

Evaluación del contenido hídrico del suelo en la región central de Córdoba a partir de imágenes Landsat

Gustavo Ovando¹ Mónica Bocco¹, Silvina Sayago¹ y Enrique Willington¹

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba (Argentina).

Resumen. La sequía impacta negativamente sobre el rendimiento de los cultivos y consecuentemente sobre beneficios del productor. Para evaluar sequía a partir de información satelital, distintos autores consideran la relación entre la temperatura superficial (LST) y el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI). El objetivo de este trabajo fue evaluar a partir de indicadores espectrales el contenido de humedad edáfica en lotes con soja. A partir del espacio LST/NDVI obtenido de una imagen Landsat 5 TM, se calculó el índice TDVI que se comparó la humedad del suelo y se comprobó que no resultó un buen indicador de la humedad del lote.. Se observó una relación inversa entre NDVI y LST. En cultivos pequeños el espacio LST/NDVI permitió discriminar distintas condiciones de sequía superficial, mientras con una altura intermedia del cultivo, es posible separar distintas condiciones de humedad de suelo, a 40 cm de profundidad.

Palabras clave: índices espectrales, soja, sequia, Landsat.

1 Introducción

La humedad superficial del suelo es una variable que juega un papel importante en las zonas agrícolas, determina la distribución de la radiación solar incidente en flujo de calor sensible o de calor latente, la distribución de la precipitación en escorrentía superficial o infiltración, convirtiéndose en un factor decisivo para el crecimiento y desarrollo de los cultivos [1].

La ocurrencia de la sequía, impacta negativamente sobre el rendimiento de los cultivos y esto se traduce en una disminución de los beneficios del productor [2]. Más de las dos terceras partes del territorio argentino sufre períodos de sequía frecuentes, debido a la irregularidad de las precipitaciones (variaciones en tiempo y espacio), siendo climáticamente semiárido y subhúmedo seco. Esto se constituye en un limitante para la explotación agrícola. En particular, la región semiárida central de Córdoba es un área importante para la producción de cereales. [3,4]

A fin de evaluar posibles condiciones de sequía y estado de humedad del suelo agrícola se pueden aplicar distintas metodologías de estimación como índices

relacionados con el déficit hídrico del suelo y estrés hídrico de la vegetación. Entre los indicadores que permiten detectar la aparición de condiciones de sequía, antes de que se produzcan efectos en la vegetación y los cultivos se encuentra la relación entre la temperatura superficial y el régimen de humedad del suelo [5].

Para evaluar sequía a partir de información satelital, distintos autores [6,7,8] han considerado indicadores que relacionan la temperatura superficial (LST, Land Surface Temperature) y el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) [9].

La combinación de LST y NDVI provee información sobre la condición de la vegetación y el contenido de humedad edáfica superficial. La información conjunta de la banda termal y las bandas visible e infrarroja cercana permite monitorear satisfactoriamente las condiciones de estrés hídrico de la vegetación. El NDVI por sí solo es un indicador conservativo de estrés hídrico debido a que la vegetación permanece verde aún después de comenzado un período de sequía [9] y por otra parte la LST es un factor que da cuenta de la parte física, química y los procesos biológicos del suelo [10] e incrementa rápidamente su valor con la presencia de estrés hídrico [11]. La LST integra tanto la temperatura de la superficie del suelo y de la vegetación, y estos componentes pueden no estar linealmente relacionados [12].

Para una región determinada la relación LST/NDVI se caracteriza por una nube de puntos dispersos en donde los mayores valores de LST se corresponden con los menores de NDVI [13]. Esta nube puede tener forma triangular o trapezoidal [6]. Esta relación es frecuentemente caracterizada por dos rectas que definen los extremos seco y húmedo del espacio. El borde seco representa la tasa de evapotranspiración mínima (zonas secas), mientras que el borde húmedo da su máximo valor (zonas sin restricción de agua).

La estimación de las pendientes de estas rectas no siempre es simple debido a la heterogeneidad de la superficie [14]. Los diferentes tipos de superficies dan lugar a distintas pendientes y ordenadas al origen para similares condiciones atmosféricas y de humedad edáfica superficial [11].

