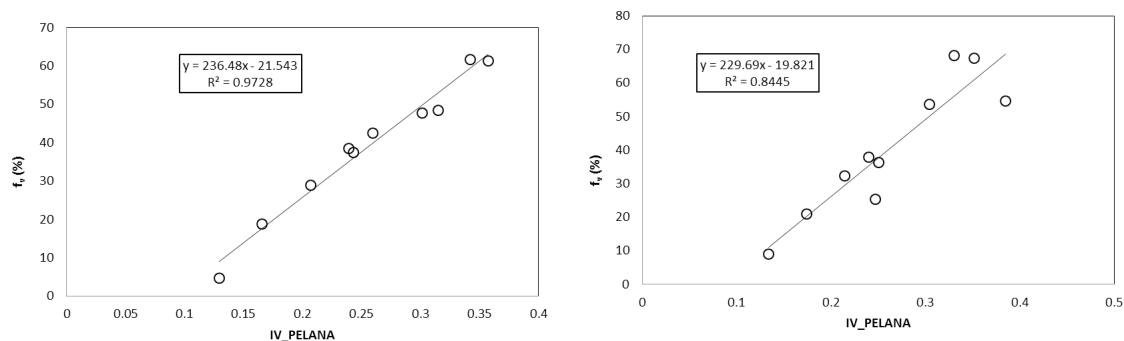


Figura 22. Relación IV_PELANA con f_v , cultivo cártamo, para el mejor y peor ajuste estadístico.

Experimento de Pasto con Mediciones Multi-Angulares de Reflectancia

La Figura 23 muestra la evolución temporal de la biomasa total y la viva (verde) de mediciones multi-angulares de reflectancia realizadas en un pastizal natural (*Buteloua* spp.) en la cuenca de Walnut Gulch, Arizona, E.U.A. en 1990. El experimento está descrito en Huete *et al.* (1992),

Chehbouni *et al.* (1994) y Qi *et al.* (1994). El análisis de las reflectancias multi-angulares se discute en Bolaños *et al.* (2007) y Bolaños y Paz (2010).

En la Figura 24 se muestra la relación entre el IV_PELANA y f_v del experimento de Walnut Gulch, donde f_v fue estimada convirtiendo la biomasa aérea viva a IAF y de allí a f_v , bajo la consideración de un f_v máximo del 40 %, definido en el experimento.

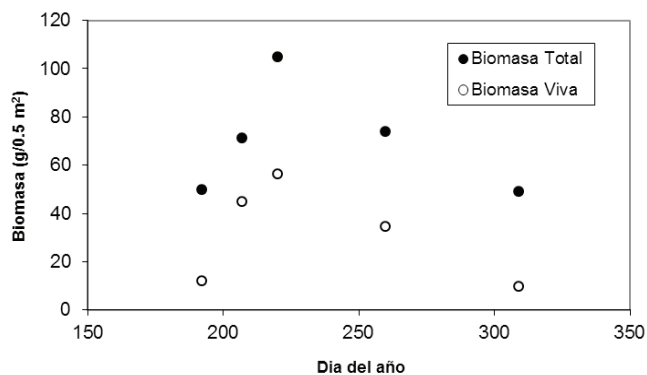


Figura 23. Evolución temporal de la biomasa total y viva del experimento de Walnut Gulch, Arizona.

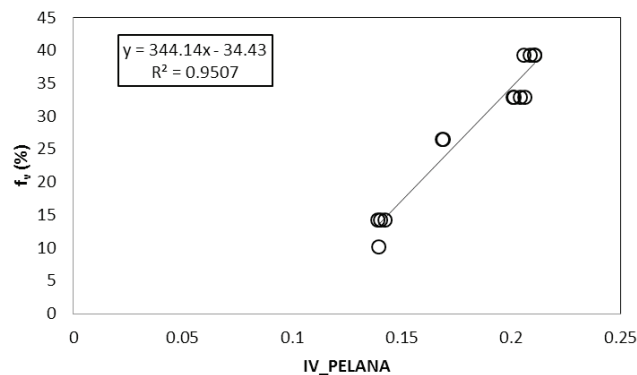


Figura 24. Relación entre IV_PELANA y f_v para el experimento de Walnut Gulch, Arizona.

