

Valutazione del sensore aereo TABI per lo studio delle dispersioni energetiche degli edifici

Mirco Boschetti (*), Alberto Crema (*), Gianluca Ruggieri (**), Giuseppe Maffei (***), Luisa Geronimi (***), Francesco Zucca (****)

(*) IREA-CNR, Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Via Bassini 15, Milano, Tel. +39 0223699454, Fax +39 0223699300, boschetti.m@irea.cnr.it, crema.a@irea.cnr.it

(**) Dipartimento di scienze teoriche e applicate Facoltà di Scienze mm. ff. nn., Università dell'Insubria, sede di Varese, gianluca.ruggieri@uninsubria.it

(***) TerrAria s.r.l., Via Melchiorre Gioia 132, 20125 Milano, Tel. +39 0287085650, Fax +39 0297376569, geronimi@terraria.com, g.maffei@terraria.com

(****) Dipartimento di Scienze della terra e dell'ambiente, Università di Pavia, Via A. Ferrara 1, 27100 Pavia, Tel. 0382985823/38, Fax 0382985890, francesco.zucca@unipv.it

Riassunto

Il presente lavoro descrive un esperimento condotto per testare il contributo di termografie aeree per la valutazione su ampia scala delle dispersioni energetiche degli edifici, in particolare delle coperture. Le termografie aeree si candidano a ricoprire un ruolo importante nella definizione di strategie di pianificazione energetica attraverso la valutazione dei possibili effetti di azioni di riqualificazione delle coperture. Una prima valutazione è stata condotta nell'inverno del 2012 sui comuni di Agenda 21 laghi della Provincia di Varese, circa 120 km², acquisendo immagini notturne con il sensore TABI, della canadese ITRES, ad una risoluzione di 50 cm. Un test è stato condotto sul comune di Cittiglio, per il quale è disponibile un Data Base Topografico alla scala 1:20.000, al fine di valutare discontinuità termiche delle superfici. Le prime analisi hanno mostrato come le immagini termiche TABI, opportunamente processate, forniscano un *layer* tematico perfettamente a registro con la cartografia tecnica comunale utile a identificare quali edifici presentino un comportamento anomalo rispetto al contesto urbano. L'alta risoluzione spaziale dei dati ha anche permesso di evidenziare gradienti nelle coperture dei tetti riconducibili a differenti proprietà termiche come conseguenza di differenti tipi di coibentazioni.

Abstract

The present work describes an experiment conducted to test the contribution of aerial thermography for the evaluation of large scale buildings energy losses. The aerial thermography are candidate to play an important role in defining strategies for energy planning by assessing the possible effects of retraining the covers. A first test was conducted in the winter of 2012 acquiring night images with the TABI sensor at 50 cm spatial resolution for the municipalities of Agenda 21 Laghi in the Province of Varese (□ 120 km²). An assessment of the information that can be derived to identify buildings with thermal discontinuity surfaces respect the surrounding zones has been carried out for the urban areas of Cittiglio. The first results showed that thermal images, properly processed, provide a thematic layer that can precisely highlight anomalous situations within the urban areas identifying which building are probably not efficient. The high spatial resolution of the data has also allowed to analyze the thermal discontinuity of a single buildings as possible clues to energy losses.

Introduzione

Nel quadro degli obiettivi di riduzione di gas climalteranti definiti a partire dal Protocollo di Kyoto, i consumi energetici ma in particolare le prestazioni energetiche degli edifici hanno un ruolo di

