

## Comparación de índices espectrales para la predicción del IAF en canopeos de maíz

Kemerer, A.<sup>1a</sup>; Di Bella, C.<sup>a</sup>; Melchiori, R.<sup>b</sup>; Benech, Arnold; Alvarez<sup>d</sup> R.<sup>c</sup> y C.

<sup>(a)</sup>Instituto de Clima y Agua, CNIA, INTA Castelar, Los Reseros y Las Cabañas, B1712WAA, Castelar, Buenos Aires, ARGENTINA

<sup>(b)</sup>EEA INTA Paraná Ruta 11 Km 12.5, 3000, Paraná, Entre Ríos, ARGENTINA

<sup>(c)</sup>IFEVA - Cátedra de Cerealicultura, Facultad de Agronomía, UBA Av. San Martín 4453, 1417, Buenos Aires, ARGENTINA

<sup>(d)</sup>Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, UBA Av. San Martín 4453, 1417, Buenos Aires, ARGENTINA

### RESUMEN

El objetivo del trabajo fue evaluar la sensibilidad de distintos índices espectrales al Índice de Área Foliar (IAF) en canopeos de maíz. Se determinaron relaciones exponenciales entre el IAF y los índices NDVI<sub>670</sub> y MSAVI, las que se saturaron para valores de IAF superiores a 3, limitando su uso hasta V8. El NDVI<sub>710</sub> y el GNDVI presentaron un comportamiento logarítmico, alcanzando la saturación para valores de IAF superiores a 4, prolongando su utilidad hasta V10. Únicamente los índices REIP y  $R_{800}/R_{550}$  presentaron relaciones lineales y pudieron ser usados durante todo el ciclo de crecimiento del cultivo.

Palabras claves: IAF, índices espectrales, maíz

### ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the sensitivity of several spectral indices to LAI in corn canopies. Exponential relationships between LAI and NDVI<sub>670</sub> and MSAVI indices were found. The saturation at LAI levels above 3 limits its use until the v8 phenological growth stage. NDVI<sub>710</sub> and GNDVI presented a logarithmical behavior and reached the saturation at LAI values above 4, delaying its use until v10. Only REIP and  $R_{800}/R_{550}$  presented linear relationships and could be used for LAI estimation during the total vegetative period of crop growth.

Keyboards: LAI, spectral indices, corn

### Introducción

El Índice de Área Foliar (IAF) es una variable determinante del crecimiento, asociada a cambios en el estado fisiológico del cultivo. Sus variaciones espacio-temporales podrían ser utilizadas en agricultura de precisión para el análisis de patrones diferenciales de calidad de sitio. Sin embargo, la aplicación del IAF en ese sentido no resulta común dado que los métodos

generalmente utilizados para su determinación son destructivos y muy demandantes en términos económicos.

Los índices espectrales obtenidos a partir de sensores remotos constituyen una herramienta ideal para el estudio de la distribución del IAF, ya que generan datos espacialmente continuos, que pueden estar disponibles en diferentes momentos del ciclo de desarrollo del cultivo.

---

<sup>1</sup> Contacto autor: Te: +54 46240125

Correo electrónico: akemerer@cnia.inta.gov.ar

Copyright: Instituto de Clima y Agua- INTA- Castelar.

El número de índices espectrales existentes es elevado, pero se han reportado diferencias en la sensibilidad de los mismos a variaciones en el IAF (Haboudane *et al.*, 2004, Broge y Leblanc, 2000). Es importante considerar que la mayor parte de los estudios se han basado en datos obtenidos a partir de modelos de simulación de reflectancia y en menor medida a través de mediciones directas, lo que genera incertidumbres acerca del comportamiento de los índices en mediciones a campo.

Uno de los más utilizados es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI, (Rouse, 1973), que contrasta la reflectancia en el rojo (centrada en 670 nm) y en el infrarrojo cercano (centrada en 860 nm). Sin embargo se ha demostrado que se satura para valores de IAF superiores a 3.

La limitante antes mencionada ha llevado a que se desarrollen una serie de índices alternativos, entre ellos el GNDVI (Gitelson *et al.*, 1996) que utiliza una banda del verde en lugar del rojo, el NDVI<sub>710</sub> (Ritchie y Bednarz, 2005) que reemplaza la banda del rojo por una correspondiente a la región del borde rojo (710 nm), el cociente  $R_{800}/R_{550}$  (Buschman y Nagel, 1993), el MSAVI que incorpora factores para la corrección por reflectancia del suelo (Qi *et al.*, 1994) y el desplazamiento del Punto de Inflexión del Borde Rojo, REIP (Guyot y Baret, 1988).

