Tethys, 4, 3–10, 2007
www.tethys.cat
ISSN-1697-1523
eISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2007.4.01

Revista editada per **ACAM**
(Associació Catalana de Meteorologia)

Influència de l'efecte de la humitat del sòl en l'emissivitat de l'infraroig tèrmic

M. Mira[1], E. Valor[1], R. Boluda[2], V. Caselles[1] i C. Coll[1]

[1]Departament de Ciències de la Terra i Termodinàmica, Facultat de Física, Universitat de València, 50 Dr. Moliner, 46100 Burjassot,València

[2]Departament de Biologia Vegetal, Facultat de Farmàcia, Universitat de València, Av. Vicent Andrés Estellés, 46100 Burjassot, València

Rebut: 3-XI-2006 – Acceptat: 29-V-2007 – **Versió Traduïda**

Correspondència a: Maria.Mira@uv.es

Resum

La influència de l'efecte de la humitat del sòl en l'emissivitat de l'infraroig tèrmic és un fet conegut però poc estudiat en el passat. S'ha dissenyat un experiment per a calcular la dependència de l'emissivitat respecte de la humitat del sòl. Han estat seleccionades sis mostres d'horitzons superficials de diferents tipus de sòl mediterranis. Llur emissivitat ha estat mesurada amb diferents continguts d'aigua al sòl, utilitzant la variant de dues tapes del mètode de caixa, mentre que el mètode gravimètric ha estat seleccionat per obtenir la humitat del sòl. Com a resultat d'això, l'estudi mostra que l'emissivitat augmenta significativament quan el contingut d'aigua esdevé més alt, especialment en sòls arenosos en el rang 8.2-9.2 μm. S'han deduït una sèrie d'equacions per tal d'obtenir l'emissivitat de la humitat del sòl a diferents bandes espectrals per als tipus de sòl analitzats.

1 Introducció

La temperatura del terra és un paràmetre d'entrada en els estudis meteorològics i climatològics així com en les anàlisis hidrològiques i agrícoles. No obstant això, l'emissivitat de superfícies naturals és una magnitud necessària per a determinar la temperatura des de les mesures de la radiància de l'infraroig tèrmic (TIR). Si la primera no està ben determinada, pot implicar un error important a l'hora d'obtenir la segona. Un 1% d'incertesa en l'emissivitat pot provocar un error en la temperatura de 0.5 K aproximadament quan la temperatura superficial és al voltant de 300 K i quan l'efecte atmosfèric no es té en consideració (Sobrino i Caselles, 1989). Per aquesta raó, cal estudiar els factors que influencien l'emissivitat, ja que s'ha de calcular amb la millor precisió possible.

La influència del tipus de sòl en l'emissivitat és ben coneguda gràcies a estudis experimentals (Salisbury i D'Aria, 1992). Tanmateix, l'anàlisi de la variació de l'emissivitat de la TIR amb la humitat del sòl (HS) és un dels temes pendents en la teledetecció tèrmica. Hi ha pocs estudis sobre aquest tema, principalment en el terreny experimental (Van Bavel i Hillel, 1976; Chen et al., 1989; Urai et al., 1997; Xiao et al., 2003; Ogawa et al., 2006). S'ha de tenir en consideració la dependència de la HS en la obtenció de l'emissivitat a partir de les dades de les observacions de satèl·lit, ja que l'augment d'HS provoca un elevat error sistemàtic en aquest paràmetre, p. ex., al voltant de +0.1 per un augment de 0.04 a 0.10 g cm^{-3} en la HS (Ogawa et al., 2006) per a sòls arenosos.

No obstant això, a la zona de microones hi ha diversos estudis teòrics (Galantowicz et al., 2000) i també experimentals (Alex i Behari, 1998; Jackson et al., 1999; Burke i Simmonds, 2003) sobre la variació en l'emissivitat amb la HS. En aquesta zona, la variació és molt més important que l'infraroig tèrmic. Els mesuraments d'emissivitat de microones per radiometria passiva són, de fet, la base d'un dels mètodes de mesurament sinòptics de la humitat del sòl per teledetecció (Martín-Neira i Goutoule, 1997).

El principal objectiu de la nostra recerca és el de millorar la descripció de la variació de l'emissivitat de la TIR del sòl amb la humitat. Això ens permetrà fer una estimació més acurada dels valors d'emissivitat des de l'espai utilitzant les estimacions de la HS, proporcionades per sensors futurs com l'instrument MIRAS de la missió de l'ESA sobre la humitat del sòl i la salinitat del mar (SMOS). En aquest estudi, es proposen una sèrie d'equacions per tal d'extreure l'emissivitat com una funció de la HS a diferents bandes espectrals per als tipus de sòl analitzats.

