

Evaluación de la humedad del suelo mediante imágenes de temperatura radiactiva e índice de vegetación

Mauro E. Holzman¹ y Raúl Rivas^{1,2}

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (UNCPBA – CIC – Municipalidad de Azul), República de Italia 780, (B7300) Azul, Buenos Aires, Argentina.

² Comisión de Investigaciones Científicas de Buenos Aires.

Mail de contacto: mauroholzman@hotmail.com

RESUMEN

El objetivo es proponer un método de estimación de humedad del suelo sólo con datos de satélite. Se utilizaron imágenes diarias MODIS/Aqua de temperatura de superficie, de 1 km y de índice de vegetación EVI, calculado a partir de imágenes de distintas bandas reflectivas, a 500 metros de resolución. Con ellas se calculó el índice de estrés Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI), a 500 metros de resolución. Posteriormente se comparó este índice con la humedad del suelo en el norte de la provincia de Buenos Aires, medida a 60 cm de profundidad. Se halló una fuerte relación entre estas dos variables (R^2 de 0,69). Se concluye que mediante el índice TVDI se puede lograr una correcta estimación de la humedad del suelo, posibilitando su aplicación en diversos campos de la hidrología como el estudio de la humedad en la zona no saturada, humedad antecedente o la recarga.

Palabras clave: humedad del suelo, TVDI, imágenes satelitales, estrés hídrico.

ABSTRACT

The objective is to propose a method of soil moisture estimation from satellite without ancillary data. We used daily MODIS/Aqua LST L3 Global 1 Km Grid products and Enhanced Vegetation Index, obtained from reflectances at 500 m spatial resolution. Then Temperature-Vegetation Dryness Index was calculated at 500 m. This index was compared with measurements of soil moisture at 60 cm depth in the North of Buenos Aires province. A strong correlation between these variables was obtained ($R^2=0.69$). In conclusion, an adequate estimation of soil moisture can be achieved through TVDI. This index can be used in several hydrological studies, like wetness in unsaturated zone, antecedent moisture conditions or aquifer recharge.

Keywords: soil moisture, TVDI, satellite images, water stress.

Introducción

El contenido de agua en el suelo tiene efectos en el rendimiento de los cultivos, la recarga de los acuíferos, los volúmenes de contaminantes que están disponibles en la zona no saturada e ingresan al acuífero y en la proporción de la precipitación que infiltra o escurre. A pesar de su importancia, el conocimiento de la humedad del suelo en forma espacial sigue siendo una limitación para la modelación climática e hidrológica (Norbiato et al., 2008). Básicamente esto se debe a la escasa disponibilidad de datos de terreno espacialmente distribuidos y a que los métodos puntuales tradicionales en general fallan en considerar la variación espacial de la humedad del suelo por topografía, profundidad del nivel freático, etc.

En cuanto a la teledetección, diversas técnicas de estimación de la humedad del suelo han sido desarrolladas en las últimas décadas. Una de ellas muy extendida es el uso de la

información captada en la región de microondas del espectro electromagnético. La ventaja que tienen los radares es la posibilidad de monitorear la superficie en distintas condiciones climáticas, pero su limitación es la escasa resolución espacial (20-40 km). Por otro lado, los radares activos tienen mejor resolución espacial (10-30 m), pero con un período de revisita de 16 a 25 días (Mallick et al., 2009). A su vez, en general estas técnicas permiten la estimación de la humedad en la parte superficial del suelo. Si bien esta variable es fundamental para procesos como los de escurrimiento, su incidencia es menor en otros como la recarga o la movilidad de contaminantes en la zona no saturada.

En este contexto, aún se deben desarrollar métodos en teledetección que permitan estimar la humedad subsuperficial del suelo. En este sentido, la relación entre la temperatura de superficie (T_s) e índices de vegetación (IV) tiene la capacidad de brindar información del estado hídrico de superficies con distintos grados de

cobertura de vegetación. El objetivo del trabajo es proponer al índice de estrés hídrico Temperature-Vegetation Index (TVDI) como método de estimación de la humedad subsuperficial del suelo y comprobar esa capacidad con medidas de terreno.

Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI)

La vegetación tiene una particular respuesta espectral en la región del infrarrojo cercano y rojo del espectro electromagnético, la que está asociada a la tasa de fotosíntesis. Ésta a menudo se ve limitada por factores ambientales como la baja disponibilidad de agua en el suelo. Por lo tanto, esa disponibilidad se puede monitorear analizando el comportamiento reflectivo de la vegetación mediante IV. La desventaja fundamental de este método es que esos cambios reflectivos se observan en etapas avanzadas del estrés, cuando los sistemas fotosintéticos han sido afectados.

