Tethys, 4, 27–32, 2007
www.tethys.cat
ISSN-1697-1523
eISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2007.4.04

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

Simulació i validació dels algorismes de la temperatura de la superfície terrestre per a les dades de MODIS i AATSR

J. M. Galve, C. Coll, V. Caselles, E. Valor, R. Niclòs, J. M. Sánchez i M. Mira

Departament de Física i Termodinàmica, Universitat de València. C/ Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot

Rebut: 21-V-2007 – Acceptat: 25-X-2007 – **Versió Traduïda**

Correspondència a: joan.galve@uv.es

Resum

S'ha construït una base de dades de perfils de radiosondatges atmosfèrics, d'abast global, i per a situacions sense núvols, amb la finalitat de simular mesuraments radiomètrics des de sensors abord de satèl·lit en l'infraroig tèrmic. L'objectiu de la simulació era el de generar algorismes de split-window (SW) i d'angle dual (DA) per a obtenir la temperatura de la superfície terrestre (LST) a partir del Terra/Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) i de les dades del Envisat/Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR). La base de dades conté 382 perfils de radiosondatge obtinguts de superfícies terrestres, amb una distribució gairebé uniforme en contingut d'aigua precipitable entre 0 i 5.5 cm. Els càlculs de transferència radiativa van ser realitzats amb el codi MODTRAN 4 per a sis angles de visió diferents entre 0 i 65°. Els espectres de radiància que en van resultar es van integrar amb les funcions del filtre de resposta de les bandes 31 i 32 del MODIS i als canals de l'AATSR a 11 i 12 μm. Utilitzant la base de dades de simulació, es van desenvolupar els algorismes SW adaptats per a les dades de MODIS i AATSR, i els algorismes DA per a les dades de AATSR. Els dos tipus d'algorismes són quadràtics en la diferència de la temperatura de brillantor i depenen explícitament de l'emissivitat de la superfície terrestre. Aquests algorismes SW i DA van ser validats amb mesuraments del sòl reals de LST presos simultàniament amb les observacions de MODIS i d'AATSR en una zona d'arrossars ampla, plana i tèrmicament homogènia situada prop de la ciutat de València, Espanya. Els resultats obtinguts no van mostrar cap biaix i tenien una desviació estàndard del voltant de $\pm$0.5 K per als algorismes SW al nadir dels dos sensors; l'algorisme SW utilitzat en la visió cap a davant va tenir com a resultat un biaix de 0.5 K i una desviació estàndard de $\pm$ 0.8 K; els resultats menys precisos es van obtenir en els algorismes DA amb un biaix proper a -2.0 K i una desviació estàndard propera a $\pm$ 1.0 K.

1 Introducció

La temperatura de la superfície terrestre (LST) és necessària per a estimar l'energia i els fluxos d'aigua entre la superfície terrestre i l'atmosfera, i per tant resulta de gran interès per als estudis meteorològics i climatològics. L'única manera d'obtenir la LST de grans porcions de la Terra és utilitzant la teledetecció de l'infraroig tèrmic. Les principals dificultats per obtenir la LST de les dades dels satèl·lits són la correcció atmosfèrica, provocada sobretot pel vapor d'aigua, i la correcció de l'emissivitat. En els últims anys, s'han proposat diverses tècniques per a la correcció de les dades de satèl·lit de l'infraroig tèrmic i per tant per a l'obtenció de la LST. McMillin (1975) va proposar mètodes basats en el principi d'absorció diferencial per a l'obtenció de temperatura de la superfície marítima (SST). Aquests mètodes utilitzen mesuraments de la mateixa superfície objectiu en diferents condicions d'observació, i són probablement les aproximacions operacionalment més simples i factibles per a la correcció de les dades de l'infraroig tèrmic.

Són exemples d'aquest mètode el mètode "split-window" (SW) que utilitza dos canals dins la finestra atmosfèrica 10.5-12.5 μm i el mètode d'angle dual (DA) que utilitza un únic canal en dos angles d'observació diferents.