El objetivo de este trabajo fue evaluar a partir del uso de información satelital indicadores espectrales del contenido de humedad de suelo en lotes con soja de la zona agrícola central de Córdoba.

2 Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio es la zona central de la provincia de Córdoba, Argentina, la cual presenta un relieve de lomas muy extendidas, casi planas. El suelo se clasifica como Haplustol éntico, con textura limosa gruesa, mineralogía mixta; las precipitaciones promedio anuales son de 800 mm, aproximadamente, y concentradas principalmente en verano. El clima corresponde al tipo seco sub-húmedo. En esta área (Figura 1) la

producción agrícola es principalmente en secano y los dos cultivos predominantes, en verano, son principalmente soja y complementada con maíz [15].

A fin de evaluar índices de sequía se relevaron lotes en los cuales se sembraron ambos cultivos, totalizando para la fecha 14 lotes. La soja fue sembrada, en esa campaña, por siembra directa entre noviembre y diciembre, con un espaciamiento entre surcos de 52cm, con variedades que corresponden a grupos de madurez 3 y 4 y variedades transgénicas resistentes al glifosato, sin aplicación de fertilizante.

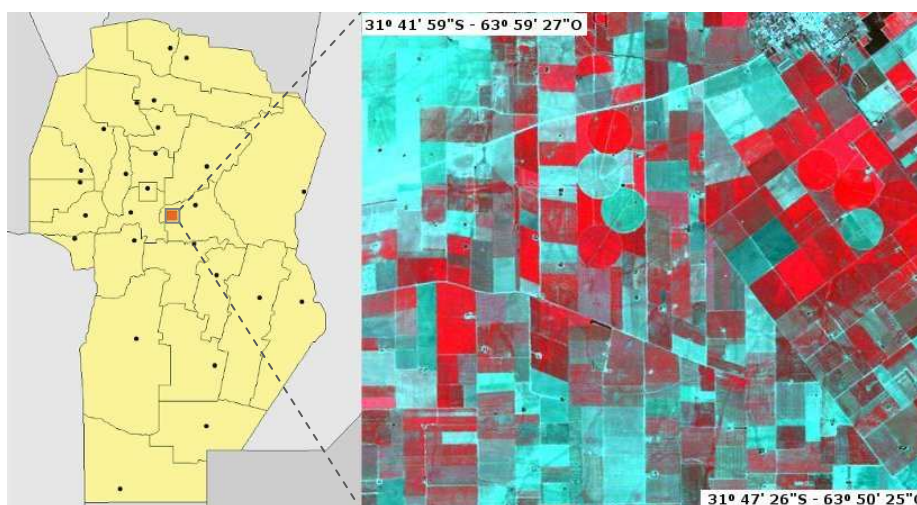


Fig. 1. Área de estudio. Imagen Landsat 5 TM (21/01/2011) Falso color compuesto.

2.2 Datos de campo

Para contrastar los índices provenientes de los datos satelitales con información de campo se obtuvieron el 20/01/2011, registros de las variables: altura de la planta, porcentaje de cobertura (%C) de materia verde, de rastrojo y de suelo desnudo, peso fresco y seco de la parte aérea de tres repeticiones de 1 m² cada una. También se determinó el contenido humedad del suelo por gravimetría a 5, 20, 40 y 80 cm de profundidad en cada repetición. La cobertura se determinó a partir de un procedimiento fotogramétrico basado en la clasificación de imágenes [16] en tanto que la humedad del suelo y la materia seca de la parte aérea se determinó a partir del peso de las muestras húmedas y del peso seco de las mismas luego de secadas en estufa hasta peso constante. Con los valores obtenidos de los pesos se determinó el porcentaje de humedad de la materia verde y del rastrojo.

2.3 Datos satelitales

Para el presente estudio se utilizó una imagen proveniente del sensor Landsat 5 TM correspondiente al día 21/01/2011. A partir de las reflectancias atmosféricamente corregidas de las bandas 3 y 4 se construyó el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) el cual permite inferir la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación y para la zona en estudio se presenta en la Figura 2.