A la secció 2 es mostren alguns detalls de la posada

(cc) BY *2007 Autor(s). Aquest treball té llicència "Creative Commons".*

Taula 1. Propietats físiques i químiques del sòl. CE: conductivitat elèctrica; MO: matèria orgànica; CIC: capacitat d'intercanvi catiònic; V: saturació de bases.

Nom de la mostra	A	B	C	D	E	F
Color sec	5YR4/6	10YR8/1	10YR4/2	10YR6/2	10YR5/6	10YR5/4
Color humit	7.5YR3/4	10YR7/2	10YR2/2	2.5Y4/2	10YR3/3	10YR5/3
pH (H_2O) 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
EC 1:5 (dS/m)	0.40 ± 0.12	0.040 ± 0.009	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
CEC ($cmol_c\ kg^{-1}$)	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
Sorra (%)	41 ± 3	99 ± 6	20.0 ± 1.0	14 ± 6	67 ± 4	50 ± 3
Llim (%)	28.0 ± 1.0	1.0 ± 1.0	43 ± 2	50 ± 8	20.0 ± 1.0	30 ± 2
Argila (%)	31 ± 2	0 ± 0	37 ± 3	35 ± 4	13.0 ± 1.0	20.0 ± 1.0
Textura (USDA)	Francoargilosa	Sorra	Francoargillollimosa	Francoargillollimosa	Francoarenosa	Franca

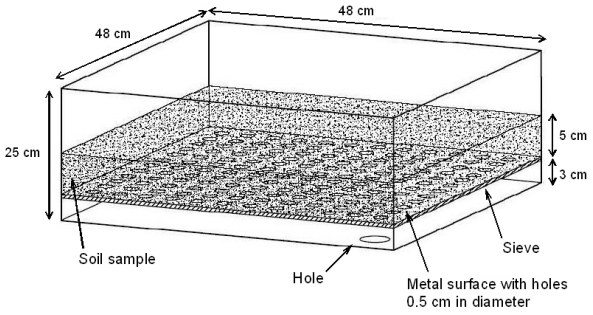

Figura 1. Contenidor de vidre per guardar les mostres i permetre un mesurament fàcil de les emissivitats, així com el drenatge de l'aigua.

en marxa de l'experiment tant per al mesurament de l'emissivitat com per al mesurament de la HS, i la descripció del sòl. A la secció 3 analitzem els resultats i la discussió d'aquest experiment. Finalment, a la secció 4 es donen les conclusions.

2 Posada en marxa de l'experiment

2.1 Descripció dels sòls

Per a aquest experiment hem seleccionat una sèrie de mostres d'horitzons superficials (0-15 cm) de diferents tipus de sòl mediterranis. La variació de l'emissivitat de la TIR amb la HS ha estat estudiada segons les diferents textures de sòl (p. ex., mida de partícula). Paràmetres com la textura, la porositat o l'estructura, entre altres, són responsables d'aquesta variació.

En primer lloc, cada mostra ha estat caracteritzada per les seves propietats físiques i químiques del sòl (Taula 1) relacionades amb la textura del sòl, el color, el contingut de matèria orgànica (MO), els carbonats totals, pH del sòl, la conductivitat elèctrica (CE), la capacitat d'intercanvi catiònic (CIC) i la saturació de bases (V). La textura del sòl es va fixar segons l'estàndard ISO 11277:1998 (ISO, 2002), basat en tècniques mecàniques de ruptura i sedimentació.

En segon lloc, el tipus taxonòmic dels sòls i els seus horitzons diagnòstics han estat identificats segons les classificacions de la FAO-ISRIC-SICS (1999) i l'USDA (1999) (Taula 2) de la taxonomia del sòl. Totes les mostres pertanyen a un clima mediterrani, tret de la mostra E que pertany a un clima atlàntic.

En tercer lloc, la identificació dels minerals argilosos de totes les mostres va ser determinada per mitjà de la tècnica de difracció de raigs X (XRD) ja que sempre és considerada com un dels procediments més ràpids. Segons aquesta anàlisi semi-quantitativa mostrada a la Taula 3, el quars és el mineral predominant a les mostres A, B i E mentre que la calcita és el mineral principal a les mostres C, D i F. El resultat és important ja que el quars contribueix a augmentar la reflectància del material entre 7.7 i 9.7 μm així com prop de 12.6 μm. Això significa un descens de l'emissivitat en aquelles regions espectrals.

2.2 Mesurament de la humitat del sòl

El primer pas en l'estratègia del mesurament va ser la de moldre i barrejar cada mostra abans de permetre que s'eixugués per l'aire, i tamisar-la en 2 mm. Després, es va inundar permetent la filtració de l'aigua a través del recipient que conté el sòl. Des d'aquell moment, es va deixar eixugar lliurament.