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

Més recentment, la tècnica SW es va estendre a les superfícies terrestres gràcies als efectes de l'emissivitat de la superfície (p.ex., Becker i Li, 1990; Wan i Dozier, 1996; Coll i Caselles, 1997). Els algorismes de LST inclouen explícitament una dependència de l'emissivitat de la superfície en els canals considerats. Es proporcionen conjunts de coeficients alternativament diferents per a cada tipus de coberta del sòl. L'extensió de la tècnica DA a la superfície terrestre requereix el coneixement de l'emissivitat de la superfície en els dos angles d'observació considerats. A causa de l'anisotropia de la radiació emesa per superfícies abruptes, heterogènies i no isotèrmiques, es més difícil obtenir la LST amb els mètodes DA que amb els mètodes SW (Caselles et al., 1997).

Els algorismes de les dues tècniques normalment expressen la LST com una combinació lineal, o més recentment quadràtica, de la diferència entre les temperatures de brillantor en els canals considerats i els angles d'observació els coeficients constants dels quals tenen validesa regional o global. Per tal d'obtenir aquests coeficients, s'utilitza generalment una base de dades de radiosondatge per a simular la temperatura de brillantor mesurada pel sensor a la part més alta de l'atmosfera per a una gamma ampla d'atmosferes i condicions de superfície, aleshores s'obté una funció de regressió entre les temperatures de brillantor i les LST.

El primer objectiu d'aquest estudi va ser utilitzar una nova base de dades de Radiosondatge atmosfèric de Terra sense Núvols (CLAR) per tal de generar algorismes de LST global a partir de les dades del *Terra/Moderate Imaging Spectroradiometer* (MODIS) i de l'*Envisat/ Advanced Along Track Scanning Radiometer* (AATSR). Les bandes del MODIS 31 (11.026 μm) i 32 (12.013 μm) són adequades per als algorismes SW, així com els canals AATSR a 11 i 12 μm. La capacitat de visió d'angle dual de l'AATSR, amb les dues observacions gairebé simultànies a un angle cap a davant (55° del nadir) i properes al nadir, permet la implementació dels algorismes DA.

El segon objectiu era generar cinc algorismes de LST: dos SW per a les dades de l'AATSR, un per a la visió de nadir (ASWn) i l'altre per a la visió cap a davant (ASWf), dos DA a partir de les dades de l'AATSR, un per a cada canal (ADA11 i ADA12) i un SW per a les dades del MODIS (MSW) per tal d'obtenir la LST amb un error inferior a 1 K en tots els casos. Això requereix una validació d'aquests algorismes utilitzant mesuraments terrestres i de satèl·lit. Els algorismes operacionals de LST dels dos sensors van ser validats per a comparar els nostres algorismes.

2 Simulació

2.1 Consideracions teòriques

Els diferents algorismes de LST obtinguts en aquest estudi estan basats en el model de Coll i Caselles (1997). L'algorisme segueix una dependència quadràtica en la diferència de la temperatura de brillantor. Si T_i és la temperatura de brillantor, essent $i = 1$ pel canal 11 μm o visió en nadir i $i = 2$ per a 12 μm o visió cap a davant, els nostres algorismes es poden expressar com:

$$LST = T_1 + a_0 + a_1(T_1 - T_2) + a_2(T_1 - T_2)^2 + \alpha(1 - \varepsilon) - \beta\Delta\varepsilon \quad (1)$$

on a_k són els coeficients atmosfèrics, que només depenen dels dos canals considerats i que són independents de l'emissivitat de la superfície. Els coeficients d'emissivitat α i β depenen dels canals i de les condicions atmosfèriques. Les expressions teòriques per als coeficients de α i β es troben a Coll i Caselles (1997). En aquest estudi, vam utilitzar una parametrització de α i β amb el contingut vertical d'aigua precipitable de l'atmosfera, W, i, depenent de l'algorisme, amb l'angle d'observació, θ. Finalment, ε i $\Delta\varepsilon$ són l'emissivitat mitjana i la diferència d'emissivitat tant per als canals com per als angles d'observació.

