

NOTA TÉCNICA

EL GREENSEEKER™ Y EL DIAGNÓSTICO DEL ESTADO DE SALUD DE LOS CULTIVOS¹

Marco V. Gutiérrez-Soto², Eduardo Cadet-Piedra², Werner Rodríguez-Montero², José Miguel Araya-Alfaro²

RESUMEN

El GreenSeeker™ y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. El objetivo de este trabajo es proveer los conocimientos básicos y los principios técnicos necesarios para el uso correcto del GreenSeeker™ en aplicaciones agrícolas como la fertilización nitrogenada, la dosificación del riego, el mapeo de los campos agrícolas y la agricultura de precisión. Se describe el instrumento y las bases físicas y fisiológicas que respaldan su uso en la agricultura, además de las propiedades radiativas de las superficies vegetales, y la reflexión de la luz en cultivos sanos y vigorosos comparados con plantas estresadas. Se discuten las posibles aplicaciones del GreenSeeker en el diagnóstico y la corrección de diversos tipos de estrés y otros “desórdenes” experimentados por los cultivos en el campo, en tiempo real, y acorde con la heterogeneidad espacial siempre presente de los agroecosistemas tropicales. Se incluyen las limitaciones de la tecnología disponible actualmente y las perspectivas para su uso en otros cultivos tropicales, además del arroz y el maíz.

Palabras clave: Agricultura de precisión, NDVI, pigmentos nitrogenados, radiación, reflectividad, sensores remotos.

ABSTRACT

GreenSeeker™ and the diagnosis of crop health. The objective of this note is to provide basic information and technical principles needed for the use of the GreenSeeker™, in agricultural applications such as nitrogen fertilization, irrigation scheduling, mapping of agricultural fields and precision agriculture. A description of the instrument is provided, as well as the technical and physiological principles that support its use in agriculture. The radiative properties of plant canopies and light reflection from healthy and stressed crops are described briefly. Possible applications of GreenSeeker in diagnosis and correction of crop disorders in the field in real time are considered, according to spatial heterogeneity ubiquitous in tropical agro ecosystems. The limitations of the technology currently available and its applications to other tropical crops, besides rice and corn, are also addressed.

Key words: NDVI, nitrogen-containing pigments, precision agriculture, radiation, reflectance, remote sensors.



INTRODUCCIÓN

El GreenSeeker (green = verde y seek = buscar) es un instrumento que provee un índice de vegetación

de diferencia normalizada (*NDVI*), cuya interpretación puede contribuir al diagnóstico rápido y dirigido de las condiciones nutricionales (especialmente de nitrógeno), el estado fisiológico, la incidencia de estrés, y

¹ Recibido: 21 de octubre, 2010. Aceptado: 3 de octubre, 2011.

² Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno, Universidad de Costa Rica, Apdo. 183-4050 Alajuela, Costa Rica. Autor para correspondencia surdo26@racsa.co.cr; eduardocadet5@gmail.com; werner.rodriguez@ucr.ac.cr; araya.josecr@gmail.com

el rendimiento potencial de los cultivos (Inman *et al.* 2005, Lan *et al.* 2009). Este índice es adjetivado como “normalizado” porque produce valores en el rango del 1 y el -1. El NDVI (Ecuación 1) es un índice que permite integrar y analizar mediciones de luz del rojo y rojo lejano realizadas con sensores remotos o próximos a las plantas, e identificar la presencia de vegetación verde y viva con base en su reflexión en los ámbitos de frecuencia de la luz correspondientes al rojo y rojo lejano (Sellers 1985, Skye 2005, Solari *et al.* 2008). Esta tecnología es resultado de la exploración espacial conducida por la NASA, y del desarrollo de algoritmos, sensores y programas de cómputo para fotografiar, interpretar, y mapear, a varias escalas y ámbitos del espectro de reflexión, la superficie terrestre.

A diferencia de las imágenes aéreas y satelitales, este sistema provee información obtenida localmente y de forma rápida mediante determinaciones terrestres. Además, puede contribuir a disminuir los costos de producción, porque permitiría aplicar la cantidad exacta de fertilizantes y de agua, y la mitigación del estrés en el momento apropiado y en el lugar correcto (Verhulst *et al.* 2009), reduciendo el gasto superfluo de insumos agrícolas de alto costo financiero y ambiental. Las aplicaciones del GreenSeeker han sido mejor evaluadas en cultivos como arroz, maíz, trigo y algodón, y forman parte de las herramientas disponibles en la agricultura de precisión (Lawton 2008).