Experimento Tipos Maqueta

Los experimentos tipo maqueta se refieren a arreglos de plantas, con un suelo debajo de ellas, en una plataforma de medición de reflectancias. En general, las plantas son pequeñas (juveniles) y son las mismas para diferentes densidades (IAF o biomasa aérea)

La Figura 25 muestra la relación IVIS con IAF para el caso de un pasto analizado por Xia (1994) con dos suelos diferentes. Paz *et al.* (2011) establecieron una relación lineal para esta situación, por lo que se valida este patrón. Bajo la consideración de la existencia de la relación lineal del IVIS con el IAF, la relación lineal IV_PELANA con f_v es consecuencia.

Con el uso de la relación (10) y un valor conservador de alrededor del 85% de f_v para un IAF de 8.0, la Figura 26 muestra la relación entre IV_PELANA y el f_v para el pasto.

Para un experimento relativamente similar con otro pasto (Huete y Jackson, 1988; Huete *et al.*, 1992), la Figura 26 muestra la relación entre el IV_PELANA y f_v , esta última variable estimada después de convertir la biomasa aérea a IAF y de IAF a f_v , todo esto en términos aproximados.

En el caso de este experimento de pastos, diferentes densidades, se utilizaron tres suelos debajo de los pastos, lo cual está mostrado en la Figura 27. Las relaciones lineales entre el IV_PELANA y f_v son buenas ($R^2 > 0.97$).

Efectos de la Distribución Angular y Propiedades Ópticas de las Hojas

En la Figura 2 (Paz *et al.*, 2005) las simulaciones de radiación corresponden a propiedades ópticas (transmitancia y reflectancia) de hojas de maíz (Gausman *et al.*, 1978) y distribución angular erectófila (Bunnik, 1978). La Figura 28 muestra estas mismas simulaciones, para los suelos extremos en propiedades ópticas, pero incluyendo el caso de una hoja de sorgo. Como se observa, las reflectancias en el infinito se modifican, por lo que cambian también las relaciones entre el IVIS-IAF (IV_PELANA- f_v).

Si dejan fijas las propiedades ópticas de las hojas (maíz), la Figura 29 muestra los cambios en la distribución angular de las hojas, produciendo efectos similares a los discutidos para la Figura 28.

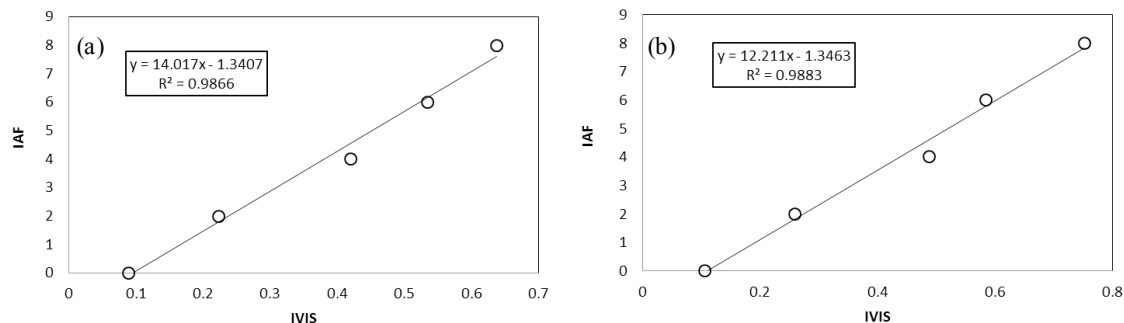


Figura 25. Relación entre el IVIS y el IAF (índice de área foliar) para el pasto, con diferentes suelos: (a) oscuro ($R_s = 9.0$); (b) claro ($R_s = 31.0$).

