

Influencia de la humedad de los suelos en la emisividad del infrarrojo térmico. Implicación en la determinación de la temperatura de la superficie terrestre

Mira, María^{1 a}; Valor, Enric^a; Boluda, Rafael^b; Caselles, Vicente^a; Coll, César^a; Niclòs, Raquel^a, Sánchez, Juan M.^a; Galve, Juan M.^a

^(a)Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Facultat de Física, Universitat de València.
Dr Moliner 50, 46100, València, España.

^(b)Departament de Biologia Vegetal, Facultat de Farmàcia, Universitat de València
Av. Vicent andrés Estellés s-n, 46100, Burjassot, València, España.

RESUMEN

Para caracterizar la dependencia de la emisividad del infrarrojo térmico con el contenido de agua del suelo, se realizó un estudio experimental con seis suelos. La emisividad se determinó con el método de la caja, y la humedad del suelo según el método gravimétrico. Los resultados mostraron que la emisividad crece entre 1,7 y 16% con la humedad de la muestra, especialmente en suelos arenosos y en la región 8,2-9,2 μm . Un conjunto de ecuaciones se derivó para obtener la emisividad a partir de la humedad de la muestra para diferentes bandas espectrales. Además, se mostró que errores sistemáticos desde 0,1 a 2 K pueden ser causados por la influencia de la humedad de los suelos en la emisividad.

Palabras clave: Emisividad, Infrarrojo Térmico, Humedad de los Suelos

ABSTRACT

A laboratory study for quantifying the dependence of thermal infrared emissivity on soil moisture was carried out with six soil types. The emissivity was measured using the two-lid variant of the box method, and the gravimetric method was chosen for determining the soil moisture. The results showed that emissivity increases from 1.7 to 16 % with soil moisture, especially in sandy soils in the 8.2 – 9.2 μm range. A set of equations was derived to obtain emissivity from soil moisture at different spectral bands. Moreover, it was shown that systematic errors from 0.1 to 2 K can be caused by soil moisture influence on emissivity.

Keywords: Emissivity, Thermal Infrared, Soil Moisture

Introducción

La emisividad de las superficies naturales es una magnitud necesaria para la determinación de la temperatura que, de no estar bien caracterizada, puede comportar un error significativo en su obtención. Es por ello que debe estimarse con la mayor precisión posible, por lo que es necesario conocer bien los factores que influyen en esta magnitud.

La influencia del tipo de suelo, de su composición y de su textura es bien conocida eminentemente a través de estudios experimentales. Sin embargo, a pesar de que es conocida la dependencia de la emisividad con el contenido de agua de los suelos, este aspecto ha sido poco estudiado en el infrarrojo térmico (IRT) y se encuentran en la bibliografía pocas referencias de tipo experimental (Van Bavel y Hillel, 1976; Chen

¹ Contacto autor: Te: +34 963 543249 Fax: +34 963 543385

Correo electrónico: Maria.Mira@uv.es

Copyright: Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina.

et al., 1989; Salisbury y d'Aria, 1992; Urai et al., 1997; Xiao et al., 2003; Ogawa et al., 2006).

El objetivo de nuestro trabajo es el de mejorar la caracterización de la emisividad térmica con la humedad del suelo. Este estudio nos permitirá estimar valores de emisividad más precisos según los valores de humedad proporcionados por futuros sensores como el instrumento MIRAS de la misión Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) de la Agencia Espacial Europea (ESA).

Material y métodos

Descripción de las muestras

Para el experimento se seleccionó una variedad de horizontes superficiales (0-15 cm) de suelos de distintos tipos, procedentes en su mayoría de lugares con un clima mediterráneo. Para tener una buena caracterización de las muestras, se hizo un estudio exhaustivo de sus características (Tabla 1).

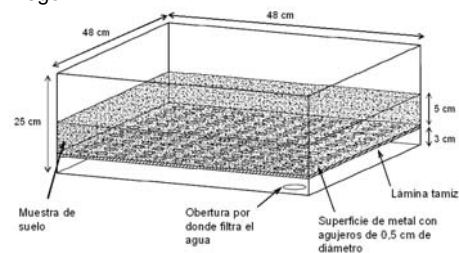
Método de medida de la humedad del suelo

El primer paso realizado al poner en práctica el experimento fue moler y mezclar cada muestra de suelo después de permitir su secado al aire. A continuación se tamizaron a 2 mm. De esa manera, fue posible una completa eliminación de posibles impurezas en el suelo, como piedras u hojas. Ya en ese momento, los suelos fueron saturados con agua permitiendo su filtración a través del recipiente que contiene el suelo. A partir de ese momento la muestra se deja secar al aire libremente.