CÁLCULO DEL NDVI

El NDVI (“Normalized Difference Vegetation Index”) es un índice normalizado de la vegetación definido como:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde RED ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) es la radiación roja incidente sobre la superficie vegetal y NIR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) es la radiación infrarroja cercana reflejada por ella. El GreenSeeker utiliza diodos que emiten la luz con base en la cual se calcula el NDVI. La luz incidente natural es separada de la producida por el instrumento electrónicamente. Una señal de voltaje permite cuantificar las fracciones de NIR y RED provenientes de los diodos (Jones *et al.* 2007).

Debido a su normalización, los rangos de medición del NDVI se encuentran entre -1,0 y 1,0, siendo los valores más altos (0,7-0,8) indicadores de plantas en las mejores condiciones (Figura 1). Un 1 representaría la densidad más alta posible de hojas verdes y saludables (Viney *et al.* 2005, Monteith y Unsworth 2008). Los suelos descubiertos generan valores positivos bajos (0,1 a 0,2), y el agua libre valores que van desde -0,1 hasta 0,1 ó 0,2. Valores de -1 se registran en superficies blancas como la nieve, el hielo o las nubes, mientras que 0 indica ausencia de vegetación. Se han propuesto índices menos afectados por la reflectividad del suelo en relación con la del follaje (Huete 1988, Rondeaux *et al.* 1996) para solucionar los problemas encontrados en estados tempranos del desarrollo del dosel.

Los aumentos en la temperatura del follaje experimentados por las plantas estresadas, son otro ejemplo de estas aplicaciones, y pueden ser medidos aplicando la ley de Stefan-Boltzmann (Ecuación 2), porque la radiación infrarroja reflejada por las plantas calientes es mayor que la emitida por aquellas más frescas. La temperatura foliar de las plantas está asociada a la tasa transpiratoria que determina, en gran medida, la pérdida de calor por evaporación (también llamado calor latente). Por lo tanto, las plantas bien irrigadas poseen menores temperaturas foliares que las plantas que sufren déficit hídrico.

$$IR = \sigma T^4 \quad (\text{Ecuación 2})$$

En este modelo, IR es la energía emitida por las hojas en forma de radiación infrarroja (W m^{-2}), σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$), y T es la temperatura de la superficie ($^\circ\text{C}$). La temperatura del follaje T se puede despejar como (Ecuación 3):

$$T = \sqrt[4]{\frac{IR}{\sigma}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Estos principios han sido utilizados para fabricar “termómetros infrarrojos”, ampliamente aplicados en la formulación de índices de estrés (Jackson *et al.* 1981), que permiten administrar eficientemente el agua de riego y la sombra. El mapeo de los terrenos usando el GreenSeeker y otros accesorios, tales como termómetros infrarrojos y sistemas de posicionamiento

