

Estimación de la humedad del suelo a partir de índices de vegetación y microondas pasivas

C. Mattar¹, J. A. Sobrino¹, J. P. Wigneron², J. C. Jiménez-Muñoz¹ y Y. Kerr³

¹ *Unidad de Cambio Global, Universidad de Valencia*

² *INRA-Aquitaine*

³ *Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO).*

Resumen

Este estudio presenta un método simple para la corrección del efecto de la vegetación en la estimación de la humedad de la superficie (w_s) utilizando medidas radiométricas en banda-L. El método se fundamenta en una relación semi-empírica entre la humedad del suelo y la reflectividad polarizada incluyendo el efecto del espesor óptico de la vegetación, que a su vez se parametriza en función del índice de vegetación normalizado NDVI. El método se aplicó a medidas in-situ adquiridas sobre una zona de hierba en el marco del experimento SMOSREX entre los años 2004 y 2007. Dos polarizaciones (horizontal y vertical) así como cinco ángulos de incidencia (20° , 30° , 40° , 50° y 60°) fueron consideradas en el análisis. La mejor estimación de w_s se obtuvo al utilizar dos polarizaciones y un ángulo de incidencia de 40° . En promedio, la precisión obtenida en las estimaciones de la humedad del suelo considerando los efectos de la vegetación fueron aproximadamente de $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$, mejorando la estimación en $0.02 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en relación al caso en que el efecto de la vegetación no es considerado. Los resultados indican que la inclusión de la vegetación (a través de un índice como el NDVI) resulta útil para la estimación de la humedad del suelo a través de regresiones semi-empíricas.

Palabras clave: Humedad del suelo, Microondas Pasivas, Banda L, SMOS.

Abstract

Soil moisture retrieval from vegetation indices and passive microwaves

A simple approach for correcting for the effect of vegetation in the estimation of the surface soil moisture (w_s) from L-band passive microwave observations is presented in this study. The approach is based on semi-empirical relationships between soil moisture and the polarized reflectivity including the effect of the vegetation optical depth which is parameterized as a function of the Normalized Vegetation Difference Index (NDVI). The method was tested against in situ measurements collected over a grass site from 2004 to 2007 (SMOSREX experiment). Two polarizations (horizontal/vertical) and five incidence angles (20° , 30° , 40° , 50° and 60°) were considered in the analysis. The best w_s estimations were obtained when using both polarizations at an angle of 40° . The average accuracy in the soil moisture retrievals was found to be approximately $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$, improving the estimations by $0.02 \text{ m}^3/\text{m}^3$ with respect to the case in which the vegetation effect is not considered. The results indicate that information on vegetation (through a vegetation index such as NDVI) is useful for the estimation of soil moisture through the semi-empirical regressions.

Key words: Soil moisture, Passive microwave, L-band, SMOS.

* Autor para la correspondencia: christian.mattar@uv.es

Recibido: 17-07-11; Aceptado: 18-11-11.

Introducción

La humedad del suelo juega un rol fundamental en el ciclo hidrológico y en las interacciones tierra-atmósfera. Varios estudios han analizado la importancia de la humedad del suelo en una serie de áreas científicas como: simulaciones climáticas y predicción meteorológica (Beljaars *et al.*, 19996; Wetzel and Change, 1988; Wilson *et al.*, 1987; Fernesy and Shukla, 1999; Dirmeyer, 2000; Leese *et al.*, 2001), modelos de simulación de crecimientos de cultivos (de Wit and van Diepen, 2007; Guerif and Duke, 2000), modelos de precipitación y escorrentía (Eltahir, 1998), evaporacióntranspiración (Noilhan and Calvet, 1995; Wood *et al.*, 1995; Carlson, 2007), entre otras.

A pesar de la enorme importancia de la humedad del suelo, una estimación confiable, a escala regional y con una alta frecuencia temporal es relativamente difícil utilizando las técnicas convencionales a nivel puntual (Mallick *et al.*, 2009). Por lo tanto, las técnicas de teledetección aparecen como una herramienta potencial para estudiar la humedad de la superficie a diferentes escalas, tanto espaciales como temporales. En este contexto, diversos trabajos han demostrado que las medidas en el rango de las microondas pasivas son las técnicas en teledetección más relevantes para monitorear la humedad de la superficie sobre la tierra a una escala global (Ulaby *et al.*, 1986; Schumgge and Jackson, 1994; Jackson *et al.*, 1995; Pellarin *et al.*, 2003; Wigneorn *et al.*, 2003). En particular, las observaciones realizadas en frecuencias de banda L (1.4 GHz), son relevantes debido a que estas tienen una alta sensibilidad hacia la humedad del suelo y una baja sensibilidad hacia las coberturas nubosas y los efectos atmosféricos.

Recientemente se ha lanzado la misión espacial Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS). La base de la misión SMOS consiste en un radiómetro interferométrico de dos dimensiones (2D) aplicado a la banda L (1.4 GHz) que tiene por objetivo entregar mapas globales de humedad del suelo con una precisión mejor a 4% (en m^3/m^3) cada 3 días y con una resolución mejor que 50 km (Kerr *et al.*, 2001). En un futuro próximo, la misión Soil

Moisture Active and Passive (SMAP) será la segunda misión espacial que estimará la humedad de la superficie en banda-L (Entekhabi *et al.*, 2009). Estas tecnologías desarrolladas en el rango de las microondas pasivas generarán un importante cambio para el desarrollo eficiente de algoritmos que permita la estimación de la humedad de la superficie. Sin embargo, la principal dificultad en la estimación de la humedad de superficie utilizando información radiométrica en banda-L tiene relación con la presencia de la estructura de la vegetación, ya que la vegetación atenúa la emisión del suelo y adiciona su misma emisión hacia la emisión en conjunto de la superficie. No obstante, varios autores han desarrollado simples avances que consideran los efectos de la vegetación (Jackson *et al.*, 1995; Wigneron *et al.*, 1995). Generalmente, estos avances se basan en los modelos «tau-omega», los cuales fundamentan sus principios físicos en el espesor óptico de la vegetación (τ), considerado para la atenuación del efecto de la vegetación y albedo de la superficie (ω) considerado para la dispersión que genera la vegetación. El modelo L-band Microwave Emission for biosphere (L-MEB) se utiliza en los algoritmos de los productos SMOS level-2 (Wigneron *et al.* 2007; Kerr *et al.*, 2010), el cual también utiliza la base del modelo «tau-omega»