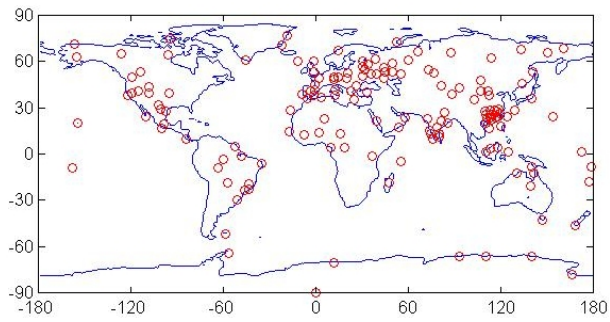

Figura 1. Distribució global dels emplaçaments de radiosondatge utilitzats a CLAR.

2.2 Base de dades CLAR

La base de dades CLAR va ser construïda amb radiosondatges atmosfèrics recollits de l'Atmospheric Science Department, University of Wyoming (http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html). Conté 382 radiosondatges atmosfèrics terrestres globals uniformement distribuïts. Tots ells van ser comprovats per tal d'assegurar-se que no s'hi incloïa cap núvol. Es considerava que un radiosondatge era ennuvolat quan la humitat relativa (RH) d'una capa era superior al 90% o quan dues capes consecutives tenien RH > 85%. Quan un radiosondatge tenia una RH superior al 80% en les dues primeres capes era considerada com un radiosondatge boirós i aleshores era descartat.

CLAR té una bona distribució en W que és uniforme fins els 5.5 cm i arriba als 7 cm. La distribució de la latitud absoluta es basa en tres rangs de latitud: 40% en latituds baixes (0° - 30°), 40% en latituds mitjanes (30° - 60°), i 20% en latituds altes (> 60°). La Figura 1 mostra la distribució global de totes les estacions de radiosondatge utilitzades en CLAR.

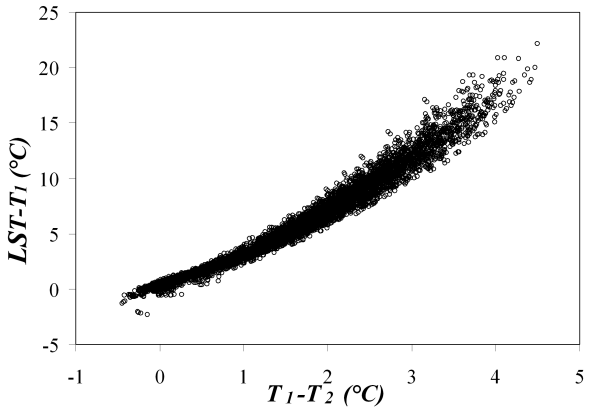

Figura 2. LST-T1 traçat en front de T1-T2 per al cas de MSW.

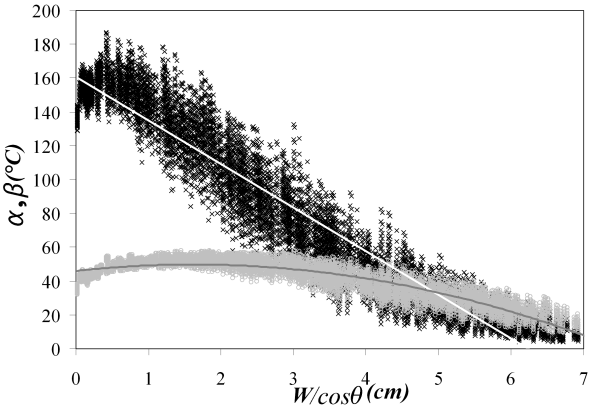

Figura 3. Coeficients α (cercle gris) i β (creu negra) per a l'algorisme MSW en front del contingut de vapor d'aigua en la trajectòria W (cm).