Amb tal fi, es va dissenyar un contenidor de vidre (Figura 1) de dimensions 48 x 48 x 25 cm^3 per permetre el drenatge de l'aigua i el seu darrer buidatge. La mostra es va conservar sobre una superfície perforada de metall uns

Taula 2. Tipus taxonòmics dels sòls i els seus horitzons diagnòstics.

Nom de la mostra	FAO-ISRIC-SICS (1999)	Taxonomia del sòl (USDA, 1999)	Horitzons diagnòstics
A	lúvic Calcisòl	Rhodoxeralf	Irragric
B	àlbic Arenosòl	Xeropsamment	Antropic
C	càlcic Kastanozem	Calcixeroll	Mollic
D	gleic-calcari Fluvisòl	Fluvaquent	Antraquic
E	dístric Cambisòl	Dystrudept	Cambic
F	petric Calcisòl	Petrocalcid	Ocric

Taula 3. Anàlisi semi-quantitativa de la identificació dels minerals usant la tècnica XRD.

Mineral	Quantitat (%)					
Quars	82	96	29	19	74	20
Feldspat	5	4	6	4	22	4
Filosilicat	5	-	9	6	4	4
Calcita	3	-	56	62	-	63
Hematites	5	-	-	9	-	9
Nom de la mostra	A	B	C	D	E	F

centímetres per sobre de la base del recipient. A més, es va col·locar un tamís de fulla a la superfície metàl·lica per impedir la pèrdua de les partícules més fines.

Es va escollir el mètode gravimètric per tal de mesurar la HS ja que és la tècnica més acurada. Es basa en la determinació directa del contingut de l'aigua del sòl (Day, 1965). La limitació principal és que és un mètode laboriós i destructiu ja que es treuen petites quantitats de sòl de la mostra total quan es realitzen els mesuraments de HS. Aquest fet ha impedit fer mesuraments amb molta freqüència. A més, la factibilitat dels mesuraments depèn de la variabilitat espacial de la humitat del sòl ja que no tota la mostra s'eixuga al mateix temps. Per aquest motiu, s'ha realitzat un mostreig adequat per a cada mesurament de contingut d'aigua. Es van agafar tres mostres de sòl per a l'anàlisi del contingut de l'aigua durant cada sèrie de mesuraments d'emissivitat per tal de minimitzar l'error del valor de la HS.

El contingut de HS s'expressa per pes (wt) en la proporció entre massa d'aigua present i pes en sec de la mostra o per volum com a proporció entre volum d'aigua i volum total de la mostra de sòl. Seguint el mètode gravimètric, per tal de determinar qualsevol d'aquestes proporcions per a una mostra concreta de sòl, la massa de l'aigua s'ha de determinar drenant el sòl fins a obtenir un pes constant i mesurant la mostra de sòl després i abans d'eixugar-se. La massa d'aigua (o pes) és la diferència entre els pesos de les mostres humides i seques. El criteri per a una mostra de sòl sec és la mostra de sòl que ha estat eixugada fins a obtenir un pes constant en el forn a una temperatura d'entre 100-110°C (105° C és la típica). Finalment, el contingut d'humitat es calcula utilitzant l'equació:

$$\Theta_d = \frac{wt_w - wt_d}{wt_d} \quad (1)$$

on:

- wt_w: pes del sòl humit.
- wt_d: pes del sòl sec.

S'han utilitzat diferents tècniques per tal d'assegurar l'homogeneïtat de les mostres en termes de composició, textura i humitat, tals com barrejar el contingut de la mostra o molent el sòl. A més, les esquerdes del sòl que van aparèixer en el procés d'assecament van ser eliminades quan va caldre. A més a més, la seqüència de la saturació del sòl i l'assecament es va repetir almenys dues vegades per tal d'assegurar la validesa i reproductibilitat dels mesuraments de l'emissivitat.

2.3 Mesuraments de l'emissivitat

Les emissivitats es van determinar a través de la variant de dues tapes del mètode de caixa (Rubio et al., 1997) i utilitzant el radiòmetre d'infraroig tèrmic CIMEL CE 312 (Legrand et al., 2000). Té quatre canals espectrals: un d'ample, 8-14 μm (canal 1), i tres canals estrets, 8.2 - 9.2, 10.5 - 11.5, 11.5 - 12.5 μm (canals 4, 3, i 2 respectivament). El radiòmetre té un camp de visió de 10°, un temps de resposta d'1 s, i precisions de $\pm$ 0.10 K per a cada canal.

