

## Aspetti applicativi nell'uso della termografia aerea per la mappatura delle dispersioni termiche in ambito urbano

Gabriele Bitelli (\*), Rita Blanos (\*\*), Paolo Conte (\*),  
Franco Coren (\*\*), Emanuele Mandanici (\*)

(\*) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali (DICAM), Università di Bologna  
(\*\*) Istituto di Oceanografia e Geofisica Sperimentale (OGS) – Trieste

### Riassunto

Il lavoro fa riferimento al progetto europeo “EnergyCity” (programma Central Europe), che mira a creare un sistema a supporto delle decisioni su piattaforma GIS ai fini della riduzione dei consumi energetici e della produzione di CO<sub>2</sub>, utilizzando come dato di partenza immagini termiche aeree. La sperimentazione viene condotta su sette città dell'Europa Centrale. Nel presente lavoro vengono descritti strumenti, metodologie operative e fasi di *processing* dei dati per la creazione dei mosaici di temperatura superficiale sulle aree di *test*.

L'acquisizione delle immagini aeree (TIR ed iperspettrali VNIR) sulle aree di *test* è stata effettuata da OGS; contemporaneamente ai voli termici, il DICAM ha condotto rilievi terrestri georeferenziati a fini di calibrazione e taratura dei modelli. Il *processing* dei dati per la creazione delle mappe di temperatura superficiale delle coperture edilizie consiste nell'ortorettifica e *mosaicking* delle immagini termiche, nella correzione radiometrica delle stesse per gli effetti atmosferici e nell'assegnazione dell'emissività dei materiali che compongono la scena a partire dalla classificazione delle immagini iperspettrali.

### Abstract

*This paper deals with activities that have been carried out within the European Project EnergyCity which aims to create a WebGIS SDSS system, based on thermal airborne images, for the reduction of energy consumptions and CO<sub>2</sub> emissions in seven cities of Central Europe. In particular, this article describes the tools, the methodology and the processing steps to obtain mosaics of surface temperatures in the test areas.*

*The acquisition of the airborne images (TIR and hyperspectral VNIR) over the test areas has been done by OGS while, contemporaneously at the flights, DICAM has performed ground georeferenced measurements for the calibration of the models. Processing steps consist in the rectification and mosaicking of thermal images, radiometric correction to remove atmospheric effects and emissivity calculation of the roofing materials through the classification of the hyperspectral data.*

### Introduzione

L'analisi della radiazione infrarossa emessa o riflessa dagli oggetti al suolo offre la possibilità di analizzare sia le proprietà termiche e in generale fisico-chimiche dei materiali che molti processi transitori legati allo scambio di calore tra corpi e superfici: un sensore termico può essere utilizzato per misurare la temperatura di una superficie d'interesse, per fornire mappe bidimensionali della distribuzione di temperatura o per identificare targets che si trovino a temperatura differente rispetto al loro contesto (Williams, 2009).

La termografia, ovvero l'acquisizione ed elaborazione di immagini digitali acquisite da sensori operanti nella regione spettrale dell'Infrarosso Termico, permette l'acquisizione a distanza di informazioni sullo stato termico delle superfici osservate, interessando tra gli altri diversi settori della modellistica ambientale come l'analisi degli scambi d'acqua ed energia tra superficie terrestre e atmosfera, i sistemi numerici di previsione meteorologica, la circolazione delle masse d'acqua

negli oceani, gli studi sui cambiamenti climatici, l'analisi dell'evaporazione / evapotraspirazione / umidità dei suoli, lo studio del fenomeno dello *Urban Heat Island* (Arnfield, 2002, Brivio et al., 2006, Quattrocchi & Luvall, 2000, Stockton & Tache, 2006).

In una recente lettera al Presidente degli Stati Uniti (Hay et al., 2011) un consorzio di *partner* industriali ha richiesto all'amministrazione pubblica di adottare strategie adeguate per fornire ai cittadini e ai proprietari immobiliari delle informazioni fruibili su larga scala circa l'utilizzo e lo spreco d'energia negli edifici, in modo da attivarsi per migliorarne l'efficienza energetica; il telerilevamento termico da piattaforma aerea si offre come possibile candidato alla realizzazione di questo obiettivo, in quanto consente di coprire superfici anche molto vaste a costi relativamente contenuti ottenendo delle immagini termiche a risoluzione sub-metrica che possano essere utilizzate per analisi a scala d'edificio.