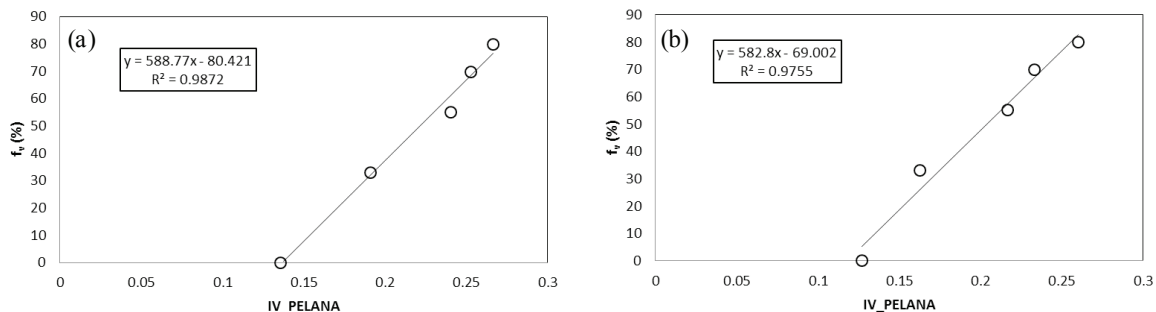


Figura 26. Relación entre el IV_PELANA y el f_v para el pasto, con diferentes suelos: (a) oscuro ($R_s = 9.0$) y (b) claro ($R_s = 31.0$).

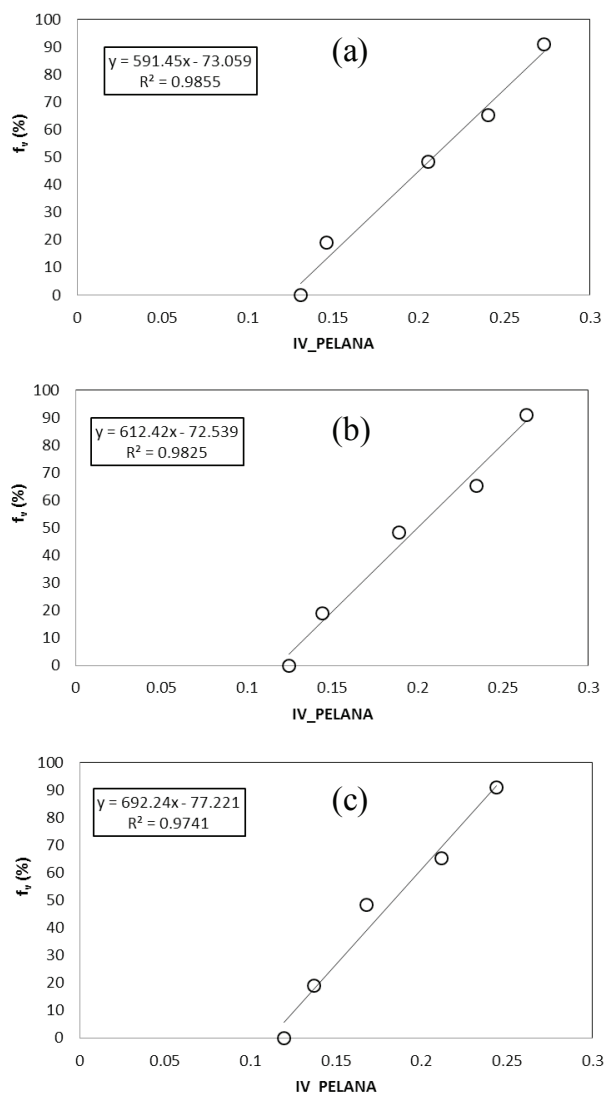


Figura 27. Relación entre el IV_PELANA y el f_v para otro pasto, con diferentes suelos: (a) oscuro ($R_s = 8.1$), (b) medio ($R_s = 15.5$); (c) claro ($R_s = 37.5$).

No obstante, los cambios mostrados en las figuras 28 y 29, Casiano *et al.* (2012) plantean la hipótesis de invarianza temporal en los atrayentes (reflectancias en el infinito) de las dinámicas del crecimiento de la vegetación. Las reflectancias en el infinito son dependientes de las propiedades ópticas y de la distribución angular de las hojas (Ross, 1981), por lo que de acuerdo a la hipótesis de invarianza temporal, las plantas modifican simultáneamente ambas propiedades para mantener las mismas reflectancias en el infinito, aun bajo condiciones de estrés. Esto implica que los patrones entre el IV_PELANA y el f_v se mantienen similares para un tipo dado de suelo.

