

Analisi della temperatura superficiale derivata da serie temporali di dati MODIS

Massimo Antoninetti, Daniela Stroppiana, Pietro Alessandro Brivio

Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, IREA - CNR (<http://www.irea.cnr.it>),
Via Bassini 15, 20133 Milano, Tel. +39 02 23699 289, Email: brivio.pa@irea.cnr.it

Riassunto

I dati acquisiti dal sensore MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) montato a bordo delle piattaforme *Terra* e *Aqua* della NASA a partire dal 2001, hanno permesso lo studio di numerose proprietà della superficie terrestre; le caratteristiche del sensore e la disponibilità di prodotti standard hanno reso questi dati preziosi per numerose applicazioni. Tra i prodotti MODIS, il MOD11A2 fornisce ogni 8 giorni una stima della temperatura superficiale della terra (*Land Surface Temperature*, LST) e dell'emissività alla risoluzione spaziale di 1 km. Queste stime sono prodotte a partire dalle acquisizioni del sensore MODIS nelle bande dell'infrarosso termico (bande 31 e 32) sulla base dell'algoritmo di *split window* (Wan e Dozier, 1996).

In questo lavoro presentiamo i primi risultati di uno studio volto ad investigare le anomalie termiche superficiali nell'Italia Meridionale, ed i loro collegamenti con la potenziale presenza di fenomeni geotermici a bassa entalpia, analizzando la stagionalità e le dinamiche inter-annuali delle stime MODIS LST anche in relazione alla topografia (quota) ed alla copertura vegetale. In particolare, è utilizzato il prodotto MODIS MOD11A2 per il periodo 2001-2010, una mappa di *land cover* derivata dal prodotto MODIS MCD12Q1 ed il modello digitale del terreno del *Global Land One-km Base Elevation Project* (GLOBE) disponibile alla NOAA. Tutti i dati sono disponibili con una risoluzione spaziale di 1 km. A partire dai dati a 8 giorni MOD11A2 di LST sia diurna che notturna, sono state create sintesi temporali (medie mensili, stagionali, ecc...), e spaziali (statistiche per classi di copertura del suolo). L'analisi di correlazione è stata quindi utilizzata per quantificare l'influenza della topografia. I risultati preliminari mettono in evidenza come la copertura e la topografia siano due elementi chiave per l'interpretazione della variabilità della temperatura superficiale sia diurna che notturna; le attività future prevedono di approfondire l'analisi dei fattori che influenzano LST ed, in particolare, della relazione con la stagionalità della vegetazione integrando serie temporali di indici di vegetazione.

Abstract

The *Land Surface Temperature* (LST) is the radiation temperature measured at the interface between surface materials (top of plant canopy, water, ground, ice, or snow surface) and the atmosphere. LST, a key parameter in the land surface radiation budget, is an important variable not only for climate change studies, but also, as in the present study, in geothermal exploration relying on monitoring LST anomalies for searching alternative energy sources.

The MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) sensor, mounted on board of NASA satellites *Terra* and *Aqua* has been registering data of Earth surface since 2001. The sensor's characteristics and the availability of standard products allow scientists to study different surface features. Among the MODIS products, the MOD11A2 is the 8-days estimate of the *Land Surface Temperature* (LST) and emissivity at a 1 km spatial resolution. These values are estimated from data registered by the MODIS thermal infrared bands 31 and 32, on the basis of the *Split Window* algorithm (Wan e Dozier, 1996).

In this work we analyzed the dynamics of seasonal and inter-annual variability of LST over a study area in Southern Italy, taking in consideration also the topography and the land cover. In particular, for the period 2001-2010, it has been evaluated a dataset composed of MODIS MOD11A2 data, a land cover map derived from the MODIS MCD12Q1 product, and the Digital Elevation Model from the NOAA Global Land One-Km Base Elevation Project (GLOBE DEM). All data are available at 1km spatial resolution.

Day-time and night-time MODIS MOD11A2 datasets have been elaborated to obtain multitemporal synthesis (monthly, seasonal, yearly and multi-year mean values) to be integrated with spatial data (land cover classes statistics). A correlation analysis has been performed to quantify the influence of topography on the LST distribution and variability. Preliminary results show how land cover and topography are two key elements for the interpretation of LST variability, both during day and night time.