La caixa utilitzada és una caixa sense fons, amb una base de 30 x 30 cm^2 i una altura de 80 cm. Les parets laterals són superfícies reflectants especulars d'alumini polit amb una emissivitat de $\varepsilon_c \sim 0.03$. Dues tapes intercanviables amb diferents respostes espectrals, cadascuna amb un petit forat central a través del qual es fan els mesuraments radiomètrics s'utilitzen com a tapes superiors. La *tapa calenta* és una tapa d'alumini aspre anoditzat pintat amb negre Parson amb un valor d'emissivitat de $\varepsilon_h \sim 0.98$ mantingut a una temperatura de 15-20°C per sobre de la temperatura de les mostres per mitjà d'un sistema d'escalfament elèctric. La *tapa freda* és una tapa reflectant especular d'alumini polit, amb un valor d'emissivitat de $\varepsilon_c \sim 0.03$.

En el mètode de dues tapes, es realitzen tres mesuraments de radiància amb tres configuracions diferents del sistema de mostra de caixa, que mostrem a la Figura 2. A més,

Taula 4. Variació màxima de l'emissivitat dins de tot el rang de la humitat del sòl ($\Delta\varepsilon_i \pm \delta\Delta\varepsilon_i$), i els errors de mesurament de la emissivitat mitjana ($\overline{\delta\varepsilon_i}$), per a cada mostra als diferents canals CE$\tilde{3}$12.

Mostra	$\Delta\varepsilon_1 \pm \delta(\Delta\varepsilon_1)$	$\Delta\varepsilon_2 \pm \delta(\Delta\varepsilon_2)$	$\Delta\varepsilon_3 \pm \delta(\Delta\varepsilon_3)$	$\Delta\varepsilon_4 \pm \delta(\Delta\varepsilon_4)$	$\overline{\delta\varepsilon_1}$	$\overline{\delta\varepsilon_2}$	$\overline{\delta\varepsilon_3}$	$\overline{\delta\varepsilon_4}$
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

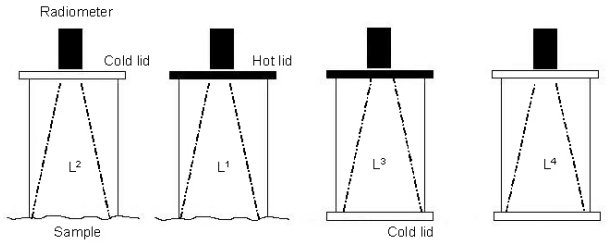

Figura 2. Procediment seguit per al mesurament d'emissivitat amb la variant de dues tapes de mètode de caixa. L^4 pertany a un mesurament addicional quan la caixa no es considera ideal. La seqüència de mesuraments de camp és d'esquerra a dreta (p.ex., L^2, L^1, L^3 i L^4).

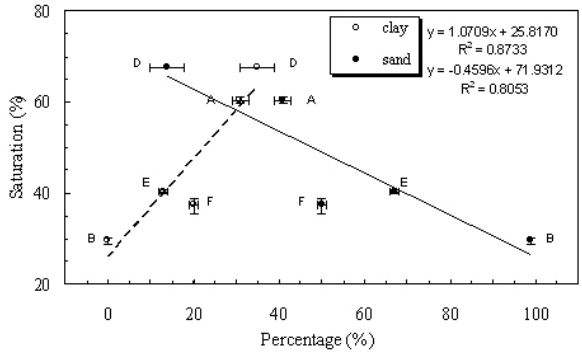

Figura 3. Relació entre el contingut de sorra i el punt de saturació de cada sòl mostrejat, tret de la mostra C tenint en compte el seu comportament especial al seu alt contingut de MO.

s'ha realitzat un quart mesurament (L^4) per tal de calcular l'efecte d'una caixa no-ideal. D'aquesta manera, el mètode dóna el valor d'emissivitat d'una mostra del terra a través de la fórmula (Rubio et al., 1997):

$$\varepsilon = 1 - \frac{(L^1 - L^2)(1 - \varepsilon_c)}{(L^3 - L^2) - (L^3 - L^1)P + (L^2 - L^4)Q} \qquad (2)$$

on:

- $\varepsilon_c = 0.03$
- $\varepsilon_h = 0.98$
- $P = F^2(1\text{-}\varepsilon_c)(1\text{-}\varepsilon_h)$
- $Q = 1\text{-}F^2(1\text{-}\varepsilon_c)^2$
- $F = 0.8674$

Seguint Rubio et al. (1997), F és un factor de transferència d'energia que depèn de la geometria de la caixa i de ε_c i representa la proporció d'energia de la base (tapa) que arriba a la tapa (base). P i Q són valors constants que depenen de F, i L^i (amb i = 1, 2, 3, 4) són els valors de la radiància efectiva (mW cm^{-2} sr^{-1} cm) mesurats amb el radiòmetre a través del petit forat.