2.3 Característiques de la simulació

Com que els coeficients atmosfèrics (a_k) no depenen de l'emissivitat, poden derivar de simulacions per a una superfície d'un cos negre. En aquest cas la relació entre la radiació mesurada per al canal i del sensor a l'angle θ del nadir (L_i) i la radiància emesa per la superfície, $B_i(T)$, obtinguda a partir de la funció Planck és la següent:

$$L_i = \tau_i(\theta) B_i + L_i^{\uparrow}(\theta) \quad (2)$$

on $\tau_i(\theta)$ i $L_i^{\uparrow}(\theta)$ són, la transmitància atmosfèrica i la radiància atmosfèrica ascendent, respectivament, que es calculen per a cada perfil atmosfèric de la base de dades amb el model de transferència radiativa MODTRAN 4 (Berk et al., 1999). Aleshores T_i s'obté a partir de la radiància mesurada pel sensor, L_i, segons $B_i(T_i) = L_i$.

Cada radiosondatge de CLAR va ser introduït en el model de transferència radiativa de multicapes MODTRAN 4, en 65 capes des del nivell del terra fins a 100 km. La temperatura del terra es va prendre al voltant de la temperatura de la primera capa, T_0. Seleccionàrem set temperatures: $T_0 - 6$ K, $T_0 - 2$ K, $T_0 + 1$ K, $T_0 + 3$ K, $T_0 + 5$ K, $T_0 + 8$ K i $T_0 + 12$ K. Es van prendre en consideració diversos angles d'observació, 11.6°, 26.1°, 40.3° i 53.7°, que són els anomenats angles gaussians. També hi vam incloure dos angles d'observació (0° i 65°) per completesa. Així doncs aconseguim 16044 simulacions per a utilitzar en l'obtenció dels algorismes de LST.

3 Algorismes

3.1 Algorismes generats

L'ASWn va ser generat a partir de simulacions obtingudes per als següents angles d'observació: 0°, 11.6° i 26.1°. L'ASWf es va generar a partir de simulacions només a 53.7°. Es van utilitzar simulacions en dues parelles d'angles de simulació: 0° - 53.7° i 11.6° - 53.7° per a generar els dos algorismes DA en els canals AATSR a 11 i 12 μm.

Encara que el camp de visió de MODIS pot arribar fins a 65°, en aquest article ens vam limitar a $\theta < 45°$. La raó és que hi ha poca informació sobre la variabilitat angular de l'emissivitat i a causa de la degradació dels resultats de regressió quan s'utilitzen angles superiors a 45°. En conseqüència, el MSW va ser generat utilitzant simulacions obtingudes a 0°, 11.6°, 26.1° i 40.3°.

En els algorismes ASWn i MSW els coeficients α i β es van parametritzar com una funció del contingut de vapor d'aigua en la trajectòria, $\frac{W}{\cos(\theta)}$, perquè en aquests casos hi havia una variabilitat més gran d'angles d'observació. Per exemple en el cas de MSW, la Figura 2 mostra les diferències en $LST - T_1$ en front de les diferències de temperatura de brillantor $T_1 - T_2$. La relació entre els coeficients α i β i el contingut de vapor d'aigua en la trajectòria es mostra en la Figura 3. Es van obtenir uns resultats similars en els altres algorismes. Aleshores els algorismes poden ser expressats així:

ASWn:

$$\begin{aligned} LST &= T_{11n} + 0.32(T_{11n} - T_{12n})^2 + 0.78(T_{11n} - T_{12n}) \\ &+0.24 + (52.57 + 1.13\tfrac{W}{\cos(\theta)} - 1.023(\tfrac{W}{\cos(\theta)})^2)(1-\varepsilon) \\ &-(79.2 - 11.06\tfrac{W}{\cos(\theta)})\Delta\varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