primo piano. A partire dalla definizione del cosiddetto Pacchetto Clima del 2008, l'Unione Europea si è data dei precisi obiettivi da raggiungere entro il 2020, tra i quali la riduzione delle emissioni di CO² del 20% e l'aumento del 20% dell'efficienza energetica (Direttiva Europea 2002/91/CE sul rendimento energetico nell'edilizia; recentemente aggiornata dalla Direttiva 2010/31/UE). Al settore pubblico è richiesto un ruolo di primo piano e le amministrazioni locali dovrebbero partecipare allo sforzo complessivo attraverso importanti azioni locali come l'adozione di un Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile (PAES). Per questo motivo, è importante sviluppare nuovi strumenti di diagnosi e verifica, che siano in grado di supportare la pianificazione energetica e le azioni dirette per la riduzione delle emissioni. In anni recenti la termografia ha assunto un ruolo di primo piano nella diagnosi energetica degli edifici, in supporto alla certificazione ma soprattutto ad eventuali interventi di miglioramento delle prestazioni. È quindi possibile confrontare gli esiti diagnostici con le previsioni di progetto, ma soprattutto è possibile verificare la presenza di criticità localizzate su cui intervenire prioritariamente. Il presente lavoro è finalizzato a verificare i possibili esiti di un allargamento di queste analisi utilizzando termografiche aeree dalla scala del singolo edificio (certificazione e diagnosi) alla scala urbanistica (pianificazione e verifiche). La termografia aerea può essere utilizzata per ottenere importanti informazioni sia in assetto invernale, sia in assetto estivo. In assetto invernale per la verifica della correttezza della certificazione energetica degli edifici e in assetto estivo per identificare la dinamica del fenomeno dell'isola di calore urbano, ipotizzando possibili interventi per la riduzione delle temperature e il miglioramento del benessere urbano.

Obiettivo del presente lavoro è quindi la verifica del contributo di termografie aeree in assetto invernale e di sistemi di informazione geografica a supporto della valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici. L'ipotesi è che edifici statisticamente più caldi possano risentire di elevate dispersioni energetiche attraverso le coperture mentre quelli statisticamente più freddi possano al contrario essere disabitati, ben coibentati o possano ospitare un sottotetto non riscaldato. In virtù della capacità di definizione del sensore utilizzato, tale contributo può avvenire a due scale differenti. A scala urbana, è possibile identificare edifici con temperature anomale a supporto di verifiche e pianificazione comunale. A scala di singolo lotto, può contribuire all'analisi di anomalie e discontinuità termiche per singoli edifici.

Materiale e metodi

Area di studio

L'area di studio comprende alcune zone della provincia di Varese e più precisamente i comuni situati nella parte ovest della provincia e confinanti con il Lago Maggiore. Su quest'area di circa 120 Km² sono state acquisite termografie aeree del sensore TABI (*ITRES* – Canada) rilevate durante un volo effettuato la notte tra il 10 e l'11 Marzo 2012 dalle ore 10.30 p.m alle 1.00 a.m (GMT+1). Il comune di Cittiglio, di cui si dispone di altri dati spaziali, è stato selezionato tra le aree sorvolate per valutare le potenzialità delle termografie aeree. Il comune è situato a circa 15 Km a nord-ovest rispetto a Varese ed è stato previsto come area test avendo all'interno del suo territorio comunale zone residenziali di nuova costruzione, edifici storici concentrati nel centro del paese, case sparse e una piccola zona industriale. L'area di studio contiene perciò molteplici tipologie di edificato con differenti tipi di coperture e conseguentemente edifici con età molto diverse e che probabilmente presentano diversi tipi di coibentazione.

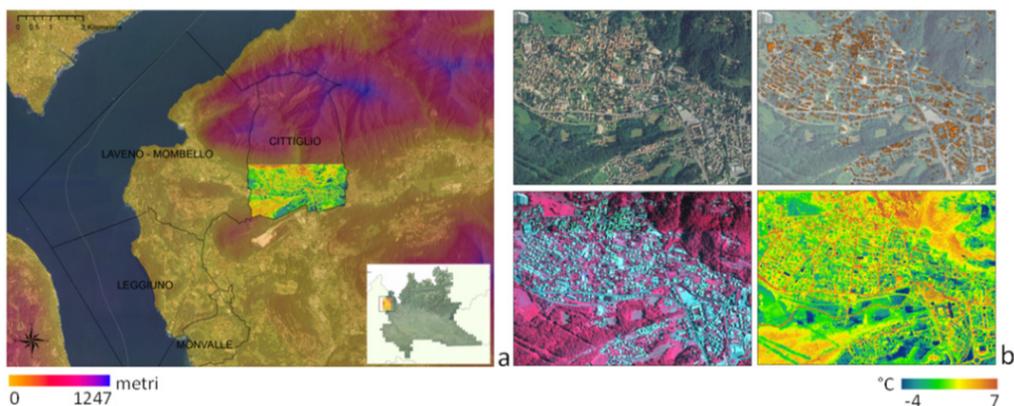


Figura 1. Area di studio: il comune di Cittiglio (Va) (a) e un dettaglio dei dati a disposizione (b). In senso orario dall'angolo in alto a destra: Ortofoto a colori, DB topografico, termografia TAB1 e immagine digitale in falsi colori.