Por otro lado, la pérdida de agua por transpiración es controlada por la vegetación a través de la regulación estomática, produciendo aumentos de la temperatura de superficie del dosel desde el inicio de un proceso de estrés hídrico. Paralelamente, en suelo desnudo la disponibilidad agua incide en la T_s a través del control evaporativo y la inercia térmica (Mallick et al., 2009). Debido a estas distintas dinámicas de los IV y T_s , su combinación permite evaluar cambios de corto plazo en la humedad del suelo desde satélite.

Diversos autores (Carlson et al., 1994; Han et al., 2010; Price, 1990; Sandholt et al., 2002; Stisen et al., 2008; Wang et al., 2006) han mostrado que la dispersión de T_s en función del IV, de un área suficientemente heterogénea (suelo desnudo seco y saturado y distintos grados de cobertura de vegetación seca y húmeda), muestra una forma triangular (Fig. 1). En ese espacio triangular y con el propósito de obtener información del contenido de humedad en el suelo, Sandholt et al. (2002) definieron el TVDI con la siguiente ecuación:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s \min}}{T_{s \max} - T_{s \min}} \quad (1)$$

Donde T_s es la temperatura (K) de superficie para un píxel dado; $T_{s \min}$ es la mínima temperatura de superficie en la imagen, definida por el límite húmedo; $T_{s \max} = a \cdot EVI + b$ es la máxima temperatura de superficie de la imagen y se refiere al límite seco del triángulo, definido como una relación lineal entre los datos, donde a y b son parámetros de la imagen. En la

ecuación del TVDI se utilizó el índice de vegetación Enhanced Vegetation Index (EVI) en lugar del tradicional NDVI, pues tiene en cuenta la dispersión atmosférica y el efecto del suelo en la señal captada por el satélite. El TVDI asume valores próximos a 1 en los píxeles cercanos al límite seco, indicando mínimo contenido de agua en el suelo, por lo tanto mínima evapotranspiración y 0 en el límite húmedo, indicando máximo contenido de agua en el suelo.

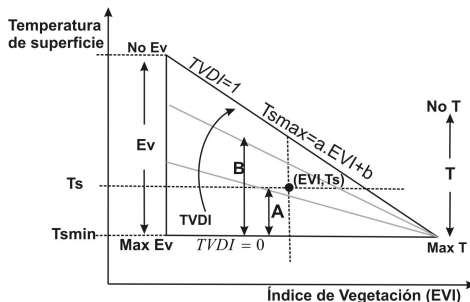


Figura 1. Definición del TVDI en el espacio triangular. Para un píxel dado ($EVI; T_s$), el TVDI se calcula como la proporción entre A y B (adaptado de Sandholt et al., 2002).

Antecedentes

Diversos autores han estimado la humedad superficial del suelo mediante el TVDI. Sandholt et al. (2002) mostraron que el TVDI calculado con imágenes NOAA-AVHRR reflejó adecuadamente la variación espacial de la humedad del suelo simulada a escala de paisaje en el área semiárida de Senegal. Mallick et al. (2009) estimaron la humedad superficial del suelo (0-5 cm) en India mediante el índice SWI (Soil Wetness Index), similar al TVDI. Estos autores, utilizando imágenes ASTER (Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer) a escala de potrero y MODIS/Aqua a escala de paisaje, hallaron mejores resultados a escala de paisaje, pues ASTER no logra captar la heterogeneidad adecuada requerida por el método. Han et al. (2010) estimaron el contenido de humedad superficial en China con imágenes MODIS/Terra, encontrando una fuerte relación ($R^2=0,76$). En Argentina, Rivas y Houspanossian (2006), Vázquez y Rivas (2010) y Holzman y Rivas (2012) demostraron la capacidad del TVDI para estimar la humedad superficial del suelo (0-20 cm de profundidad) en la región pampeana. No obstante estos diversos trabajos, aún no se ha indagado en la

capacidad del TVDI para estimar la humedad subsuperficial del suelo.

Características del área de estudio

El área de estudio se ubica en el sector este de la Pampa arenosa (35° 09'S; 61° 07'O) (Pereyra, 2003). Los procesos eólicos han dado como resultado un paisaje con notable presencia de médanos. En cuanto al clima, la temperatura media anual es de 18 °C, con máximas de 23 °C en enero y mínimas de 10 °C en julio. La precipitación anual es mayor a 800 mm. Con una evapotranspiración potencial (ETP) aproximada de 800 mm, el exceso hídrico es nulo o muy bajo, con déficit estacionales de 100 mm.