Para ello fue necesario el diseño y construcción de unos recipientes de vidrio donde contener los suelos y permitir una práctica realización de las medidas de emisividad, así como el drenaje del agua de riego sin la pérdida de las partículas más finas. Los recipientes, de dimensiones 48 x 48 cm² de base y 25 cm de altura, cuyo esquema se muestra en la Figura 1, disponen de una superficie metálica con perforaciones de 0,5 cm de diámetro, elevada 3 cm

sobre su base. Sobre ésta, una lámina tamiz evita la pérdida de las partículas más finas de la muestra de suelo que descansa sobre ella. Además, un orificio suficientemente grande practicado en la base del recipiente permite eliminar el agua filtrada para hacer así posible un completo y rápido secado de los suelos.

Fig. 1. Esquema representativo del recipiente de vidrio donde contener los suelos y permitir una práctica realización de las medidas de emisividad, así como el drenaje del agua de riego.



Se escogió el método gravimétrico para el cálculo de la humedad del suelo, por ser una de las técnicas más precisas. Es un método sencillo basado en la determinación directa del contenido de agua de una muestra de suelo. Su principal limitación es que se trata de un método laborioso y destructivo, ya que pequeñas cantidades de suelo son extraídas de la muestra total en cada medida.

Según el método gravimétrico, el contenido de agua másico que contiene el suelo se calcula como cociente entre el agua presente en una muestra, frente a la masa de muestra seca. Además, se ha expresado en términos de tanto por cien, de forma que una humedad mayor que 100% representa que la masa de agua presente en el suelo húmedo es mayor que la masa de suelo seco.

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo, junto con su clasificación taxonómica, el horizonte de diagnóstico y el origen, así como su composición mineral y su densidad aparente y capacidad de campo. CE: conductividad eléctrica; MO: materia orgánica; CIC: capacidad de intercambio catiónico; V: saturación de bases.

Muestra	A	B	C	D	E	F	
Color seco	5YR4/6	10YR8/1	10YR4/2	10YR6/2	10YR5/6	10YR5/4	
Color húmedo	7.5YR3/4	10YR7/2	10YR2/2	2.5Y4/2	10YR3/3	10YR5/3	
pH (H ₂ O) 1:2,5	7,50±0,04	9,28±0,06	7,50±0,10	7,7±0,4	5,180±0,010	8,2±0,2	
pH (KCl) 1:2,5	6,9±0,3	8,79±0,04	6,70±0,07	7,1±0,4	4,460±0,010	7,70±0,10	
CE 1:5 (dS/m)	0,40±0,12	0,040±0,010	0,48±0,10	0,58±0,09	0,150±0,010	0,20±0,03	
MO (%)	2,1±0,3	< 0,1	8,9±0,5	4,5±0,4	1,50±0,10	3,5±0,4	
CaCO ₃ (%)	1,70±0,10	< 0,1	24±3	44±6	0	46±8	
CIC (cmol _c kg ⁻¹)	21,3±1,7	0	35±4	24±3	9,8±1,9	14,7±1,4	
V (%)	100	0	100	100	59±6	100	
Arena (%)	41±3	99±6	20,0±1,0	14±6	67±4	50±3	
Limo (%)	28,0±1,0	1,0±1,0	43±2	50±8	20,0±1,0	30±2	
Arcilla (%)	31±2	0±0	37±3	35±4	13,0±1,0	20,0±1,0	
Textura (USDA)	Fr-Ac	Ar	Fr-Ac-Li	Fr-Ac-Li	Fr-Ar	Fr	
FAO (1999)	luvic Calcisol	albic Arenosol	calcic Kastanozem	gleyic- calcaric Fluvisol	dystric Cambisol	petric Calcisol	
Soil Taxonomy (USDA)	Rhodoxeralf	Xeropsamment	Calcixeroll	Fluvaquent	Dystrudept	Petrocalcic	
Horizonte de diagnóstico	Irrágnico	Antrópico	Móllico	Antrácuico	Cámbico	Ócrico	
Origen de la muestra (España)	Huerto, Albal (Valencia)	Cantera, Villar del Arzobispo (Valencia)	Requena (Valencia)	Parque Natural de la Albufera de Valencia	Santiago de Compostela (A Coruña)	Camporrobles (Valencia)	
Mineral (cantidad %)	Cuarzo Feldespató Fosilicato Calcita Hematite	82 5 5 3 5	96 4 - - -	29 6 9 56 -	19 4 6 62 9	74 22 4 - -	20 4 4 63 9
Densidad aparente (10 ³ x kg/m ³)	1,34	2,09	0,9	1,27	1,52	1,43	
Capacidad de campo (kg kg ⁻¹ ·100)	22,1	3,8	-	28,3	13,2	17,5	

