

EXPERIMENTOS *IN SITU* PARA MEJORAR LA ESTIMACIÓN REMOTA DE HUMEDAD DEL SUELO EN BANDA L

N. Sánchez¹, J. Martínez Fernández¹, M. Piles^{2,3}, A. Aguasca², G. Baroncini-Turricchia¹, M. Vall-Ilosera^{2,3}, A. Camps^{2,3}, A. Monerris^{2,3}, N. Rodríguez Álvarez²

¹ Centro Hispano Luso de Investigaciones Agrarias. Universidad de Salamanca. c/ Duero, 12. 37185 Villamayor. E-mail: nilda@usal.es.

² RSLab/UPC and IIEC-CRAE/UPC. Jordi Girona 1-3, 08034. Barcelona. Spain

³ SMOS Barcelona Expert Centre. Pg. Marítim de la Barceloneta 37-49, 08003 Barcelona, Spain.

RESUMEN. Las actuales misiones espaciales que cuentan con sensores pasivos para la estimación de humedad de suelo, tal como SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*, de la Agencia Europea del Espacio), tienen una resolución espacial en torno a 40 km, lo que resulta insuficiente para aplicaciones locales y regionales, en las que se necesita en torno a 1-10 km. Por otro lado, los modelos de estimación de humedad de estos radiómetros necesitan computar los efectos de la vegetación, los cuales se pueden relacionar con su contenido de agua (*Vegetation Water Content*, VWC), el índice de área foliar (*Leaf Area Index*, LAI), el índice de vegetación normalizado (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) y la fracción de cobertura vegetal verde (*Fraction of Vegetation Cover*). En relación con estos dos conceptos, se planteó una campaña durante 2009 (*GPS and Radiometric Joint Observations one-year field experiment*, GRAJO) en la Red de Estaciones de Medición de Humedad de Suelo de la Universidad de Salamanca (REMEDIHUS), situada en la zona central de la cuenca del Duero (Zamora). El objetivo, entre otros, fue explorar: (1) la mejora de la resolución espacial de las estimaciones remotas de humedad a través de imágenes en el visible y el infrarrojo, y (2) las relaciones entre los parámetros de vegetación y humedad mediante mediciones directas e indirectas *in situ*.

Para el primer objetivo se realizaron varios vuelos con un sensor aerotransportado en banda L (*Airborne Radiometer at L-band*, ARIEL) coincidiendo con el paso del satélite Landsat 5 en la zona. El NDVI y la temperatura de superficie se derivaron de la imagen Landsat. Aplicando sobre estos datos el concepto del 'triángulo universal', que relaciona humedad de suelo con parámetros espectrales del visible y el infrarrojo, se consiguió mejorar la resolución y la estimación de humedad de suelo derivada de ARIEL hasta en un 40%.

Por su parte, la relación entre parámetros de vegetación del segundo objetivo fue investigada en dos parcelas de cebada y pastizal durante el ciclo vegetativo de 2009. Los resultados mostraron que NDVI, LAI y FVC estaban muy correlacionados con VWC en ambas especies. Ello indica que el contenido de agua de la vegetación, que es crítico en la estimación de humedad de suelo, podría ser obtenido indirectamente a partir de mediciones de esos tres parámetros.

passive observations of surface soil moisture, such as SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity, European Space Agency) will provide global maps of soil moisture every 3-days, with high accuracy (0.04 m³/m³) and a spatial resolution of ~ 40 km. This resolution is adequate for many global applications but restricts the use of the data in regional applications, where a resolution of 1-10 km is needed. On the other hand, a variety of models have been developed to account for the vegetation effect on the observed microwave signal. This effect can be related with the Vegetation Water Content VWC, the Leaf Area Index (LAI), the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Fraction of Vegetation Cover (FVC). Two experiments have been carried out at the REMEDIHUS Cal/Val site (Duero basin, Zamora, Spain) within the GPS and Radiometric Joint Observations one-year field experiment (GRAJO) to explore: (1) the possibility of enhancing the spatial resolution of SMOS-derived soil moisture estimates using higher-resolution visible-infrared data; and (2) the relationship between vegetation parameters and soil moisture using *in situ*-based estimations.