ASWF:

$$\begin{aligned} LST &= T_{11f} + 0.437(T_{11f} - T_{12f})^2 + 0.49(T_{11f} - T_{12f}) \\ &+0.16 + (55.2 - 4.4W - 0.7W^2)(1-\varepsilon) \\ &-(64.6 - 11.432W)\Delta\varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

ADA11:

$$\begin{aligned} LST &= T_{11n} + 0.176(T_{11n} - T_{11f})^2 + 1.569(T_{11n} - T_{11f}) \\ &-0.059 + (57.00 + 1.57W - 1.18W^2)(1-\varepsilon) \\ &-(111.6 - 17.62W)\Delta\varepsilon \end{aligned} \quad (5)$$

ADA12:

$$LST = T_{12n} + 0.303(T_{12n} - T_{12f})^2 + 1.57(T_{12n} - T_{12f}) \\ -0.01 + (64.5 - 4.53W - 0.71W^2)(1 - \varepsilon) \\ -(110.3 - 19.84W)\Delta\varepsilon \quad (6)$$

MSW:

$$LST = T_{31} + 0.494(T_{31} - T_{32})^2 + 2.370(T_{31} - T_{32}) \\ +0.319 + (45.99 + 4.67\frac{W}{\cos(\theta)} - 1.446(\frac{W}{\cos(\theta)})^2)(1 - \varepsilon) \\ -(160.5 - 25.75\frac{W}{\cos(\theta)})\Delta\varepsilon \quad (7)$$

En el cas dels algorismes AATSR, T_{11n} i T_{12n} són les temperatures de brillantor en la visió de nadir en els canals de 11 μm i 12 μm respectivament, i T_{11f} i T_{12f} són les temperatures de brillantor per als mateixos canals però en una visió cap a davant. A més, en l'algorisme MSW T_{31} i T_{32} són les temperatures de brillantor en les bandes 31 i 32, respectivament.

3.2 Algorismes operacionals AATSR i MODIS LST

L'algorisme AATSR LST (Prata, 2000) expressa la LST com una combinació lineal de les temperatures de brillantor del nadir amb coeficients determinats per la regressió sobre conjunts de dades simulades i depenent del tipus de coberta del sòl (i), de la fracció de coberta vegetal (f), l'aigua precipitable i l'angle de visió del satèl·lit.

Aquests coeficients són proporcionats per a 14 classes diferents de coberta del sòl. Per a una classe de coberta del sòl específica, es donen dos conjunts separats de coeficients per a la superfície totalment vegetada i per a la superfície amb sòl nu. Actualment, les dades de LST generades amb aquest algorisme són proporcionades com un producte amb dades AATSR_ L2. L'algorisme està executat operacionalment al Rutherford Appleton Laboratory (RAL) en l'anomenat processador RAL. Els valors de la classe de coberta del sòl, de la fracció de coberta vegetal i de l'aigua precipitable es prenen de la classificació global, dels mapes mensuals de la fracció de coberta vegetal i de la climatologia mensual global amb una resolució espacial de 0.5° × 0.5° longitud/latitud.

L'algorisme generalitzat de "split-window" aplicat al MODIS està expressat com una combinació lineal de les temperatures de brillantor. Les expressions teòriques es troben a Wan i Dozier (1996). Els coeficients es van obtenir de la regressió lineal de les dades simulades de MODIS per a rangs amples de superfície i condicions atmosfèriques i depenen de l'angle de visió, W, i de la temperatura de la capa inferior atmosfèrica. Les emissivitats necessàries es van obtenir de les emissivitats basades en la classificació de píxels (Snyder et al., 1998).Actualment, les dades de LST generades amb aquest algorisme són proporcionades com un producte amb dades MOD11.

4 Validació

La validació de les LSTs obtingudes dels satèl·lits amb mesures del sòl és un repte a causa de l'heterogeneïtat de les superfícies terrestres, tant en termes de temperatura com d'emissivitat. Només es poden trobar uns pocs estudis de validació de LST en la literatura (p.ex., Prata, 1994; Wan et al., 2002; Coll et al., 2005 i 2006; Hook et al., 2007). La comparació entre les mesures puntuals del sòl i les mesures de satèl·lit que representen una mitjana de superfície només és possible per a certes superfícies terrestres que són tèrmicament homogènies a diverses escales espacials, des de la petjada d'instruments terrestres fins als píxels de diversos satèl·lits. Aquestes superfícies existeixen, les més adequades són les aigües continentals o les superfícies densament vegetades.