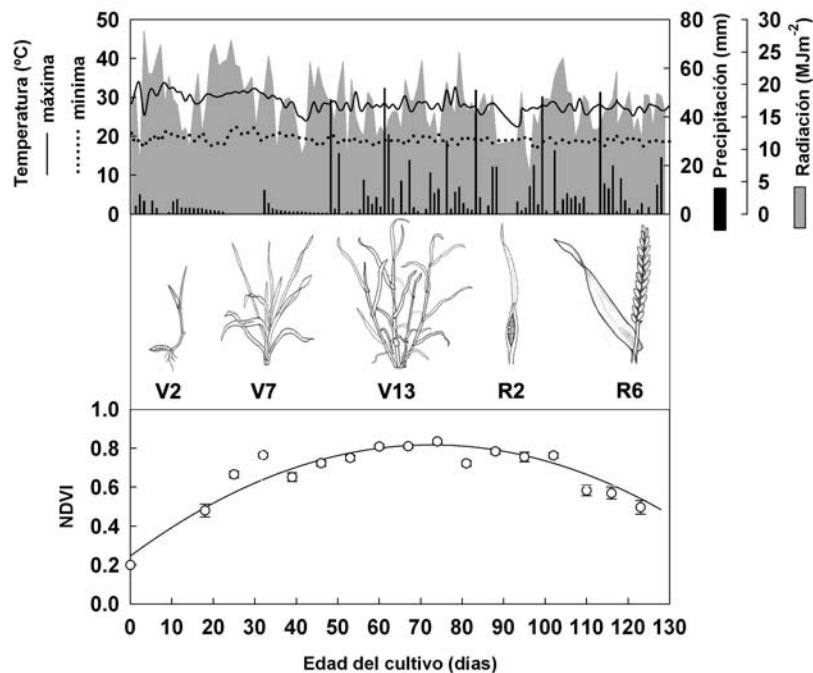


Figura 1. Condiciones climáticas, fenología del cultivo, y NDVI (\pm SE) en una parcela de arroz tropical a lo largo de su ciclo de vida, a partir del 14 de abril del 2010. Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno, Universidad de Costa Rica (Alajuela, 840 m elevación). Se suplió agua de riego durante el primer mes de desarrollo. El modelo $NDVI=0,246432+0,163706*Edad-0,000117327*Edad^2$ explica NDVI con un $R^2 = 0,90$. La fenología del arroz se registró siguiendo el método propuesto por Counce *et al.* (2000).

geográfico (GPS), permitiría la distribución de los insumos agrícolas según los requerimientos de los cultivos, en diferentes zonas y etapas fenológicas, es decir, el llamado “manejo por sitio específico”. El uso de esta instrumentación como componente de la maquinaria agrícola moderna puede dirigir la dosificación eficiente del agua, los fertilizantes, y otros agroquímicos con claros efectos positivos sobre el ambiente y las finanzas del sistema productivo.

PRINCIPIOS FISIOLÓGICOS Y TÉCNICOS

Las propiedades radiativas de una superficie vegetal determinan su capacidad para absorber, reflejar y transmitir la luz (Sellers 1985, Monteith y Unsworth 2008). Los doseles verdes con concentraciones

apropiadas de nitrógeno (~1-2%) y clorofila, absorben la luz fotosintéticamente activa (RFA, roja y azul) y reflejan la luz verde e infrarroja, delineando un patrón característico (Gates, 1980, Figuras 2 y 3). Este patrón es alterado por diferentes factores ambientales como las deficiencias nutricionales, la sequía, las temperaturas extremas, y la luz (Knapp y Carter 1998).

En contraste con la absorción y utilización del RFA (400-700 nm), las hojas evolucionaron para dispersar (reflejar y transmitir) la radiación solar infrarroja (> 700 nm), porque su nivel energético por fotón no es termodinámicamente suficiente para impulsar la síntesis de moléculas orgánicas. Por lo tanto, las plantas aparecen relativamente oscuras en el rango de la RFA y brillantes en el infrarrojo (Figura 2).

Comparando plantas en óptimas condiciones nutricionales y sanitarias con estresadas, el GreenSeeker permite establecer diferencias en un

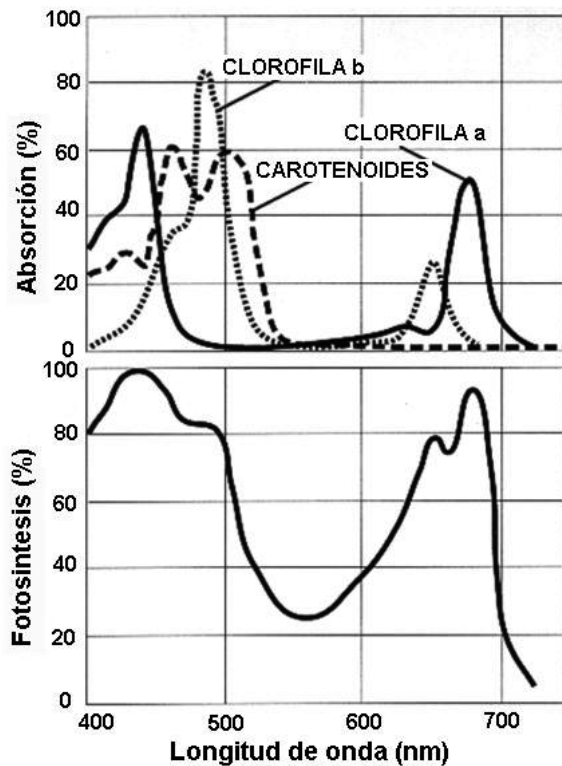


Figura 2. Espectros de absorción de la luz y de la acción de la fotosíntesis, en hojas saludables y con concentraciones óptimas de nitrógeno de cultivos como el arroz, el trigo, el maíz y el algodón (adaptado de Gates 1980 y McCree 1981).