In the first experiment, several flights were performed over the area using the Airborne Radiometer at L-band (ARIEL), coincident with a Landsat 5 overpass. The NDVI and surface temperatures derived from the Landsat image were used to improve the spatial resolution of the airborne observations, using a downscaling algorithm based on so-called universal triangle concept. This triangle relates visible-infrared parameters to soil moisture. The results showed that the agreement between ARIEL-derived soil moisture and ground-based soil moisture was improved by a 40% when applying the downscaling technique.

The relationships between some vegetation canopy parameters were studied in the second experiment for two plots of barley and grass located over the study area during a complete growing season in 2009. Results showed that NDVI, LAI, FVC and VWC were strongly correlated for both covers. Thus, it is possible to infer that NDVI, LAI and FVC data would be appropriate to estimate the VWC needed in the soil moisture retrieval algorithm. These relationships encouraged us to deeply explore the VWC estimation by means of measurements of NDVI, LAI and FVC.

ABSTRACT. The current satellite missions devoted to

1.- Introducción

La medición de la humedad de suelo desde sensores remotos se basa en la variación de la constante dieléctrica del suelo con el contenido de agua, variación que repercute en la propagación de las ondas electromagnéticas en esas bandas (Kerr et al., 2010). Estas oscilaciones naturales son recogidas por el dispersómetro o radiómetro pasivo, y posteriormente se convierten en humedad de suelo. Estudios teóricos y experimentales con radiómetros terrestres aerotransportados han demostrado que la detección pasiva de microondas en banda L es óptima para la medición de humedad del suelo, debido a que la atmósfera es transparente a estas frecuencias, y a la relación directa de emisividad del suelo con su contenido de agua en presencia de la mayoría de las cubiertas vegetales. Sin embargo, debido a la dificultad de conseguir la resolución temporal y espacial adecuadas (Jackson et al., 1996), no es hasta 2009 cuando la Agencia Europea del Espacio (ESA) lanza el primer satélite con un radiómetro en banda L dedicado a observaciones de humedad de suelo: SMOS (Kerr et al., 2001). La carga útil de SMOS es MIRAS (*Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis*), el primer radiómetro en banda L polarimétrico de apertura sintética en dos dimensiones para la observación de la Tierra.

La mejora de la resolución espacial de los datos SMOS se puede abordar, entre otras técnicas, utilizando algoritmos de *downscaling* sobre imágenes de mayor resolución espacial del espectro visible o infrarrojo (Chauhan et al., 2003; Merlin et al., 2005; Carlson, 2007; Piles et al. 2010). En este trabajo se presenta una propuesta que utiliza una imagen Landsat 5 (visible, infrarrojo cercano y térmico), imágenes aerotransportadas en banda L del radiómetro ARIEL y el concepto de *universal triangle* (Carlson et al., 1997; Carlson, 2007).

La validación de datos SMOS con humedad *in situ* es compleja, pues el valor del pixel es un valor promedio para una zona extensa, mientras que la medida en el terreno representa un valor aislado y puntual. Además, la presencia de vegetación sobre el suelo produce un efecto pantalla que dificulta la medida de su contenido de humedad. La densidad de la masa vegetal, su superficie foliar, su estado fenológico, su contenido de humedad, la altura, el marco de plantación y el tipo de práctica agrícola, sumados a otros factores ambientales (rocío, lluvia, hielo), producen un enmascaramiento de la emisividad natural del suelo. Para modelar el efecto de la vegetación, entre todos los modelos descritos en la literatura, el más frecuente y sencillo, y el usado por SMOS, es el modelo de transferencia radiativa llamado $\tau-\omega$ (Mo et al., 1982), que describe la influencia de la vegetación mediante dos parámetros: el albedo y la transmisividad de la cobertura vegetal. Si bien el primero puede ser tomado de la literatura o simplemente considerarse nulo (Wigneron et al., 2007), el segundo se relaciona con otro parámetro, el espesor óptico de la vegetación. Éste, a su vez, se relaciona con el contenido de agua de la vegetación (Jackson y Schmugge, 1991) y con índices de vegetación como el LAI y el NDVI (Owe et al., 2001). En el contexto del presente trabajo, se trató de

encontrar una relación ajustada para las coberturas de estudio, típicas de usos agrícolas (cereal y pastizal), entre diferentes parámetros susceptibles de caracterizar el espesor óptico, como el LAI, NDVI, VWC y FVC. Por último, se relacionaron estos parámetros con el contenido de agua en el suelo.