Es va recollir una base de dades de mesuraments de LST terrestre simultàniament amb el pas de l'AATSR i MODIS durant els estius de 2002-2006. Es tracta d'una zona plana d'arrossars situada a prop de València. Cada estiu,

Taula 1. Emissivitats utilitzades en l'aplicació dels algorismes a l'emplaçament de la prova de València.

	ASWn	ASWf	ADA11	ADA12	MSW
ε	0.983	0.973	0.980	0.975	0.984
$\Delta\varepsilon$	0.005	0.005	0.010	0.010	-0.003

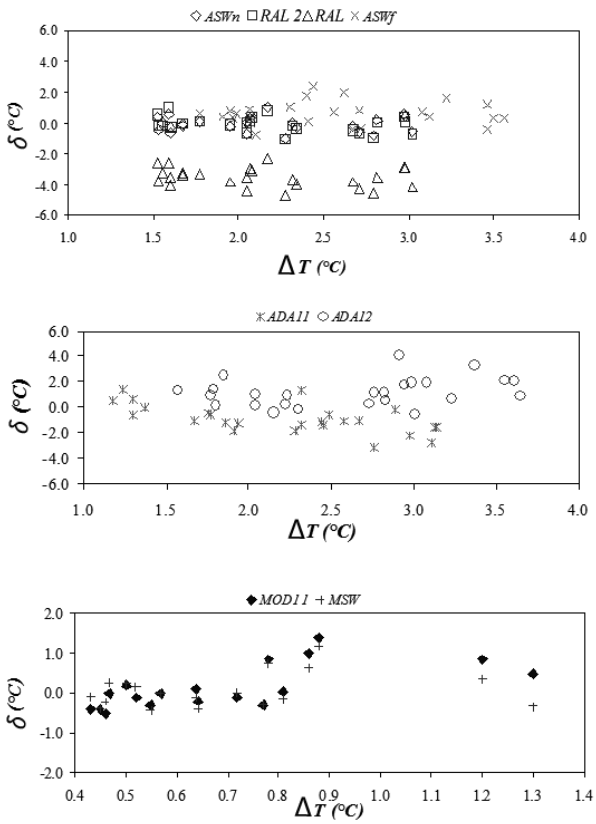

Figura 4. Error d'algorisme δT com una funció de la diferència de temperatura de brillantor ΔT a l'emplaçament de València.

Taula 2. Errors dels algorismes de LST obtinguts a l'emplaçament de València (δT = error mitjà; σ(T) desviació estàndard).

Nombre de punts	Algorisme	δT (K)	σ(T) (K)	RMSE (K)
25	ASWn	0.0	0.5	$\pm$ 0.5
25	ASWf	0.5	0.8	$\pm$ 0.9
25	ADA11	-1.0	1.1	$\pm$ 1.5
25	ADA12	-2.4	1.6	$\pm$ 2.8
25	RAL1	-3.5	0.6	$\pm$ 3.6
25	RAL2	-0.1	0.5	$\pm$ 0.5
18	MSW	0.1	0.5	$\pm$ 0.5
18	MOD11	0.1	0.6	$\pm$ 0.6

aquesta zona està completament coberta de vegetació i està ben irrigada, cosa que fa que aquest indret sigui tèrmicament homogeni. Aquesta base de dades de validació ha estat utilitzada per avaluar els mètodes de correcció SW i DA (Coll et al., 2005 i 2006).