Como una alternativa a la utilización de algoritmos basados en modelos de inversión (Wigneron *et al.*, 2003), los efectos de la vegetación generados en la banda-L se han considerado en diversos estudios utilizando parametrizaciones semi-empíricas basadas en observaciones bi-angulares (Wigneron *et al.*, 2004) u observaciones bi-polarizadas (Saleh *et al.* 2006a; Saleh *et al.*, 2006b, Calvet *et al.*, 2011). Sin embargo, estos avances se basan solamente en observaciones realizadas en el rango de las microondas y no se complementan con información adicional que pueda caracterizar la estructura de la vegetación como los índices de vegetación desarrollados en el dominio óptico, como por ejemplo el NDVI o el Enhanced Vegetation Index (EVI) (Huete *et al.*, 1999). Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es presentar un método de regresión simple que permita la estimación de la humedad de la superficie utilizando datos combina-

dos óptico-microondas para considerar el efecto de la vegetación. El método está basado en regresiones semi-empíricas desarrolladas por Wigneron *et al.* (2004) pero incluyendo los efectos de la vegetación a través del NDVI. Para llevar a cabo este trabajo, se analizaron las medidas in-situ obtenidas durante el experimento SMOSREX (de Rosnay *et al.*, 2006) tal y como se describirá a continuación.

Datos

Medidas in-situ de humedad del suelo, temperatura de la superficie, temperatura de brillo en el rango de las microondas y reflectancia visible/infrarroja-cercana adquiridas durante la campaña Surface Monitoring of the Soil Reservoir Experiment (SMOSREX) (de Rosnay *et al.*, 2006) han sido utilizadas en este trabajo. El sitio SMOSREX está localizado en el área experimental de la National Office of Aerospace Study and Research (ONERA) cerca del pueblo de Mauzac en Francia (43°23'8.74"N; 1°17'32.63"E; 188 m. a. s. l.). SMOSREX integra un variado número de estudios en el rango de las microondas pasivas, precisamente en banda-L, con el fin de desarrollar modelos de emisión y simulación de datos para estimar la humedad del suelo en la zona radicular (0-1 m). El experimento de SMOSREX comenzó en el año 2001, pero a partir del año 2003 se pusieron en pleno funcionamiento todos los sensores que realizan las medidas. En el presente trabajo se procesaron datos adquiridos a partir del 1 de enero del 2004 hasta el 31 de diciembre del 2007. Estos años son representativos de una gran variedad de condiciones meteorológicas. En particular, los rangos de precipitación variaron entre 474 mm en 2005 hasta los 766 mm en 2004 (los valores para el 2006 y 2007 son 624 y 589 mm respectivamente).

Las mediciones radiométricas en banda-L se obtuvieron con el radiómetro LEWIS (L-band radiometer for Estimationg Water in soils), con una precisión de 0.2 K y un campo de visión de 13.5° a 3 dB (Lemaître *et al.*, 2004). LEWIS está instalado en lo alto de una torre de 13.7 m y está configurado para realizar mediciones automáticas sobre hierba y suelo desnudo. El es-

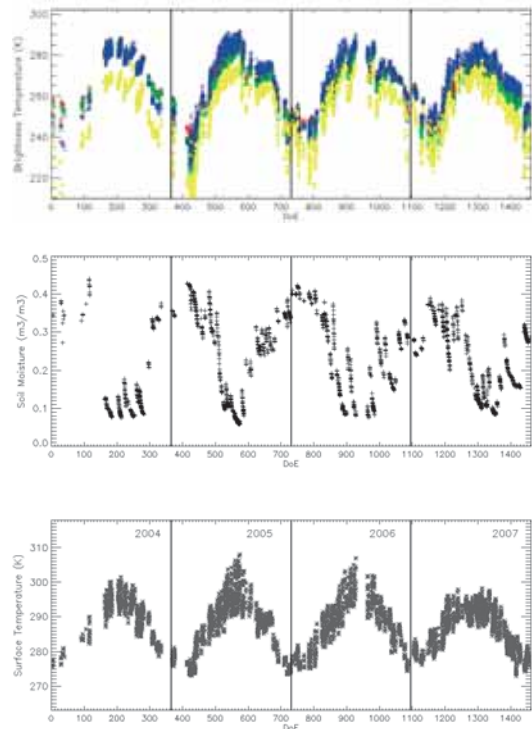


Figura 1. Series temporales entre 2004-2007 para las medidas realizadas sobre el sitio SMOSREX (a) Temperatura de brillo a 20 y 40° a una polarización vertical y horizontal representadas por las líneas negra, roja, verde y azul respectivamente, (b) contenido volumétrico de la humedad del suelo (m³/m³) entre 0-5 cm y (c) temperatura de la superficie (K) a 0-1 cm. DoE representa el día del experimento.

caneo de este sensor está diseñado para un paso automático en cinco ángulos de incidencia diferentes (20°, 30°, 40°, 50° y 60°) registrando ocho medidas por día. En este estudio sólo se utilizaron las medidas sobre la zona de hierba.