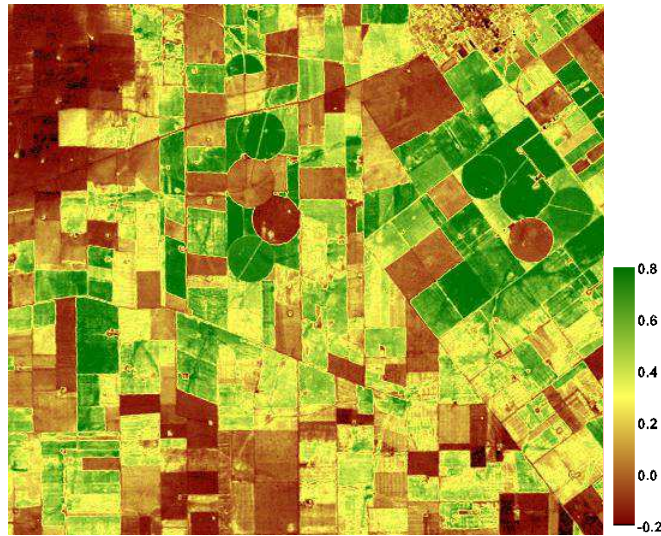


Fig. 2. NDVI obtenido a partir de la imagen Landsat 5 original para el área de estudio.

Para el cálculo de la temperatura de superficie se utilizaron los datos de la banda térmica (b6) de la imagen, el contador digital (CD) de cada píxel tiene que ser convertido en radiancia espectral usando los datos de calibración del sensor [17]. Siguiendo a [18] para convertir el contador digital (CD) de la banda térmica en radiancia espectral L_{λ} , se empleó la ecuación:

$$L_{\lambda} = 0,055158CD + 1,2378 \quad (1)$$

Estos valores de radiancia espectral fueron atmosféricamente corregidos ($L_{\lambda atm}$), a partir de los valores locales de transmitancia (τ), radiancia saliente ($L\uparrow$) y radiancia entrante ($L\downarrow$) obtenidos de [19], se consideró una emisividad de la superficie (ϵ) de 0,95, que es el valor mínimo de la literatura para suelo desnudo y que llega a 0,98 para cobertura total.

$$L_{\lambda atm} = \frac{L_{\lambda} - L\uparrow}{\epsilon\tau} - \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} L\downarrow \quad (2)$$

Donde $\tau = 0,86$, $L\uparrow = 1,08 \text{ W m}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ y $L\downarrow = 1,81 \text{ W m}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$

Para convertir la radiancia atmosféricamente corregida en temperatura de superficie (LST) se empleó la siguiente ecuación:

$$LST = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda atm}} + 1\right)} - 273,15 \quad (3)$$

Donde LST es la temperatura de superficie (°C), $L_{\lambda atm}$ es la radiancia integrada en el ancho de banda atmosféricamente corregida ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), y K_1 and K_2 son constantes de calibración que para Landsat 5 TM toman valores de 607,76 y 1260,56, respectivamente [20].

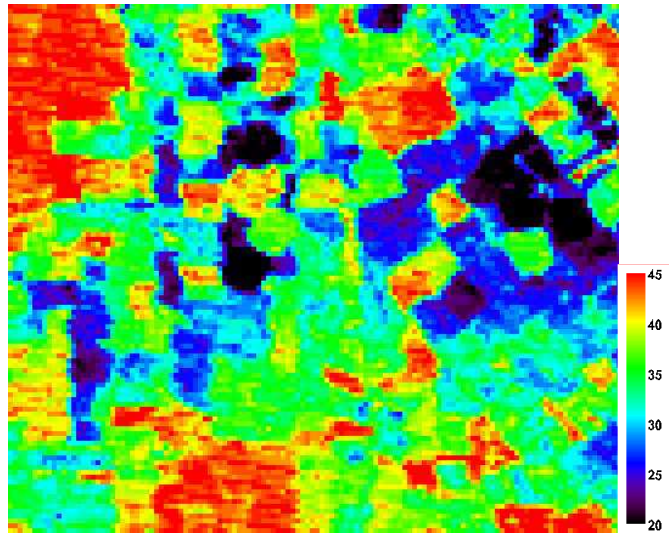


Fig. 3. LST (°C) obtenida a partir de la imagen Landsat 5 original para el área de estudio.