2.- Localización y diseño experimental

El experimento GRAJO tuvo lugar entre los meses de noviembre de 2008 y mayo de 2010 dentro de la zona REMEDHUS (Fig. 1a), en una finca agrícola situada en Vadillo de la Guareña, Zamora (41.3101° N, 5.3680° W, 716 m de altitud). REMEDHUS se localiza sobre una superficie de unos 1300 km² entre las provincias de Zamora, Valladolid y Salamanca, en la zona central de la cuenca del Duero. GRAJO consistió en la monitorización, con diferente instrumental y campañas de medición, de dos parcelas de 40 m² cada una con especies típicas de la zona: pastizal (*Festuca arundinacea*) y cebada (*Hordeum vulgare*) (Fig. 1b). Se midieron humedad y temperatura de suelo, parámetros de vegetación, variables meteorológicas y la respuesta espectral tanto del suelo como de la cobertura vegetal. Para la humedad y temperatura, se instalaron dos sensores Hydra (Stevens® Water Monitoring System, Inc.) y dos termistores a 5 cm de profundidad en cada parcela. Las variables meteorológicas fueron registradas en una estación meteorológica automática. Para el seguimiento espectral, se combinaron diferentes estrategias. De forma continuada, un radiómetro (LAURA, L-band AUTOMATIC RADIOMETER) en banda L de la región de las microondas observó las parcelas desde una plataforma situada a 3 m de altura. Desde esa misma posición, se instaló un receptor GPS sobre la parcela de cebada, para realizar mediciones mediante la técnica de GNSS-R (*Global Navigation Satellite Systems opportunity signals Reflected*) (Rodríguez-Alvarez et al., 2011). También se midió reflectividad con espectrorradiómetro de campo (en bandas del visible y el infrarrojo cercano) puntualmente a lo largo del ciclo fenológico de las especies.

Acompañando a este dispositivo se realizaron campañas intensivas de distinta naturaleza a lo largo de la duración del experimento, entre ellas las realizadas con ARIEL a bordo de una avioneta teledirigida sobre la zona de la granja, en un área de 1 km² (Fig. 1a) con el objetivo de estimar humedad de suelo (Acevo-Herrera et al., 2010). Simultáneamente a los vuelos se realizaron mediciones de humedad, vegetación y espectrorradiometría en diferentes puntos y usos de suelo de esa zona.

3.- Relación entre parámetros vegetales de festuca y cebada y contenido de agua mediante estimaciones directas e indirectas.

El objetivo de este experimento fue mejorar la estimación de aquellos parámetros de la cobertura vegetal relacionados con su contenido de agua y el del suelo. Especialmente se

trataron de relacionar contenido de agua e índices de vegetación. Para determinar las relaciones más consistentes se hicieron medidas directas e indirectas sobre la cobertura de festuca y cebada cada 15 días a lo largo de sus ciclos fenológicos, siguiendo un esquema similar de otros trabajos (Gonzalez-Dugo y Mateos, 2008). Los parámetros estimados directamente fueron LAI y VWC.

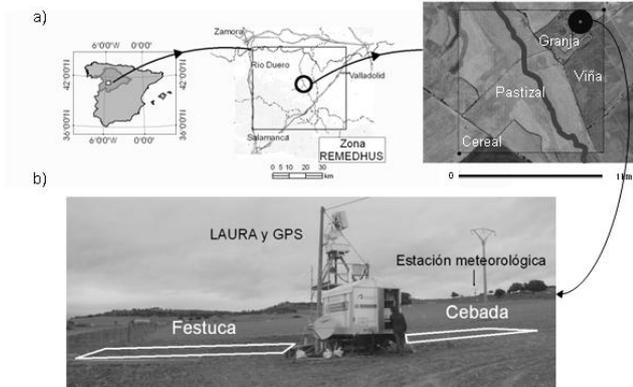


Fig. 1. Localización de los experimentos en REMEDHUS. (a) Zona del vuelo ARIEL, (b) Parcelas experimentales y radiómetro LAURA y GPS.

El LAI verde fue estimado mediante escaneado de las muestras, en las que se seleccionó la parte fotosintéticamente activa mediante el software *Image J* (Abramoff et al., 2004). El VWC se estimó mediante diferencia de los pesos seco y fresco de la muestra. El peso seco se obtuvo secando la muestra en estufa a 105°C al menos durante 24 horas hasta estabilizar el peso (Gilbert et al., 1996).

