

Comparación de distintos índices de vegetación para detectar deficiencias de nitrógeno en maíz.

Isla, R. y Lopez-Lozano R.

Unidad de Suelos y Riegos. Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA). Apdo. de Correos 727, 50080 Zaragoza. risla@aragon.es, rlopezl@aragon.es

Resumen

La estrecha relación entre concentración de nitrógeno en la planta del maíz y el contenido en clorofila de las hojas ofrece la posibilidad de detectar deficiencias de nitrógeno en el cultivo a través de datos de reflectancia de la cubierta vegetal. En este trabajo se evalúa la aptitud de diversos índices de vegetación calculados a partir de datos radiométricos obtenidos en campo para la detección de deficiencias de nitrógeno en el maíz. Los resultados sugieren que es posible la detección de grandes carencias en el abonado de nitrógeno, pero no se obtiene una clara diferenciación entre dosis de abonado próximas al óptimo.

1. Introducción

En los últimos años, se han realizado importantes avances en el terreno de la teledetección aplicada a la agricultura, detectando de forma remota estrés hídrico, problemas nutricionales u otros problemas de desarrollo de los cultivos. La teledetección desde plataformas remotas (satélites o aviones) puede permitir estudiar grandes zonas de cultivo y realizar estudios de la variabilidad espacial del desarrollo de los cultivos, que en última instancia están muy relacionados con el rendimiento de los mismos. En el caso del maíz, un aspecto muy relevante para su cultivo es el conocimiento de su estado nutricional, en particular del nitrógeno, debido al gran impacto que tiene dicho nutriente en el desarrollo del cultivo y la producción final.

Una detección temprana del nivel de suficiencia del nitrógeno permitiría una corrección antes de que la producción se viese afectada o evitaría aplicaciones excesivas de fertilizante nitrogenado, con los consiguientes problemas medioambientales que pueden originarse. El contenido en clorofila es uno de los parámetros biofísicos más relacionadas con la cantidad de nitrógeno en planta, dado que la mayor parte de éste se encuentra en las moléculas de clorofila [1].

Trabajos previos demuestran la aplicabilidad de datos de reflectancia de alta resolución espectral en la estimación del contenido en clorofila de la hoja.

Estudios como los de [2], [3], [4] y [5] proponen diferentes índices buscando la máxima sensibilidad por parte de éstos al contenido en clorofila y una baja sensibilidad a otros factores (área foliar, reflectancia del suelo, etc.)

El objetivo de este trabajo es evaluar la posible utilidad de distintos índices orientados a estimar el contenido en clorofila foliar propuestos en la bibliografía para discriminar diferencias en el estado nutricional de un cultivo de maíz en las condiciones de regadío del valle del Ebro y su relación con el rendimiento de grano del cultivo.

2. Área de estudio

El estudio se realizó en una parcela de la finca de Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA, Gobierno de Aragón). El diseño fue en bloques al azar con 4 repeticiones y 5 tratamientos de nitrógeno N0, N1, N2, N3, y N4 en cada una de las repeticiones, en las que se aplicaron 0, 120, 180, 240, y 300 UF N/ha. Las parcelas tenían unas dimensiones de 6 m x 7,5 m de ancho (un total de 10 líneas de siembra), lo que hacía una superficie de 45 m² por parcela experimental. La siembra se realizó el 25 de Abril de 2003, utilizándose el híbrido Dracma, de ciclo 700 y obteniendo una densidad de 93.000 pl/ha. La parcela se regó mediante un sistema de aspersión, aplicándose los riegos para cubrir las necesidades hídricas del maíz, con un volumen total aplicado (riego y lluvia) de 740 mm. Todas las prácticas culturales fueron idénticas (a excepción del abonado) en las 20 parcelas experimentales.

3. Materiales y Métodos

3.1. Adquisición de datos radiométricos.

Las medidas de reflectancia de la cubierta se realizaron el día 31 de julio utilizando un espectrómetro *Unispec* (PP Systems, EEUU). Se realizaron tres medidas cenitales en cada uno de los tratamientos. Cada una de esas medidas comprendió dos lecturas de reflectancia: una de ellas en mitad de la línea de siembra y la segunda de ella entre dos

líneas de siembra. Las medidas fueron realizadas a 50 cm por encima del cultivo utilizando una lente con un ángulo de visión instantáneo de 12°. Todas las lecturas recogidas por el radiómetro fueron calibradas con una superficie de referencia para su transformación a valores de reflectancia.