Next steps of activity forecast the upgrading of factors influencing LST related with the phenological evolution of the vegetation covers (vegetation indices).

Introduzione

La temperatura superficiale del suolo (*Land Surface Temperature* – LST) è la temperatura radiante misurata all'interfaccia fra la superficie di un materiale (chioma di un albero, acqua, terreno, ghiaccio o neve) e l'atmosfera, ed è considerata una fondamentale variabile nel calcolo del budget radiativo delle superfici negli studi sui potenziali cambiamenti climatici (Brivio et al., 2001). LST controlla inoltre molti processi fisici, chimici e biologici, quali, ad esempio, l'umidità dei suoli e l'evapotraspirazione della vegetazione (Zhong et al., 2010; Wang e Liang, 2008). Infine, i valori misurati di temperatura superficiale sono utilizzati come indicatori chiave per la comprensione dei complessi fenomeni geologici profondi (Cassinis, 1984; Kahle e Gillespie, 1976). La ricerca di fonti alternative di energia ha aumentato l'interesse per l'esplorazione geotermica monitorando le variazioni di LST in superficie (Qin et al., 2011).

Le tecniche di telerilevamento da satellite hanno dimostrato di essere fonte di valide informazioni sulle proprietà termiche della superficie del nostro pianeta (Wan e Liang, 2009), fin dalle prime missioni, quali ad esempio l'*Heat Capacity Mapping Mission* (Brivio et al., 1982; Cassinis et al., 1984). Recentemente, i dati acquisiti dal sensore MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) hanno notevolmente migliorato il livello informativo disponibile grazie al miglioramento sia della geometria che della radiometria del sensore che acquisisce anche nelle bande dell'infrarosso termico (TIR). In particolare, il prodotto MOD11A2 fornisce valori stimati di emissività (e) delle superficie osservate regolarmente alle 10.30 am ed alle 10.30 pm, con una risoluzione spaziale di 1km, ogni 8 giorni.

I dati MODIS LST sono quindi largamente utilizzati per studi delle temperature superficiali, isole urbane di calore, stime della temperatura dell'aria, valori di umidità dei suoli, ed altro (Liu e Zhang, 2011; Benali et al., 2012; Son et al., 2012).

In questo lavoro presentiamo i primi risultati di uno studio volto ad investigare le anomalie termiche superficiali nell'Italia Meridionale, ed i loro collegamenti con la potenziale presenza di fenomeni geotermici a bassa entalpia. Questo approccio metodologico può essere considerato innovativo nel campo della ricerca di sorgenti alternative di energia e per la riduzione delle emissioni di gas serra.

Pochi studi finora hanno analizzato le variazioni stagionali e spaziali dei valori di LST stimati da dati satellitari ed i fattori che influenzano questa variabilità (e.g. Ge, 2010; Westermann et al., 2011). Questi fattori sono, essenzialmente, le caratteristiche delle coperture e dell'uso del suolo, e la topografia.

Sono stati quindi acquisiti ed analizzati i prodotti MOD11A2 di LST diurna e notturna per studiarne la variabilità temporale e spaziale in funzione delle caratteristiche di copertura del suolo (classi di copertura del suolo) e della topografia (quota). Le variazioni legate alla latitudine sono stati considerate ininfluenti essendo l'area di studio di piccole dimensioni areali.

Dati

I prodotti MODIS MOD11A2 LST, registrati a bordo del satellite *Terra*, forniscono valori di temperatura superficiale in gradi Kelvin, ogni 8 giorni, con copertura globale ed ad 1 km di risoluzione al suolo, mediando i valori giornalieri di LST (Wan et al., 2002). Inoltre vengono forniti valori di emissività (e) della superficie e informazioni relative alla qualità delle stime (QC).