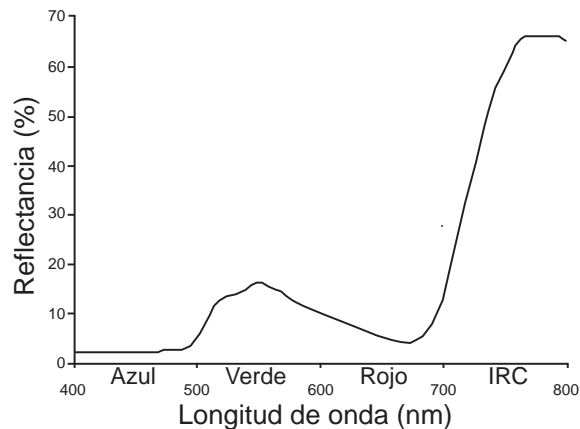


Figura 3. Patrón de reflexión de la luz visible de una hoja verde y saludable, con concentraciones foliares adecuadas de Nitrógeno (~1-2%) y otros elementos (adaptado de Gates 1980 y McCree 1981).

simple índice numérico (NDVI) que puede reflejar el estado fisiológico de los cultivos en el campo. Las plantas sanas y vigorosas absorben más luz roja y reflejan más luz infrarroja (IRC) que aquellas con problemas fisiológicos. Este patrón puede variar entre plantas vecinas, con la edad de la hoja, y con la época del año en que las hojas son producidas. Por ejemplo, en comparación con plantas bien nutridas, los cultivos con deficiencias de nitrógeno muestran clorosis, amarillamiento, y cambios en las propiedades radiativas del follaje, que pueden ser detectadas y medidas. En la práctica, y como consecuencia de las variaciones intraespecíficas, estacionales y anuales en los requerimientos y la utilización del nitrógeno por los cultivos (Martin *et al.* 2005, Samborski *et al.* 2009), el uso efectivo del GreenSeeker requiere mantener siempre una sección de la plantación bajo condiciones nutricionales y sanitarias óptimas, que pueda ser utilizada como referencia para calibrar las mediciones del NDVI en el resto del área de cultivo.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El GreenSeeker comercialmente disponible para aplicaciones agrícolas utiliza la segunda generación de la tecnología de sensores ópticos. Este utiliza diodos emisores de luz (luz LED) para emitir su propia luz roja e infrarroja (Figura 5). La luz roja (570-680 nm) emitida por el instrumento que es dirigida hacia las superficies cultivadas, y simultáneamente, mide la luz que reflejan las hojas (infrarroja cercana, 725-1020 nm), calculando valores numéricos que están relacionados con la salud y el vigor de las plantas “en tiempo real”.

El GreenSeeker (modelo RT100, NTech, California, EEUU, Figura 4) está constituido por el sensor, ajustable en incrementos de 15°, montado sobre un brazo de longitud también ajustable, que permite mantenerlo paralelo a la superficie de la vegetación. Un centro de control provee energía a los sensores óptico y externos. Está equipado además con una computadora portátil de bolsillo (PDA) y programas para la recolección y procesamiento inicial de los datos.

Conforme el sensor pasa sobre la superficie del cultivo, mide tanto la radiación incidente como la reflejada por el dosel, y calcula el NDVI como un cociente de luz roja: luz infrarroja. La luz emitida por fuentes naturales es separada de la emitida por el



Figura 4. Modelo RT100 (NTech, California, EEUU) de GreenSeeker utilizado. Se resaltan sus componentes. 2011.

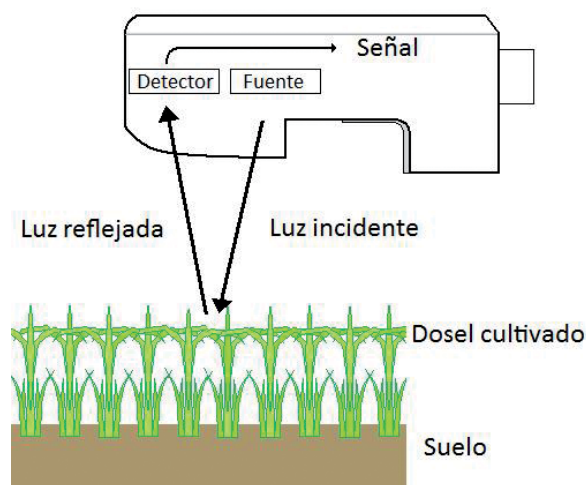


Figura 5. Partes y funcionamiento del sensor de GreenSeeker. Elaborado por los autores. 2011.

instrumento electrónicamente (Jones *et al.* 2008). La distancia entre el sensor y la superficie del cultivo debe ser de 80-120 cm. Se realizan aproximadamente diez lecturas por segundo.