Las masas fueron determinadas con una balanza modelo KERN 770 con una exactitud de $\pm 10^{-6}$ kg. El error derivado en la determinación de la humedad de la muestra era, por ello, causado generalmente por la homogeneidad no ideal de la humedad de la muestra durante las medidas de emisividad.

Método de medida de la emisividad

Las emisividades de los suelos se han medido con el método de la caja en su variante de dos tapas (Rubio et al., 1997) y un radiómetro que mide en el IRT. En este método, la emisividad de la muestra se obtiene a través de una secuencia de tres medidas de radiancia en las que se utiliza una caja sin fondo, cuyas paredes son de aluminio pulido al espejo por considerarse un material con un comportamiento similar al de un reflector especular perfecto, y dos tapas intercambiables, una del mismo material que las paredes y otra de aluminio rugoso y anodizado pintada con negro de Parson, ésta última con una temperatura unos 20 °C superior que la muestra. Además, una cuarta medida nos sirve

para cuantificar el efecto de la caja no-ideal. La secuencia de medidas se muestra en la figura 2. El radiómetro utilizado fue un CIMEL Electronique CE 312 que tiene un canal ancho (8-13 $\frac{1}{4}$ m) y tres bandas estrechas (8,2-9,2 $\frac{1}{4}$ m, 10,3-11,3 $\frac{1}{4}$ m, 11,5-12,5 $\frac{1}{4}$ m). El cálculo de la emisividad responde a la siguiente ecuación

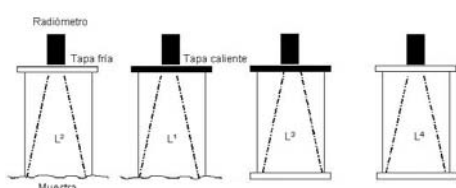
$$\varepsilon = 1 - \frac{[L^1 - L^2] (1 - \varepsilon_c)}{(L^3 - L^2) - [L^3 - L^1] P + (L^2 - L^1) Q} \quad (1)$$

donde $P=0,1460$ y $Q=0,2921$ son factores que dependen de la geometría de la caja y de la emisividad de las tapas fría y caliente.

Con el fin de obtener una buena estadística y disminuir así el error, se realizaron series de 30 medidas por canal, a partir de las cuales se obtuvo un único valor de emisividad para cada banda y determinada humedad del suelo. Asimismo, es importante mencionar que la secuencia de saturación y secado de los suelos fue

repetida entre dos y tres veces para cada muestra con el fin de asegurar la validez y la reproducibilidad de las medidas de emisividad, así como para obtener valores intermedios de la emisividad a lo largo del intervalo de humedades.

Fig. 2. Procedimiento seguido para la medida de la emisividad según la versión de dos tapas del método de la caja. La secuencia de medidas es de izquierda a derecha (i.e., L², L¹, L³, L⁴). Las líneas discontinuas representan el campo de visión del radiómetro.



Y como último punto, mencionar la práctica de diferentes técnicas para asegurar la homogeneidad de las muestras, en relación a su composición, textura y humedad. Técnicas tan sencillas como mezclar el contenido de la muestra o triturarla en caso necesario, pues ciertos suelos, sobretodo los más arcillosos, toman una estructura dura y compacta al secarse, con la consiguiente aparición de grietas, que eliminá-bamos a su paso.

Resultados y discusión

Resultados experimentales

Los resultados experimentales de la dependencia de la emisividad del infrarrojo térmico con la humedad del suelo en cada canal espectral del CE 312, para cada suelo, se muestran en la Figura 3.