Dati

Rilievo tabi

Il sensore TAB1-1800 (*Thermal Airborne Broadband Imager*¹) della canadese *ITRES* è in grado di registrare immagini nella banda del termico ad alta risoluzione spaziale (da 10 cm a 1.25 m con aerei fino a 2 cm con elicotteri) e con grande abbracciamento per ogni singola strisciata (1800 pixel). L'intera area di studio è stata ripresa con 12 strisciate con risoluzione spaziale di 0.5 m in grado di fornire un'immagine della temperatura delle superfici in gradi centigradi (precisione di 0.05 °C). Dopo l'acquisizione le immagini sono state pre-processate da *ITRES* per ottenere un dato ortorettificato, proiezione UTM-WGS84, e corretto radiometricamente; in seguito i dati sono stati analizzati per valutare le potenzialità del sensore e il livello di dettaglio del dato.

Digital Surface Model (DSM)

Il *Digital Surface Model* DSM della provincia di Varese è un prodotto che fornisce il modello digitale del terreno e che è stato utilizzato per l'ortorettifica delle termografie aeree. Essendo le immagini acquisite dal sensore TAB1 delle ortofoto queste vanno geometricamente corrette per correggere gli errori di deformazione accorsi durante le fasi di ripresa e connessi alla strumentazione utilizzata. Il DSM è disponibile con il sistema di coordinate UTM-WGS84, con una risoluzione di 2x2 metri e con una dimensione che copre i circa 570 km² della provincia di Varese. Il prodotto è un dato raster dove ogni cella porta l'informazione della quota assoluta del punto che rappresenta quella cella con una tolleranza minima di ± 3 m.

Ortofoto colori reali e CIR

La Lombardia dispone di una copertura dell'intero territorio regionale con immagini aeree. L'ortofoto è un'immagine aerea ad alta risoluzione ripresa con sistemi ottici aviotrasportati a più bande (blu, verde, rosso, infrarosso vicino), in funzione della sensoristica utilizzata. Il prodotto tradizionale più aggiornato, rilievi del 2007, è un mosaico dell'intera regione ortorettificato e georiferito e disponibile in scala nominale 1:10000 con risoluzione spaziale di 2x2 m. Questo dato risulta essere un'immagine digitale a colori reali utile per caratterizzare il territorio e dove si possono effettuare elaborazioni e/o misure spaziali in quanto rappresenta in dimensione reali la superficie investigata. Oltre a questo dato sono state analizzate anche immagini in infrarosso a falso colore (CIR) Questi dati, grazie alla presenza della banda che riprende nell'infrarosso vicino, consentono di estendere la possibilità di elaborazione automatica con tecniche di Image Processing per la classificazione delle superfici. Entrambi i dati sono stati forniti proiezione Gauss-Boaga (Roma 40).

DB topografico

Per l'interpretazione dei dati aerei è stata utilizzata come base cartografica il database topografico (aggiornato all'anno 2007). Tale base cartografica in formato vettoriale mette a disposizione elementi conoscitivi necessari alle scelte di pianificazione e gestione del territorio. I dati sono stati prodotti utilizzando specifiche tecniche omogenee, in materia di basi geografiche di interesse generale, definite a livello regionale in conformità alle direttive dell'intesa Stato-Regioni-Enti locali sul sistema cartografico di riferimento (Intesa GIS) e delle indicazioni del Comitato Tecnico Nazionale per il coordinamento informatico dei dati territoriali.

Schema del lavoro

La Figura 3 riporta lo schema concettuale del lavoro e i differenti *steps* di processamento dei dati utilizzati per identificare edifici del comune di Cittiglio con temperature anomale e riconducibili a potenziali problemi di dispersioni energetiche. La termografia ci permette di analizzare la variabilità delle temperature per tutto l'edificato. Tali temperature sono però riferite ad un corpo nero con emissività pari ad 1. Le reali variazioni di temperatura sono però funzione delle caratteristiche dei differenti materiali espresse da specifici coefficienti di emissività. La Figura 2 (Brivio et al., 2006) riporta, a titolo di esempio, quale sia l'effetto di una variazione del valore di emissività sulla stima della reale temperatura di un corpo.