2.4 Índice espectral de sequía.

A partir del espacio generado por la relación LST/NDVI se puede obtener el índice TDVI (Temperature Vegetation Dryness Index) que está inversamente correlacionado con la humedad del suelo [11]. Este índice se define como:

$$TDVI = \frac{LST_{NDVIi} - LST_{NDVIi.min}}{LST_{NDVIi.máx} - LST_{NDVIi.min}} \quad (4)$$

Donde $LST_{NDVIi.máx} = a \cdot NDVIi + b$ y $LST_{NDVIi.min} = a' \cdot NDVIi + b'$ siendo a , a' , b y b' las pendientes y ordenadas al origen de las rectas que definen el borde seco y húmedo, respectivamente y $NDVIi$ es el valor del $NDVI$ en cada pixel.

Para determinar los vértices del trapecio generado en el espacio LST/NDVI se consideraron los valores correspondientes a los percentiles del 0,05 y 0,95 de LST correspondientes a NDVI nulo y 0,8, rango que asegura cubrir todos los valores de vegetación. Estos puntos permitieron determinar las rectas $LST_{NDVI.máx}$ y $LST_{NDVI.min}$.

3 Resultados y discusión

El espacio LST/NDVI para la zona de estudio y el trapecio determinado por las rectas que definen el borde seco y húmedo se presenta en la Figura 4.

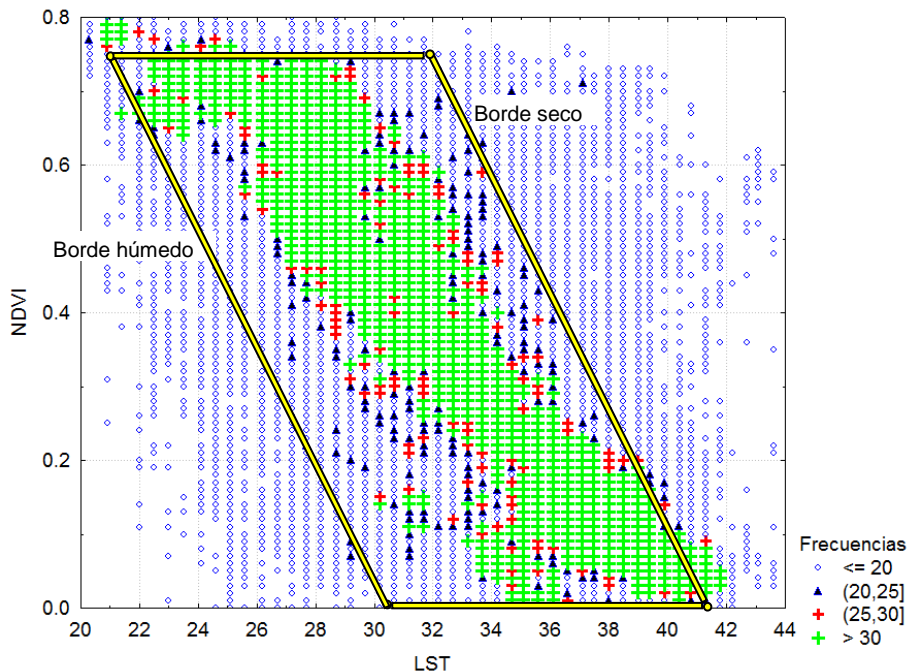


Fig. 4. Espacio LST/NDVI para frecuencias observadas en el área de estudio.

Como se observa en la Figura 4, la mayoría de los valores que presentan alta frecuencia se encuentran dentro del trapecio determinado por las rectas $LST_{NDVI.máx}$ y $LST_{NDVI.min}$ y como señalan [13] los mayores valores de LST se corresponden con los menores de NDVI.