LIMITACIONES Y PERSPECTIVAS

A diferencia de los sensores remotos, el cálculo del NDVI determinado con ayuda del GreenSeeker no

es sensitivo a diversas condiciones atmosféricas como la nubosidad y el polvo en suspensión. Sí lo es al contenido de agua del suelo (los suelos son más oscuros cuando húmedos), la anisotropía de la superficie de interés, y la geometría angular de la iluminación y de la observación al momento de la determinación (Viney *et al.* 2005, Monteith y Unsworth 2008).

Las aplicaciones del GreenSeeker deben ser consideradas con precaución antes de utilizarlas en cultivos no estudiados previamente y con objetivos adicionales a la determinación del NDVI *per se*, particularmente en la medición del índice de área foliar, la concentración de clorofila, la cobertura vegetal y la productividad potencial. Otras aplicaciones potenciales del GreenSeeker incluyen la planificación de tasas de aplicación variables de insumos, el mapeo de la salud, el vigor, y la biomasa de los cultivos, la creación de zonas de manejo, el control de algunas plagas a través de la medición de niveles de defoliación y pérdida del área foliar, la evaluación de la eficiencia de los sistemas de drenaje y de riego, la validación de los protocolos de muestreo, y la determinación de las fechas óptimas para la cosecha. El GreenSeeker no puede separar las arvenses de las plantas cultivadas, requiriéndose un WeedSeeker para este propósito. El uso del GreenSeeker y de otros instrumentos semejantes probablemente aumentará en el futuro cercano, conforme la tecnología de precisión y sus aplicaciones agrícolas se extiendan, se lleven a cabo validaciones locales, y se perfeccionen los algoritmos para otros cultivos como la papa, la remolacha, el girasol, la cebada, y los cultivos tropicales en general.

¿CÓMO UTILIZAR EL GREENSEEKER?

- Inserte su PDA (computadora de mano) y conéctela.
- Coloque la correa de hombro alrededor del cuerpo.
- Extienda el tubo telescópico a la longitud deseada, y ajuste el ángulo del sensor de modo paralelo a la superficie de interés, generalmente el dosel de las plantas cultivadas.
- Conecte el cable serial al conector situado en la parte inferior de la máquina propulsora de la caja de control.
- Presione el botón verde que provee energía al sensor (el interruptor está situado en la caja de control).
- En su PDA, vaya al menú de Inicio. Tenga el cuidado de no correr ningún otro programa en el disco de memoria de la PDA para evitar su bloqueo. Pulse en el ícono de programas, limpie la memoria de su PDA, y luego vaya al ícono NTech Capture para abrir el programa.
- En el campo, seleccione el dosel que va medir, mapee el terreno que usted espera examinar, y defina un protocolo de muestreo apropiado.
- Seleccione la opción de Sensor y el GreenSeeker estará listo para capturar datos. Colóquese con el sensor al inicio de la parcela que se va a medir. El sensor debe estar más o menos paralelo a la superficie del dosel, entre 80-120 cm por encima de él. Presione el gatillo en forma sostenida y atravesie la parcela caminando en forma regular. Al completar su recorrido, suelte el gatillo. Cada vez que suelte el gatillo tendrá usted la posibilidad de iniciar un nuevo muestreo.
- Cuando se suelta el gatillo, el número que aparece en la pantalla de la PDA es el promedio de todas las lecturas realizadas hasta ese punto. Cada vez que presione el gatillo comienza el registro de los datos que constituirán un nuevo valor de NDVI.
- Cuando haya completado la recopilación de datos, vaya a *Archivo* y seleccione *Guardar* para localizar, nombrar y salvar su trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Franklin Herrera y al programa de Arvenses de la Estación Experimental Fabio

Baudrit por permitirnos utilizar sus parcelas de arroz para realizar las pruebas del GreenSeeker. A la Vice-rectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica por proveer horas asistente al señor Rubén Calderón que colaboró en la confección de las figuras, y a la Escuela de Agronomía gestionó la adquisición del instrumento.