Segons aquest mètode abans mencionat, es va realitzar una sèrie de 30 mesuraments d'emissivitat per canal i mostra amb l'objectiu d'obtenir una bona estadística i reduir l'error. Cal remarcar que si considerem que cada mesurament d'emissivitat s'obté dels quatre mesuraments de radiància (L^i; i = 1, 2, 3, 4), es necessita un total de 120 mesuraments individuals per tal d'inferir un únic valor d'emissivitat per a cada canal i mostra.

3 Resultats i discussió

En relació a la HS, s'obté un valor excepcional del valor de la HS més alt per al castanozem càlcic (mostra C). Probablement la causa principal d'aquest alt valor és la riquesa de contingut de matèria orgànica (MO) d'aquest sòl. La Taula 1 mostra que el contingut de MO de la mostra C és quatre vegades superior a la mitjana de contingut de MO de les altres mostres. Encara que la MO sigui generalment un component menor dels sòls, és el principal emmagatzematge d'aigua disponible per plantes degut a l'alt percentatge d'agregats estables a l'aigua. Per aquesta raó, els sòls amb un alt contingut de MO tenen un comportament diferent que els altres pel que fa a l'aigua retinguda. La resta de mostres tenen una acusada tendència a disminuir el valor del seu punt de saturació amb l'augment del seu contingut de sorra, com es pot veure a la Figura 3. Els valors del punt de saturació es van obtenir al laboratori (Porta, 1986) seguint el mètode gravimètric, amb l'objectiu de comprovar aquesta relació. Es tracta d'un resultat consistent ja que la matriu del sòl reté l'aigua a través de dos mecanismes: primer, l'aigua pot ser absorbida en les superfícies de la partícula (especialment

Taula 5. Regressió ajustada de l'emissivitat en funció del contingut d'aigua del sòl per a cada canal i mostra. ε: emissivitat; Θ_d: contingut d'aigua del sòl; R^2: coeficient de determinació; σ_f: error estàndard ajustat.

		$\varepsilon_i = a \cdot \Theta_d^2 + b \cdot \Theta_d + c$				
Nom de la mostra	**Canal**	a x 10^{-3}	b x 10^{-2}	c	R^2	σ_f
A	1	-0.024	0.18	0.930	0.953	0.002
	2	-0.034	0.21	0.942	0.946	0.002
	3	-0.024	0.16	0.943	0.971	0.0013
	4	-0.029	0.24	0.914	0.978	0.002
B	1	-0.13	0.6	0.862	0.931	0.010
	2	-0.05	0.3	0.931	0.954	0.005
	3	-0.059	0.31	0.928	0.990	0.002
	4	-0.4	1.5	0.72	0.878	0.03
C	1	-0.0031	0.10	0.901	0.991	0.003
	2	-0.0025	0.08	0.910	0.986	0.003
	3	-0.004	0.11	0.897	0.988	0.003
	4	-0.004	0.11	0.895	0.985	0.004
D	1	-0.010	0.08	0.951	0.396	0.006
	2	-0.011	0.088	0.954	0.928	0.0016
	3	-0.003	0.03	0.957	0.586	0.003
	4	0.000	0.03	0.948	0.874	0.003
E	1	-0.05	0.291	0.9326	0.999	0.0003
	2	-0.038	0.23	0.943	0.989	0.002
	3	-0.034	0.23	0.938	0.995	0.0019
	4	-0.031	0.27	0.918	0.997	0.0019
F	1	-0.12	0.5	0.914	0.844	0.005
	2	-0.19	0.8	0.902	0.798	0.006
	3	-0.12	0.5	0.914	0.824	0.005
	4	-0.13	0.6	0.897	0.919	0.004

les partícules argiloses degut a llur zona reactiva d'ampla superfície); i en segon lloc, l'aigua pot ser retinguda en porus de sòl per capil·laritat. L'aigua és retinguda d'una manera més estreta en porus petits que en porus grans. Per tant, els sòls argilosos retenen més aigua i durant més temps que els sòls arenosos.

Els resultats experimentals de la dependència de l'emissivitat de la TIR en la HS per a cada canal espectral de CE 312 es mostren a la Figura 4. En tots els casos s'observa un augment de l'emissivitat amb la HS. La Taula 4 compara l'augment de l'emissivitat amb els errors de mesurament, amb el resultat que l'augment és molt més gran que la incertesa experimental. Segons els valors de la Taula 4, l'error mitjà d'emissivitat és d'aproximadament $\pm$ 0.5%. Cal remarcar que l'error d'emissivitat prové de la desviació estàndard de la sèrie de 30 mesuraments d'emissivitat realitzats cada vegada.