A partir del espacio generado y de la ecuación (4) se obtuvieron los valores de TDVI para los lotes muestreados y se correlacionaron dichos valores con los valores registrados de contenido de humedad de suelo hasta la profundidad de las raíces, considerando que la profundidad explorada por éstas puede llegar a los 2,10 m y se relaciona con la altura de los cultivos [21].

En la Figura 5 se muestra la dispersión entre los valores de TDVI y el contenido de humedad de suelo, en la misma puede observarse que para la región en estudio este índice no permite explicar adecuadamente a nivel de lote el contenido de humedad de suelo partiendo de la información radiométrica. La falta de sensibilidad a mayores profundidades puede deberse a diferencias en los patrones de extracción de agua, como así también al aporte de agua de mayores profundidades no evaluadas en el presente trabajo.

Esta relación entre TDVI y el contenido de humedad de suelo presenta un coeficiente de determinación igual a 0,19, lo cual no permite inferir que este índice sea un buen estimador a priori de niveles de sequedad. Esta escasa relación fue observada en una región de Chile por [22] quienes compararon el índice con el total mensual de precipitaciones y encontraron valores de R que oscilaron entre -0,05 y 0,36 cuando las precipitaciones son muy bajas. La pendiente de la relación LST/NDVI puede estar influenciada por la topografía, tipo de cobertura y las condiciones ambientales de la zona, pudiendo variar diariamente en función de la radiación solar incidente, condiciones atmosféricas advectivas, además de la disponibilidad de humedad superficial [23].

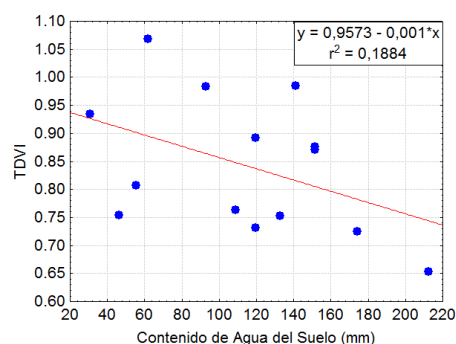


Fig. 5. Relación entre índice TDVI y contenido de humedad de suelo para lotes en el área de estudio.

Para el espacio LST/NDVI construido se presentan en la Figura 6 el comportamiento de la relación en los lotes muestreados categorizados de acuerdo a la altura del cultivo (h) y contenido de humedad de suelo (HS) a tres profundidades seleccionadas.

Como puede observarse en la Figura 6, al igual que en la Figura 4, la relación entre NDVI y LST es inversa, tal como lo plantearon [13]. Para cultivos pequeños (altura menor a 15cm), los valores de humedad registrados a 5 cm y 20 cm de profundidad, permiten discriminar distintas condiciones en el espacio LST/NDVI, en tanto que para cultivos más desarrollados (altura entre 15cm y 30cm), resulta más adecuada la humedad que se registra a 40 cm de profundidad. Cuando el cultivo supera los 30cm este espacio no permite diferenciar para la soja distintas condiciones de humedad en todo el rango de profundidad de medida.

Estos resultados fueron también observados por [11] quienes demostraron que la relación entre la temperatura de la superficie y el NDVI está directamente relacionada con la humedad superficial del suelo. Por el contrario, cuando los cultivos están completamente desarrollados (alturas mayores que 30 cm) la relación LST/NDVI pierde sensibilidad para diferenciar distintos niveles de estrés hídrico para las tres profundidades de toma de muestras de suelo consideradas.

Como señala [9] la ubicación de un pixel en el espacio LST/NDVI está determinada por varios factores: i) cobertura por vegetación del suelo, que determina una LST afectada por la diferencia entre la temperatura del suelo desnudo y la escasa cobertura; ii) evapotranspiración, controla el LST a través del balance de energía superficial; iii) propiedades térmicas de la superficie; iv) radiación neta, la energía disponible que incide en el suelo afecta al LST y v) condiciones meteorológicas y rugosidad de la superficie, bajo condiciones similares de índice de área foliar y disponibilidad de agua, la cobertura verde irregular y baja resistencia superficial presenta menor LST que superficies con vegetación baja y mayor resistencia superficial.