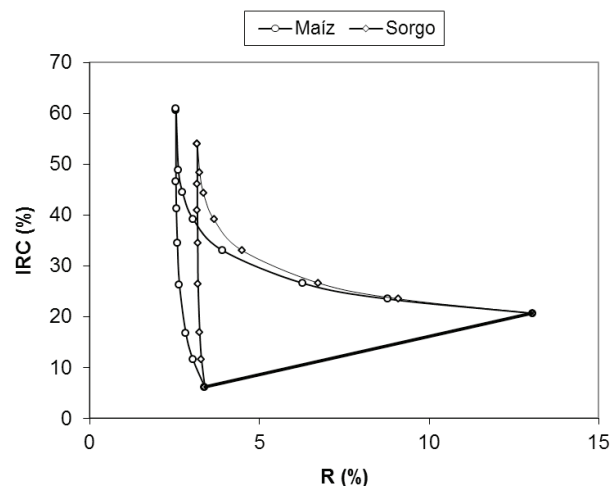


Figura 28. Efecto de cambiar las propiedades ópticas de las hojas, manteniendo una distribución angular erectófila.

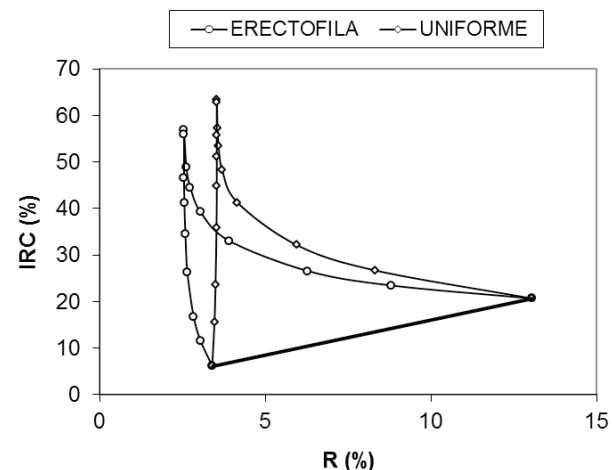


Figura 29. Efecto de cambiar la distribución de las hojas manteniendo las propiedades ópticas de las hojas (maíz).

CONCLUSIONES

- Los desarrollos mostrados en relación a los patrones de la transferencia de radiación en el medio suelo-vegetación, para la generación del índice espectral de la vegetación IV_PELANA , sin efectos de geometría sol-sensor, permitieron establecer una relación lineal con la cobertura aérea foliar (f_v), particularmente con la consideración de la no saturación del índice con f_v .
- Con datos experimentales analizados, de diferentes arquetipos de plantas herbáceas, se validó la relación lineal establecida, lo que permite el uso del IV_PELANA en forma robusta y operativa.

- La ventaja de la relación lineal entre el IV_PELANA y la cobertura aérea de la vegetación, entre otras cosas, es que permite su calibración en campo usando fotografías digitales para estimar la cobertura, que es un procedimiento de bajo costo y eficiente.
- El IV_PELANA, en su forma más simple y operativa, requiere del conocimiento de la línea del suelo para que la constante aditiva de su relación lineal con la cobertura aérea de la vegetación dependa de un solo parámetro (constante multiplicativa), de tal forma que con un solo dato se parametrice la relación.
- Aunque los desarrollos son válidos para la vegetación herbácea, en otro trabajo de los autores se analiza el caso de vegetación arbustiva y arbórea.