En cuanto a los suelos, por la regularidad de la pluviometría, el régimen de humedad predominante es el údico. Predominan suelos Argiudoles Típicos, con un horizonte superficial con alto contenido de materia orgánica y uno subsuperficial enriquecido en arcillas iluviales (Bt), los cuales fueron cubiertos por sedimentos eólicos de texturas más gruesas (arenosos). Donde dominan estos sedimentos, los suelos tienen poco contenido de materia orgánica, su estructura es débil y con una alta permeabilidad.

Con respecto a los cultivos, entre los de invierno domina el trigo y avena, cubriendo aproximadamente el 8 % del área sembrada. En verano domina el cultivo de soja, cubriendo aproximadamente el 30% del área sembrada (fuente de datos: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca-MAGyP). Cabe destacar que el trigo y la avena tienen una profundidad de exploración radicular aproximada de 50 cm, en cambio para la soja es de aproximadamente 1 metro. De esta forma este cultivo de verano puede cubrir sus requerimientos de agua extrayéndola a mayor profundidad.

Metodología

El período de estudio comprendió desde el 01/01/2012 al 26/02/2012, durante el cual se observaron condiciones variables de humedad. Esto permitió evaluar la capacidad del TVDI de detectar distintas condiciones de humedad del suelo. En cuanto a las imágenes satelitales, el análisis de la Ts se realizó mediante el uso de imágenes productos diarios del sensor MODIS/Aqua (MYD11A1). El EVI se calculó en base al producto de reflectancias diarias (MYD09GA) (reverb.echo.nasa.gov/reverb/). El uso de estos productos facilita la aplicación del método por parte de usuarios no experimentados en el procesamiento de

imágenes, ya que requieren un mínimo tratamiento.

Las imágenes fueron procesadas con el software ENVI y re proyectadas a coordenadas Geográficas (Lat/Long), Datum WGS84. Se obtuvieron los mosaicos del área de estudio y luego, en base a los pares de imágenes diarios se realizaron los diagramas triangulares de dispersión Ts/EVI, obteniéndose los límites secos y húmedos de las imágenes analizadas. Se definió un límite seco extremo que refleje las mayores Ts para distintos intervalos de EVI de la serie (mayor ordenada al origen y pendiente) y un límite húmedo extremo que muestre las Ts más bajas de la serie para distintos grados de cobertura de vegetación (menor T_{min}). Esto permitió hacer comparables temporalmente los valores de TVDI. Finalmente, en base a estos límites se calcularon las imágenes diarias de TVDI (Holzman et al., 2012). Descartando las imágenes con cobertura de nubes, se contó con un total de 25 datos.

Con el fin de encontrar una relación física que permita definir distintos grados de condición hídrica del suelo, se compararon los valores diarios medidos de tensión de humedad del suelo con el TVDI medio de una cuadrícula de 3x3 km centrada en las coordenadas de la estación de muestreo. Dicha estación está ubicada en la estancia La Ydalina (35° 08' 57,66"S; 61° 07' 31,15"O), donde se midió la tensión de humedad del suelo a 60 cm de profundidad sobre una superficie cultivada con soja. La estación instalada es marca Davis, modelo Vantage PRO2, cuyos sensores miden la tensión de humedad en valores que varían entre 0 y 200 centibares, indicando máxima y mínima humedad del suelo, respectivamente. Estos datos fueron cedidos por la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA) del MAGyP.

Resultados y discusión

La Fig. 2 muestra los límites secos y húmedos del día más seco y húmedo de la serie analizada. El límite seco extremo utilizado para el cálculo del TVDI correspondió al día 09/01/2012 (Fig. 2C), en el cual se observó la mayor pendiente y ordenada al origen. El límite húmedo extremo correspondió al día 31/01/2012 (Fig. 2B), fecha en la que se observó el menor valor de T_{min}. Estos límites extremos permitieron una correcta definición de los parámetros necesarios para el cálculo del TVDI y hacer comparables los valores de distintas fechas. Con respecto a los límites secos, los elevados coeficientes de determinación R² (0,92 y 0,93) indican que tales límites son definidos adecuadamente mediante la ecuación $a.EVI+b$.

Se observan notables contrastes en los parámetros de los ajustes lineales entre períodos secos y húmedos, con diferencias de 3.8 K en la pendiente y 15 K en la ordenada. En el caso del límite húmedo, la T_{smin} extrema fue de 298 K, indicando máxima disponibilidad de agua en el suelo.