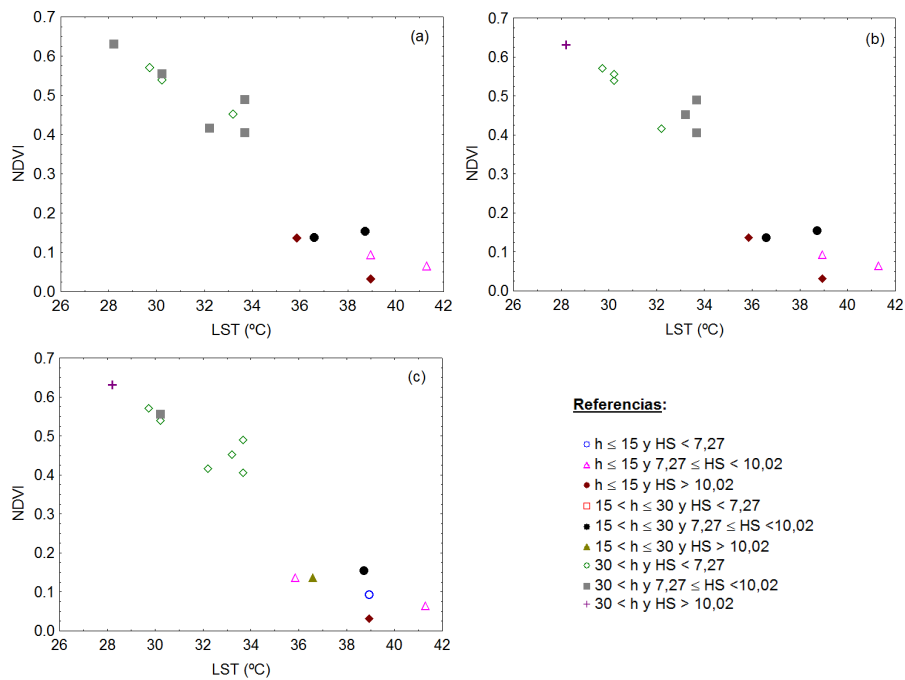


Fig. 6. Relación entre valores promedio de LST y NDVI para lotes en el área de estudio agrupados según altura del cultivo (h, cm) y humedad de suelo (HS, g/g) medida a 5 cm de profundidad (a), 20 cm (b) y 40 cm (c).

4 Conclusiones

A partir de valores radiométricos es posible evaluar el contenido de humedad del suelo, en lotes con soja, en distintas etapas de su ciclo. Se observó que existe una relación inversa entre los valores de NDVI y LST. Si bien el espacio LST/NDVI permite estimar valores del índice TDVI, éste no es un buen indicador de la condición hídrica del lote. Una de las dificultades que metodología es la falta de una metodología objetiva para la determinación de los límites húmedo y seco en el trapezoide, dado que pequeñas variaciones de las pendientes y ordenadas de las líneas límites pueden resultar en diferencias significativas de los valores de este índice espectral de sequía.

En cultivos pequeños se observó que el espacio generado a partir de LST y NDVI, permiten discriminar distintas condiciones de sequía superficial, mientras que si el cultivo presenta una altura intermedia, es posible separar distintas condiciones de humedad de suelo, en los 40 cm. de profundidad. Una vez que el cultivo se encuentra desarrollado, el espacio LST/NDVI no es útil para discriminar condiciones de humedad de suelo, cualquiera sea la profundidad considerada en la determinación de humedad edáfica.

Agradecimientos. Los autores expresan su gratitud a la Secretaría de Ciencia y Técnica – Universidad Nacional de Córdoba - Argentina (Secyt-UNC) por el apoyo financiero que permitió la realización de este trabajo.