También se ha utilizado perfiles de humedad de la superficie y temperatura medidos cada 30 minutos por sensores de impedancia (ML2-Theta-probes) y termistores, respectivamente, instalados a diferentes profundidades del perfil edáfico. Para este trabajo se seleccionaron las realizadas en la primera capa de suelo que corresponden a 0-5 cm para humedad y 1 cm para temperatura del suelo. Una completa descripción de las medidas de perfiles de temperatura y humedad del suelo puede encontrarse en de Rosnay *et al.* (2006). A modo de ejemplo, la figura 1 muestra los datos de temperatura de brillo registrada por LEWIS, así como los valores de humedad y temperatura del suelo re-

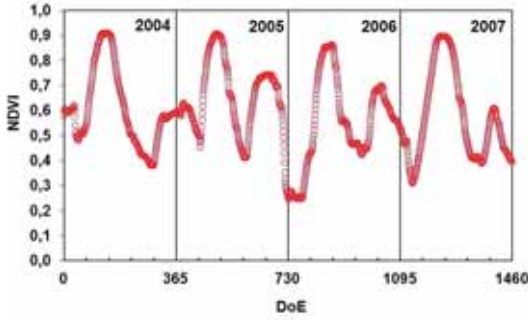


Figura 2. Valores diarios de NDVI calculados a partir de los radiómetros ópticos sobre la zona de hierba de SMOSREX entre 2004 y 2007. DoE representa el día del experimento.

gistrados durante el periodo de estudio entre 2004-2007 sobre el sitio SMOSREX.

El índice de vegetación NDVI utilizado en este estudio se calculó a partir de las medidas de reflectancia en el infrarrojo e infrarrojo cercano llevadas a cabo mediante el radiómetro óptico CIMEL entre Julio del 2003 y Diciembre del 2007. Más detalles sobre las medidas de reflectancia pueden consultarse en Albergel *et al.* (2010). La figura 2 presenta los valores de NDVI medido sobre la zona de hierba en el área SMOSREX. Para los valores de un año, se pueden apreciar dos periodos de crecimiento, uno en primavera y otro al final de la estación de verano.

Descripción del algoritmo

Base Teórica: Ecuación de transferencia radiativa

El desarrollo del algoritmo propuesto se basa en el modelo tau-omega, el cual se aplica sobre coberturas de vegetación (Ulaby *et al.*, 1986). La temperatura de brillo polarizada ($T_b(\theta, p)$) está en función del albedo ($\omega(\theta, p)$), el espesor óptico $\tau(\theta, p)$, la reflectividad del suelo $\Gamma_s(\theta, p)$ y las temperaturas efectivas del suelo y la vegetación (T_s^E and T_v^E , respectivamente):

$$T_b(\theta, p) = (1 - \omega)(1 - \gamma)(1 + \gamma \Gamma_s(\theta, p)) T_v^E + \gamma(1 - \Gamma_s(\theta, p)) T_s^E + T_b_{\theta}^{SKY1} \Gamma_s(\theta, p) \gamma^2(\theta, p) \quad [1]$$

donde $\gamma = \gamma(\theta, p)$ es la transmisividad de una capa de vegetación p -polarizada, que puede expresarse como una función del espesor óptico $\tau(\theta, p)$ y el ángulo de incidencia θ , y siendo $T_b_{\theta}^{SKY1}$ la temperatura atmosférica y extraterrestre.

$$\gamma(\theta, p) = \exp\left(-\frac{\tau(\theta, p)}{\cos(\theta)}\right) \quad [2]$$

Para simplificar la ecuación [1] sin introducir errores significativos en el resultado (Jackson *et al.*, 1995), es posible asumir que la temperatura efectiva del suelo y la vegetación son iguales. ($T_s^E = T_v^E = T_c = \text{effective surface temperature}$). Adicionalmente, la emisión atmosférica puede ser despreciada para mediciones realizadas en banda-L a nivel in-situ. Además, la temperatura atmosférica y extraterrestre es pequeña después de la reflexión con la superficie y la atenuación a través de la vegetación (Pellarin *et al.*, 2003) y por lo tanto se puede omitir.

Relación estadística de Wigneron *et al.* 2004

Si se desprecian los efectos de la dispersión en banda-L (Wigneron *et al.*, 2004), w puede ser equivalente a cero ($\omega = 0$), y el modelo tau omega queda simplificado mediante la siguiente ecuación:

$$T_b(\theta, p) = T_c(1 - \Gamma_s(\theta, p)\gamma^2(\theta, p)) \quad [3]$$

donde la emisividad de la superficie $e(\theta, p)$ definida como $e(\theta, p) = T_b(\theta, p)/T_c$ puede escribirse como

$$e(\theta, p) = 1 - \Gamma_s(\theta, p)\gamma^2(\theta, p) \quad [4]$$

Considerando que la reflectividad de la superficie puede expresarse como $\Gamma(\theta, p) = 1 - e(\theta, p)$, la ecuación [4] se reduce a:

$$\Gamma(\theta, p) = \Gamma_s(\theta, p)\gamma^2(\theta, p) \quad [5]$$

Combinando la ecuación [2] y la ecuación [5], es posible obtener la siguiente expresión:

$$\cos(\theta) \cdot \log(\Gamma_s(\theta, p)) - 2\tau(\theta, p) = \cos(\theta) \cdot \log(\Gamma(\theta, p)) \quad [6]$$

La reflectividad del suelo $\Gamma_s(\theta, p)$ es usualmente considerada como a una función casi lineal en relación a la humedad del suelo (w_s) y es relativamente baja para suelos secos (Jackson *et al.*, 1995). En el caso general no lineal, se introduce el coeficiente α , de forma que:

$$\Gamma_s(\theta, p) \cong Ap(\theta)w_s^\alpha \quad [7]$$

siendo $Ap(\theta)$ un coeficiente que depende de la configuración del sensor. Los valores de $Ap(\theta)$ y α depende de la zona de estudio, y están principalmente determinados por la textura y estructura del suelo, así como la rugosidad de la superficie.