L'emissivitat del nadir va ser mesurada en el camp utilitzant el mètode de caixa (Rubio et al., 2003). Els mesuraments fora del nadir no estaven disponibles per als arrossars. Es podria esperar que l'emissivitat angular fos petita en aquest cas. Per als arrossars completament coberts i ben irrigats, la diferència entre les temperatures de brillantor en el nadir i fora del nadir (60°) estaven a dins de 0.5 K (Lagouarde et al., 1995). Una disminució de la temperatura de 0.5 K entre les observacions en el nadir i fora del nadir és aproximadament equivalent a una disminució de l'emissivitat de 0.01 entre les dues condicions de visió. La Taula 1 proporciona l'emissivitat mitjana i la diferència d'emissivitat utilitzades en tots els algorismes.

La Figura 4 compara la diferència entre la temperatura de la superfície terrestre (T_g), i la LST estimada per l'algorisme (T_a), ($\delta T = T_g - T_a$), amb la diferència de temperatura de brillantor $\Delta T = T_1 - T_2$. Els errors obtinguts pels algorismes de LST a l'indret de València es troben a la Taula 2. ls errors en els casos de SW són sempre inferiors a 1 K, en canvi els dos errors de rendiment dels algorismes DA són superiors a 1.5 K. L'ADA12 és el menys precís amb un error de $\pm$ 2.4 K. Això mostra que el canal de 12 μm té massa absorció i no és apropiat per a les correccions atmosfèriques.

El processador RAL classifica aquest emplaçament com a arbres de fulla ampla amb coberta del sòl (i = 6) i f = 0.40 - 0.47 (juliol - agost). El valor assignat a f sembla especialment baix per als arrossars a l'estiu. De fet, amb aquestes consideracions sembla que el processador RAL sobreestima les LSTs terrestres per una mitjana de 3.6 K (veure Figura 4). Els resultats més precisos per a l'algorisme AATSR LST es van obtenir en els arbustos de fulla ampla amb coberta del sòl (i = 8) i f = 1 (coberta total) anomenats RAL2 en la Figura 4 i la Taula 2.

5 Conclusions

Es va recopilar una nova basa de dades CLAR per tal d'obtenir els algorismes de LST per a els dues tècniques, SW i DA. Utilitzant aquesta base de dades i aplicant el mètode de Coll i Caselles (1997), es van generar els algorismes de LST per a dos sensors, l'AATSR i el MODIS. La validació va proporcionar l'error dels algorismes. Els resultats d'aquests algorismes també van ser comparats amb els proporcionats pels algorismes operacionals de l'AATSR i del MODIS LST.

Els resultats més precisos a l'indret de València es van obtenir amb l'algorisme SW, amb l'excepció d'ASWf. L'error normalment es troba al voltant de $\pm$ 0.5 K, però en el cas de l'ASWf és del voltant de $\pm$ 1.0 K. La baixa precisió del mètode DA es deu als efectes direccionals en les temperatures radiomètriques esperades per a superfícies terrestres rugoses i no isotèrmiques, i també a les incerteses en la variació angular de l'emissivitat de superfície terrestre. De fet, aquests algorismes tenen un error del voltant de $\pm$ 2.0 K. La precisió de l'algorisme DA disminueix amb l'augment de la rugositat i l'heterogeneïtat tèrmica de la superfície terrestre.

Encara que la base de dades de validació té pocs punts i correspon només a un emplaçament, els resultats mostren que els algorismes SW poden obtenir la LST amb una precisió superior que $\pm$ 1 K. En futures recerques, hi haurà més emplaçaments per tal d'augmentar la base de dades de validació. L'algorisme operacional de LST per a MODIS és coherent amb els algorismes SW proposats en aquest document. En el cas d'AATSR, la classificació incorrecta de l'emplaçament va provocar un error molt més gran que l'esperat.