Superficie	ϵ	$\Delta \epsilon$	T_s	T_{rad}	ΔT
Corpo nero	1.00	-	300.0	300.0	-
Vegetazione	0.98	-2%	300.0	298.5	-1.5
Suolo umido	0.95	-5%	300.0	296.2	-3.8
Suolo asciutto	0.92	-8%	300.0	293.8	-6.2

Figura 2. Temperatura termodinamica T_s e temperatura radiometrica T_{rad}

Per poter quindi identificare edifici con temperature anomale e riconducibili a potenziali problemi di dispersioni energetiche è necessario analizzare i dati per classi di copertura omogenee. A tale scopo sono state utilizzate le ortofoto digitali (RGB a colori reali e CIR all'infrarosso) riprese da aereo. L'elaborazione di tali dati ha consentito di classificare gli edifici in differenti gruppi. Cartografia digitale proveniente dai DB topografici ha permesso una precisa delimitazione degli edifici che ha facilitato la classificazione delle immagini. Infine la conoscenza di strategie e di tecnologie utilizzabili per la coibentazione degli edifici ha consentito di derivare ipotesi su aree a potenziale anomalia.

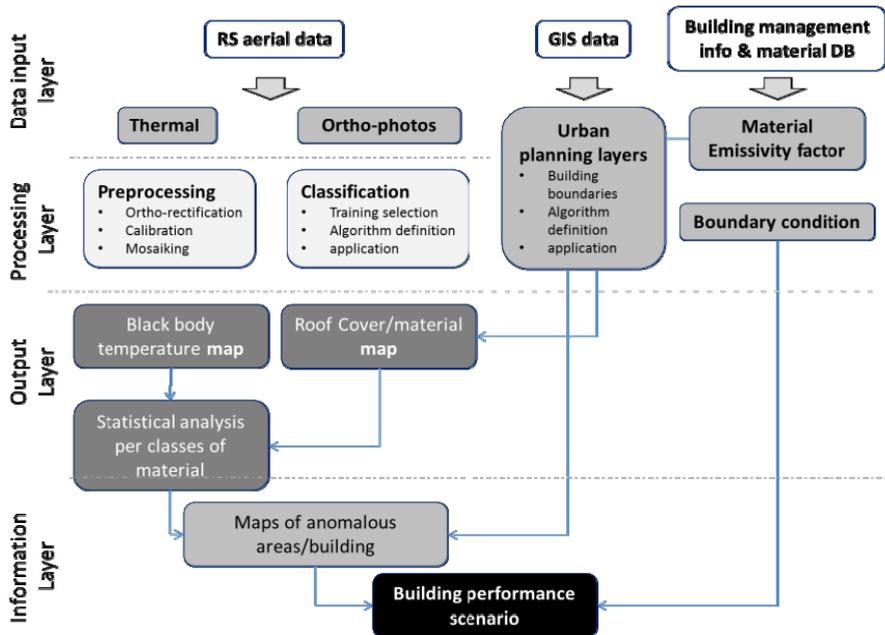


Figura 3. Schema concettuale del processamento dei dati per ottenere informazioni territoriali e puntuale su anomalie termiche degli edifici.

Classificazione delle coperture

Poiché il *range* di temperature misurate varia tra i -4.5°C e i 7°C si è scelto di analizzare il comportamento termico degli edifici per classi di coperture. Le categorie selezionate per classificare gli edifici con valori di emissività paragonabili sono le seguenti: tetti chiari ad elevato albedo (alluminio), tetti rossi (coppi chiari), tetti marroni (coppi scuri), tetti grigi (cementi e prefabbricate) e tetti scuri (materiali bituminosi).

L'identificazione automatica delle coperture da immagini aeree è avvenuta con classificazione supervisionata ed ha previsto i seguenti passi di elaborazione: i) messa a registro dei dati e ri-proiezione delle fotografie aeree nel comune sistema di riferimento UTM 32N WGS84; ii) ricerca dei training per la classificazione; iii) test per selezione del algoritmo di classificazione; iv) mascheratura, realizzazione delle mappe e valutazione dei risultati.