Respecto a las mediciones indirectas, se utilizó un espectrorradiómetro de campo Ocean Optics y una cámara digital instalados sobre una torre a 3 m de altura. Mediante el espectrorradiómetro se tomaron valores de reflectividad (ρ) en las bandas del rojo y del infrarrojo, que sirvieron para calcular el NDVI, de la forma (Rouse et al., 1974):

$$NDVI = (\rho_{infrarrojo} - \rho_{rojo}) / (\rho_{infrarrojo} + \rho_{rojo}) \quad (1)$$

La FVC se calculó a partir de fotografías cenitales tomadas sobre la cobertura vegetal. El porcentaje de cobertura verde y seca fue separado del porcentaje total mediante una clasificación supervisada (Calera et al., 2001).

La festuca tiene un desarrollo más tardío que la cebada (Fig. 2 y 3) y no alcanza claramente el estado madurez, probablemente debido a que ese periodo, al ser más tardío, coincide con ausencia de lluvias. Se observa que el NDVI, relacionado con el vigor vegetativo, presenta el típico adelanto respecto a la formación de biomasa y contenido de agua (Calera et al., 2004). Ello hace pensar que el NDVI correlacionaría bien con LAI, FVC y VWC, pero con cierto adelanto temporal, por lo que algunos autores sugieren utilizar el NDVI integrado en el tiempo (Yang et al., 1998). Los resultados mostraron una fuerte correlación de LAI, NDVI y FVC con VWC (Fig. 2 y 3 y Tablas 1 y 2), lo que permite inferir que el contenido de agua en la planta puede ser obtenido a partir de cualquiera de esas tres variables.

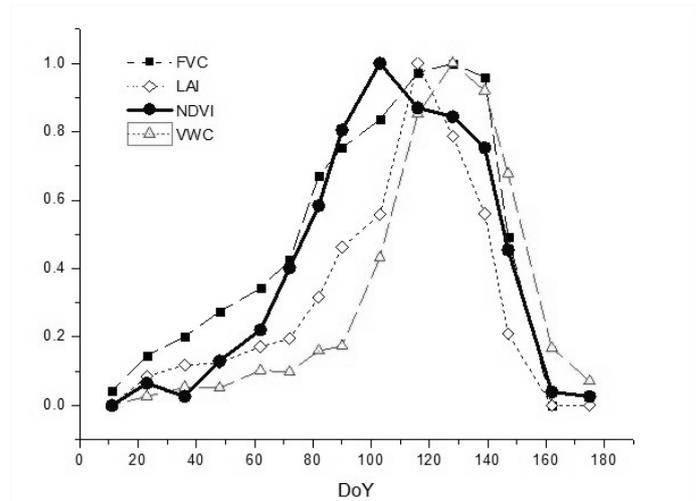


Fig. 2. Valores normalizados de la cobertura vegetal a lo largo del ciclo fenológico de la cebada.

Ninguna de las variables mostró una correlación significativa con el contenido de agua en el suelo, especialmente en el caso de la cebada; y en cualquier caso siempre mostraron correlación inversa (Tablas 1 y 2). La relación entre NDVI y vigor vegetal podría sugerir la dependencia con contenido de agua en el suelo, pues para cultivos herbáceos anuales, el estado hídrico de la planta se relaciona directamente con la humedad de suelo en la zona de raíces (Ridder et al., 1983). Sin embargo, diferentes intentos de relacionar linealmente el NDVI con las mediciones directas como los de Wang et al. (2007), Chen et al. (2005) y Adegoke et al. (2002), han dado resultados pobres. Mejores resultados han dado el uso de índices de vegetación en el ámbito del visible y el infrarrojo junto con aplicaciones de microondas para establecer parámetros intermedios en la estimación de humedad de suelo (Owe et al., 2001; Sikdar et al., 2005; Lakhankar et al., 2006), como aquí se sugiere.

Tabla 1. Coeficiente de correlación (R) entre parámetros estimados a lo largo del ciclo de la cebada.