LITERATURA CITADA

- Baird, F. and F. Baret. 1997. Crop residue estimation using multiband reflectance. *Remote Sens. Environ.* 59: 530-536. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00125-3.
- Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.* 35: 161-173. doi: 10.1016/0034-4257(91)90009-U.
- Baret, F., J. G. P. W. Clevers, and M. D. Steven. 1995. The robustness of canopy gap fraction estimates from red and near-infrared reflectances: A comparison of approaches. *Remote Sens. Environ.* 54: 141-151. doi: 10.1016/0034-4257(95)00136-O.
- Baret, F., S. Jacquemoud, and J. F. Hanocq. 1983. The soil line concept in remote sensing. *Remote Sens. Rev.* 7: 65-82. doi: 10.1080/02757259309532166.
- Baumgardner, M. F., L. F. Silva, L. L. Biehl, and E. R. Stoner. 1985. Reflectance properties of soils. *Adv. Agron.* 38: 1-44. doi: 10.1016/S0065-2113(08)60672-0.
- Bausch, W. C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ.* 46: 213-222. doi: 10.1016/0034-4257(93)90096-G.
- 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.
- Bolaños G., M. A. y F. Paz P. 2010. Modelación general de los efectos de la geometría iluminación-visión en la reflectancia de pastizales. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 1: 349-361.
- Bonhomme, R. and C. Varlet-Grancher. 1977. Application aux couverts végétaux de lois rayonnement en milieu diffusant I. Etablissement des lois et vérifications expérimentales. *Ann. Agron.* 28: 567-582.
- Booth, D. T., S. E. Cox, T. W. Meikle, and C. Fitzgerald. 2006. The accuracy of ground-cover measurements. *Rangeland Ecol. Manage.* 59: 179-188. doi: 10.2111/05-069R1.1
- Boyer, M., J. Miller, M. Belanger, and E. Hare. 1988. Senescence and spectral reflectance in leaves of Northern Pin Oak (*Quercus palustris* Muenchh.). *Remote Sens. Environ.* 25: 71-87.
- Bunnik, N. J. J. 1978. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. Wageningen, The Netherlands.
- Calera, A., C. Martínez, and J. Meliá. 2001. A procedure for obtaining green plant cover: relation to NDVI in a case study for barley. *Int. J. Remote Sens.* 22: 3357-3362. doi: 10.1080/01431160010020100.
- Carlson, T. N. and D. A. Ripley. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sens. Environ.* 62: 241-252. doi: 10.1016/S0034-4257(97)00104-1.
- Casiano, M., F. Paz, A. Zarco, M. Bolaños y E. Palacios. 2012. Escalamiento espacial de medios heterogéneos espectrales usando invarianzas temporales. *Terra Latinoamericana* 30: 315-326.
- Chehbouni, A., Y. H. Kerr, J. Qi, A. R. Huete, and S. Sorooshian. 1994. Toward the development of a multidirectional vegetation index. *Water Resour. Res.* 30: 1281-1286. doi: 10.1029/93WR03063.
- Clevers, J. G. P. W. 1989. The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. *Remote Sens. Environ.* 29: 25-37. doi: 10.1016/0034-4257(89)90076-X.
- Coulloudon, B., K. Eshelman, J. Gianola, N. Habich, L. Hughes, C. Johnson, M. Pellant, P. Podboruy, A. Rasmussen, B. Robles, P. Shaver, J. Spehar, and J. Willoughby. 1996. Sampling vegetation attributes. Technical reference 1734-4. Bureau of Land Management. National Business Center. Denver, CO, USA.
- Eagleson, P. S. 1982. Ecological optimality in water-limited natural soil-vegetation systems. 1. Theory and hypothesis. *Water Resour. Res.* 18: 325-340. doi: 10.1029/WR018i002p00325.
- Gao, X., A. R. Huete, W. Ni, and T. Miura. 2000. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sens. Environ.* 74: 609-620. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00150-4.
- Gausman, H. W., W. A. Allen, C. I. Wiegand, D. E. Escobar, R. R. Rodriguez, and A. J. Richardson. 1978. The leaf mesophylls of twenty crops, their light spectra, and optical and geometrical parameters. Technical Bulletins 160035. USDA, Economic Research Service. Washington, DC, USA.
- Gilbert, M. A., S. Gandia, and J. Meliá. 1996. Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sens. Environ.* 55: 11-20. doi: 10.1016/0034-4257(95)00187-5.
- Gitelson, A. and M. N. Merzlyak. 1994. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *J. Plant Physiol.* 143: 286-292. doi: 10.1016/S0176-1617(11)81633-0.
- Gitelson, A. A., Y. J. Kaufman, R. Stark, and D. Rundquist. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sens. Environ.* 80: 76-87. doi: 10.1016/S0034-4257(01)00289-9.
- Goudriaan, J. 1977. Crop micrometeorology: A simulation study. Simulation Monographs. PUDOC. Wageningen, The Netherlands.
- Goudriaan, J. and J. L. Monteith. 1990. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Ann. Bot.* 66: 695-701.
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing Environ.* 25: 295-309. doi: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.