La ricerca dei training per la classificazione, circa 200 pixels per ciascuna categoria, è avvenuta per fotointerpretazione da parte di operatore, sia delle immagini CIR che colori reali. Differenti algoritmi di classificazione supervisionata (Richards, 1993) presenti nel *software* commerciale ENVI i.e. *Maximum likelihood* (MLC, Richards, 1993), *Spectral Information Divergence* (SID, Du et al., 2004), *Spectral Angle Mapper* (SAM, Kruse et al, 1993) sono stati testati su entrambi i *dataset* di ortofoto. La comparazione delle mappe per alcune aree test ha indicato come l'algoritmo SAM (Wang, 1999) applicato ad immagini CIR desse i migliori risultati. Per ottimizzare la classificazione sull'intero comune di Cittiglio è stata preliminarmente creata una maschera che eliminasse tutte quelle aree che non fossero edifici sfruttando le unità volumetriche censite e presenti nel *layer* vettoriale della destinazione d'uso del suolo (*Masking procedure*). La risultante mappa finale delle coperture è stata poi valutata per definirne una accuratezza preliminare. I risultati della classificazione pixel a pixel hanno mostrato accuratezze maggiori dell' 85%. A partire da questo dato *raster* ogni edificio è stato etichettato in base alla classe dominante (n° di pixels) all'interno di ogni poligono che ne identificasse i confini (*GIS majority analysis*).

Analisi GIS: statistica spaziale delle temperature delle coperture

Una volta ottenuto il *layer* delle coperture si è proceduto ad analizzare il dato TABI per classi omogenee. Per ogni classe di copertura è stata calcolata la statistica delle temperature di ogni edificio e comparata a quella della classe di appartenenza al fine di identificare *outliers* dal comportamento anomalo. Si è scelto di considerare anomali gli edifici che per ogni classe cadessero nel primo (edifici anomali “freddi”) e quarto quantile (edifici anomali “caldi”), i primi possono rappresentare case non occupate/riscaldate al momento della ripresa mentre i secondi possono indicare potenziali situazioni con problemi di coibentazione. L'estrazione spaziali dei dati è stata condotta con il software ARCGIS mentre l'analisi statistica è stata condotta con il software open source R.

Risultati

Termografie aeree: esempio delle potenzialità del dato

La Figura 4 mostra un dettaglio delle termografie TABI per un edificio industriale. L'immagine ci permette di apprezzare il dettaglio del dato (50 cm di risoluzione) nonché la sensibilità dello strumento nel misurare variazioni di temperatura di poche decimi di grado. Il profilo di Figura 4b riporta le variazioni di temperature funzione dei diversi materiali del tetto: coperture a cementi prefabbricati e vetri. In corrispondenza dei lucernari si nota un regolare incremento delle temperature di che passano dai 0 ai 2-3 °C.

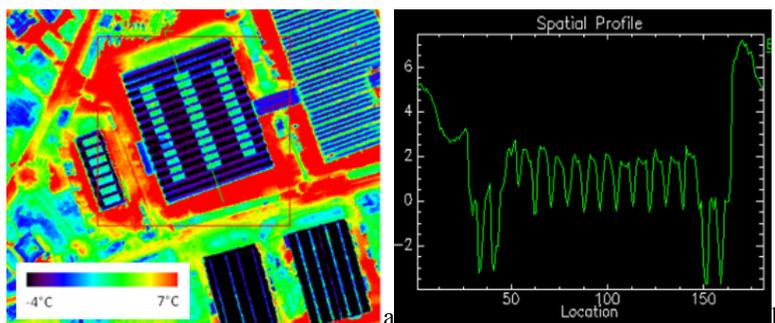


Figura 4. Dettaglio della termografia aerea per edificio industriale (a) e profilo spaziale delle temperature per la copertura del tetto (b).

Classificazione delle coperture

La Figura 5 mostra gli *steps* di classificazione per ottenere il *layer* finale delle coperture degli edifici del comune di Cittiglio. A partire dalla selezione dei *training* per fotointerpretazione delle immagini aeree (a) si ottiene una classificazione *pixel based* per le sole porzioni di immagine corrispondenti ai tetti (b). L'analisi GIS del dato consente di attribuire per ogni poligono quale classe di copertura è statisticamente più rappresentativa (c) fornendo perciò il *layer* finale delle coperture (d).