Gli studi termografici quantitativi da piattaforma aerea per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici sono applicazioni relativamente recenti, e hanno finora trovato impiego principalmente in aree continentali o con climi molto freddi come la Gran Bretagna, il Canada o il Nord degli Stati Uniti (Allinson, 2007, Hay et al., 2011); essi sono oggetto di crescente interesse da parte della comunità scientifica a causa delle prestazioni odierne offerte dai sensori e del potenziale scientifico e commerciale che tali sistemi offrono, in particolare in combinazione con sistemi GIS di analisi spaziale dei dati. I sistemi di supporto spaziale delle decisioni (SDSS) finalizzati all'aumento dell'efficienza energetica degli edifici interessano diverse tipologie di *stakeholder* sia pubblici che privati (Hay et al., 2011): enti territoriali e municipalità che intendano monitorare o incrementare l'efficienza energetica nelle aree di propria competenza; proprietari di casa e affittuari che desiderino valutare lo stato d'efficienza dei propri immobili; imprenditori nei campi dell'adeguamento e certificazione energetica che vogliano individuare le aree bisognose d'intervento; urbanisti e pianificatori che vogliano stabilire le aree prioritarie d'intervento per recuperi o ristrutturazioni edilizie oltre a fornitori di servizi energetici, agenzie immobiliari, imprese di costruzione e agenzie governative.

Per effettuare analisi termografiche quantitative sono necessari, oltre ad una strumentazione adeguata, ad una corretta pianificazione ed esecuzione dei rilievi e a condizioni meteorologiche congrue, anche una serie di informazioni aggiuntive riguardanti sia le caratteristiche geometriche e strutturali degli edifici sia le caratteristiche microclimatiche esistenti al tempo del rilievo, dati che interessano le diverse fasi di *processing* geometrico e radiometrico delle immagini; infine, per ottenere dati fruibili sullo stato d'efficienza degli involucri edilizi, risultano indispensabili modelli energetici appositamente studiati che valutino le prestazioni energetiche degli edifici dai valori di temperatura superficiale delle relative coperture.

Il progetto *Central Europe* denominato "*EnergyCity*" coinvolge dieci partner appartenenti a cinque nazioni europee, e mira appunto a creare un sistema SDSS su piattaforma WebGIS finalizzato all'incremento delle prestazioni energetiche e alla riduzione della produzione di gas serra su sette città dell'Europa Centrale (Bologna, Budapest, Ludwigsburg, Monaco, Praga, Treviso, Velenje); a questo scopo sono stati acquisiti diversi *set* di dati digitali sulle aree di *test* delle città interessate per la valutazione della temperatura superficiale delle coperture e la creazione di mappe georiferite di "*heat loss*".

Le attività del progetto sono finalizzate anche alla creazione di una base di conoscenza comune e coordinata sulle tematiche energetiche tra i diversi paesi, all'effettuazione di una serie di azioni pilota e infine alla definizione di una strategia transnazionale tramite un documento di guida politica da sottoporre alla comunità europea e alle amministrazioni nazionali e locali.

I rilievi aerei sono stati effettuati dall'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale (OGS) in stretta collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'Università di Bologna che ha provveduto all'esecuzione dei rilievi terrestri e alla collezione di tutti i *dataset* ancillari. L'elaborazione dei dati è in carico ad entrambi i gruppi con procedure differenziate.

### Rilievi da aereo

L'acquisizione di immagini termiche e iperspettrali è stata effettuata con una piattaforma aerea "Piper Seneca II" (di proprietà OGS), su cui sono stati installati, in base alle necessità, il sensore termico "Thermo Tracer TS9260" della NEC (con risoluzione spaziale di 640x480 *pixel*) operante nell'infrarosso termico, e il sensore iperspettrale "AISA Eagle 1k" della Specim, (*pushbroom* da 1024 *pixel*) operante nel visibile e nel vicino infrarosso.

Le zone di interesse sono state sorvolate secondo linee parallele; per ottenere una copertura ottimale è stato pianificato un *overlap* longitudinale del 60% tra singoli fotogrammi ed un *overlap* trasversale del 20% tra strisciate parallele. La quota di volo e la velocità dell'aeromobile sono state calcolate in modo da ottenere immagini termiche e iperspettrali con *pixel* a terra rispettivamente di 0,50 m e 0,75 m. Per migliorare l'accuratezza delle successive operazioni di georettifica tramite l'algoritmo di *boresight calibration*, per ogni rilievo (sia termico sia iperspettrale) sono state effettuate delle strisciate in direzione perpendicolare alle altre.