- Huete, A. R. and R. D. Jackson. 1988. Soil and atmosphere influences on the spectra of partial canopies. *Remote Sens. Environ.* 25: 89-105. doi: 10.1016/0034-4257(88)90043-0.
- Huete, A. R., R. D. Jackson, and D. F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sens. Environ.* 17: 35-53. doi: 10.1016/0034-4257(85)90111-7.
- Huete, A. R., G. Hua, J. Qi, A. Chehbouni, W. J. D. van Leeuwen. 1992. Normalization of multidirectional red and NIR reflectances with SAVI. *Remote Sens. Environ.* 41: 143-154. doi: 10.1016/0034-4257(92)90074-T.
- Huete, A., C. Justice, and H. Liu. 1994. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sens. Environ.* 49: 224-234. doi: 10.1016/0034-4257(94)90018-3.
- Jacquemoud, S. and F. Baret. 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens. Environ.* 34: 75-91. doi: 10.1016/0034-4257(90)90100-Z.
- Jacquemoud, S., S. L. Ustin, J. Verdebout, G. Schmuck, G. Andreoli, and B. Hosgood. 1996. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sens. Environ.* 56: 194-202. doi: 10.1016/0034-4257(95)00238-3.
- Kallel, A., S. L. Hégarat-Masclé, C. Ottlé, and L. Hubert-Moy. 2007. Determination of vegetation cover fraction by inversion of a four-parameter model based on isoline parameterization. *Remote Sens. Environ.* 111: 553-566. doi: 10.1016/j.rse.2007.04.006.
- Kubelka, P. and F. Munk. 1931. Ein beitrag zur optik der farbanstriche. *Z. Techn. Phys.* 12: 593-601.
- Medrano R., E. R., F. Paz P., J. L. Orozco M., J. R. Valdez L. y M. Bolaños G. 2013. Evaluación de un modelo de la BRDF a partir de simulaciones con modelos semi-empíricos lineales (SEL). *Terra Latinoamericana* 31: 181-192.
- Merzlyak, M. N. and A. Gitelson. 1995. Why and what for the leaves are yellow in autumn? On the interpretation of optical spectra of senescing leaves (*Acer platanoides* L.). *J. Plant Physiol.* 145: 315-320. doi: 10.1016/S0176-1617(11)81896-1.
- Myneni, R. B. and G. Asrar. 1994. Atmospheric effects and spectral vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 47: 390-402. doi: 10.1016/0034-4257(94)90106-6.
- Nilson, T. 1971. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agric. Meteorol.* 8: 25-38. doi: 10.1016/0002-1571(71)90092-6.
- Odi L., M., F. Paz P., R. López U. y J. González P. 2010. Limitaciones en la estimación de variables biofísicas en cultivos usando índices de vegetación espectrales: efecto de la densidad del follaje. *Agrociencia* 44: 807-819.
- Pascual, F., F. Paz y M. Bolaños. 2012. Estimación de biomasa aérea en cultivos con sensores remotos. *Terra Latinoamericana* 30: 17-28.
- Paz, F., E. Mejía S., M. Martínez M., L. A. Palacios y E. Palacios V. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Paz, F., E. Palacios V., E. Mejía S., M. Martínez M. y L. A. Palacios S. 2006a. Determinación del estado de crecimiento de cultivos usando la transformada de Hough de las reflectividades del follaje. *Agrociencia* 40: 99-108.
- Paz, F., E. Palacios, L. A. Palacios, L. Tijerina y E. Mejía. 2006b. Correcciones atmosféricas usando patrones invariantes en el espacio del rojo e infrarrojo cercano. *Rev. Latinoam. Rec. Nat.* 2: 3-16.
- 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: NDVIcp. *Agrociencia* 41: 539-554.
- Paz, F., M. Bolaños, E. Palacios, L. A. Palacios, M. Martínez y A. Huete. 2008. Optimización del índice espectral de la vegetación NDVIcp. *Agrociencia* 42: 925-937.
- Paz, F., M. Reyes y E. Medrano. 2011. Diseño de índices espectrales de la vegetación usando curvas iso-suelo. *Agrociencia* 45: 121-134.
- Paz, F., M. Casiano D., A. Zarco H. y M. Bolaños G. 2013. Estimación de las propiedades ópticas de la vegetación usando medios radiativos equivalentes y espacios n-paramétricos. *Terra Latinoamericana* 31: 119-134.
- Paz, F., E. Romero, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez y A. Aldrete. 2014. Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: marco teórico. *Terra Latinoamericana* 32: 177-194.
- Paz, F., E. Romero, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez y A. Aldrete. 2015. Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: análisis de índices de banda ancha. *Terra Latinoamericana* 33: 27-49.
- Pinty, B., N. Gobron, J. L. Widlowski, T. Laverne, and M. M. Verstraete. 2004. Synergy between 1-D and 3-D radiation transfer models to retrieve vegetation canopy properties from remote sensing data. *J. Geophys. Res.* 109: D21205. doi: 10.1029/2004JD005214.
- Price, J. C. 1992. Estimating vegetation amount from visible and near infrared reflectances. *Remote Sens. Environ.* 41: 29-34. doi: 10.1016/0034-4257(92)90058-R.
- Price, J. C. and W. C. Bausch. 1995. Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. *Remote Sens. Environ.* 52: 55-65. doi: 10.1016/0034-4257(94)00111-Y.
- Purevdorj, T., R. Tateishi, T. Ishiyama, and Y. Honda. 1998. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. *Int. J. Remote Sensing* 19: 3519-3535. doi: 10.1080/014311698213795.
- Qi, J., A. R. Huete, F. Cabot, and A. Chehbouni. 1994. Bidirectional properties and utilization of high-resolution spectra from a semiarid watershed. *Water Resour. Res.* 30: 1271-1279. doi: 10.1029/93WR03058.
- Reyes, M., F. Paz, M. Casiano, F. Pascual, M. I. Marín y E. Rubiños. 2011. Caracterización del efecto de estrés usando índices espectrales de la vegetación para la estimación de variables relacionadas con la biomasa aérea. *Agrociencia* 45: 221-233.
- Richardson, A. J. and C. L. Wiegand. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogram. Eng. Remote Sens.* 43: 1541-1552.
- 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.
- Ross, J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. W. Junk. The Hague, Netherlands.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, and J. C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation (Green Wave Effect) of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report. Greenbelt, MD, USA.
- Sinclair, T. R., R. M. Hoffer, and M. M. Schreiber. 1971. Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season. *Agron. J.* 63: 864-868.