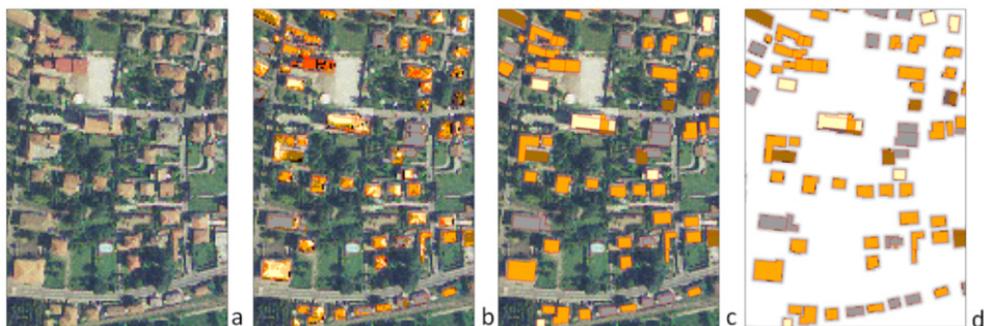


Figura 5. Cclassificazione delle coperture degli edifici: immagine RGB (a), classificazione pixel based (b), majority analysis in ambiente GIS (c) e layer finale delle coperture per ogni edificio.

Individuazione edifici con temperature anomale

Dei 1720 edifici analizzati la maggior parte è risultata avere una copertura a coppi tradizionale con diverse caratteristiche di materiale o stato di alterazione (1070 rossi e 185 marroni). A questa classe, principalmente riferibile ad edifici residenziali, seguono quella delle coperture cementizie e prefabbricate (185) tipiche di edifici industriali o nuove costruzioni. In maniera minoritaria sono presenti anche tetti in alluminio o coperture alto riflettenti (70) e con superfici riconducibili a mescole bituminose (15). La Figura 6 descrive il *box-plot* delle statistiche termiche delle classi di copertura identificate, la numerosità delle classi ed i valori per i differenti quartili sono riportati in figura 7.

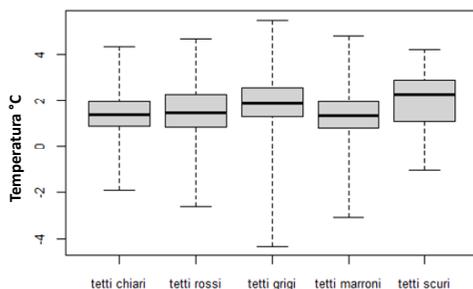


Figura 6. Box plot delle temperature per ogni classe di copertura.

La figura 7 mostra come la classe dei tetti grigi sia quella che mostra la più grande variabilità, ciò può essere dovuto ad un accorpamento in unica classe di materiali termicamente differenti.

Range di temperatura dei quartili per classi di copertura					
# classi	1	2	3	4	5
quartile	tetti chiari	tetti rossi	tetti grigi	tetti marroni	tetti scuri
[1]	-1.91	-2.66	-4.34	-3.09	-1.07
[2]	0.88	0.86	1.3	0.78	1.075
[3]	1.37	1.46	1.87	1.32	2.26
[4,]	1.95	2.29	2.565	1.96	2.895
-	4.37	4.71	5.49	4.84	4.24

Figura 7. Statistiche per le classi di copertura degli edifici presenti nel comune di Cittiglio.

I valori identificati per il 4° quartile per ogni classe di copertura sono stati utilizzati per identificare gli edifici con comportamento anomalo per ogni classe. La Figura 8 riporta il risultato di questa analisi per l'intera area di studio (a). E' interessante notare come le anomalie maggiori siano concentrate in una specifica aree geografica riconducibile al centro storico del comune di Cittiglio dove si concentrano edifici di più antica formazione (b).