Referencias

1. Álvarez-Mozos, J., Casali J., González-Audicana, M.: Teledetección radar como herramienta para la estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas. *Revista de Teledetección*, 23, 27—42 (2005).
2. Wehbe, M.B., Bosch, E.A., Granda J.A., Tarasconi, I.E. Riesgo sequía, impactos y manejo de riesgo en la agricultura del sur de Córdoba En: 3er Congreso Regional de Economía Agraria. Universidad Austral de Chile. Chile (2011). <http://www.ing.unrc.edu.ar/grupos/giasa/0002.pdf>
3. Scian, B., Donnari, M.: Retrospective analysis of the Palmer drought severity index in the semi-arid pampas region, Argentina. *International Journal of Climatology*, 17, 313--322 (1997).
4. Rivarola, A.D.V., Seiler, R.A., Vinocur, M.: Vulnerabilidad agroclimática a las sequías en el sur de la provincia de Córdoba. En: X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología, Mar del Plata (2004). <http://agro.unc.edu.ar/~clima/AADA/Congresos/MDQ/254.htm>
5. García, S.G., Baille, A., González, M.M., Martínez, V., Urrea, M., Hernández, Z., Nortes, P., Tanguy, M.: Desarrollo y aplicación de indicadores de alerta temprana frente a sequías a escala regional desde MODIS. En: XII Congreso AET - TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional. pp.223--229. Ed. Martin (2007).
6. Moran M.S., Clarke T.R., Inoue Y., Vidal, A.: Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.*, 49, 246--263 (1994).

7. Wang, P.X., Li, X., Gong, J., Song, C.: Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring. In: IEEE International, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 141--143, Sydney (Australia) (2001)
8. Fensholt, R., Sandholt, I.: Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 111--121 (2003)
9. García Galiano S.G. Assessment of vegetation indexes from remote sensing: theoretical basis. En: Erena M. (coord.), López-Francos A. (coord.), Montesinos S. (coord.), Berthoumieu J.-P. (coord.). The use of remote sensing and geographic information systems for irrigation management in Southwest Europe. Zaragoza : CIHEAM / IMIDA / SUDOE Interreg IVB (EU-ERDF), pp. 65--75 (2012)
10. Becker, F., Li, Z.L.: Towards a local split window method over land surfaces. *Int. J. Remote Sensing*, 11, 369--393 (1990)
11. Sandholt, I., Rasmussen, K., Andersen, J.: A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3), 213--224 (2002)
12. Friedl, M.A., Davis, F.W.: Sources of variation in radiometric surface temperature over a tallgrass prairie. *Remote Sensing of Environment*, 48(1), 1-17, (1994)
13. Nemani, R.R., Running, S.W.: Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal IR AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 28, 276--284 (1989)
14. Czajkowski, K.P.: Thermal remote sensing of near-surface water vapor. *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3), 253--265 (2002)
15. Bocco, M., Ovando, G., Sayago, S., Willington, E.: Modelos simples para estimar cobertura de suelo agrícola a partir de Imágenes MODIS: aplicación a la zona central de Córdoba (Argentina). In: 42 JAIIO Congreso Argentino de AgroInformática, CAI 2013, Córdoba, pp. 61--69 (2013)
16. Bocco, M., Ovando, G., Sayago, S., Willington, E., Heredia, S.: Estimating Soybean Ground Cover from Satellite Images Using Neural Networks Models. *International Journal of Remote Sensing* 33(6), 1717--1728 (2012)
17. Markham, B.L., Barker, J.L.: Spectral characteristics of Landsat-D multispectral scanner subsystem. NASA Technical Memo. 83955. 19 (Greenbelt, Maryland, USA: National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center) (1986)
18. The Yale Center for Earth Observation, http://www.yale.edu/ceo/Documentation/-Landsat_DN_to_Kelvin.pdf
19. National Aeronautics and Space Administration: Atmospheric Correction Parameter Calculator, <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>
20. National Aeronautics and Space Administration: Landsat 7 Science Data Users Handbook, http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf
21. Andriani, J.: Estrés hídrico en soja. *Revista IDIA XXI(3)-INTA*, 48--51 (2002)
22. Sanchez Martínez, M., Carvacho Bart, L.: Aproximación a la determinación del déficit hídrico en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile, a partir de imágenes MODIS y datos meteorológicos. *Revista de Geografía Norte Grande* 55, 109--124 (2013)
23. Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R., Anderson, M., Imhoff, M., Gutman, G., Panov, N., Goldberg, A.: Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment: Merits and Limitations. *J. Climate*, 23, 618--633 (2010).