Agraïments. Donem les gràcies al Department of Atmospheric Science, University of Wyoming, pels perfils dels radiosondatges atmosfèrics. Aquesta recerca va ser finançada pel Ministerio de Educación y Ciencia (projecte CGL2004-06099-C03-01, cofinançat amb els fons FEDER de la Unió Europea, accions complementàries CGL2005-24207-E i CGL2006-27067-E, el contracte de recerca de R. Niclòs i les dues beques de recerca de J.M. Galve i Maria Mira), i la Universitat de València (beca de recerca V Segles de J.M. Sánchez). Donem les gràcies al AATSR Validation Team, University of Leicester, a l'Agència Espacial Europea (sota CAT-1 projecte 3466) i a l'EOS-NASA per proporcionar-nos les dades de l'AATSR i del MODIS.

Referències

Becker, F. i Li, Z., 1990: *Towards a local split-window method over land surfaces*, Int J Remote Sens, **11**, 369–394.

Berk, A., Anderson, G. P., Acharya, P. K., Chetwynd, J. H., Bernstein, L., Shettle, E. P., Matthew, M. W., i Adler-Golden, J. H., 1999: MODTRAN 4 users manual, report, Air Force Research Laboratory Space Vehicles Directorate, Hascom AFB, Mass.

Caselles, V., Coll, C., Valor, E., i Rubio, E., 1997: *Thermal band selection for the PRISM instrument: 2. Analysis and comparison of existing atmospheric and emissivity correction methods for land surface temperature recovery*, J Geophys Res, **102**, 19 611–19 627.

Coll, C. i Caselles, V., 1997: *A split-window algorithm for land surface temperature from Advance Very High Resolution Radiometer data: Validation and algorithm comparison*, J Geophys Res, **102**, 16 697–16 713.

Coll, C., Caselles, V., Galve, J. M., Valor, E., Niclòs, R., Sánchez, J. M., i Rivas, R., 2005: *Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data*, Remote Sens Environ, **97**, 288–300.

Coll, C., Caselles, V., Galve, J. M., Valor, E., Niclòs, R., i Sánchez, J. M., 2006: *Evaluation of split-window and dual-angle correction methods for land surface temperature retrieval from Envisat/AATSR data*, J Geophys Res, **111**, 12 105.

Hook, S., Vaughan, R., Tonooka, H., i Schladow, S., 2007: *Absolute radiometric in-flight validation of mid and thermal infrared data from ASTER and MODIS using the Lake Tahoe CA/NV, USA automated validation site*, IEEE Trans Geosci Remote Sens, **15**, 1798–1807.

Lagouarde, J. P., Kerr, Y. H., i Brunet, Y., 1995: *An experimental study of angular effects on surface temperature for various plant canopies and bare soils*, Agric For Meteorol, **77**, 167–190.

McMillin, L. M., 1975: *Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption*, J Geophys Res, **80**, 5113–5117.

Prata, A. J., 1994: *Land surface temperatures derived from the Advanced Very High Resolution Radiometer and the Along Track Scanning Radiometer: 2. Experimental results and validation of AVHRR algorithms*, J Geophys Res, **99**, 13 025–13 058.

Prata, A. J., 2000: Land surface temperature measurement from space: AATSR algorithm theoretical basis document, technical report, CSIRO Atmospheric Research, Aspendale, Australia, 27 pp.

Rubio, E., Caselles, V., Coll, C., Valor, E., i Sospedra, F., 2003: *Thermal-infrared emissivities of natural surfaces: Improvements on the experimental set-up and new measurementsThermal-infrared emissivities of natural surfaces: Improvements on the experimental set-up and new measurements*, Int J Remote Sens, **24**, 5379– 5390.

Snyder, W. C., Wan, Z., Zhang, Y., i Feng, Y. Z., 1998: *Classification based emissivity for land surface temperature from space*, Int J Remote Sens, **19**, 2753–2774.

Wan, Z. i Dozier, J., 1996: *A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space*, IEEE Trans Geosci Remote Sens, **34**, 892–905.

Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., i Li, Z. L., 2002: *Validation of the land surface temperature products retrieved from TERRA MODerate resolution Imaging Spectroradiometer data*, Remote Sens Environ, **83**, 163–180.