L'esecuzione di un volo fotogrammetrico termico per gli scopi descritti richiede condizioni climatiche particolari: assenza di turbolenza in quota (che ostacola il mantenimento della rotta durante il volo), assenza di copertura nevoosa o condensa sulle coperture dell'edificato urbano (che precludono una misura corretta della radianza proveniente dalle coperture degli edifici), bassa copertura nuvolosa e temperature atmosferiche piuttosto basse (che enfatizzano il contrasto tra gli edifici e l'ambiente circostante).

Nella Figura 1 viene riportata a titolo d'esempio la traiettoria del volo iperspettrale effettuato sulla città di Budapest.



Figura 1. Traiettoria del volo iperspettrale sulla città di Budapest.

### Rilievi a terra

Simultaneamente ai rilievi termografici aerei il DICAM ha effettuato delle campagne di rilievo terrestre nelle aree di *test*, con lo scopo di acquisire dati di verità a terra e di misurare una serie di parametri atmosferici da utilizzare come dati di *input* nelle successive operazioni di *processing*. La strumentazione utilizzata consiste in una termocamera "FLIR P620", in un ricevitore GNSS "Ashtech ProMark 500" e in alcuni *datalogger* per la misura di temperatura atmosferica e umidità relativa; è stato utilizzato anche un dispositivo multifunzione "DeltaOHM DO9847" per la misura della temperatura superficiale a contatto e della pressione atmosferica.

Nella scelta della posizione dei punti da rilevare sono stati seguiti dei criteri che permettessero di rilevare il maggior numero di dati possibile nel breve intervallo di tempo in cui vengono effettuati i voli aerei (un paio di ore per città): le *ground truth* sono state acquisite su pavimentazioni esterne lisce ed omogenee, posizionate in maniera distribuita sull'area di *test* ma nonostante ciò facilmente

accessibili; sono state inoltre scelte su aree pubbliche pianeggianti, orizzontali, senza eccessivo affollamento e circondate da edifici di altezza limitata.

Il rilievo terrestre si articola in due fasi: nella prima (precedente al volo) viene preparata la superficie, viene misurata la posizione dei punti e viene posizionato un *datalogger* all'altezza di 2 m per la misura delle variazioni temporali delle caratteristiche microclimatiche durante il rilievo aereo notturno; nella seconda fase (simultanea al volo aereo) vengono misurate temperatura atmosferica e umidità relativa, e viene utilizzata la procedura “*non-contact*” descritta dallo standard ASTM E 1933-99 per la stima dell'emissività a banda larga della superficie e la misura della temperatura superficiale del *target*. Poiché le pavimentazioni oggetto di misura presentano diversi materiali e tessiture nell'acquisizione, nell'acquisizione delle verità a terra si è tenuto conto della scala operativa effettuando le misurazioni su un'area di dimensioni comparabili con i *pixel* delle immagini aeree ( $\cong 50$  cm).

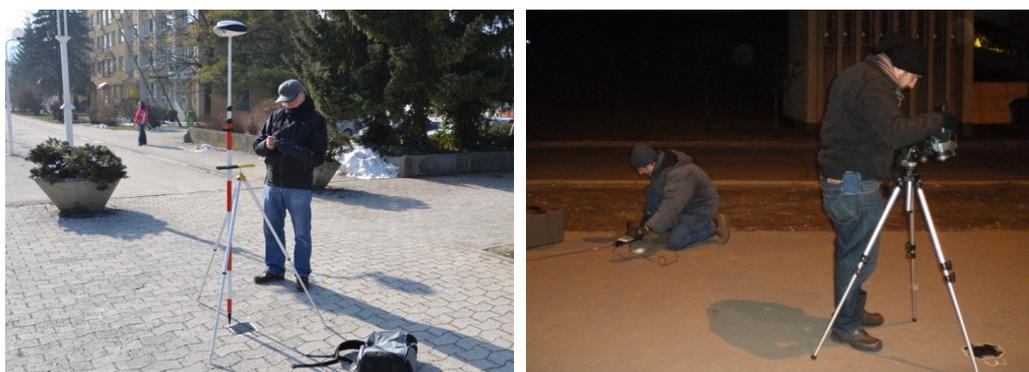


Figura 2. Fasi del rilievo terrestre.