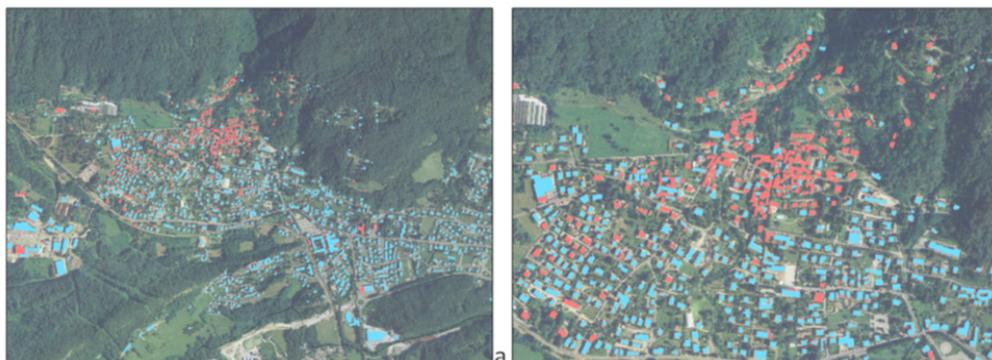


Figura 8. Mappa degli edifici anomali (4° quartile) e dettaglio dell'area del centro storico (b).

Individuazione anomalie nelle coperture di un edificio

Le termografie aeree ci hanno consentito non solo di condurre analisi a scala territoriale ma anche di studiare le caratteristiche di un singolo edificio. Di seguito si restituisce un focus di dettaglio di un fabbricato particolare (Ospedale di Cittiglio), che per il differente uso interno degli spazi e continui recuperi e ampliamenti, mostra significative variazioni nella dispersione delle coperture.

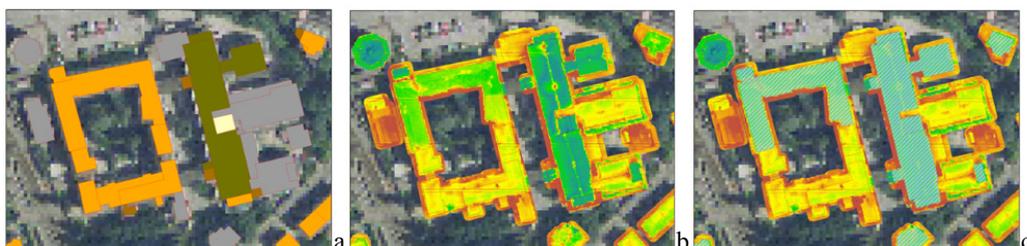


Figura 9. Dettaglio della termografia dell'ospedale di Cittiglio. a) identificazione delle classi di copertura (a coppo e con materiali bituminosi), b) la termografia aerea con pattern di temperature diversi (c) e l'identificazione di parti della copertura anomale ovvero sensibilmente più fredde (isolate) del restante.

Figura 9 mostra un dettaglio in corrispondenza dell'ospedale di Cittiglio. Sono evidenti comportamenti termici diversi tra la parte più nuova con coperture moderne bituminose e quella antica con tetti a coppi (a). E' interessante notare come la parte recentemente ristrutturata nella sezione nord dell'edificio abbia temperature comparabili alle nuove coperture e sensibilmente inferiori a quelle della parte a sud (b). La parte a nord risulta appartenere statisticamente al primo quantile delle coperture a coppi ovvero a quella parte di popolazione che mostra basse temperature ricongiungibili quindi a recenti interventi di coibentazione (c). Infine si può notare come l'alta risoluzione delle immagini sia in grado di identificare gli hot-spot puntuali presenti su tetti corrispondenti ai camini delle centrali termiche (b).

Discussioni

In assetto invernale, la termografia aerea può fornire utili informazioni per valutare in prima approssimazione la dispersione termica osservata attraverso le coperture, che dipende dalla temperatura interna e dalla trasmittanza della superficie. Dal punto di vista della pianificazione energetica comunale (ad esempio nel supporto alla stesura del Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile) risulta interessante identificare la relazione esistente tra le dispersioni termiche osservate e una serie di altre caratteristiche dell'edificio considerato quali la destinazione d'uso, l'anno di costruzione, l'inserimento in contesto ad alta o bassa densità del costruito. Tale relazione può contribuire a identificare con buona approssimazione i consumi energetici per la climatizzazione invernale, i potenziali di risparmio e le priorità di intervento.