Sono stati utilizzati dati MOD11A2 Version-5 per il periodo 2001-2010. Dal sito web dell'USGS Glovis (<http://glovis.usgs.gov/>, ultimo accesso giugno 2012) sono stati acquisiti, in modalità gratuita, 457 file immagine in formato HDF (Hierarchical Data Format) forniti in proiezione sinusoidale (*Equal Area Sinusoidal*). Ogni file HDF è composto da 12 livelli informativi: LST e QC relativi alle acquisizioni di giorno e di notte, angolo di ripresa di giorno e di notte, emissività nei canali MODIS 31 e 32, giorni di cielo sgombro da nuvole di giorno e di notte. I dati vengono classificati di buona qualità quando l'errore medio della stima di emissività è inferiore a 1, e di LST stimata è inferiore a 1 K. I prodotti MODIS vengono forniti per aree di circa 1100 km per 1100 km (*tile*), l'area studio in Italia Meridionale è identificata come *tile* h19 v04 (fig. 1).

Con la sola eccezione degli anni 2001 e 2010, con mancanza di, rispettivamente, uno e due serie di 8 giorni, ogni anno analizzato è coperto da una serie di 46 immagini composite.

L'algoritmo implementato per la stima di LST è basato sulla teoria *split window* (Wan e Dozier, 1989; Wan e Dozier, 1996) utilizzando le bande termiche MODIS 31 e 32. I parametri per l'algoritmo *MODIS Generalised Split Window* (GSW) dipendono dall'angolo di vista zenitale del satellite e dalla colonna di vapor acqueo presente al momento dell'acquisizione. Maggiori dettagli sull'algoritmo e sui prodotti possono essere reperiti sul sito web dell'USGS (http://lpdaac.usgs.gov/products/modis_product_table, ultimo accesso giugno 2012).

Wan et al. (2004) hanno validato i prodotti MODIS LST analizzando 11 differenti situazioni di cielo sgombro da nuvole acquisendo dati a terra ed ottenendo un errore di 1 K in un intervallo di temperature al suolo comprese fra 263 e 300 K.

In corrispondenza dell'area di studio, è stato inoltre acquisito il prodotto *MODIS Land Cover Type* (MCD12Q1) che include 5 sistemi di classificazione globale della copertura del suolo derivata per ogni anno dalle acquisizioni dei satelliti *Terra* e *Aqua* (Friedl et al., 2010). Per questo studio è stato utilizzato la classificazione UMD (*University of Maryland*) con 14 classi di copertura del suolo (Hansen et al., 2002), così come schematizzato nella tabella 1. Nell'area di studio più del 60% del suolo è classificato come agricolo, le aree urbane coprono circa l'11% e le foreste miste circa l'8% dell'area totale. Alcune classi coprendo aree molto ristrette (meno dell'1%) non vengono considerate nelle fasi successive.

Infine, il modello digitale del terreno (DEM) utilizzato è stato acquisito dal sito NOAA NESDIS (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html>, ultimo accesso giugno 2012). Il dato disponibile, denominato *Global Land One-km Base Elevation Digital Elevation Model* (Globe DEM), fornisce valori di quota con risoluzione di 1km in proiezione geografica Lat/Lon (Fig. 1).

Metodologia

L'analisi delle variazioni spaziali e temporali di LST sono state eseguite tenendo in considerazione i valori di qualità forniti con i prodotti MODIS11A2 al fine di quantificare la proporzione dei dati affetti da un errore superiore al valore nominale del prodotto (mancanza di dati causa copertura nuvolosa, pixel con valori di qualità bassa). Sono stati quindi calcolati i valori medi mensili di LST per il periodo 2001-2010 ottenendo valori di riferimento stagionali di LST per ogni pixel di 1km, e la deviazione standard per quantificare la variabilità di LST anno per anno. Tutte le analisi sono state eseguite mantenendo la rappresentazione geografica sinusoidale originale.

Nella seconda parte del lavoro vengono analizzate congiuntamente le temperature LST medie mensili, la topografia (quota) e le classi di copertura del suolo, utilizzando metodologie di analisi di correlazione (regressione lineare) e rappresentazioni statistiche mantenendo invariata la risoluzione spaziale di 1km. Tuttavia, per utilizzare il Globe DEM si è reso necessario ri-proiettare i prodotti MOD11A2 da proiezione sinusoidale a geografica Lat/Lon.