- Specht, R. L. 1972. Water use by perennial evergreen plant communities in Australia and Papua New Guinea. *Aust. J. Bot.* 20: 273-299. doi: 10.1071/BT9720273.
- Specht, R. L. and A. Specht. 1989. Canopy structure in Eucalyptus-dominated communities in Australia along climatic gradients. *Acta Oecol. Ecol. Plant.* 10: 191-213.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8: 127-150. doi: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- van Leeuwen, W. J. D., A. R. Huete, C. L. Walthall, S. D. Prince, A. Bégué, and J. L. Roujean. 1997. Deconvolution of remotely sensed spectral mixtures for retrieval of LAI, fPAR and soil brightness. *J. Hydrol.* 188-189: 697-724. doi: 10.1016/S0022-1694(96)03199-X.
- Verhoef, W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sens. Environ.* 16: 125-141. doi: 10.1016/0034-4257(84)90057-9.
- Verstraete, M. M., B. Pinty, and R. B. Myneni. 1996. Potential and limitations of information extraction on the terrestrial biosphere from satellite remote sensing. *Remote Sens. Environ.* 58: 201-214. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00069-7.
- Villa, A., F. Paz, M. J. Pérez, C. Rojas, M. Rodríguez, S. Ortiz, M. Casiano y H. Díaz. 2014. Estimación de la capacidad de carga animal en agostaderos usando un índice de vegetación de pendientes normalizadas. *Agrociencia* 48: 599-614.
- Wanjura, D. F. and J. D. Bilbro. 1986. Ground cover and weathering effects on reflectances of three crop residues. *Agron. J.* 78: 694-698. doi: 10.2134/agronj1986.00021962007800040027x.
- Xia, L. 1994. A two-axis adjusted vegetation index (TWVI). *Int. J. Remote Sens.* 15: 1447-1458. doi: 10.1080/01431169408954176.
- Yoshioka, H., T. Miura, A. R. Huete, and B. D. Ganapol. 2000. Analysis of vegetation isolines in RED-NIR reflectance space. *Remote Sens. Environ.* 74: 313-326. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00130-9.
- Yoshioka, H. 2004. Vegetation isoline equations for an atmosphere-canopy-soil system. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42: 166-175. doi: 10.1109/TGRS.2003.817793.