LITERATURA CITADA

- Counce, PA; Keisling, TV; Mitchell, AJ. 2000. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. *Crop Science* 40(1):436-443.
- Gates, D. 1980. *Biophysical ecology*. Springer-Verlag, New York, Estados Unidos. 611 p.
- Huete, AR. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing Environ* 254:295-309.
- Inman, D; Khosla, R; Mayfield, T. 2005. On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. *Sensor Review* 25(3):209-214.
- Jackson, RD; Idso, SB; Reginato, RJ; Pinter, PJ. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research* 17(4):1133-1138.
- Jones, CN; Weckler, PR; Maness, NO; Jayasekara, R; Stone, ML; Chrz, D. 2007. Remote sensing to estimate chlorophyll concentration in spinach using multi-spectral plant reflectance. *Transactions of the ASABE* 50(6): 2267-2273.
- Knapp, AK.; Carter, GA. 1998. Variability in leaf optical properties among 26 species from a broad range of habitats. *Amer. J. Bot.* 85: 940-946.
- Lan, Y; Zhang, H; Lacey, R; Hoffmann, WC; Wu, W. 2009. Development of an integrated sensor and instrumentation system for measuring crop conditions. *Agricultural Engineering International, The CIGR E-Journal* 11:1-16.
- Lawton, K. 2008. Crop sensors come of age. *The Progressive Farmer* 2008:1-4.
- Martin, KL; Hodgen, PJ; Freeman, KW. Melchiori, R; Arnall, DB; Teal, RK; Mullen, K; Desta, K; Phillips, SB; Solei, JB; Caviglia, O; Solari, F; Bianchini, A; Francis, DD; Schepers JS; Hatfield, JL; Raun, WR. 2005. Plant-to plant variability in corn production. *Agronomy Journal* 97:1603-1611.
- McCree, KJ. 1981. Photosynthetically active radiation. *In* OL Lange, PS Nobel, CB Osmond, H Ziegler. eds. *Physiological Plant Ecology*. Encyclopedia of Plant

- Physiology, New Series, Vol. 12A. Springer-Verlag, Berlin. p. 41-55.
- Montheith, JL; Unsworth, MH. 2008. Principles of environmental physics. 3 ed. Academic Press, Boston, Estados Unidos. 418 p.
- Rondeaux, GM; Steven, M; Baret, F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing Environ.* 55:95-107.
- Samborski, SM; Tremblay, N; Fallon, E. 2009. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendation. *Agronomy Journal* 101(4):800-816.
- Sellers, PJ. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. *International Journal of Remote Sensing* 6:1335-1372.
- Skye Instruments Ltd. 2005. Light. Application notes. Sensors for NDVI calculations. 4 p.
- Solari, F; Shanahan, J; Ferguson, R; Schepers, J; Gitelson A. 2008. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. *Agronomy Journal* 100(3):571-579.
- Verhulst, N; Govaerts, B; Sayre, KD; Deckers, J; Francois IM; Dendooven, L. 2009. Using NDVI and soil quality analysis to assess influence of agronomic management on within-plot spatial variability and factors limiting production. *Plant & Soil* 317:41-59.
- Viney, MK; Hatfield, JL; Baker, JM. 2005. Micrometeorology in agricultural systems. *Agronomy Monograph No. 47*. Madison, Estados Unidos, ASA-CSSA-SSSA. 584 p.

SITIOS DE INTERÉS EN INTERNET

- University of Sheffield Remote Sensing: GEO6370 Vegetation Indices. Disponible en <http://www.shef.ac.uk/~bryant/6370/veg/vegsoil.htm>
- U.S. Water Conservation Laboratory: How a Vegetation Index Works. Disponible en <http://www.uswcl.ars.ag.gov/epd/remsen/Vi/VIworks.htm>
- Mark Servilla: The First Steps to Understanding Agriculture Remote Sensing. Disponible en <http://www.eonline.com/modernagsite/archives/Servilla.html>
- USGS: Wide Dynamic Range VI application <http://www.gap.uidaho.edu/Bulletins/12/The Wide Dynamic Range Vegetation Index.htm>.
- BGR: A Comparison of Slope-Based Vegetation Indices for Agricultural Applications. Disponible en <http://www.biogeorecon.com/vegindcs.htm>