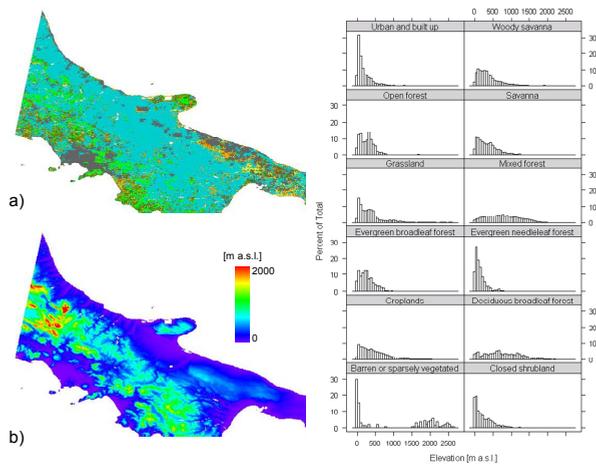


Figura 1. Area di studio dell'Italia Meridionale. Sono rappresentate le classi di copertura del suolo (a), il Globe DEM (b), e gli istogrammi di frequenza della quota [m a.s.l.] per ogni classe di copertura. I colori delle classi di copertura sono rappresentati nella tabella 1.

Nome UMD	Codice	N pixel	Prop. Area studio	Colore
Foreste sempreverdi ad aghifoglia	1	290	0.5%	
Foreste sempreverdilatifoglia	2	538	0.8%	
Foreste decidue ad aghifoglia	3	7	0.0%	
Foreste decidue latifoglia	4	748	1.2%	
Foreste miste	5	4896	7.7%	
Arbustivo denso	6	1021	1.6%	
Arbustivo rado	7	1473	2.3%	
Savanna legnosa	8	4429	7.0%	
Savanna	9	1943	3.1%	
Erbaceo	10	1643	2.6%	
Agricolo	12	39300	62.1%	
Urbano	13	6934	10.9%	
Suolo nudo o poco vegetato	16	111	0.2%	

Tabella 1. Classi di copertura del suolo secondo la classificazione UMD (nome e codice della classe) e la percentuale relativa all'area di studio per ogni classe. I codici colore identificativi delle classi sono uguali a quelli rappresentati nella Fig. 1(a).

Risultati e discussione

LST Mensili

La figura 2 mostra i valori di LST media mensile e le relative deviazioni standard (variabilità inter-annuale rispetto alla media multi-temporale) calcolate dal dataset 2001-2010 ed utilizzate per l'analisi con il DEM e la copertura del suolo. Le aree ad una quota maggiore, figura 1(b), mostrano valori di LST inferiori rispetto alle aree topograficamente più basse. Per quanto concerne invece la variabilità inter-annuale, la maggior parte dei valori delle deviazioni standard ricadono nell'intervallo 1-4 K, con le notevoli eccezioni dei mesi di Febbraio, Maggio, Agosto e Ottobre. Febbraio mostra valori molto variabili nelle aree più elevate (aree rosse nella figura 2). Alcune di queste aree sono ancora visibili nell'immagine di Marzo.

LST e topografia

La correlazione fra LST e topografia (Fig. 2) è stata quantificata con il coefficiente di correlazione r di Pearson che conferma l'influenza della quota sui valori di LST (Hais e Kucera, 2009): valori negativi di r rappresentano la diminuzione di temperatura superficiale con l'aumento della quota. Viene inoltre evidenziata una significativa differenza fra questa relazione analizzando i dati multitemporali di LST diurna e notturna. Il range dei valori di r è infatti più ristretto per le stime di LST notturna rispetto alle corrispondenti giorno stime di LST diurna: 0.81-0.91 e 0.69-0.94, rispettivamente. Inoltre, la correlazione fra LST stimata dalle acquisizioni diurne è maggiore durante i mesi invernali (da Dicembre a Febbraio) e più bassa in estate (Luglio-Agosto), al contrario di quanto osservato per i valori di LST notturni.

LST e copertura del suolo

Considerando che le differenti classi di copertura del suolo influenzano notevolmente la variabilità delle temperature superficiali, occorre considerare attentamente la statistica sia di LST media notturna sia di quella diurna per ogni classe di *land cover*.