Combinando las ecuaciones [6] y [7], se puede obtener finalmente:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) \cdot \alpha \cdot \log(w_s) - 2\tau(\theta, p) = \\ \cos(\theta) \cdot \log(\Gamma(\theta, p)) - \cos(\theta) \cdot \log(A_p(\theta, p)) \end{aligned} \quad [8]$$

Nuevo método combinado

Reordenando la ecuación [8], la humedad del suelo puede expresarse como una función de las reflectividades y del espesor óptico:

$$\begin{aligned} \log(w_s) = c_0 \cdot \log(\Gamma(\theta, p)) + \\ c_1(\theta) \cdot \tau(\theta, p) + c_2(\theta, p) \end{aligned} \quad [9]$$

donde c_0 , c_1 , y c_2 son coeficientes de regresión en los cuales el parámetro α está implícitamente considerado. Para el espesor óptico se puede asumir una independencia del ángulo de incidencia y la polarización como (Wigneron *et al.*, 2004). En este contexto, varios trabajos han demostrado que el espesor óptico puede relacionarse con algún indicador de la vegetación ya sea el índice de área foliar (Leaf Area Index, LAI), el NDVI o el EVI. Por ejemplo, relaciones entre t y el contenido de agua de la vegetación (Water Vegetation Content, WVC) e índices de vegetación calculados a partir de imágenes Landsat fueron analizados en Jackson *et al.* (2004). A escala global, se ha de-

mostrado que el espesor de la vegetación está estadísticamente relacionado con los índices de vegetación descritos anteriormente en varias coberturas terrestres (Jones *et al.*, 2011). En particular, sobre la zona SMOSREX, se determinó una relación estadística entre el espesor óptico y el LAI utilizando 2 años de medidas (Saleh *et al.*, 2006b). Además, relaciones lineales entre el espesor óptico, el LAI y el contenido de agua de la vegetación fueron también calculadas para diferentes tipos de cultivos (Calvet *et al.*, 2011) y consideradas en el modelo L-MEB para el procesador de productos Level-2 de SMOS (Kerr *et al.*, 2010). Por lo tanto, basándose en estos trabajos, es posible asumir que el espesor óptico puede ser parametrizado en función de un índice de vegetación (NDVI, EVI, LAI, etc.). En este estudio se ha seleccionado el NDVI, ya que puede estimarse fácilmente a partir de valores de reflectancias como los medidas en la zona SMOSREX o bien a partir de valores obtenidos a partir de distintos sensores de Observación de la Tierra. Por lo tanto, en este trabajo consideramos la siguiente expresión:

$$\tau = f(\text{NDVI}) \cong a \cdot \text{NDVI} \quad [10]$$

donde α es una constante que considera los efectos de la estructura de la vegetación. Utilizando las ecuaciones [9] y [10], la humedad del suelo queda expresada como una función de las reflectividades en las microondas y el NDVI:

$$\begin{aligned} \log(w_s) = a_0 \log(\Gamma(\theta, p)) + \\ a_1 \cdot \text{NDVI} + a_2(\theta, p) \end{aligned} \quad [11]$$

donde a_0 , a_1 y a_2 son los coeficientes de la regresión.

La ecuación [11] fue inicialmente desarrollada para una polarización y un ángulo de incidencia. Sin embargo, la expresión es válida para las polarizaciones horizontales y verticales y para todos los ángulos de incidencia. Por lo tanto, las contribuciones obtenidas a diferentes polarizaciones y ángulos de incidencia pueden ser sumadas. Esto se realiza con el fin de que las estadísticas en los modelos de regresión sean más eficientes mientras más án-

gulos y polarizaciones existan. Por ejemplo, considerando la ecuación [11] aplicada a dos ángulos (1 y 2) y dos polarizaciones (V y H), y utilizando la razón entre las temperaturas de brillo y de superficie ($\Gamma = 1 - Tb/Tc$), la humedad del suelo puede expresarse como:

$$\log(w_s) = a + b \left(\log \left(1 - \frac{Tb_{\theta_1,V}}{Tc} \right) \right) + c \left(\log \left(1 - \frac{Tb_{\theta_2,V}}{Tc} \right) \right) + d \left(\log \left(1 - \frac{Tb_{\theta_1,H}}{Tc} \right) \right) + e \left(\log \left(1 - \frac{Tb_{\theta_2,H}}{Tc} \right) \right) + f \cdot NDVI \quad [12]$$

siendo a , b , c , d , e y f los coeficientes de regresión de la ecuación. Pruebas estadísticas preliminares (no mostradas en este artículo) fueron realizadas con el fin de encontrar el número de ángulos más significativos para estimar la humedad de la superficie. Como resultado, la información contenida en las firmas multiangulares utilizando una bi-polarización fueron similares a la utilización de una firma bi-angular y bipolarizada (con la excepción de que el ruido del radiómetro decrece cuando el número de observaciones independiente se incrementa). Estos resultados son consistentes con los resultados numéricos descritos en (Wigneron *et al.*, 2000). Finalmente, estas pruebas estadísticas mostraron que la mejor combinación se presenta en un modo bipolarizado a una configuración angular de 40° (mono-angular) y a una configuración bi-angular de 20 y 40°. Los resultados mostrados a continuación se centran en estas dos configuraciones angulares.

Procesamiento de datos y estrategia de calibración/Validación

Para calibrar los coeficientes de la regresión correspondiente a la ecuación [12], los datos SMOSREX fueron procesados con el fin de filtrar y reordenar todo el conjunto de datos. Para este trabajo fueron utilizadas solo las observaciones que se llevaron a cabo sobre la hierba, debido a que el objetivo principal del presente trabajo es corregir el efecto de la vegetación. Datos anómalos y sesgados fueron eliminados del conjunto de datos. Por otra par-

te, para evitar el efecto de saturación del agua, los días que presentaban precipitaciones superiores a cero y el día después de este fueron excluidos del análisis. Otro filtro utilizado se basó en el índice de razón de polarización descrito como $PR = (Tbv - Tbh) / (Tbv + Tbh)$ donde Tbv y Tbh son las temperaturas de brillo vertical y horizontal, respectivamente. Este índice permite identificar los suelos con coberturas de hielo (de Rosnay *et al.*, 2006) y los valores negativos de PR indican una inversión en la magnitud de la Tbh sobre la Tbv , correspondiendo a un patrón anómalo. Por lo tanto, los días con valores negativos o bajos de PR (< 0.02) se filtraron, de forma análoga a lo propuesto por Saleh *et al.* (2006b).