El objetivo del trabajo fue evaluar la sensibilidad de los siguientes índices espectrales a variaciones en el IAF en canopeos de maíz: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI<sub>670</sub> y NDVI<sub>710</sub>), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI), Índice de Vegetación Ajustado a Suelo Modificado (MSAVI), el desplazamiento del Punto de Inflexión del Borde Rojo (REIP) y el cociente  $R_{800}/R_{550}$ .

## Materiales y métodos

Se generaron variaciones de IAF mediante la combinación de diferentes densidades de plantas de maíz (45000, 75000 y 100000 plantas/ha) y dosis de N (0, 50, 100 y 200 Kg de N/ha) aplicados como urea a la siembra, en un arreglo en parcelas divididas con un diseño en bloques completos al azar.

Se realizaron mediciones de reflectancia con un espectrorradiómetro Ocean Optics® 2000 en cuatro estadíos fenológicos, cuando el cultivo presentó seis, ocho, diez y doce hojas totalmente desplegadas (v6, v8, v10 y v12 respectivamente). Las mediciones se realizaron entre las 10 y las 14 hs, a una altura de 1,10 m sobre el tope del canopeo, cubriendo un área de 0,25 m<sup>2</sup>

Previo a cada medición se calibró el sensor con una superficie blanca (espectralón).

Las plantas incluidas en el área medida con el sensor fueron cosechadas y se determinó el IAF con un medidor de área foliar LICOR 3000.

Con los datos hiperespectrales obtenidos se calcularon los siguientes índices:

$$NDVI_{670} = R_{864} - R_{671} / R_{864} + R_{671} \quad (1) \quad (\text{Rouse et al., 1973})$$

$$NDVI_{710} = R_{864} - R_{710} / R_{864} + R_{710} \quad (2) \quad (\text{Ritchie y Bednarz, 2005})$$

$$GNDVI = R_{780} - R_{550} / R_{780} + R_{550} \quad (3) \quad (\text{Gitelson et al., 1996})$$

$$MSAVI = 0.5 (2R_{800} + 1 - ((2R_{800} + 1)^2 - 8(R_{800} - R_{670}))^{0.5}) \quad (4) \quad (\text{Qi et al., 1994})$$

$$R_{800} / R_{550} \quad (5) \quad (\text{Buschman y Nagel, 1993})$$

$$REIP = 700 + 40[(R_{670} + R_{780}) / 2 - R_{700}] / (R_{740} - R_{700}) \quad (6) \quad (\text{Guyot y Baret, 1988}).$$

El análisis de los datos incluyó el cálculo de los estadísticos descriptivos para el IAF y el ajuste de regresiones entre los datos de IAF y los índices evaluados utilizando el paquete R®.

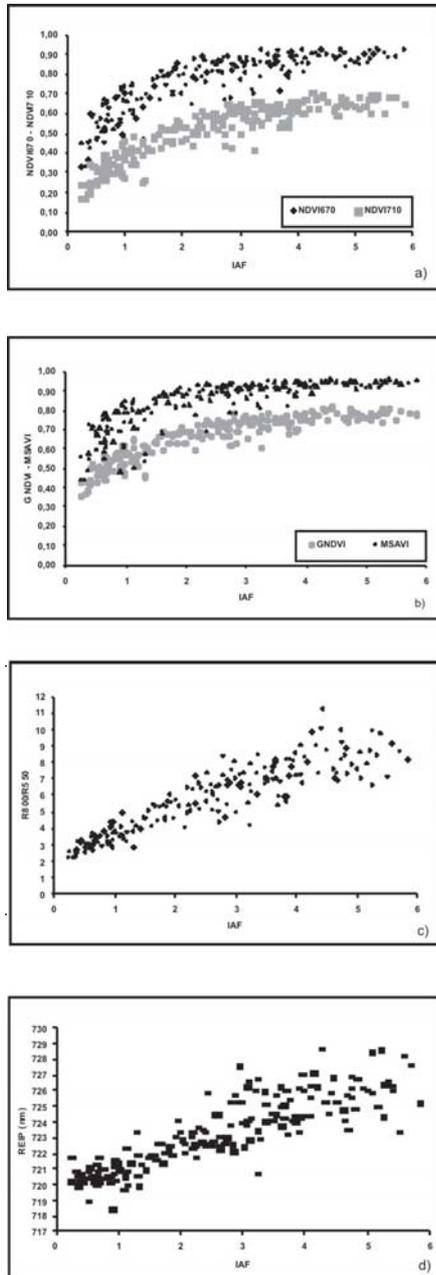
## Resultados

Los índices espectrales evaluados se pudieron separar en tres grupos de acuerdo a su sensibilidad a variaciones en el IAF.