	NDVI	LAI	Biomasa	VWC	FVC
NDVI		0.92	0.57	0.75	0.97
LAI			0.61	0.82	0.93
Biomasa				0.93	0.66
VWC					0.80
FVC					
Humedad suelo	-0.43	-0.32	-0.67	-0.51	-0.44

4.- Experimento de *downscaling* a partir de Landsat y radiómetro aerotransportado en banda L.

El objetivo de este experimento fue mejorar la resolución espacial de imágenes remotas concebidas para la estimación de humedad de suelo. Se utilizó ARIEL, sobrevolando la zona al tiempo del paso del sensor TM de

Landsat 5 en la zona de GRAJO (23/03/2009).

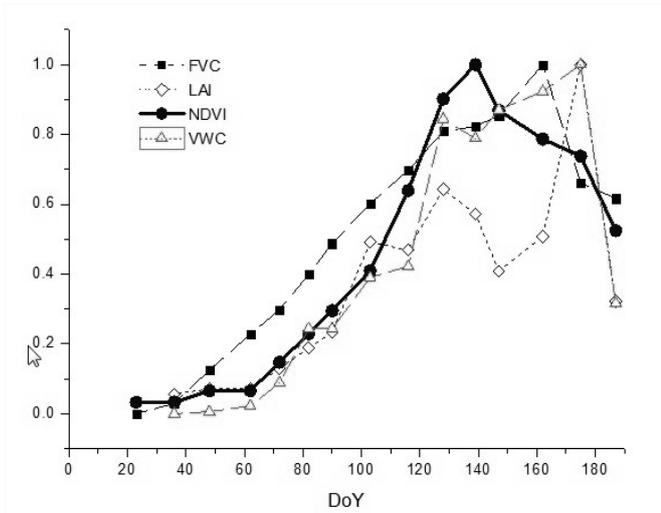


Fig. 3. Valores normalizados de la cobertura vegetal a lo largo del ciclo fenológico de la festuca.

Tabla 2. Coeficiente de correlación (R) entre parámetros estimados a lo largo del ciclo de la festuca.

	NDVI	LAI	Biomasa	VWC	FVC
NDVI		0.81	0.90	0.92	0.95
LAI			0.81	0.89	0.75
Biomasa				0.98	0.90
VWC					0.90
FVC					
Humedad de suelo	-0.85	-0.71	-0.75	-0.75	-0.81

El concepto del *universal triangle* se basa en la forma del diagrama de dispersión entre observaciones de temperatura de superficie y valores de NDVI, que puede relacionarse con contenidos de agua en el suelo (Carlson, 2007). Diferentes estudios teóricos y experimentales han demostrado que puede encontrarse una única relación entre humedad de suelo, NDVI y temperatura para una determinada región bajo un amplio rango de condiciones climáticas y tipos de suelos (Piles, 2010). Esta relación se puede expresar como una regresión de la forma:

$$\theta = \sum_i^n \sum_j^n a_{ij} NDVI_i T_j \quad (2)$$

donde θ es el contenido de agua en suelo, a_{ij} los coeficientes de la regresión y T la temperatura superficial, en este caso derivada de Landsat 5, al igual que el NDVI. El cálculo del algoritmo conlleva los siguientes pasos:

1. La humedad de suelo se obtiene a partir de ARIEL (correlacionada con medidas directas de humedad *in situ*).
2. Los valores de NDVI y temperatura de Landsat se

relacionan con la humedad de suelo a la resolución de ARIEL, y se obtienen los coeficientes de regresión a_{ij} . Los coeficientes de regresión calculados se aplican a Landsat para obtener humedad de suelo a mayor resolución.

Los resultados se validaron con la campaña intensiva de medición de humedad *in situ* simultánea (Fig. 4). Se observa que la humedad de suelo resultante del algoritmo reproduce las variaciones espaciales de la medida directa. Comparando los resultados de la humedad de suelo obtenida directamente de ARIEL con la obtenida con el proceso de *downscaling* a través de Landsat, se obtuvo un RMSE para la primera de $0.112 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y para la segunda de $0.069 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ lo que representa una mejora del 40% en la estimación.