A partir de los datos ya filtrados, se realizó el proceso de calibración para obtener las mejores correlaciones estadísticas entre la humedad del suelo, la temperatura de brillo (a 40° y 20°-40°) y el NDVI. Estos resultados se compararon con los obtenidos cuando el NDVI no se tiene en cuenta (NDVI=0) con el fin de evaluar las mejoras potenciales obtenidas cuando se considera el NDVI.

A partir de los cuatro años de datos disponibles (2004 a 2007), uno año fue utilizado para la calibración de la regresión semi-empírica, y los otros tres años fueron utilizados para su validación. Los resultados obtenidos se evaluaron a partir de diferentes estadígrafos como el coeficiente de determinación (R^2), el ajuste estadístico ($p < 0.05^*$) y el Error Cuadrático Medio (Root Mean Square Error, RMSE).

Resultados

Calibración del método utilizando datos SMOSREX

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos durante la calibración de la ecuación de regresión [12] utilizando los datos in-situ de SMOSREX. Como es lógico, los mejores resultados en términos de R^2 fueron obtenidos para la configuración bi-angular ($\theta = 20^\circ$ y $\theta = 40^\circ$) frente a la configuración mono-angular ($\theta = 40^\circ$). Para ambas configuraciones (mono y bi-angular), los mejores resultados se obtuvieron cuando el

Tabla 1. Coeficientes de determinación R^2 ($p < 0.05^*$) obtenidos en la calibración de las ecuaciones de regresión para cada año considerando el NDVI y considerando NDVI=0 en las dos configuraciones angulares: mono angular (40°) y bi angular (20° - 40°)

mono-angular configuration 40 - VH - NDVI = 0								
Año de calibración	N	a	b(TbV20)	c(TbV40)	d(TbH20)	e(TbH40)	f(NDVI)	R_2
2004	516	1.559		1.811		-0.763		0.861
2005	979	0.733		1.719		-1.157		0.654
2006	800	1.337		1.815		-0.956		0.794
2007	1,243	1.035		1.424		-0.607		0.584
mono-angular configuration 40 - VH - Teniendo en cuenta el NDVI								
Año de calibración	N	a	b(TbV20)	c(TbV40)	d(TbH20)	e(TbH40)	f(NDVI)	R_2
2004	516	1.144		1.814		-0.795	0.642	0.888
2005	979	0.126		2.028		-1.302	1.810	0.869
2006	800	1.345		2.176		-1.162	0.870	0.875
2007	1,243	0.474		1.292		-0.392	1.162	0.788
Configuración Bi-angular 20-40 - VH - NDVI = 0								
Año de calibración	N	a	b(TbV20)	c(TbV40)	d(TbH20)	e(TbH40)	f(NDVI)	R_2
2004	516	-0.730	-6.456	3.356	5.850	-2.826		0.901
2005	979	1.323	0.687	0.447	1.510	-1.893		0.798
2006	800	0.423	-4.641	2.144	4.941	-1.888		0.883
2007	1,243	0.572	-0.829	0.925	2.348	-1.844		0.771
Configuración Bi-angular 20-40 - VH - Teniendo en cuenta el NDVI								
Año de calibración	N	a	b(TbV20)	c(TbV40)	d(TbH20)	e(TbH40)	f(NDVI)	R_2
2004	516	-0.538	-5.152	3.064	4.616	-2.396	0.382	0.909
2005	979	0.529	0.046	1.412	1.107	-1.797	1.432	0.899
2006	800	0.473	-4.076	2.624	3.771	-1.582	0.776	0.920
2007	1,243	0.319	-1.271	1.359	1.869	-1.235	0.806	0.811

NDVI fue incluido en la ecuación de regresión, apreciándose una mayor precisión en las estimaciones para la configuración mono-angular. Esto puede explicarse parcialmente debido a que el NDVI incluye información de la dinámica de la vegetación en la ecuación de regresión. En el proceso de estimación de humedad del suelo, el efecto de la vegetación se corrige mejor mediante observaciones bi-angulares y bi-polarizadas que por observaciones mono-angulares y bi-polarizadas (Wigner *et al.*, 1995). A partir de los resultados obtenidos, se

aprecia que la información sobre la dinámica de la vegetación por ejemplo a través del NDVI es más útil en la ecuación de regresión mono-angular que en la bi-angular.

Los resultados de la calibración muestran una gran diferencia en términos de R^2 en función de si el NDVI es considerado o no para la configuración mono-angular. El R^2 varió entre 0.861 para el año 2004 a 0.854 utilizando datos del año 2007. Los resultados de la calibración fueron ligeramente mejores para los años 2004 y 2006, pero una explicación de este fe-

Tabla 2. Valores del error cuadrático medio (RMSE) calculados a partir de la comparación entre los valores de humedad del suelo medidos y estimados para cada año de validación para las dos configuraciones (mono y bi-angular) en ambas polarizaciones (V y H). Se muestra la comparación del efecto del NDVI y cuando este es considerado igual a cero. En el cálculo de los valores de RMSE se excluye el año de calibración (dado en la primera columna). N representa el número de observaciones de fase utilizadas para la comparación

	N	40° VH				20 and 40° VH			
		NDVI		NDVI=0		NDVI		NDVI=0	
		Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE
2004	3022	0.042	0.064	0.045	0.075	-0.011	0.064	-0.032	0.091
2005	2559	-0.007	0.068	-0.020	0.052	-0.018	0.083	-0.041	0.096
2006	2738	-0.002	0.058	0.005	0.064	-0.007	0.062	-0.006	0.065
2007	2295	-0.001	0.053	0.006	0.057	0.023	0.054	0.050	0.078

nómeno resulta no trivial. Sin embargo, es posible establecer que el año 2005 fue un año seco y las precipitaciones sobre el sitio SMOSREX fueron inclusive menores que en el 2003, el año de una sequía severa en Europa.