En el primer grupo se encuentran los índices NDVI<sub>670</sub> y MSAVI, que presentaron asociaciones de tipo exponencial con el IAF (tabla 1), con buenas características predictivas hasta valores de IAF cercanos a 3, donde alcanzaron niveles de saturación (figura 1 a y b). Resultados similares habían sido indicados para el NDVI<sub>670</sub> (Gitelson *et al.*, 1996; Gilabert *et al.*, 1996; Viña *et al.*, 2004). En cambio contrastan con lo establecido para el MSAVI, ya que Haboudane *et al.* (2004) mediante modelos de simulación de reflectancia determinaron un buen poder predictivo del MSAVI hasta valores de IAF superiores a 6.

En el segundo grupo se encuentran los índices GNDVI y NDVI<sub>710</sub>, que permitieron el ajuste de funciones logarítmicas (tabla 1 a y b). Ambos índices presentaron mejores características predictivas que los antes mencionados, determinando niveles de saturación para valores de IAF superiores a 4 (figura 1). Los resultados concuerdan con los obtenidos por Gitelson *et*

al. (2003), al comparar el comportamiento del GNDVI respecto al  $NDVI_{670}$ .



**Figura 1.** Relaciones entre los índices a)  $NDVI_{670}$ ,  $NDVI_{710}$ ; b) GNDVI, MSAVI; c)  $R_{800}/R_{550}$  y d) REIP y el IAF

Sin embargo Daughtry et al. (2000) en estimaciones con modelos de simulación de reflectancia, determinaron que el GNDVI se vio más afectado por el aporte de la reflectancia del suelo que los índices que incluyeron una banda del rojo. Por otro lado Ritchie y Bednarz (2005) también determinaron relaciones más ajustadas al emplear bandas del verde y del borde rojo, en especial la banda correspondiente a 710 nm, en combinación con el infrarrojo cercano para predicciones de IAF en canopeos de algodón.

Las mejores características predictivas fueron determinadas para el tercer grupo, que incluyó los índices  $R_{800}/R_{550}$  y REIP. Ambos índices permitieron el ajuste de funciones lineales en el rango de IAF explorado (tabla 1) sin alcanzar niveles de saturación. Si bien los ajustes fueron importantes, se observa una dispersión más acentuada para valores de IAF superiores (figura 1 c y d), efecto que podría estar relacionado a variaciones en el contenido de clorofila, determinadas por una mayor absorción de N en etapas avanzadas del desarrollo del cultivo.

**Tabla 1.** Tipo de funciones ajustadas entre el IAF y los índices espectrales,  $R^2$ , error cuadrático medio y coeficientes de cada modelo

Índice	Modelo	$R^2$	RMSE
$NDVI_{710}$	$Y=a+b \ln x$	0.88	0.049
GNDVI	$Y=a+b \ln x$	0.88	0.040
$NDVI_{670}$	$Y=a+be^{-x}$	0.82	0.064
MSAVI	$Y=a+be^{-x}$	0.76	0.063
$R_{800}/R_{550}$	$Y=a+bx$	0.83	0.888
REIP	$Y=a+bx$	0.77	1.116

En general la utilización de bandas correspondientes al verde y al borde rojo determinó un incremento en la sensibilidad de los índices ante variaciones del IAF respecto a los que incluyeron bandas del rojo. Este resultado podría estar relacionado a la menor capacidad de absorción de energía por parte de los pigmentos en las longitudes de onda del verde, lo que determina que la absorción no se sature aún ante contenidos elevados de clorofila (Gitelson et al., 2003). Así como a los efectos indirectos en la reflectancia determinados en la región del borde rojo ante incrementos en el contenido de clorofila y la superposición de hojas (Horler et al., 1983; Leprieur, 1989).

Considerando los valores de IAF determinados en cada uno de los estadios fenológicos evaluados (tabla 2) y el comportamiento de los índices espectrales, se puede comprobar que el  $NDVI_{670}$  y el MSAVI sólo pueden predecir los valores del IAF hasta el estadio de V8, ya que en ese momento se alcanzan valores cercanos al nivel de saturación. Por otra parte, el  $NDVI_{710}$  y el GNDVI, que alcanzan la saturación a valores de IAF superiores (cerca de 4), podrían utilizarse hasta el estadio de V10.

Como el IAF, la biomasa generada por el cultivo y la absorción de nutrientes se incrementan considerablemente a partir de V6, el periodo de utilidad de los índices antes mencionados estaría marcando una ventana temporal bastante acotada. La tendencia lineal determinada para el REIP y  $R_{800}/R_{550}$ , en cambio, define un periodo de utilización más prolongado.