En relación al contenido de humedad del suelo, destaca un valor excepcional ($1,17 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) como humedad máxima del Kastanozem cálcico (muestra C). La principal causa de este elevado valor es, no sólo la gran cantidad de MO del suelo, sino también su baja densidad aparente (ver Tabla 1).

Por una parte, en la Tabla 1 se mostró que el contenido de MO de la muestra C es cuatro veces el contenido medio de MO de las otras muestras. A pesar de que la MO es general-

mente el componente minoritario de los suelos, es el principal almacén de agua disponible para las plantas dado el elevado porcentaje de agregados estables de agua que se pueden formar. Por esta razón, los suelos con un elevado contenido de MO tienen diferentes comportamientos en relación al agua retenida.

Por otra parte, en la Tabla 1 se observa que la densidad aparente de la muestra B es dos veces la densidad de la muestra C, tomando valores intermedios el resto de los suelos. Según los resultados, la humedad máxima tomada por los suelos en el experimento, es mayor cuanto menor es su densidad aparente. De aquí que la muestra C presente el máximo valor de humedad alcanzado por el conjunto de muestras.

Hemos visto, entonces, que la muestra C se caracteriza por ser la de menor densidad aparente y por contener la mayor cantidad de MO, características que justificarían el por qué de su elevado valor máximo de humedad. Remarcar que, haciendo hincapié en la ecuación que utilizamos como definición de la humedad gravimétrica (ecuación 3.2), un valor de Θ_s mayor del 100% (como en este caso en concreto que acabamos de mencionar) indica que, en ese momento, el contenido másico de agua que contiene la muestra es mayor que el contenido másico de suelo seco. No es, por tanto, un valor erróneo como fácilmente se puede prestar a confusión.

Por ello, si consideramos la muestra C como un caso especial debido a su elevado contenido de MO y por un momento no la consideramos, se observa una tendencia común a retener mayor (menor) cantidad de agua cuanto mayor es su contenido de arcilla (arena). Éste es un resultado consistente, dado que la matriz de suelo retiene agua por dos mecanismos: en primer lugar, el agua puede ser absorbida por las superficies de las partículas (sobretodo por partículas de arcilla por su gran área superficial reactiva); y en segundo lugar, el agua puede ser retenida en los poros del suelo por capilaridad, siendo retenida con más fuerza en los poros pequeños que en los grandes. Por estas razones, los suelos arcillosos retienen más agua y por más tiempo que los suelos arenosos.

Fig. 3. Medidas de emisividad de los suelos según los canales del CE 312, para distintos valores de la humedad del suelo. Canal 1: 8-13 μm ; canal 2: 11,5-12,5 μm ; canal 3: 10,3-11,3 μm ; canal 4: 8,2-9,2 μm . Las líneas discontinuas representan las curvas de regresión de la emisividad frente el contenido de agua del suelo, para cada canal y cada muestra, de acuerdo con la ecuación y los coeficientes dados en la tabla 3.