La variació més gran d'emissivitat amb la humitat del sòl s'observa en els 8.2-9.2 μm en el canal 4, seguida de variacions en el canal 1 (8-13 μm), en el canal 2 (11.5-12.5 μm) i finalment en el canal 3 (10.5-11.5 μm). Aquesta variabilitat és més evident en l'arenosòl àlbic, mostra B ($\Delta\varepsilon_4 \sim 16\%$), i menys marcada en el calcisòl lúvic, mostra A ($\Delta\varepsilon_3 \sim 1.7\%$).

A la Figura 4 s'observa generalment un augment marcat de l'emissivitat per a poc contingut en aigua, i gairebé no s'observen canvis a partir d'un cert valor d'HS. Segons dades experimentals extretes d'Israelsen i Hansen (1962), aquest determinat valor d'HS podria coincidir amb el punt de capacitat del camp (CC), el valor del qual depèn del tipus de sòl. Un sòl es troba a CC quan, després de la saturació, tota l'aigua ha estat drenada dels macroporus per la gravetat. Aleshores, els microporus poden retenir l'aigua contra la força de la gravetat gràcies a les forces capil·lars. Aquest argument ens permet entendre el comportament de l'emissivitat de la TIR en relació amb la humitat del sòl ja que quan el sòl està saturat, o fins i tot amb una HS més alta que el seu punt CC, el seu valor d'emissivitat tèrmica no és només gairebé constant sinó gairebé igual a un que sigui l'emissivitat de l'aigua. Tanmateix, per sota del punt CC, l'aigua es retinguda en microporus, permetent valors d'emissivitat més baixos així com variació d'emissivitat amb contingut d'HS.

Una regressió d'ajustament quadràtic de l'emissivitat amb el contingut d'aigua del sòl per a cada canal de CE 312 i per a cada mostra ha estat deduïda per realitzar-les en futurs algorismes atmosfèrics i d'emissivitat. A la Taula 5, la sèrie de coeficients així com el coeficient de determinació (R^2) i l'error estàndard ajustat (σ_f) es mostren per a cada cas. Aquestes corbes d'ajustament són acceptables ja que llur