Per ogni pavimentazione rilevata è stata redatta una monografia contenente, oltre alle immagini per l'identificazione del punto, le coordinate, l'ora del rilievo, le caratteristiche della pavimentazione, i parametri atmosferici misurati, l'emissività e la temperatura della superficie.

### Metodologia di elaborazione dei dati

Il trattamento del dato termografico, per quanto concerne la geometria ed ancor più la radiometria, presenta notevoli criticità, legate da un lato alla molteplicità di fattori che concorrono alla generazione dell'osservabile, dall'altro alla debolezza strutturale dei modelli disponibili, in parte dovuta alla carenza di fondamentali informazioni ancillari. Il DICAM ha provveduto alla collezione e organizzazione di tutti i *dataset* aggiuntivi esistenti sulle aree di *test* che potessero risultare utili per le successive fasi di *processing*, tra cui una cartografia numerica a grande scala (contenente un *layer* relativo agli edifici) e il *Digital Elevation Model* e/o *Digital Surface Model*, le registrazioni con frequenza di *sampling* di 1" da stazioni GNSS permanenti in prossimità dell'area e le osservazioni da stazioni meteorologiche contemporanee al rilievo termografico aereo.

Il problema dell'estrazione da immagini termiche dei valori di temperatura assoluta delle superfici si presenta quanto mai complesso, non tanto dal punto di vista strettamente teorico, quanto piuttosto sotto il profilo della determinazione numerica coerente ed accurata delle diverse quantità che figurano nelle equazioni dei modelli: per il calcolo della temperatura bisogna in particolare tener conto delle caratteristiche fisiche dei materiali, dell'interferenza della radiazione con l'atmosfera circostante e della topografia della scena.

Prima di essere corrette radiometricamente, le singole immagini acquisite con la termocamera sono state ortorettificate dall'OGS; l'ortorettifica permette di trasformare un'immagine *raw* da un sistema arbitrario di coordinate ad un sistema di proiezione cartografico.

L'accurato posizionamento spaziale delle immagini aeree dipende dalla corretta misura degli angoli di *pitch*, *roll* e *heading*, derivati dall'unità inerziale (IMU) a bordo, che definiscono l'assetto dell'aereo al momento dello scatto di ciascuna immagine. È ovviamente determinante conoscere la posizione e l'assetto dei sensori montati sull'aereo rispetto al sistema di posizionamento: per questo sono state effettuate delle procedure di calibrazione (*boresight calibration*) che determinano il disallineamento degli angoli tra l'unità inerziale e la camera termica utilizzando un numero elevato di punti di legame.

La successiva operazione di ortorettifica è stata eseguita con il *software* "Terraphoto" della Terrasolid che tramite il file di calibrazione precedentemente ottenuto elabora le posizioni dei centri di presa e gli angoli d'assetto della termocamera; l'orientamento dei fotogrammi e la correzione per gli effetti topografici avviene inserendo come dati di *input* il DTM dell'area di interesse ed una serie di punti omologhi identificati automaticamente su due o più fotogrammi adiacenti. A differenza di un'immagine RGB, dove l'identificazione di questi punti risulta piuttosto semplice e precisa, nelle immagini termiche la loro individuazione automatica risulta maggiormente complessa aumentando notevolmente il tempo di *processing*. I singoli fotogrammi ortorettificati sono stati successivamente assemblati formando il mosaico termico dell'intera area di test; non è stato applicato alcun algoritmo di normalizzazione radiometrica al fine di conservare i valori originali di *digital number* per le successive operazioni di correzione radiometrica. Nella Figura 3 viene riportato il mosaico di temperatura apparente ottenuto dall'unione dei singoli fotogrammi acquisiti sulla città di Monaco.



Figura 3. Ortomosaico termico della città di Monaco.