Nelle figure 3 e 4 sono rappresentate le statistiche di LST diurna e notturna mensili nelle differenti classi riportate in Tabella 1, con l'eccezione della classe 3 (foreste decidue con foglie aghiformi) che sono rappresentate da soli 7 pixel in tutta l'area di studio, e quindi definibili non significative. Sull'asse y sono rappresentate le temperature misurate medie mensili stimate da MODIS, variabili fra 270-320 K di giorno, e fra 270-300 K di notte e sull'asse x i codici delle classi di copertura del suolo come riportati in Tabella 1. Confrontando i periodi giorno-notte, appare chiaro che in estate è maggiore la variabilità spaziale della LST di giorno e nelle aree non forestate rispetto ai valori ottenuti per le immagini notturne. Le variazioni presenti nelle immagini riprese di giorno risentono inoltre delle variazioni intra-annuali dell'angolo di incidenza della radiazione solare, delle coperture del suolo e dell'umidità dei suoli.

L'influenza negativa della copertura nuvolosa rappresenta ancora una importante limitazione nell'elaborazione delle immagini acquisite dai sensori ottici e nella valutazione dei risultati relativi. L'utilizzo di immagini composte multitemporali, così come nel caso dei prodotti MOD11A2, riduce notevolmente, anche se non elimina del tutto, la contaminazione dei dati da parte delle nuvole presenti.

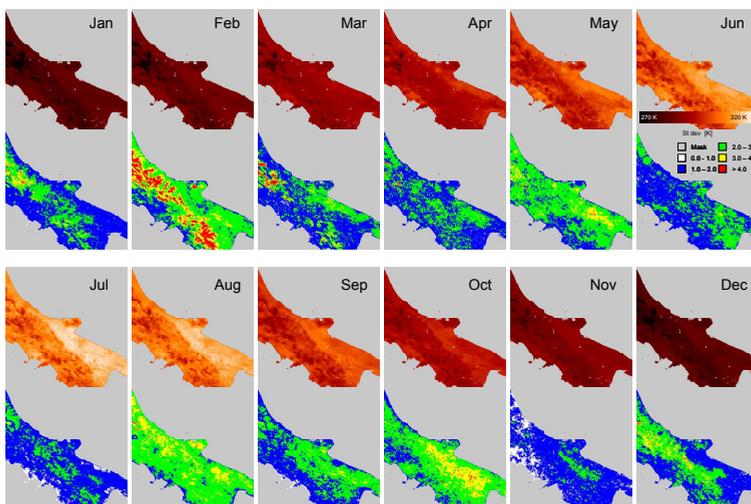


Figura 2. Valori medi mensili (K) di LST diurna (prima e terza riga) e valori di deviazione standard della LST (seconda e quarta riga) calcolati dalla serie di immagini MODIS comprese nel periodo 2001-2010.

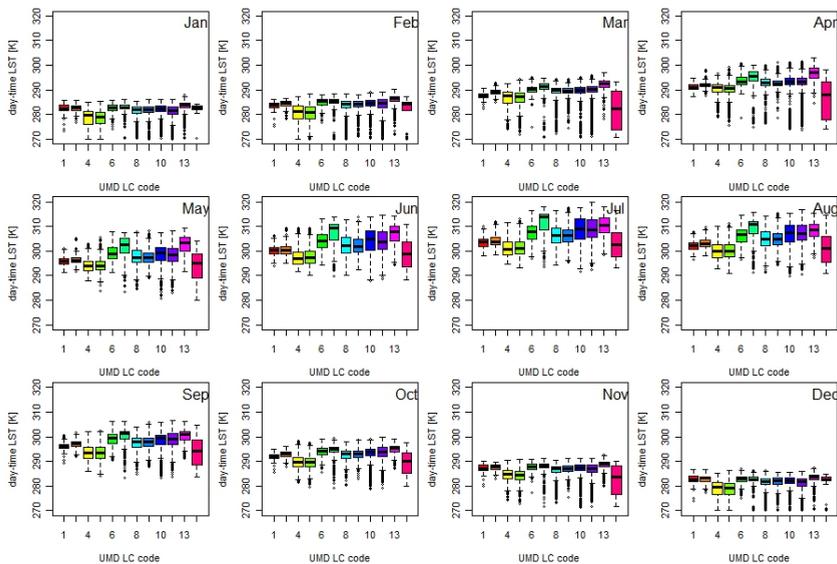


Figura 3. Grafici boxplot della temperatura media mensile LST (K) di giorno in funzione delle diverse classi di copertura del suolo.