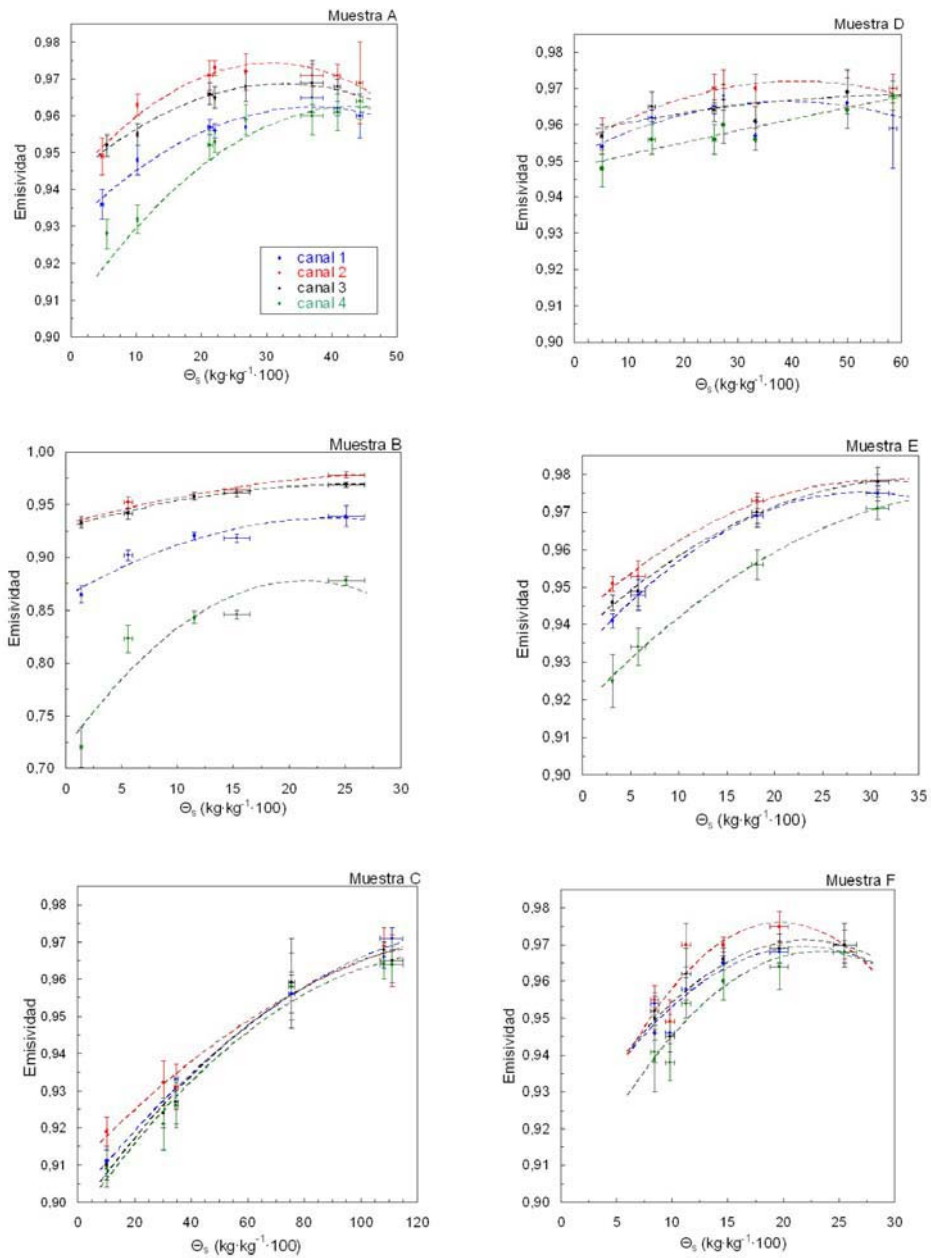


Tabla 2. Maximum emissivity variation within the whole soil moisture range ($\Delta \epsilon_i$) and its error ($\delta(\Delta \epsilon_i)$), and average emissivity measurement errors ($\overline{\delta \epsilon_i}$), for each sample in the different CE-312 channels.

Muestra	$\Delta \epsilon_1 \pm \delta(\Delta \epsilon_1)$	$\Delta \epsilon_2 \pm \delta(\Delta \epsilon_2)$	$\Delta \epsilon_3 \pm \delta(\Delta \epsilon_3)$	$\Delta \epsilon_4 \pm \delta(\Delta \epsilon_4)$	$\overline{\delta \epsilon_1}$	$\overline{\delta \epsilon_2}$	$\overline{\delta \epsilon_3}$	$\overline{\delta \epsilon_4}$
A	0,029±0,008	0,024±0,007	0,017±0,009	0,036±0,009	0,003	0,005	0,004	0,004
B	0,074±0,018	0,046±0,007	0,036±0,007	0,16±0,02	0,006	0,004	0,004	0,009
C	0,060±0,007	0,050±0,009	0,058±0,006	0,055±0,010	0,004	0,005	0,006	0,006
D	0,031±0,006	0,031±0,009	0,029±0,010	0,041±0,011	0,004	0,004	0,004	0,005
E	0,034±0,004	0,027±0,006	0,032±0,006	0,046±0,010	0,003	0,004	0,004	0,005
F	0,023±0,005	0,030±0,008	0,028±0,008	0,037±0,007	0,003	0,005	0,004	0,005

En cuanto al comportamiento espectral, se ha observado en todos los suelos un incremento de la emisividad con el contenido de agua. Cuantitativamente podemos ver en la tabla 2 que, si comparamos el intervalo máximo de variación de la emisividad con la humedad (σ) respecto a los errores medios de las medidas (δ), se observa que el incremento es claramente mayor que la incertidumbre experimental. Más concretamente, el error medio de la emisividad, para todo suelo y canal espectral, está alrededor de $\pm 0,005$, mientras que la emisividad varía con la humedad entre 0,017 y 0,16.