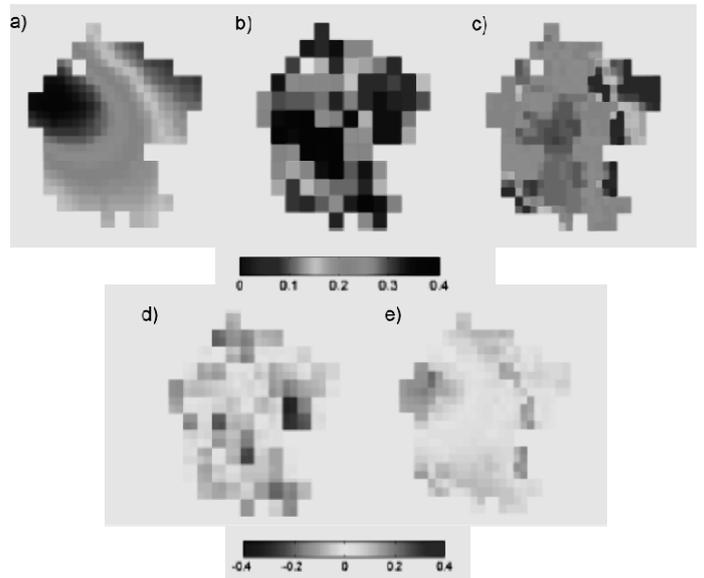


Fig. 4. Humedad de suelo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) en la zona GRAJO a partir de datos *in situ* (a), ARIEL (b) y el algoritmo de *downscaling* (c). También se representa el error ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) obtenido con ARIEL (d) y con el algoritmo (e).

5.- Conclusiones

Los dos experimentos demuestran la sinergia entre observaciones radiométricas pasivas en microondas y las observaciones a mayor resolución del visible e infrarrojo, tanto remotas como a escala de parcela, en el contexto del cálculo de humedad de suelo. Ese potencial debe ser explorado para mejorar la resolución espacial de las estimaciones derivadas de satélites como SMOS, por ejemplo, pero también para usarse en estrategias de validación con productos distribuidos de humedad de suelo a mayor resolución.

La relación encontrada entre contenido de agua en las plantas con NDVI, LAI y FVC abre las posibilidades de parametrización del algoritmo de transferencia radiativa para calcular humedad de suelo a través de estimaciones indirectas de sendas variables, relativamente sencillas de obtener. Sin embargo, no se ha encontrado una relación lineal directa entre esas variables y humedad de suelo, por lo que se sugieren estrategias de modelización para

integrarlas en el cálculo de humedad, tales como el citado algoritmo de transferencia radiativa.

Agradecimientos: Este trabajo no habría sido posible sin la ayuda de los proyectos ESP2007-65667-C04-04, AYA2009-06844-E y AYA2010-22062-C05-05/02 del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