Validación del método utilizando datos SMOSREX

La tabla 2 muestra los resultados de la validación utilizando datos in-situ, al igual que en el caso de la calibración (sección anterior), los mejores resultados se obtienen para la configuración mono-angular, siendo ésta más robusta cuando se utiliza en el modo de estimación en lugar de la calibración.

En la mayoría de los casos obtenidos en los resultados anteriores (excepto para la configuración mono-angular utilizando el año 2005 para calibración), el RMSE entre los valores observados y estimados de humedad del suelo es menor cuando el NDVI se incluye en la ecuación de regresión. Los valores mínimos de RMSE (0.051 y 0.053 m³/m³) se obtuvieron para la configuración mono-angular y los años de calibración 2005 y 2007, mientras que los valores máximos de RMSE (0.091 y 0.095 m³/m³) se obtuvieron para la configuración bi-angular y NDVI=0 en los años 2004 y 2005.

Las ilustraciones de los resultados obtenidos se muestran en la figura 3, en la que se representa la estimación de la humedad del suelo entre 2005 y 2007 utilizando el 2004 como un año de calibración. La humedad del suelo utilizan-

do el método combinado en configuración mono-angular se muestra en la figura 3a. A partir de estos resultados es posible establecer algunos periodos donde la humedad del suelo presenta un sesgo positivo en comparación con la humedad del suelo estimada (primavera y otoño). Los resultados mejoran cuando se utiliza el NDVI (RMSE = 0.064 m³/m³ versus 0.075 m³/m³) para estos dos periodos del año. Comparativamente, se obtuvo un sesgo menor en la estimación de la humedad del suelo utilizando el método combinado pero con la configuración bi-angular (figura 3b) e incluyendo el NDVI (sesgo = -0.015 m³/m³ y 0.041 m³/m³ respectivamente para la configuración bi y mono angular considerando el NDVI). De manera similar, la humedad del suelo tiende a ser sobreestimada para el periodo de invierno (estación húmeda). Además, grandes discrepancias entre la estimación y la medida de la humedad del suelo pueden observarse para este periodo, especialmente para el caso en el que no se considera el NDVI.

Discusión

El algoritmo presentado en este trabajo mejora la regresión semi-empírica propuesta por Wigneron *et al.* (2004) para estimar la humedad del suelo utilizando observaciones realizadas en la banda-L. En este estudio se evaluó además si la información de la dinámica de la vegetación a través del NDVI puede ser útil para corregir los efectos de la vegetación y me-

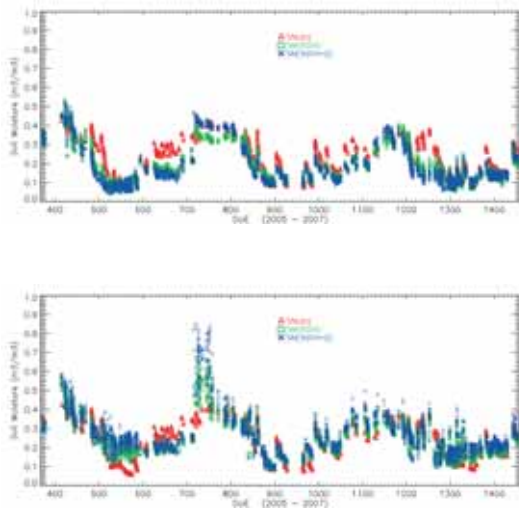


Figura 3. Estimación de la humedad del suelo (SM) para los años de validación 2005 a 2007 utilizando la configuración mono-angular (a) y bi-angular (b) sobre el sitio SMOSREX. Las medidas de SM están representadas en triángulos rojos, la SM estimada por el método propuesto en cuadrados verdes (considerando NDVI) y cruces azules no considerando NDVI.

jorar las estimaciones de la humedad de la superficie. Para los procesos de calibración y validación realizados en este trabajo, fue necesario tener un valor de humedad de superficie para ser considerado como una referencia. Sin embargo, la obtención de valores de humedad del suelo como referencia es difícil en muchos estudios. En el sitio SMOSREX, el valor de la humedad del suelo corresponde a la capa 0-5 cm, el cual es significativamente mayor que la humedad de la superficie estimada a partir de las medidas realizadas en banda-L (correspondientes al espesor de 0-3 cm) (Escorihuela *et al.*, 2010). Además, las estimaciones hacen referencia a medidas puntuales localizadas en un área que no es necesariamente el área observada por el radiómetro LEWIS, ya que este radiómetro realiza medidas en distintos ángulos de incidencia, y por tanto variando el área observada. Por lo tanto, los datos de humedad del suelo obtenidos a partir del radiómetro LEWIS y que fueron utilizados en la fase de calibración y validación de este estudio son sólo indicativos de la condiciones de la humedad del suelo que presenta el campo de hierba y no corresponde a una referencia de los valores de humedad del suelo. Este efecto puede explicar algunas discrepancias entre la humedad del

suelo medida y estimada. En muchos casos, el punto de medida de la humedad del suelo llevado a cabo por la sondas está fuera del área de medida de LEWIS y no necesariamente representa los efectos de inundación que puede ocasionar las fuertes lluvias o granizadas. A pesar de esto, el algoritmo propuesto muestra un buen funcionamiento en las estimaciones de la humedad del suelo en el sitio SMOSREX. No obstante, es importante considerar que los coeficientes de la regresión fueron calculados a través de una relación logarítmica. Esto es, que las estimaciones de la humedad del suelo pueden ser afectadas por otras incertezas cuando son convertidas a una escala lineal.