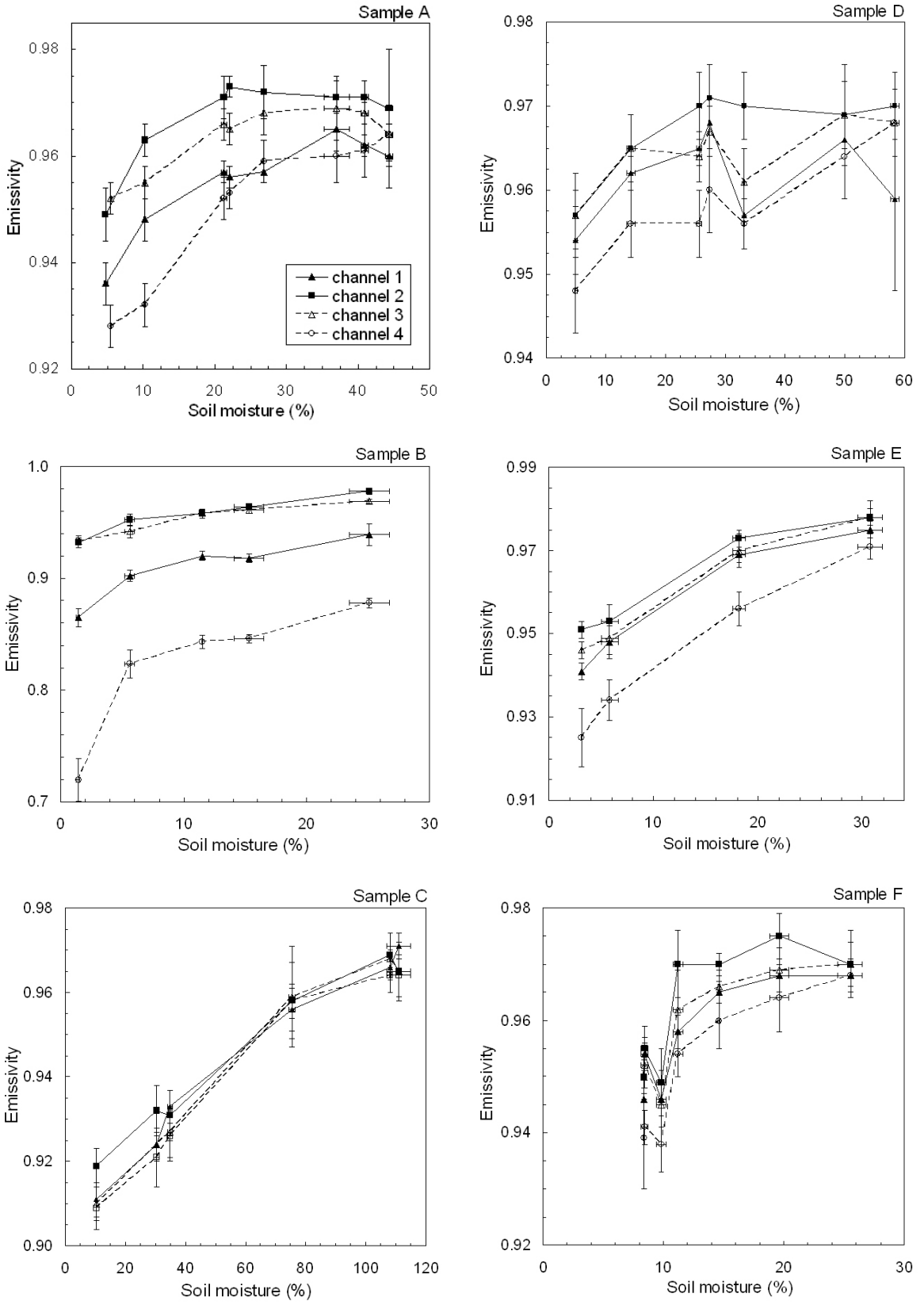

Figura 4. Emissivitat mesurada dels sòls mostrejats en els canals espectrals d'un radiòmetre infraroig tèrmic CE 312 per a diversos continguts d'humitat.

coeficient de determinació mitjana és del voltant de 0.90 i l'error estàndard ajustat arriba a un valor d'aproximadament $\pm$ 0.5%. És important destacar que la mostra D és la que presenta el pitjor ajustament, tal com mostren els seus coeficients de baixa determinació. Creiem que això és degut a la textura compacta que va adquirir al llarg de l'experiment i la conseqüent rudesa aconseguida. Mentrestant, la mostra E mostra el millor ajustament ja que el seu valor mitjà de R^2 és el més alt i el seu valor σ_f és el més baix.

4 Conclusions

Aquest document posa l'accent en la importància d'una determinació precisa de la variació d'emissivitat amb el contingut d'aigua del sòl per tal de permetre obtencions adequades de temperatura, sobretot per a sòls arenosos.

En primer lloc, s'han utilitzat sis minerals com a base d'estudi de la dependència de l'emissivitat de la TIR en la HS a partir de mesuraments de laboratori. Cada sòl té una textura de sòl diferent i per tant s'han observat diferents comportaments d'emissivitat. Tanmateix, s'observa una tendència general comuna a augmentar l'emissivitat amb el contingut d'aigua del sòl per a cada sòl estudiat. Els resultats mostren que la variació d'emissivitat és més gran sobretot en el rang 8.2-9.2 μm i més baixa en el rang 10.3-11.3 μm, seguint la seqüència $\Delta\varepsilon_4$ (8.2-9.2 μm) $>$ $\Delta\varepsilon_1$ (8-13 μm) $>$ $\Delta\varepsilon_2$ (11.5-12.5 μm) $\sim$ $\Delta\varepsilon_3$ (10.5-11.5 μm). A més, el contrast espectral disminueix quan la HS augmenta. Mentrestant, en el cas dels clàssics canals de "split window", aquest contrast és gairebé constant. La variació d'emissivitat és òbvia per a l'arenosòl àlbic (mostra B) amb un augment d'aproximadament 16% (que provoca un error sistemàtic de 8°C en la temperatura) perquè és el sòl amb un contingut de sorra més alt. La variació abans mencionada és important ja que és clarament més gran que la incertesa experimental ($\delta_\varepsilon \sim \pm$ 0.5%), fet que pot implicar un important impacte en els mètodes actuals d'estimació de la temperatura a partir de dades radiomètriques.

En segon lloc, s'ha deduït una regressió d'ajustament quadràtic de l'emissivitat en funció del contingut d'aigua del sòl per cada canal i mostra, per tal d'implementar-les en futurs algorismes de correcció atmosfèrics i de l'emissivitat. Per resumir, aquest estudi prova que la variació de l'emissivitat amb la HS s'hauria de considerar en algorismes de correcció atmosfèrica i de l'emissivitat per a evitar importants errors sistemàtics de la temperatura de la superfície del sòl.