**Tabla 2.** Estadísticos descriptivos del IAF por estadio fenológico

Est	Media	DE	CV	Mín	Máx
V6	0.71	0.28	40.15	0.24	1.48
V8	1.88	0.68	36.46	0.64	3.48
V10	3.79	0.94	24.70	2.05	5.85
V12	3.88	1.07	27.53	1.28	6.02

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto una ventaja importante desde el punto de vista práctico para los índices REIP y  $R_{800}/R_{550}$  en la aplicación en sistemas de agricultura de precisión, principalmente asociada a que la mayor parte de los sensores disponibles requirieron de condiciones ambientales adecuadas, tales como ausencia de nubosidad, para poder ser utilizados. Por tal motivo, ventanas temporales acotadas, como las determinadas para los índices  $NDVI_{670}$  y el MSAVI en combinación con condiciones ambientales de alta nubosidad representan una limitación. En cambio ventanas temporales amplias permiten evaluaciones e intervenciones a nivel de cultivo en diferentes momentos, con mayores posibilidades de utilización.

Finalmente, los resultados de este trabajo permiten comprobar que las características de los índices determinadas a partir de modelos de simulación de reflectancia no siempre son trasladables a condiciones de campo. Esto se debe a que variaciones en las condiciones de manejo pueden generar cambios en la estructura del

cultivo que no necesariamente son contempladas a través de los modelos de simulación. La utilización de índices para la predicción de variables a nivel de canopy requiere por lo tanto de una etapa previa de evaluación de los mismos en condiciones de campo.

## Conclusiones

En el presente trabajo se ha determinado que los índices espectrales resultan herramientas útiles para evaluar cambios en el IAF. Los índices con mayor sensibilidad al IAF fueron  $R_{800}/R_{550}$  y REIP, que pudieron utilizarse durante todo el ciclo del cultivo. Los índices GNDVI y el  $NDVI_{710}$  presentaron capacidad predictiva hasta el estadio de V10 y los índices  $NDVI_{670}$  y MSAVI fueron los menos sensibles, alcanzando la saturación en el estadio de V8.

Se pudo comprobar que los resultados determinados a partir de modelos de simulación de reflectancia no siempre son coincidentes con los determinados a campo, indicando que se requiere de una evaluación de los índices espectrales a nivel de canopy para la predicción de variables de cultivo.

## Agradecimientos

Los datos presentados forman parte de la tesis de maestría de la Ing. Agr. Alejandra Kemerer. Este trabajo fue realizado con los fondos del Proyecto Específico Desarrollo y Aplicación de la Tecnología de Agricultura de Precisión para el Manejo de Cultivos AEAI3722, Proyecto Específico Desarrollo Metodológico y aplicaciones de Sensores Remotos a la Producción Agropecuaria y Forestal AERN4642, Proyecto Específico Geomática Aplicada AERN4, de INTA.

## Referencias

- Broge, N.H.; Leblanc, E. 2000. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density, *Remote Sensing of Environment*, 76: 156-172.
- Buschman, C.; Nagel, E. 1993. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation, *Int. Journal of Remote Sensing*, 14(4): 711-722
- Carter
- Gitelson, A.; Kaufman, Y.; Merzlyak, M. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 58: 289-298.

- Gitelson, A.A.; Viña, A.; Arkebauer, T.J.; Rundquist, D.C.; Keydan, G.; Leavitt, B. 2003. Remote estimation of leaf index and green leaf biomass in maize canopies, *Geophysical Research Letters*, 30(5), 1248-1251
- Guyot, G.; Baret, F.; Major, D. 1988. High spectral resolution: determination of spectral shifts between the red and near infrared, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 8:1307-1317.
- Haboudane, D.; Miller, J.; Pattey, E.; Zarco-Tejada, P.; Strachan, I. 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture, *Remote Sensing of Environment*, 90: 337-352.
- Horler, D.N.H.; Dockray, M. and J. Barber 1983. The red edge of plant leaf reflectance, *International Journal of Remote Sensing*, 4: 273-288.
- Leprieur, C.E. 1989 Red edge measurements and canopy structure: a first look with AVIRIS data, *Geoscience and remote sensing symposium*, 12th Canadian Symposium on Remote Sensing.
- Qi, J.; Huete, A.; Keer, Y.; Sorooshian, S. 1994. A modified soil vegetation adjusted index, *Remote Sensing of Environment*, 48: 119-126.
- Ritchie, G.; Bednarz, C. 2005. Estimating defoliation of two distinct cotton types using reflectance data. *J. Cotton Science*. 9: 182-188.
- Rouse, J.; Haas, R.; Schell, J.; Deering, D. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third ERTS Symposium*. 1: 309-317. Washington: MASA.
- Qi, J.; Chehbouni, A.; Huete, A.R.; Ferry, Y.H.; Sorooshian S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index, *Remote Sensing of Environment*, 48: 119-126.