Conclusiones

El método semi-empírico propuesto que combina observaciones en el rango óptico y de microondas ha proporcionado resultados prometedores utilizando los datos SMOSREX sobre un campo de hierba, aunque los valores calculados de humedad del suelo tienen ciertas dificultades sobre esta vegetación debido a los efectos de la vegetación remanente, la heterogeneidad espacial, el tipo de estructura y la fracción de cobertura (Saleh *et al.*, 2006; Saleh *et al.*, 2006b; Saleh *et al.*, 2007). El NDVI fue utilizado en este trabajo como un estimador del espesor óptico de la vegetación, pero alternativamente otros índices como el LAI, el EVI o el Normalized Difference Water index (NDWI) podrían considerarse para evaluar las estimaciones de la humedad de la superficie.

Agradecimientos

Los autores agradecen a al Ministerio de Ciencia y Tecnología de España (TERMASAT, project ESP2005-07724-C05-04; EODIS, project AYA2008-0595-C04-01) y a la Unión Europea (CEOP-AEGIS, project FP7-ENV-2007-1 proposal No. 212921; WATCH, project 036946) por financiar este trabajo. Adicionalmente, agradecemos la financiación del CNES (Centre National d'Etudes Spatiales, France, TOSCA program) y la ESA (European Space Agency).

Referencias

- ALBERGEL, C., CALVET, J.-C., MAHFOUF, J.-F., RÜDIGER, C., BARBU, A. L., LAFONT, S., ROUJEAN, J.-L., WALKER, J. P., CRAPEAU, M., & WIGNERON, J.-P. 2010. «Monitoring of water and carbon fluxes using a land data assimilation system: a case study for southwestern France». *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 1109-1124.
- BELJAARS, A., VITERBO, P., MILLER, M., & BETTS, A. 1996. «The anomalous rainfall over the United States during July 1993: sensitivity to land surface parameterization and soil moisture anomalies». *Monthly Weather Rev.*, vol. 124, 362-383.
- CALVET, J.-C., WIGNERON, J.-P., WALKER, J., KARBOU, F., CHANZY, A., & ALBERGEL, C. 2011. «Sensitivity of passive microwave observations to soil moisture and vegetation water content: from L-band to W-band». *IEEE-TGRS*, vol. 49(4), 1190-1199.
- CARLSON, T. 2007. «An overview of the «Triangle Method» for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery». *Sensors*, 7, 1612-1629.
- DE ROSNAY, P., CALVET, J.-C., M KERR, Y., WIGNERON, J.-P., LEMAÎTRE, F., ESCORIHUELA, M. J., MUÑOZ-SABATER, J., SALEH, K., BARRIÉ, J., BOUHOURS, G., CORET, L., CHEREL, G., DEDIEU, G., DURBE, R., FRITZ, N. E. D., FROISSARD, F., HOEDJES, J., KRUSZEWSKI, A., LAVENU, F., SUQUA, S., & WALDTEUFEL, P. 2006. «SMOSREX: A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing». *Rem Sens. Env*, 102, 377-389.
- DE WIT, A. J., & VAN DIEPEN, A. J. 2007. «Crop model data assimilation with the ensemble Kalman filter for improving regional crop yield forecasts». *Agric. For. Meteorol.*, vol. 146, 38-56.
- DIERMEYER, P. A. 2000. «Using a global soil wetness dataset to improve seasonal climate simulation». *J. Climate*, 13, 2900-2922.
- ELTAHIR, E. A. B. 1998. «A soil moisture rainfall feedback mechanism I Theory and observations». *Water Resour. Res.* Vol. 34(4), 765-776.
- ENTEKHABI, D., NJOKU, E. G., O'NEILL, P., KELLOGG, K., CROW, W. T., EDELSTEIN, W. N., ENTIN, J. K., GOODMAN, S. D., JACKSON, T. J., JOHNSON, J., KIMBALL, J., PIEPMEIER, J. R., KOSTER, R. D., MARTIN, N., MCDONALD, K. C., MOGHADDAM, M., MORAN, S., REICHLER, R., SHI, J. C., SPENCER, M. W., THURMAN, S. W., TSANG, L., & VAN ZYL, J. 2009. «The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission». *Proceeding of the IEEE*, 98(5), 704-716.
- ESCORIHUELA, M. J., CHANZY, A., WIGNERON, J.-P., & KERR, Y. 2010. «Effective soil moisture sampling depth of L-band radiometry: A case study». *Rem Sens. Env*, Vol. 114(5-17), 995-1001.
- FENNESSY, M. J., & SHUKLA, J. 1999. «Impact of initial soil wetness on seasonal atmospheric prediction». *J. Climate*, 12, 3167-3180.
- GUERIF, M., & DUKE, C. I. 2000. «Adjustment procedures of a crop model to the site-specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation. *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 81(1), 57-69.
- HUETE, A., & JUSTICE, C. 1999. «MODIS vegetation index (MOD13) algorithm theoretical basis document». Ver. 3.
- JACKSON, T. J., DAOYI, CH., COSH, M., LI, F., ANDERSON, M., WALTHALL, CH., DORIASWAMY, P., & HUNT, E. R. 2004. «Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans». *Rem Sens. Env*. Vol. 92, 475-482.
- JACKSON, T. J., LE VINE, D. M., SWIFT, C. T., SCHMUGGE, T., & SCHIEBE, F. R. 1995. «Large area mapping of soil moisture using the ESTAR passive microwave radiometer in Washita92». *Rem. Sens. Environ*, 53, 27-37.
- JONES, M., JONES, L., KIMBALL, J., & MCDONALD, K. «Satellite passive microwave remote sensing for monitoring global land surface phenology». *Rem Sens. Env*, vol. 115, 1102-1114.
- KERR, Y. 2010. «SMOS level 2 Processor for Soil Moisture, Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD),» 133 pp.
- KERR, Y., WALDTEUFEL, P., WIGNERON, J.-P., MARTINUZZI, J.-M., FONT, J., & 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.
- LEESE, J., JACKSON, T., PITMAN, A., & DIRMEYER, P. 2001. «GEWEX/BAHC International workshop on soil moisture monitoring analysis and prediction for hydrometeorological and hydroclimatological applications». *Bull. Amr. Meto. Soc.*, vol. 82, 1423-1430.
- LEMAÎTRE, F., POUSSIÈRE, J. C., KERR, Y., DEJUS, M., DURBE, R., DE ROSNAY, P., & CALVET, J.-C. 2004. «Design and test of the ground based L-band radiometer for Estimating Water in Soils (LEWIS),» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42(8), 1666-1676.
- MALLICK, K., BHATTACHARYA, B. K., & PATEL, NK. 2009. «Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI». *Agric. For. Meteorol.*, vol. 149 (8), 1327-1342.
- NOILHAN, J., & CALVET, J.-C. 1995. «Mesoscale land-atmosphere models and data needs». In:

- «Proc. Passive Microw. Remote Sens. Land-Atmosphere Interactions», ESA/NASA Int. Workshop, B. J. Choudhury, Y. Kerr, E. Njoku, and P. Pampaloni, Eds., St. Lary, France, pp. 17-54.
- PELLARIN, T., WIGNERON, J.-P., CALVET, J. C., BERGER, M., DOUVILLE, H., FERRAZZOLI, P., KERR, Y., LÓPEZ-BAEZA, E., PAULLIAINEN, J., SIMMONDS, L., & WALDTEUFEL, P. 2003. «Two-Year Global Simulation of L-Band Brightness Temperatures Over Land». *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.* 2003, 41 (9), 2135-2139.
- SALEH, K., WIGNERON, J.-P., WALDTEUFEL, P., DE ROSNAY, P., SCHWANK, M., CALVET, J.-C., & KERR, Y. 2007. «Estimates of surface soil moisture under grass covers using L-band radiometry» *Rem Sens. Env.*, vol. 109, 42-53.
- SALEH, K., WIGNERON, J.-P., DE ROSNAY, P., CALVET, J.-C., ESCORIHUELA, M. J., KERR, Y., & WALDTEUFEL, P. 2006b. «Impact of rain interception by vegetation and mulch on the L-band emission of natural grass». *Rem Sens. Env.*, vol. 101, 127-139.
- SALEH, K., WIGNERON, J.-P., DE ROSNAY, P., CALVET, J.-C., & KERR, Y. 2006a. «Semi-empirical regressions at L-band applied to surface soil moisture retrievals over grass». *Rem Sens. Env.*, vol. 101, 415-426.
- SCHMUGGE, T., & JACKSON, T. J. 1994. «Mapping soil moisture with microwave radiometers». *Meteorol. Atmos. Phys.*, vol. 54, 213-233.
- ULABY, F., MOORE, R., & FUNG, A. 1986. «Microwave remote sensing-Active and passive». Norwood, MA: Artech House, vol. III.
- WETZEL, P. J., & CHANG, J. T. 1988. «Evaporation from non-uniform surface: a first approach for short-term numerical weather prediction». *Monthly Weather Rev.*, vo. 116, 600-621.
- WIGNERON, J.-P., CALVET, J.-C., DE ROSNAY, P., KERR, Y., WALDTEUFEL, P., SALEH, K., ESCORIHUELA M. J., & KRUSZEWSKI, A. 2004. «Soil moisture retrievals from biangular L-Band passive microwave observations». *IEEE Geosc. Rem. Sens.*, 1(4), 277-281.
- WIGNERON, J.-P., CALVET, J.-C., PELLARIN, T., VAN DE GRIEND, A., BERGER, M., & FERRAZZOLI, P. 2003. «Retrieving near-surface soil moisture from microwave radiometric observations: current status and future plans». *Remote Sensing of Environment*, 85, 489-506.
- WIGNERON, J.-P., CHANZY, A., CALVET J.-C., & BRUGUIER, N. 1995. «A simple algorithm to retrieve soil moisture and vegetation biomass using passive microwave measurements over crop fields». *Remote Sens. Environ.* Vol. 51, 331-341.
- WILSON, M. F, HENDERSON-SELLERS, A., DICKINSON, R., & KENNEDY, P. J. 1987. «Sensitivity of the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) to inclusion of variable soil characteristics». *J. Climat Appl. Meteorol.*, 60, 341-362.
- 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., GUGLIEMMETTI, M., HORNBUCKLE, B., MÄTZLER, C., PELLARIN, T., & 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.
- WIGNERON, J.-P., PARDÉ, M., WALDTEUFEL, P., CHANZY, A., KERR, Y., SCHMIDL, A., & SKOU, N. 2004. «Characterizing the dependence of vegetation parameters on crop type, view angle and polarization at L-band». *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 42, 416-425.
- WIGNERON, J.-P., WALDTEUFEL P., CHANZY A., CALVET J.-C., & KERR Y., 2000. «Two-D microwave interferometer retrieval capabilities of over land surface (SMOS Mission)», *Remote Sens. Environ.*, 73: 270-282.
- WOOD, E. F., LIN, S., TROCH, P. A., MANCINI, M., & JACKSON, T. J. 1995. «Soil moisture estimation: Comparisons between hydrologic model estimates and remotely sensed estimates». In: Proc. Passive Microw. Remote Sens. Land-Atmosphere Interactions, ESA/NASA Int. Workshop, B. J. Choudhury, Y. Kerr, E. Njoku, and P. Pampaloni, Eds., St. Lary, France, pp. 17-54.