3.2. Cálculo de índices de vegetación

A partir de los datos radiométricos obtenidos en campo se calcularon varios índices que guardan relación con el contenido en clorofila de la hoja (tabla 1). El primer grupo de índices se calcula a partir de datos de reflectancia en el visible: Reflectancia en el verde, PSR, NPCI, MCARI, TCARI y PRI. Entre ellos cabe destacar el PRI, que según [6] está muy correlacionado con la eficiencia en el uso de la radiación solar (RUE) de la cubierta vegetal.

Un segundo grupo de índices se basa en las diferencias de reflectividad entre el rojo y el infrarrojo próximo: RVI, NDVI, NIR/F, NDNF, Chl NDI y OSAVI y CCCI. Entre ellos, el CCCI propuesto por [5] pretende obtener una alta sensibilidad a la concentración en clorofila y minimizar la influencia de la biomasa.

El tercer grupo de índices se fundamenta en las diferencias de reflectancia entre el verde y el infrarrojo próximo: GNDVI y SIPI. El SIPI (Structure-Independent Pigment Index) está correlacionado con la relación carotenoides /clorofila [7], por lo que se ve afectado en condiciones de estrés.

También se han utilizado índices que tienen en cuenta la reflectancia en las regiones del infrarrojo próximo, rojo y verde, como el TCARI/OSAVI. Este índice fue propuesto por [4] con el objetivo de minimizar la influencia del área foliar y maximizar la sensibilidad a la clorofila.

Finalmente, el último grupo de índices se basan en la amplitud y la posición del *red edge* (máxima pendiente entre el rojo e infrarrojo próximo).

3.3. Estimación *in situ* del nivel de suficiencia de nitrógeno.

Como información para valorar el nivel de suficiencia de nitrógeno en las distintas parcelas se realizaron medidas de SPAD (Minolta 502, Spectrum Technologies Inc, EEUU) en 30 plantas de cada parcela paralelamente a la adquisición de los datos radiométricos. La lectura se realizó sobre la hoja de inserción de la mazorca. Las lecturas de SPAD han sido ampliamente utilizadas como indicadoras del contenido en clorofila de la hoja y, por tanto, de la suficiencia de nitrógeno en maíz [8],

por su elevada correlación con la concentración de nitrógeno en la hoja.

Tabla 1. Relación de índices estudiados y longitudes de onda utilizadas para su cálculo.

Índice	Cálculo
Verde	$\rho_{549,5}$
PSR	$\rho_{430,7} / \rho_{680,2}$
NPCI	$(\rho_{430,7} - \rho_{680,2}) / (\rho_{430,7} + \rho_{680,2})$
MCARI	$[(\rho_{699,7} - \rho_{670,4}) - 0,2(\rho_{699,7} - \rho_{549,4})] * (\rho_{699,7} / \rho_{670,4})$
TCARI	$3[(\rho_{699,7} - \rho_{670,4}) - 0,2(\rho_{699,7} - \rho_{549,4})] * (\rho_{699,7} / \rho_{670,4})$
PRI	$(\rho_{529,7} - \rho_{569,1}) / (\rho_{529,7} + \rho_{569,1})$
RVI	$\rho_{790,5} / \rho_{670,4}$
NDVI	$(\rho_{790,5} - \rho_{670,4}) / (\rho_{790,5} + \rho_{670,4})$
NIR/F	$\rho_{790,5} / \rho_{719,2}$
NDNF	$(\rho_{790,5} + \rho_{719,2}) / (\rho_{790,5} - \rho_{719,2})$
Chl NDI	$(\rho_{748,4} + \rho_{706,2}) / (\rho_{748,4} - \rho_{706,2})$
OSAVI	$[(1+0,16)(\rho_{800,2} - \rho_{670,4})] / (\rho_{800,2} + \rho_{670,4} + 0,16)$
*CCCI	$(NDNF - a) / (a - b)$
GNDVI	$(\rho_{790,5} - \rho_{549,4}) / (\rho_{790,5} - \rho_{549,4})$
SIPI	$(\rho_{800,2} - \rho_{443,9}) / (\rho_{800,2} - \rho_{443,9})$
Am.RE	Altura del pico que maximiza la primera derivada
λ RE	Longitud de onda en la que se halla el máximo de la primera derivada

* a y b son funciones del NDVI obtenidas para algodón y cuyos parámetros han sido suministrados por T. Clarke (USDA, Arizona) para su evaluación en maíz (ver [5]).

3.4. Medida de la producción final.

Las parcelas de maíz se cosecharon manualmente el 22 de Octubre de 2003 tomando una superficie de 1.725 m² en cada parcela experimental. La producción se expresó en Kg/ha de grano al 14% de humedad.