Por otra parte, si analizamos el comportamiento presentado por cada canal del radiómetro, tenemos que es en el intervalo espectral de 8,2 a 9,2 μm (canal 4) donde la variación máxima de la emisividad con la humedad del suelo es mayor en todos los suelos. A continuación tenemos como más destacadas las variaciones del canal 1 (8 - 13 μm), seguidas por el canal 2 (11,5 - 12,5 μm) y finalmente el canal 3 (10,3 - 11,3 μm), de acuerdo con los estudios previos (Salisbury y d'Aria, 1992; Urai et al., 1997; Xiao et al., 2003).

Además, y como era de esperar, es el suelo más arenoso (muestra B) el que presenta una variabilidad de la emisividad mucho más aparente que el resto. En concreto, su emisividad varía con la humedad un máximo en 0,16, observado en el canal 4. Y como extremo inferior tenemos el Cacosol lúvico (muestra A), que presenta una variación de 0,017, esta vez en el canal 3.

Estos resultados explican por qué la gran parte de los estudios sobre el tema se centran en el intervalo espectral de 8 a 9 μm y en suelos muy arenosos, pues son las condiciones que mejor permiten ver la dependencia de la emisividad térmica de un suelo con su contenido de agua. Sin embargo, los resultados del presente trabajo demuestran que suelos con un escaso

contenido de arena también presentan una variación de la emisividad con su humedad significativa, que debe ser considerada no sólo en el intervalo de 8 a 9 μm , sino también en aquellos intervalos comprendidos entre los 8 y 13 μm .

Cualitativamente, en la figura 3 se observa, en todos los suelos e intervalos espectrales, un importante crecimiento de la emisividad para pequeños contenidos de agua, mientras que no se obtienen prácticamente cambios a partir de cierto valor de humedad. En concreto, este valor de humedad podría coincidir con el punto de capacidad de campo de cada suelo, cuyo valor se recoge en la tabla 1.

Se considera un suelo a capacidad de campo cuando, después de la saturación, toda el agua es drenada de los macroporos por gravitación. En ese momento, tan sólo los microporos pueden retener el agua contra la fuerza de la gravedad mediante las fuerzas de capilaridad. Por ello, su valor depende del tipo de suelo y en general es menor en suelos con un elevado contenido de arena.

Este argumento nos permite entender el comportamiento de la emisividad térmica en relación al contenido de agua del suelo, si además tenemos en cuenta que la emisividad del agua toma un valor cercano a la unidad en el IRT. De esa manera se justifican los valores de emisividad prácticamente constantes y cercanos a la unidad que observamos en las medidas realizadas en todas las bandas espectrales cuando los suelos están saturados o, incluso con una humedad del suelo mayor que su capacidad de campo. Atribuimos por ello el aumento de la emisividad térmica de un suelo con su humedad, a la película de agua que se forma sobre las partículas del suelo, pues ésta tiene como efecto la disminución de su reflectividad. Cuando la humedad pasa a ser menor que la capacidad de campo, el agua se retiene en los micro

poros y los macroporos están llenos de aire. Estas condiciones permiten que la emisividad del suelo deje de ser constante y que disminuya considerablemente su valor a medida que el suelo se va secando, y al mismo tiempo, permite que las diferencias espectrales se acentúen.

Parametrización espectral

En la figura 3 se representan las curvas de regresión cuadráticas de la emisividad frente su contenido de agua obtenidas como resultado óptimo para cada canal del CE 312 y cada muestra. En la tabla 3 se recoge el conjunto de coeficientes de regresión (a, b, c), junto con el coeficiente de determinación (r^2) y el error estándar del ajuste (σ) para todos los casos.