6.- Referencias

- Abramoff, M. D., Magelhaes, P. J. y Ram, S. J. (2004). Image Processing with ImageJ. *Biophotonics International* 11(7), 36-42.
- Acevo-Herrera, R., Aguasca, A., Bosch-Lluis, X., Camps, A., Martínez-Fernández, J., Sánchez-Martín, N. y Pérez-Gutiérrez, C. (2010). Design and first results of an UAV-borne L-band radiometer for multiple monitoring purposes. *Remote Sensing* 2, 1662-1679.
- Adegoke, J. O. y Carleton, A. M. (2002). Relations between soil moisture and satellite vegetation indices in the U.S. Corn Belt. *American Meteorological Society* 3, 395-405.
- Calera, A., Martínez, C. y Meliá, J. (2001). A procedure for obtaining green plant cover: relation to NDVI in a case study for barley. *International Journal of Remote Sensing* 22(17), 3357-3362.
- Calera, A., González-Piqueras, J. y Meliá, J. (2004). Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *International Journal of Remote Sensing* 25(1), 97-109.
- Carlson, T. (2007). An overview of the "triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. *Sensors* 7, 1612-1629.
- Carlson, T. N., Cui, J., Kustas, W. P. y Humes, K. S. (1997). A verification of the "triangle" method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the NDVI and surface radiant temperature. 18, 3145-3166.
- Chauhan, N., Miller, S. y Ardanuy, P. (2003). Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: a microwave-optical/IR synergistic approach. *International Journal of Remote Sensing* 22, 4599-4622.
- Chen, D., Huang, J. y Jackson, T. J. (2005). Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands. *Remote Sensing of Environment* 98, 225-236.
- Gilbert, M. A., Gandía, S. y Meliá, J. (1996). Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sensing of Environment* 55, 11-20.
- Gonzalez-Dugo, M. P. y Mateos, L. (2008). Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops. *Agricultural Water Management* 95, 48-58.
- Jackson, T., Schmugge, T. y Engman, E. (1996). Remote sensing applications to hydrology: soil moisture. *Hydrological Science Journal* 41, 517-530.
- Jackson, T. J. y Schmugge, T. J. (1991). Vegetation effects on the microwave emission of soils. *Remote Sensing of Environment* 36, 203-212.
- Kerr, Y., Waldteufel, P., Wigneron, J.-P., Delwart, S., Cabot, F., Boutin, J., Escorihuela, M.-J., Font, J., Reul, N., Gruhier, C., Juglea, S. E., Drinkwater, M. R., Hahne, A., Martin-Neira, M. y Mecklenburg, S. (2010). The SMOS Mission: new tool for monitoring key elements of the Global Water Cycle. *Proceedings of the IEEE* 98(5), 666 - 687.
- Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J. P., Martinuzzi, J. M., Font, J. y Berger, M. (2001). Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(8), 1729-1735.
- Lakhankar, T., Ghedira, H. y Khanbilvardi, R. (2006). Spatial mapping of soil moisture using RADARSAT-1 data. ASPRS 2006 Annual Conference, Reno, NV, USA, ASPRS.
- Merlin, O., Chehbouni, A. G., Kerr, Y., Njoku, E. G. y Entekhabi, D. (2005). A combined modeling and multispectral/multiresolution remote sensing approach for disaggregation of surface soil moisture: application to SMOS configuration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43(9), 2036 - 2050.
- Mo, T., Choudhury, B. J., Schmugge, T. J. y Jackson, T. J. (1982). A model for microwave emission from vegetation covered fields. *Journal of Geophysical Research* 87, 11229-11237.
- Owe, M., de Jeu, R. y Walker, J. P. (2001). A methodology for surface soil moisture and Vegetation Optical Depth retrieval using the Microwave Polarization Difference Index. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* 39(8), 1643-1654.
- Piles, M. (2010). Multiscale soil moisture retrievals from microwave remote sensing observations. Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya: 136.
- Piles, M., Camps, A., Vall-Ilossera, M., Corbella, I., Panciera, R., Rüdiger, C., Kerr, Y. H. and Walker, J. (2011), *Downscaling SMOS-Derived Soil Moisture Using MODIS Visible/Infrared Data*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49, in press.
- Ridder, N., Stroosnijder, L., Cisse, A. M. y van Kelulen, H. (1983). *Productivity of Sahelian rangelands, a study of the soils, the vegetation and the exploitation of the natural resources*. Wageningen, Wageningen, Netherlands: Agricultural University.
- Rodriguez-Alvarez, N., Vall-Ilossera, M., Camps, A., Bosch-Lluis, X., Moneris, A., Ramos-Perez, I., Valencia, E., Marchan-Hernandez, J. F., Martínez-Fernández, J., Baroncini-Turricchia, G., Pérez-Gutiérrez, C. y Sánchez, N. (2011). Land geophysical parameters retrieval using the interference pattern GNSS-R technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49(1), 71-84.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Shell, J. A., Deering, D. W. y Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Final Report, Type III. Greenbelt, MD, NASA/GSFC: 371.
- Sikdar, M., MacIntosh, S., Cumming, I. y Brisco, B. (2005). Incorporating a Vegetation Index into a Soil Moisture Retrieval Model – Results from Convair-580 SAR Data. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2005, Seoul, Korea, IEEE International.
- Wang, X., Xie, H., Guan, H. y Zhou, X. (2007). Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions. *Journal of Hydrology* 340, 12-14.
- Wigneron, J.-P., Kerr, Y., Waldteufel, P., Saleh, K., Escorihuela, M.-J., Richaume, P., Ferrazzoli, P., de Rosnay, P., Gurney, R., Calvet, J.-C., Grant, J. P., Guglielmetti, M., Hornbuckle, B., Matzler, C., Pellarin, T. y Schwank, M. (2007). L-band Microwave Emission of the Biosphere (L-MEB) Model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields. *Remote Sensing of Environment* 107, 639-655.
- Yang, L., Wylie, B., Tieszen, L. L. y Reed, B. (1998). An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U.S. Northern and Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment* 65, 25-37.