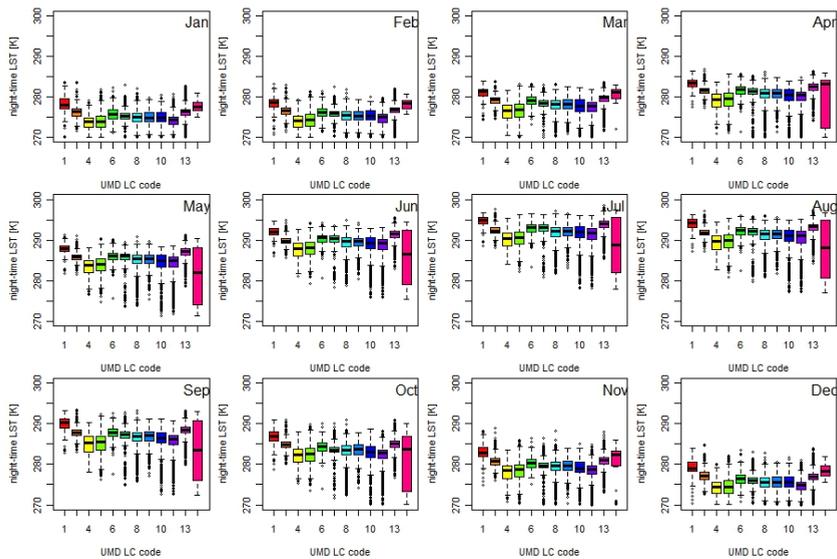


Figura 4. Grafici boxplot della temperatura media mensile LST (K) notturna in funzione delle diverse classi di copertura del suolo.

Conclusioni

Sono stati analizzati dieci anni (2001-2010) di dati di temperatura LST stimata a partire dai dati acquisiti dal sensore MODIS di giorno e di notte con una risoluzione di 1 km su un'area di studio nell'Italia Meridionale per analizzare la variabilità spaziale e temporale della temperatura superficiale, in funzione anche della topografia e della copertura del suolo. Questa analisi a scala

regionale rappresenta la fase preliminare per uno studio più complesso delle anomalie termiche esistenti in relazione alla ricerca ed allo sfruttamento di potenziali fonti di energia geotermica.

Le topografia può spiegare fino al 90% della variazioni di LST, sebbene tale valore vari in modo considerevole in funzione del periodo dell'anno e della copertura del suolo. Inoltre, le variazioni di LST sono direttamente collegabili alla presenza di estese aree coperte da vegetazione non arborea ed alla loro caratteristica variabilità fenologica annuale. Questi fattori devono essere tenuti in considerazione nella valutazione delle anomalie termiche registrate osservate tramite l'analisi dei dati satellitari.

Le prossime fasi della ricerca prevedono l'analisi delle influenze legate alla pendenza ed alla esposizione dei versanti, includendo inoltre l'analisi della correlazione fra LST e indici di vegetazione, quale migliore indicatore dell'evoluzione fenologica della vegetazione presente.

Saranno, infine, integrate le immagini registrate dal satellite *Aqua*, riprese dallo stesso sensore MODIS ma in orari di giorno e di notte differenti rispetto ai dati MODIS ripresi dal satellite *Terra*, utilizzati finora. Sarà quindi possibile analizzare le variazioni temporali di temperatura durante il ciclo giornaliero.

Acknowledge

Questa attività è svolta nell'ambito del Progetto "Atlante Geotermico" (Progetti per l'Innovazione e lo Sviluppo nel Mezzogiorno, coordinati dal Consiglio Nazionale delle Ricerche). Il progetto è focalizzato sullo sfruttamento del potenziale geotermico non convenzionale per la produzione di energia elettrica e sulla realizzazione di un atlante aggiornato delle risorse geotermiche.