Agraïments. Aquest treball ha rebut el suport del Ministerio de Educación y Ciencia (projectes CGL2004-06099-C03C01/CLI i CGL2004-0166-E) i de la Generalitat Valenciana (projecte GV2004-B-084). Els autors agraeixen els útils comentaris del Prof. C. Coll (Departament de Ciències de la Terra i Termodinàmica), dels Prof. J. Bastida i P. Pardo (Departament de Geologia) així com dels Drs. L. Roca i F. Perobelli (Departament de Biologia Vegetal), tots de la Universitat de València. Finalment, voldríem expressar la nostra gratitud per l'ajuda essencial de tota la gent implicada en els mesuraments d'emissivitat (Alberto Almendros, Joan Miquel Galve, Juan Manuel Sánchez, Dra. Raquel Niclòs, Anaís Barella, Jesús Muñoz, Maite Rodríguez, Mari Carmen Campo, África Barreto, Cecilia Narbón).

Referències

Alex, Z. C. i Behari, J., 1998: *Laboratory evaluation of emissivity of soils*, Int. J. Remote Sens., **19**, 1335–1340.

Burke, E. J. i Simmonds, L. P., 2003: *Effects of sub-pixel heterogeneity on the retrieval of soil moisture from passive microwave radiometry*, Int. J. Remote Sens., **24**, 2085–2104.

Chen, J. M., Yang, B. J., i Zhang, R. H., 1989: *Soil thermal emissivity as affected by its water content and surface treatment*, Soil Sci., **148**, 433.

Day, P. R.: Methods of soil analysis, part I. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling, pp. 545–567, num. 9 a the Agronomy Series, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 1965.

FAO-ISRIC-SICS, 1999: World Reference Base for Soil Resources, FAO, Rome, Italy, 99 pp.

Galantowicz, J. F., Entekhabi, D., i Njoku, E. G., 2000: *Estimation of soil-type heterogeneity effects in the retrieval of soil moisture from radiobrightness*, IEEE T. Geosci. Remote, **38**, 312–316.

ISO: *Soil quality. Determination of particle size distribution in mineral soil material. Method by sieving and sedimentation (ISO 11277:1998/TC190)*, International Organization for Standardization, 30 pp, 2002.

Israelsen, O. W. i Hansen, E. V.: Basic Soil Water Relations. Irrigation principles and practices, cap. 7, third edn., 1962.

Jackson, T. J., Le Vine, D. M., Hsu, A. Y., Oldark, A., Starks, P. J., Swift, C. T., Isham, J. D., i Haken, M., 1999: *Soil moisture mapping at regional scales using microwave radiometry: the southern great plains hydrology experiment*, IEEE T. Geosci. Remote, **37**, 2136–2151.

Legrand, M., Pietras, C., Brogniez, G., Haeffelin, M., Abuhassan, N. K., i Sicard, M., 2000: *A high-accuracy multiwavelength radiometer for in situ measurements in the thermal infrared: Part 1. Characterization of the instrument*, J. Atmos. Ocean. Tech., **17**, 1203–1214.

Martín-Neira, M. i Goutoule, J. M., 1997: *MIRAS-A two dimensional aperture-synthesis radiometer for soil-moisture and ocean-salinity observations*, ESA Bulletin, **92**, 95–104.

Ogawa, K., Schmugge, T., i Rokugawa, S., 2006: *Observations of the dependence of the thermal infrared emissivity on soil moisture*, Geophysical Research Abstracts, **8**, 04 996.

Porta, J., 1986: Técnicas y experimentos en Edafología, Col·legi Oficial d'Enginyers Agrònoms de Catalunya, Barcelona, Spain, 282 pp.

Rubio, E., Caselles, V., i Badenas, C., 1997: *Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8-14 μm wave band: analysis of two field methods*, Remote Sens. Environ., **59**, 490–521.

Salisbury, J. W. i D'Aria, D. M., 1992: *Emissivity of terrestrial materials in the 8-14 μm atmospheric window*, Remote Sens. Environ., **42**, 83–106.

Sobrino, J. A. i Caselles, V., 1989: *Medida mediante el método de la caja de la emisividad en la banda espectral de los 8-14 μm de algunos suelos agrícolas y de la vegetación*, An. Fis., **B85**, 220–227.

Urai, M., Matsunaga, T., i 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**, 322–331.

USDA, 1999: Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, 436, Natural Resources Conservation Service USDA, Soil Survey Staff, Washington, DC., 870 pp.

Van Bavel, C. H. M. i Hillel, D., 1976: *Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat*, Agr. Meteorol., **76**, 453–476.

Xiao, Q., Liu, Q. H., Li, X. W., Chen, L. F., Liu, Q., i Xin, X. Z., 2003: *A field measurement method of spectral emissivity and research on the feature of soil thermal infrared emissivity*, J. Infrared Millim. W., **22**, 373–378.