4. Resultados y discusión.

Para evaluar la mayor o menor aptitud de los distintos índices propuestos en la bibliografía para discriminar diferencias en estado nutricional del maíz asociado al nitrógeno, se presentan en la Tabla 2 los valores medios de cada una de ellos en cada tratamiento de nitrógeno, así como el coeficiente de

variación dentro del mismo tratamiento y entre los distintos tratamientos.

Tabla 2: Medias y CV (entre paréntesis) de los índices estudiados y de las lecturas de SPAD para los distintos tratamientos de nitrógeno establecidos.

Índice	N0	N120	N180	N240	N300	CVtotal(%)
Verde	9.6 (6)	6.4 (22)	6.0 (26)	7.9 (25)	6.5 (14)	21
PSR	0.51 (14)	0.57 (19)	0.57 (17)	0.64 (7)	0.55 (15)	8
NPCI	-0.32 (-20)	-0.28 (-33)	-0.28 (-27)	-0.22 (-15)	-0.29 (-22)	-13
MCARI	0.20 (4)	0.09 (19)	0.07 (30)	0.08 (25)	0.08 (18)	52
TCARI	0.20 (3)	0.11 (21)	0.10 (26)	0.12 (26)	0.11 (15)	31
OSAVI	0.76 (5)	0.79 (5)	0.79 (5)	0.79 (1)	0.80 (2)	2
TCARI/OSAVI	0.26 (6)	0.14 (18)	0.13 (22)	0.16 (25)	0.14 (15)	34
PRI	-0.092 (-10)	-0.055 (-14)	-0.051 (-7)	-0.052 (-8)	-0.051 (-8)	-30
RVI=NIR/R	16.4 (24)	15.8 (38)	19.4 (6)	20.6 (28)	16.1 (24)	12
NDVI	0.88 (3)	0.90 (1)	0.90 (3)	0.88 (2)	0.90 (2)	1
NIR/F	2.0 (9)	3.2 (34)	2.9 (5)	3.3 (9)	2.9 (12)	18
NDNF	0.34 (12)	0.51 (2)	0.54 (6)	0.50 (7)	0.53 (5)	17
Chl-NDI	0.87 (17)	1.50 (5)	1.63 (12)	1.39 (10)	1.57 (12)	22
CCCI	-0.207 (-75)	0.665 (8)	0.832 (15)	0.691 (23)	0.801 (14)	78
GNDVI	0.64 (6)	0.76 (2)	0.78 (2)	0.74 (5)	0.77 (3)	7
SIPI	0.92 (1)	0.93 (1)	0.93 (1)	0.91 (2)	0.93 (1)	1
Am-RE	0.86 (13)	0.96 (16)	0.98 (20)	1.04 (7)	1.03 (3)	7
λ RE	725.7 (0)	731.4 (0)	732.2 (0)	731.4 (0)	732.2 (0)	0.4
SPAD	36.7 (6)	51.2 (5)	53.2 (4)	54.6 (1)	56.3 (4)	16

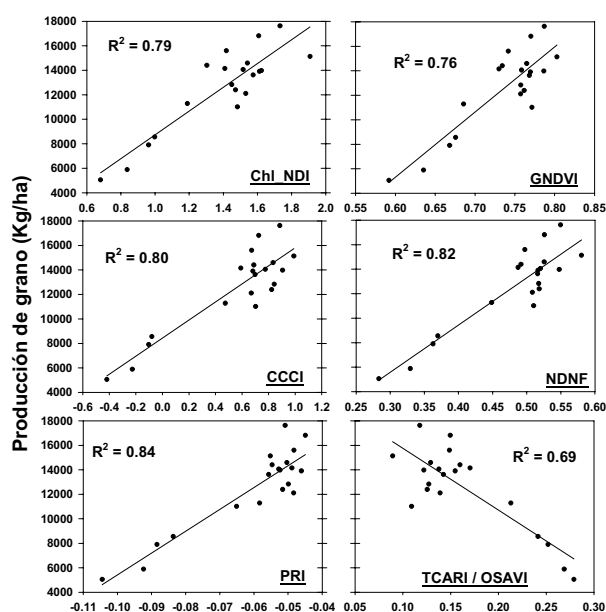


Figura 1. Relaciones entre la producción de grano y algunos índices de vegetación calculados.