Riferimenti bibliografici

- Benali, A., Carvalho, A.C.; Nunes J.P.; Carvalhais N., Santos A. (2012), "Estimating air surface temperature in Portugal using MODIS LST data", *Remote Sens. Environ.* 124: 108-121.
- Brivio P. A., R. Cassinis, G. M. Lechi, A. Marini, and E. Zilioli, (1982), "Heat Capacity Mapping Mission (HCMM) Program: Study of geological structure of Sicily and other Italian areas", NASA Resources Survey Program, NTIS n° E 82, 10073, September, 7, p. 24.
- Brivio, P.A., Colombo, R., Meroni, M. (2001), "The use of remotely sensed data for the estimation of energy balance components in a mountainous catchment", in *Remote Sensing and Climate Modelling: Synergies and Limitations* (M. Beniston & M. Verstraete, Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/The Netherlands, pp. 307-327.
- Cassinis, R., Tosi, N., Lechi, G.M., Brivio, P.A., Zilioli, E., Marini, A. (1984), "Thermal inertia of rocks: An HCMM experiment on Sardinia, Italy", *Int. J. Remote Sens.* 1984, 5(1): 79-94.
- Friedl, M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X. (2010), "MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets", *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 168-182.
- Ge, J. (2010); "MODIS observed impacts of intensive agriculture on surface temperature in the southern Great Plains", *Int. J. Climatology*, 30: 1994-2003.
- Hais, M., Kučera, T. (2009), "The influence of topography on the forest surface temperature retrieved from Landsat TM, ETM + and ASTER thermal channels", *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.*, 64(6): 585-591.
- M.C. Hansen, R.S. DeFries, J.R.G. Townshend, R. Sohlberg, C. Dimiceli, M. Carroll, (2002), "Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: Examples using AVHRR and MODIS data", *Remote Sensing of Environment*, 83: 303-319.
- Kahle, A.B., Gillespie, A.R., Goetz, A.F.H. (1976), "Thermal inertia imaging: a new geologic mapping tool" *Geophys. Res. Letters*, 3: 26-28.
- Liu, L., Zhang, Y. (2011), "Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong", *Remote Sens.*, 3(7): 1535-1552.

- Qin Q., Zhang N., Nan P., and Chai L., (2011), "Geothermal area detection using Landsat ETM+ thermal infrared data and its mechanistic analysis—A case study in Tengechong, China", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13: 552-559.
- Son, N.T., Chen, C.F., Chen, C.R., Chang, L.Y., Minh, V.Q. (2012), "Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data", *Int. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18: 417-427
- Z. Wan and J. Dozier, "Land-surface temperature measurement from space: physical principles and inverse modeling," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 27, no. 3, pp. 268-278, 1989.
- Wan, Z. & Dozier, J., (1996), "A Generalized Split- Window Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature from Space", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 34, No. 4, 1996.
- Wan, Z.M., Zhang, Y.L., Zhang, Q.C. (2002), "Validation of the land-surface temperature products retrieved from terra moderate resolution imaging spectroradiometer data", *Remote Sens. Environ.*, 83: 163–180.
- Wan, Z., Wang, P., & Li, X. (2004), "Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the Southern Great Plains, USA", *International Journal of Remote Sensing*, 25(1): 61–72.
- Wan, K., Liang S., (2009), "Evaluation of ASTER and MODIS land surface temperature and emissivity products using long-term surface longwave radiation observations at SURFRAD sites", *Remote Sensing of Environment*, 113: 1556-1565.
- Wang, K., Liang, S. (2008), "An improved method for estimating global evapotranspiration based on satellite determination of surface net radiation, vegetation index, temperature, and soil moisture", *Journal of Hydrometeorology*, 9(4): 712–727.
- Westermann, S., Langer, M., Boike, J. (2011), "Spatial and temporal variations of summer surface temperatures of high-arctic tundra on Svalbard - Implications for MODIS LST based permafrost monitoring", *Remote Sens. Environ.*, 115(3): 908-922.
- Zhong, L., Ma, Y., Su, Z., Salama, M.S. (2010), "Estimation of Land Surface Temperature over the Tibetan Plateau Using AVHRR and MODIS data", *Advances in Atmos. Sci.*, 27(5): 1110-1118.