In questo caso, la principale difficoltà consiste nel fatto che la temperatura rilevata dipende non solo dalla temperatura superficiale ma anche dall'emissività del materiale presente in copertura. Data l'estrema variabilità di materiali utilizzati in edilizia, è molto complicato assegnare a ogni singola copertura un valore di emissività sufficientemente preciso. Per questo motivo si è preferito scegliere una strada alternativa, identificando delle classi, ciascuna delle quali caratterizzata da valori di emissività paragonabili. La scelta di non identificare con precisione un valore di emissività ci impedisce di conseguenza di calcolare i valori di temperatura superficiale. Allo stesso tempo, l'identificazione di classi rende però possibile l'identificazione all'interno della singola classe degli edifici caratterizzati dalle temperature superficiali più elevate. Come già mostrato, il quarto quartile di ciascuna classe identifica gli edifici che sono riscaldati e che mostrano le prestazioni termiche più deficitarie (elevata trasmittanza delle coperture). Nel caso del comune di Cittiglio, risulta significativo il fatto che tali edifici siano ben concentrati all'interno della zona del centro storico.

Per gli edifici dotati dell'Attestato di Certificazione Energetica è inoltre possibile realizzare un confronto tra la trasmittanza indicata nell'attestato e quella che è ragionevolmente possibile stimare a partire dalle rilevazioni termografiche. Questo dato potrebbe servire a indirizzare le campagne di verifica degli enti preposti semplicemente come indicazione degli edifici su cui può essere opportuno realizzare un approfondimento di indagine. A valle di una estesa campagna di termografia aerea, ad esempio sull'intero territorio regionale, le verifiche si concentrerebbero chiaramente su edifici riscaldati, che dal punto di vista della riduzione dei consumi energetici risultano più interessanti rispetto a quelli sfitti. Non è stato possibile realizzare un confronto nel corso del presente lavoro a causa dell'indisponibilità di dati presenti negli attestati di certificazione. Grazie alla elevata definizione consentita dal sensore utilizzato, è stato inoltre possibile realizzare la verifica delle discontinuità delle prestazioni termiche nella copertura di un singolo edificio. L'ospedale di Cittiglio è composto da un complesso di edifici distinti. È possibile identificare nella Figura 9 una parte storica di edifici (coperture con coppi sulla sinistra) e gli edifici più recenti. Si verifica facilmente come gli edifici più recenti siano caratterizzati da temperature più basse, e quindi da prestazioni migliori. Inoltre, nel complesso di edifici storici, è possibile identificare la parte recentemente ristrutturata (ala posta a nord) e la parte ancora in attesa di ristrutturazione. L'evidenza sperimentale è quindi in linea con quanto ci si attende a partire dalla conoscenza delle reali condizioni degli edifici.

Questo livello di dettaglio può risultare interessante per un ente pubblico su più livelli. Considerando l'ente pubblico come proprietario di edifici (e consumatore di energia), la termografia può supportare l'identificazione degli edifici (o delle frazioni di edificio) di propria competenza che richiedono un intervento prioritario. Se consideriamo invece l'ente pubblico come possibile fornitore di servizi ai propri cittadini, la termografia aerea può aiutare il singolo cittadino a verificare la prestazione energetica dell'edificio in cui abita, in particolare delle coperture.

Ringraziamenti

Si ringrazia Fagiani Fulvio Coordinatore di Agenda 21 Laghi per l'aiuto nella realizzazione del presente lavoro, l'Ing. Leonardo Bastianelli della Intermark Aviosistemi per il supporto tecnico all'installazione del sensore e La Rossi S.r.l di Brescia per aver condotto le riprese aeree.

Referenze

- Brivio P.A., Lechi G., Zilioli E., : “Principi e metodi di Telerilevamento” edito da Città Studi (2006)
- Du, H., C.-I. Chang, H. Ren, F.M. D'Amico, J. O. Jensen, J., "New Hyperspectral Discrimination Measure for Spectral Characterization," *Optical Engineering*, Vol. 43, No. 8, 2004, 1777-1786
ITRES: <http://www.itres.com/products/imagers/tab1800/>
- Kruse, F. A., A. B. Lefkoff, J. B. Boardman, K. B. Heidebrecht, A. T. Shapiro, P. J. Barloon, and A. F. H. Goetz, 1993, "The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data." *Remote Sensing of the Environment*, v. 44, p. 145 - 163.
- Richards J.A. Remote Sensing Digital Image Analysis An Introduction. , 2nd ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1993