La Fig. 3 muestra la relación entre la tensión normalizada de las sondas de humedad a 60 cm de profundidad y el TVDI diario. Los datos de tensión fueron normalizados en base al valor mínimo (35 centibares, registrado el día 31/01/2012) y máximo (195 centibares, registrado el día 09/01/2012) observados en la serie analizada. Los datos fueron variables, con valores extremos e intermedios, lo que permitió su comparación con el TVDI a distintas condiciones de humedad. Se observa una buena correlación lineal ($R^2=0,69$) entre la tensión medida y el TVDI. Esto verifica que valores bajos del TVDI se corresponden con condiciones de alta humedad subsuperficial del suelo, lo que concuerda con un trabajo de Holzman y Rivas (2012), donde para el centro de la provincia de Buenos Aires se hallaron R^2 de 0,82 y 0,60 para contenidos de humedad superficial de suelo medidos a 10 y 20 cm de profundidad, respectivamente. En conjunto,

estos resultados muestran que el TVDI tiene la capacidad de detectar las condiciones de humedad en el perfil de suelo. En caso de superficies con suelo desnudo el índice sería un indicador de la humedad superficial, pues los cambios en la T_s están asociados al control evaporativo y la inercia térmica del suelo. Por otro lado, en áreas vegetadas el índice tiene la capacidad de reflejar las condiciones de humedad del perfil explorado por las raíces de la vegetación, ya que ante cambios en la humedad disponible primeramente se producirán cambios térmicos y posteriormente en el índice de vegetación.

La recta punteada de la Fig. 3 muestra la relación 1:1 entre las variables, es decir la correlación perfecta entre ellas. Se observa que el TVDI muestra una tendencia a la sobreestimación de las condiciones de humedad del suelo. La mayor parte de los puntos (84%) de los puntos se ubican en el área del $\pm 20\%$, lo que indica que con el TVDI se podría obtener mapas de las condiciones de humedad del suelo con errores aproximados del 20%.

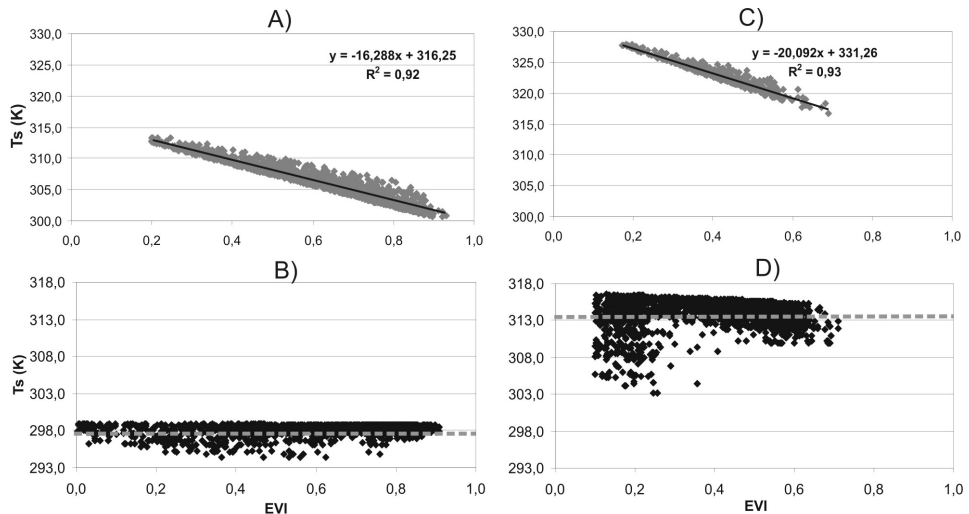


Figura 2. Límites seco (A) y húmedo (B) del día más seco (09/01/2012) y límites seco (C) y húmedo (D) del día más húmedo (31/01/2012) de la serie analizada.

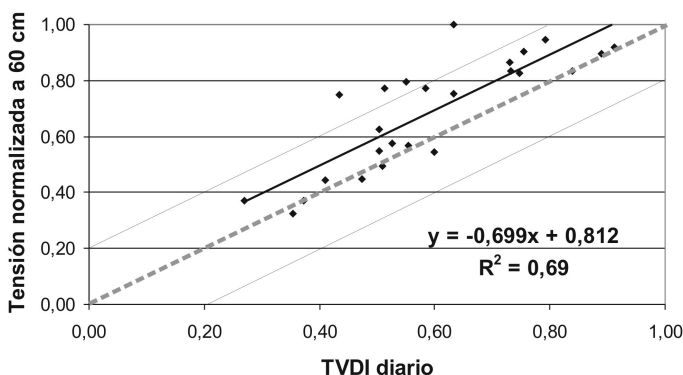


Figura 3. Relación entre el TVDI diario y la tensión de humedad medida a 60 cm de profundidad.