De acuerdo con las regresiones, obtenemos un coeficiente de determinación medio alrededor de 0,90 y un error de estimación con un valor medio de $\pm 0,005$. Es importante remarcar que la muestra D es la que presenta el peor ajuste. Pensamos que esto se debe a la compacta estructura que alcanzó el suelo durante el experimento alsecarse, que provocaba rugosidades por la aparición de grietas que debían ser eliminadas para mantener la homogeneidad de la superficie. Si esta muestra no se considera, el coeficiente de determinación aumenta hasta un valor medio de 0,95.

Las relaciones empíricas obtenidas permitirán estimar la emisividad de los suelos a partir de las medidas de humedad proporcionadas por sensores tales como MIRAS a bordo de la misión SMOS de la Agencia Espacial Europea. De esa forma será posible una mejora en las estimaciones de la temperatura de la superficie terrestre.

Implicación en la determinación de la temperatura de la superficie terrestre

Se han analizado dos casos para estudiar el efecto que tiene sobre la determinación de la temperatura de la superficie terrestre (TST) el hecho de no considerar la influencia de la humedad de los suelos sobre su emisividad. En primer lugar, el error derivado en la determinación de la TST a partir de un algoritmo monocanal de corrección atmosférica y de emisividad (Coll et al., 1994); y en segundo lugar, el error derivado a partir de un algoritmo split-window (Coll y Caselles, 1997).

Como resultado del análisis, se observó en los dos casos una tendencia general a disminuir el error de la TST con el aumento del contenido de vapor de agua de la atmósfera. Si se consideran todos los suelos conjuntamente, el error varía entre 0,1 y 2 °C.

Tabla 3. Ecuación de ajuste de la emisividad frente el contenido de agua del suelo para cada canal y cada muestra. r^2 : coeficiente de determinación; σ : error de estimación.

Muestra	Canal	$\epsilon = a \cdot \Theta d^2 + b \cdot \Theta d + c$				
		$cx10^4$	$bx10^{-2}$	a	r^2	σ_f
A	1	-0,24	0,18	0,930	0,953	0,002
	2	-0,34	0,21	0,942	0,946	0,002
	3	-0,24	0,16	0,943	0,971	0,0013
	4	-0,29	0,24	0,914	0,978	0,002
B	1	-1,3	0,6	0,862	0,931	0,010
	2	-0,5	0,3	0,931	0,954	0,005
	3	-0,59	0,31	0,928	0,990	0,002
	4	-4	1,5	0,72	0,878	0,03
C	1	-0,031	0,10	0,901	0,991	0,003
	2	-0,025	0,08	0,910	0,986	0,003
	3	-0,04	0,11	0,897	0,988	0,003
	4	-0,04	0,11	0,895	0,985	0,004
D	1	-0,10	0,08	0,951	0,396	0,006
	2	-0,11	0,088	0,954	0,928	0,0016
	3	-0,03	0,03	0,957	0,586	0,003
	4	0	0,03	0,948	0,874	0,003
E	1	-0,5	0,291	0,9326	0,999	0,0003
	2	-0,38	0,23	0,943	0,989	0,002
	3	-0,34	0,23	0,938	0,995	0,0019
	4	-0,31	0,27	0,918	0,997	0,0019
F	1	-1,2	0,5	0,914	0,844	0,005
	2	-1,9	0,8	0,902	0,798	0,006
	3	-1,2	0,5	0,914	0,824	0,005
	4	-1,3	0,6	0,897	0,919	0,004

Conclusiones

En este trabajo se ha hecho hincapié en la determinación precisa de la variación de la emisividad con el contenido de agua del suelo, para permitir así mejoras en la determinación de la TST.

El conjunto de muestras seleccionado para el estudio cubre la necesidad de conocer cómo varía la emisividad del suelo en el IRT respecto su contenido de agua, por tratarse de muestras con una variada composición. Las medidas experimentales muestran una tendencia común en todo tipo de suelo a aumentar su emisividad con la humedad del suelo, siendo el incremento más acusado para pequeños valores de humedad. Además, los cambios observados son significativos no sólo en suelos muy arenosos y en el intervalo de 8 a 10 μm , sino que también lo son para cualquier tipo de suelo independientemente

de su composición, y para los intervalos espectrales centrados en los 11 y 12 μm .