Come noto, la grandezza fisica fondamentale in studio è la radianza emessa dalle superfici nella direzione del sensore. La relazione tra temperatura assoluta e radianza spettrale è poi fornita dalla legge di Planck, che nel caso si consideri un valore di emissività costante e pari all'unità permette di calcolare la cosiddetta temperatura di brillantezza, ossia quella che avrebbe la superficie nell'ipotesi di corpo nero; questa temperatura fornisce una prima informazione sullo stato termico delle superfici, ma tuttavia risulta poco realistica come valore assoluto. Al segnale registrato dal sensore infatti concorrono altri fattori, tutt'altro che trascurabili, quali la radianza riflessa e l'interazione atmosferica; inoltre, la deduzione della temperatura superficiale richiede la conoscenza con buona approssimazione dell'emissività di banda larga del materiale di cui è costituita la superficie.

Tutti i parametri di cui deve tener conto il modello, contributo atmosferico, emissività e temperatura, risultano fortemente relati. Di qui la necessità di un approccio semplificato che trascuri alcune interdipendenze a prezzo, però, di una forte sensibilità alle determinazioni dei singoli parametri. La formulazione scelta nell'ambito del presente progetto deriva dal modello proposto da Allinson (2007), sotto l'ipotesi di superfici lambertiane, a seguito di alcune semplificazioni:

$$L_T = \frac{L_S - (1 - \varepsilon)L_d - L_u}{\tau \cdot \varepsilon} \quad [1]$$

La radianza  $L_T$  emessa dalla superficie è quindi ottenuta sottraendo alla radianza  $L_S$  registrata dal sensore il contributo della radianza *downwelling*  $L_d$  riflessa dalla superficie ed il contributo della radianza *upwelling*  $L_u$  emessa dall'atmosfera in direzione del sensore. L'equazione [1] tiene conto dell'emissività  $\varepsilon$  e della riflettività della superficie (pari a  $1 - \varepsilon$  nell'ipotesi di trasmissività del corpo nulla nelle frequenze TIR), oltre che della trasmissività  $\tau$  dell'atmosfera. Tutte le grandezze si intendono integrate sull'intervallo di lunghezze d'onda in cui opera il sensore termico, cioè tra gli 8 e i 16  $\mu\text{m}$ .

Tutti i parametri atmosferici,  $L_d$ ,  $L_u$ ,  $\tau$ , sono calcolati attraverso simulazioni con il modello di trasferimento radiativo "Modtran 5", il quale richiede in *input* profili verticali di parametri fisici (pressione, temperatura) e chimici (concentrazione delle differenti specie di gas). Nell'intervallo di lunghezze d'onda proprio delle applicazioni termografiche, i parametri più influenti sono evidentemente la temperatura della colonna d'aria (almeno fino alla quota di volo) ed il contenuto di vapore d'acqua e anidride carbonica. Se quest'ultimo può considerarsi relativamente uniforme e può quindi essere ricavato da valutazioni globali, quali le stime fornite dall'*Earth System Research Laboratory* del NOAA, per gli altri parametri sensibili si è fatto ricorso ad una combinazione di dati derivati dai prodotti satellitari MODIS (Figura 4), da misure di stazioni meteorologiche locali e da misure di temperatura e umidità a livello del suolo effettuate appositamente durante le operazioni di rilievo a terra contemporanee ai voli termici. I dati di verità a terra misurati sul campo mediante termocamera e sonda di temperatura a contatto sono stati impiegati per verificare i valori di temperatura superficiale ricavati dall'applicazione del modello descritto all'equazione [1] sugli stessi punti.

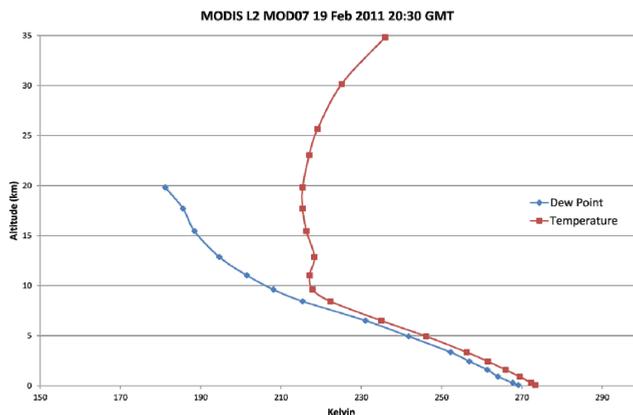


Figura 4. Profili di temperatura e punto di rugiada estratti da una ripresa MODIS sulla città di Treviso, quasi contemporanea al volo termico.