Conclusiones

En este trabajo se evaluó la capacidad del índice de estrés hídrico TVDI para estimar las condiciones de humedad subsuperficial del suelo con información sólo de satélite. Las imágenes MODIS de 1 km permitieron detectar la heterogeneidad de condiciones de cobertura y humedad del suelo necesaria para la correcta definición de los parámetros del TVDI. A su vez, metodológicamente se definieron parámetros extremos (límite seco y húmedo) para la serie analizada, evitando la sobre o subestimación del índice y haciendo comparables sus valores temporalmente.

La alta correlación del TVDI con la humedad subsuperficial medida en el norte de la provincia de Buenos Aires demostró la capacidad del índice para detectar la condición de humedad en el sector del perfil del suelo explorado por las raíces de la vegetación. Si bien se deben continuar con análisis más exhaustivos de la humedad subsuperficial en coberturas de vegetación de distinto tipo, estos resultados representan un avance importante en la estimación de la humedad del suelo desde satélite. En este sentido, tradicionalmente los trabajos previos se han centrado en la estimación de la humedad superficial del suelo (0-20 cm). Si bien esta humedad tiene gran incidencia en procesos de escurrimiento en cuencas y de interacción superficie-atmósfera, su importancia es menor en procesos hidrológicos como los del sistema suelo-planta-atmósfera o la recarga de acuíferos. Finalmente se propone al TVDI como un método sencillo que permite la obtención de mapas de humedad

del suelo como base para distintos estudios hidrogeológicos.

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a la Oficina de Riesgo Agropecuario (MAGyP) por brindarnos los datos de terreno de tensión de humedad, a la CIC, ANPCyT y al CONICET por al apoyo económico que hizo posible este trabajo.

Referencias

- Carlson, T. N., Gillies, R. R., and Perry, E. M. 1994. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews* (9): 161–173.
- Han, Y., Wang, Y. and Zhao, Y. 2010. Estimating soil moisture conditions of the Greater Changbai Mountains by Land Surface Temperature and NDVI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48 (6): 2509-2515.
- Holzman, M. E. y Rivas, R. 2012. Estimación del estrés hídrico en cultivos y su relación con el rendimiento. *Congreso Argentino de Teledetección*, Córdoba.
- Holzman, M. E., Rivas, R. y Piccolo, M. C. 2012. Utilización de imágenes de temperatura radiativa e índice de vegetación mejorado para el estudio de las condiciones hídricas en la región pampeana. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería* (28): 25-33.
- Mallick, K., Battacharya, B.K. and Patel, N.K. 2009. Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and

- NDVI. *Agricultural and Forest Meteorology*, (149): 1327-1342.
- Norbiato, D., Borga, M., Degli Esposti, S., Gaume, E. and Anquetin, S. 2008. Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: an assessment for gauged and ungauged basins. *Journal of Hydrology*, 362 (3–4): 274–290.
- Pereyra, F. 2003. Ecorregiones de la Argentina. SEGEMAR. ISSN 0328-2325, 189 pp.
- Price, J. C. 1990. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (28): 940–948.
- Rivas, R. y Houspanossian, J. 2006. Obtención de mapas de estrés hídrico a partir de datos captados por los sensores AVHRR y MODIS. *VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*, Paraguay.
- Sandholt I., Rasmussen, K. and Andersen, J. 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing and Environmental*, 79 (2-3): 213–224.
- Stisen, S., Sandholt, I., Nöørgard, A., Fensholt, R. and Jensen, K.H., 2008. Combining the method with thermal inertia to estimate regional evapotranspiration-applied to MSG-SEVIRI data in the Senegal River basin. *Remote Sensing of Environment* (112): 1242–1255.
- Vázquez P. y Rivas R. 2010. Comparación de Índices de Estrés Hídrico (CWSI, WDI y TDVI) utilizando datos del sensor MODIS. *Actas X Congreso de ALHSUD*, Ref.90-AR, T4:1-8. Caracas, Venezuela. ISBN 978-980-7346009-9.
- Wang, K.C., Li, Z.Q. and Cribb, M.M., 2006. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: a new method to determine Priestley-Taylor parameter. *Remote Sensing of Environment* (102): 293–305.