La variación máxima de la emisividad que sufre un suelo al variar su contenido de agua, es generalmente mayor en el intervalo espectral de 8,2 a 9,2 μm , siendo mínima en el intervalo de 10,3 a 11,3 μm . Según los datos experimentales, podríamos clasificar su variación de mayor a menor según la secuencia (8,2-9,2 μm)

$\Delta\epsilon_1 > (8-13 \mu\text{m}) : \Delta\epsilon_2(11,5-12,5 \mu\text{m}) \sim \Delta\epsilon_3(10,5-11,5 \mu\text{m})$, donde el subíndice representa el canal espectral del radiómetro.

El crecimiento de la emisividad con la cantidad de agua del suelo es más acusado cuanto mayor es la proporción de arena que éste contiene. Este efecto lo atribuimos principalmente a la combinación de dos efectos sobre la reflectividad del material: por una parte, la influencia del cuarzo a aumentar su valor alrededor de los 7,7 y 9,7 μm ; y por otra, al efecto del agua en el IRT a disminuirlo.

Las medidas experimentales muestran un intervalo de variación máximo de la emisividad con la humedad del suelo entre 0,017 y 0,16. Son, por tanto, variaciones significativas para todo tipo de suelo e intervalo espectral por ser mayores a la indeterminación experimental media de la emisividad ($\overline{\delta\epsilon_i} \pm 0,005$).

La emisividad de un suelo responde cuadráticamente a su contenido de agua, siendo dicha variación particular para cada intervalo espectral y cada tipo de suelo. De esa forma, según las curvas de ajuste, puede obtenerse el valor de la emisividad de un suelo a una determinada humedad con una incertidumbre media de $\pm 0,005$.

Las relaciones empíricas obtenidas permitirán una mejora en la determinación de la emisividad de los suelos a partir de los valores de humedad del suelo proporcionados por sensores tales como MIRAS a bordo de la misión SMOS de la Agencia Espacial Europea. De esa forma será posible una mejora en las estimaciones de la temperatura de la superficie terrestre.

No considerar el efecto de la humedad del suelo sobre su emisividad puede implicar errores de hasta 2 $^{\circ}\text{C}$ en la determinación de la temperatura de la superficie terrestre.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Generalitat Valenciana (proyecto GV2004-B-084) y por el Ministerio de Educación y Ciencia (proyectos CGL2004-06099-C03C01/CLI, CGL2005-24207-E/CLI y CGL2006-09776/BOS). Agrade

ceamos también las becas y el contrato de investigación de J.M. Sánchez, J.M. Galve y Dra. R. Niclòs. Y finalmente, nuestro agradecimiento a todos aquellos que colaboraron en la toma de medidas de emisividad, así como la ayuda del Dr. L. Roca en la caracterización de las muestras, y al Prof. J. Bastida y P. Pardo por su ayuda prestada en el estudio de la composición mineral de los suelos.

Referencias

- Chen, J. M., Yang, B. J. and Zhang, R. H. 1989. Soil thermal emissivity as affected by its water content and surface treatment. *Soil Science*, 148(6), 433-435.
- Coll, C. and Caselles, V. 1997. A split-window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: Validation and algorithm comparison. *Journal of Geophysical Research*, 102(14):16697-16713.
- Coll, C., Caselles, V., Sobrino, J. A., and Valor, E. 1994. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 15:105-122.
- Ogawa, K., Schmugge, T. and Rokugawa, S., 2006. Observations of the dependence of the thermal infrared emissivity on soil moisture. *Geophysical Research Abstracts*, 8, 04996.
- Rubio, E., Caselles, V. and Badenas, C. 1997. Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8-14 μm wave band: analysis of two field methods. *Remote Sensing of Environment*, 59, 490-521.
- Salisbury, J. W. and D'Aria, D. M. 1992. Infrared (8-14 μm) remote sensing of soil particle size. *Remote Sensing of Environment*, 42:157-165.
- Urai, M., Matsunaga, T. and Ishii, T. 1997. Relationship between soil moisture content and thermal infrared emissivity of the sand sampled in Muus Desert, China. *Remote Sensing Society of Japan*, 17(4), 322-331.
- Van Bavel, C. H. M. and Hillel, D. 1976. Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat. *Agricultural Meteorology*, 17, 453-476.
- Xiao, Q., Liu, Q. H., Li, X. W., Chen, L. F., Liu, Q. and Xin, X. Z. 2003. A field measurement method of spectral emissivity and research on the feature of soil thermal infrared emissivity. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 22(5), 373-378.