Para que un índice pueda discriminar eficazmente los distintos tratamientos debe presentar poca variabilidad entre las parcelas repetidas dentro de cada uno de los tratamientos y

una alta variabilidad entre los tratamientos con diferentes dosis de N. De los índices presentados, el MCARI, TCARI, TCARI/OSAVI, PRI, CCCI, y Chl-NDI son los que presentaron mayor variabilidad

entre los 5 tratamientos de nitrógeno, oscilando entre un 22% para el Chl-NDI y un 78% para el CCCl. Para estos mismos índices la media del CV (dentro de los tratamientos) osciló entre 9.4% para el Chl-NDI y el 27% para el CCCl.

La Figura 1 muestra las correlaciones lineales entre la producción de grano de cada parcela del ensayo y los seis índices de vegetación con los que obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) más elevado. En la misma se observa que los índices PRI, CCCl, y NDNF presentaron unos coeficientes de determinación superior a 0.80. Otros índices como el TCARI, el MCARI o las lecturas de SPAD presentaron coeficientes de determinación (R^2) de 0.61, 0.67 y 0.82 respectivamente en su relación con el rendimiento de grano. Los Coeficientes de determinación de las relaciones entre las lecturas de SPAD (indicador de la concentración de clorofila) y los seis índices presentados en la Figura 1 oscilaron entre 0.69 para el GNDVI y 0.87 para el CCCl.

Sin embargo, a la vista de la Figura 1, las parcelas del tratamiento N0 (control, sin fertilizante N) pueden ser las responsables de la significación de algunas de las correlaciones encontradas. Para verificar esto, se calcularon las correlaciones lineales excluyendo las parcelas del tratamiento N0, resultando significativas ($P < 0.05$) únicamente las correlaciones con los índices PRI ($R^2 = 0.29$), NDNF ($R^2 = 0.25$), Chl_NDI ($R^2 = 0.26$) y SPAD ($R^2 = 0.40$). Estos resultados indican que los índices analizados discriminan de forma eficaz carencias importantes de nitrógeno en maíz, pero resultan de mucha menor utilidad para discriminar entre valores más próximos al óptimo, ya que los coeficientes de determinación obtenidos son muy bajos.

5. Conclusiones

Los resultados demuestran que algunos de los índices estudiados pueden resultar de gran utilidad para discriminar carencias de nitrógeno en el cultivo del maíz a nivel de cubierta vegetal a través de cambios drásticos en el contenido en clorofila foliar (tratamiento N0 del resto). Sin embargo, resulta difícil establecer una relación adecuada entre esos índices de vegetación y el contenido de nitrógeno en planta cuando las dosis de N se encuentran cercanas al óptimo. Un aspecto a evaluar en el futuro es el potencial de estos índices en fases menos avanzadas del cultivo ya que permitirían corregir las deficiencias de N en el cultivo.

6. Agradecimientos.

El presente trabajo se ha desarrollado dentro del Proyecto MCYT N° AGL2001-2214-CO6-04. R.

López-Lozano ha contado con una beca predoctoral INIA durante la realización del presente trabajo

7. Referencias.

- [1] Daughtry, C. S. T., Walthall, C. L., Kim, M. S.; Brown de Colstoun, E. and McMurtrey III, J. E.: Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sens. Environ.*, 74, 229-239, 2000.
- [2] Blackmer, T., J.S. Schepers, G.E. Varvel, and E.A. Walet-Shea. "Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated canopies". *Agron. J.* 88:1-5, 1996.
- [3] Filella, I., L. Serrano, J. Serra, and J. Peñuelas. "Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis". *Crop Sci.* 35:1400-1405, 1995.
- [4] Haboudane, D., J.R. Miller, N. Tremblay, P.J. Zarco-Tejada, and L. Dextraze. "Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture". *Remote Sens. Environ.* 81 :416-426, 2002.
- [5] Kostrzewski, M., P. Waller, P. Guertin, J. Haberland, P. Colaizzi, E. Barnes, T. Thomson, T. Clarke, E. Riley, and C. Choi. "Ground-based remote sensing of water and nitrogen stress". *Trans. of ASAE* 45(6): 29-38, 2002.
- [6] Barton, C.V.M., and P.R.J. North. "Remote sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index. Model and sensitivity analysis". *Remote Sens. Environ.* 78: 264-273, 2001.
- [7] Peñuelas, J., F. Baret, and I. Filella. "Semiempirical indices to assess carotenoids /chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance". *Photosynthetica* 31:221-230, 1995.
- [8] Blackmer, T.M., and J. S. Schepers. "Use of chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn". *J. Prod. Agric.* 8:56-60, 1995.