L'emissività delle superfici ha un forte impatto sul valore numerico della temperatura ed è di per sé un parametro estremamente variabile in ambito urbano, sia perché i differenti materiali costruttivi impiegati nella realizzazione delle coperture edilizie presentano comportamenti radiometrici molto diversi, sia a causa del differente orientamento delle superfici che compongono il tessuto urbano. Per l'assegnazione dei valori di  $\varepsilon$  ai *pixel* del mosaico termico si è fatto ricorso alle immagini iperspettrali, procedendo su alcune aree *test* alla classificazione *pixel-based* delle principali macro-categorie di materiali di copertura, ispirate alle differenze più significative in termini di emissività. La classificazione è stata effettuata utilizzando l'algoritmo supervisionato *Spectral Angle Mapper* (SAM, Kruse et al., 1993) basandosi su *set* di *training site* sui quali sono stati verificati gli effettivi

materiali di copertura; a ciascuna macro-classe è stato quindi attribuito un differente valore di emissività sulla base di dati tabellari reperibili in letteratura.

Le immagini iperspettrali sono state precedentemente calibrate in radianza tramite il file di calibrazione del sensore, e sono state georettificate con il pacchetto *software* “Caligeo” della Specim. Il modulo di georettifica utilizza i dati di posizione e assetto (rollio, imbardata e beccheggio) raccolti dagli strumenti GPS/INS sulla piattaforma aerea in maniera sincrona con i dati AISA.

### **Conclusioni**

Il notevole interesse che riveste oggi il monitoraggio delle dispersioni energetiche in ambito urbano ai fini della messa a punto di opportune strategie sostenibili, anche ai fini della riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, richiede informazioni a scala di singolo edificio, correlabili ad altre informazioni georiferite in ambiente GIS. La termografia aerea consente, nel caso si disponga di tutti i dati necessari e si applichino gli algoritmi di calcolo adeguati, di ricavare mappe di temperatura sinottiche e affidabili che sarebbe impossibile ottenere diversamente; di contro, i costi rilevanti e la complessità delle operazioni di pianificazione e svolgimento dei rilievi rendono difficili analisi di *change detection*.

La creazione di mappe di temperatura superficiale delle coperture edilizie richiede inoltre complesse procedure di correzione geometrica e radiometrica delle immagini; nel lavoro si sono evidenziati alcuni di questi aspetti, ed alcune delle criticità esistenti, sulla base di una interessante sperimentazione condotta su alcune città europee nell’ambito del progetto “EnergyCity” del programma Central Europe.

### **Ringraziamenti**

Il lavoro è stato effettuato nell’ambito del progetto EnergyCity “Reducing energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in cities across Central Europe” (EU CENTRAL EUROPE 2CE126P3).

### **Bibliografia**

- Allinson, D. (2007), *Evaluation of aerial thermography to discriminate loft insulation in residential housing*, PhD thesis, University of Nottingham.
- Arnfield, A.J. (2002), “Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchange of energy and water, and the urban heat island”, *International Journal of Climatology*, 23: 1–26.
- ASTM, E 1933-99a (2002), “Standard test methods for measuring and compensating for emissivity using infrared imaging radiometers”.
- Brivio P.A., Lechi G., Zilioli E. (2006), *Principi e metodi di telerilevamento*, Città Studi, Torino.
- Hay, G.J., Kyle C., Hemachandran B., Chen G., Rahman M.M., Fung T.S., Arvai J.L., (2011), “Geospatial Technologies to Improve Urban Energy Efficiency”, *Remote Sensing*, 3.
- Kruse F.A., Lefkof A.B., Boardman J.W., Heidebrech K.B., Shapiro A.T., Barloon J.P., Goetz A.F.H. (1993), “The spectral image processing system (SIPS). Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data”, *Remote Sensing of Environment*, 44: 145-163.
- Quattrocchi, D.A., Luvall, J.C, (2000), *Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes*, CRC.
- Sobrino, J.A., Oltra-Carrió, R., Jiménez-Muñoz, J.C., Julien, Y., Sòria, G., Franch, B., Mattar, C. (2012), “Emissivity mapping over urban areas using a classification-based approach: Application to the Dual-use European Security IR Experiment (DESIREX)”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18: 141-147.
- Stockton, G.R. & Tache, A. (2006), “Advances in Applications for Aerial Infrared Thermography”, *Thermosense XXVIII*, 62050C.
- Williams, T.L. (2009), *Thermal Imaging Cameras. Characteristics and performance*, CRC Press.