

Assessment della vulnerabilità del tessuto urbano a heat waves ed UHI tramite tecniche di Remote Sensing ed object classification

Borfecchia F. (*), Caiaffa E. (**), Pollino M. (*), De Cecco L. (*), Martini S. (*),
La Porta L. (*), Ombuen S. (***), Barbieri L. (***), Benelli F. (***), Camerata F. (***),
Pellegrini V. (***), Filpa A. (***)

(*) ENEA - UTMEA-TER (Environment and Climate Modelling □ Earth Observation and Analysis Laboratory)
Remote Sensing & GIS Group , tel. +39 6 3048 6042, fax: +39 6 3048 6042, e-mail: flavio.borfecchia@enea.it;

(**) ENEA - UTMEA-CLIM (Environment and Climate modelling □ Climate Modelling and Impacts);
C.R. Casaccia □ via Anguillarese, 301 Rome-Italy;

(***) DipSU - Dipartimento di Studi Urbanistici □ Università degli Studi Roma Tre,
via della Madonna dei Monti, 40 Rome-Italy

Riassunto

Aree della città densamente costruite e con una bassa percentuale di aree verdi, sono maggiormente sensibili alle ondate di calore (Heat Waves), in aumento a causa del cambiamento climatico (CC). Gli effetti di tali fenomeni possono cumularsi a quelli dell'isola termica o UHI (Urban Heat Island), fenomeno locale che determina frequentemente temperature dell'aria nel nucleo delle città densamente costruite, significativamente superiori rispetto a quelle nelle zone rurali circostanti, con impatto notevole sulla qualità ambientale ed i consumi energetici. Questo lavoro è dedicato alla messa a punto di metodologie basate sulle tecniche di telerilevamento aerospaziale (EO) a medio-alta risoluzione e tecnologie GIS (Geographical Information Systems) per la caratterizzazione estensiva del tessuto urbano relativa alla sua risposta a questi aspetti climatici connessi alla temperatura, nel quadro generale di supporto alle attività e politiche di sostenibilità ed adattamento ai CC. L'area di test è quella del comune di Roma che per estensione e caratteristiche delle tipologie residenziali edilizie presenti ben si presta allo sviluppo della metodologia. In tale prospettiva l'obiettivo iniziale è stato quello della classificazione delle varie aree urbane di Roma sulla base di variabili fondamentali legate sia alla tipologia/densità edilizia sia alla presenza di vegetazione/superfici permeabili connesse al ciclo idrologico ed alla "risposta" alle forzanti termiche. Si è partiti operando tramite metodologie di fotointerpretazione della cartografia a scala di dettaglio (C.T.R. 1:5000) su di un'area di riferimento costituita da un transetto di circa 7x22 km., esteso dal centro alla periferia e comprendente gran parte delle classi edilizie urbane d'interesse. Oltre alla cartografia sono stati sfruttati i dati di osservazione aerospaziale della terra (EO) telerilevati dal nuovo sensore satellitare Landsat 8 OLI che riprende da orbite polari la superficie terrestre in 9 bande spettrali (visibile RGB, NIR, SWIR, TIR) e con risoluzione di 30 m. a terra. Si è operato secondo lo schema di classificazione "supervised" individuando le classi di riferimento sulle aree del transetto con le quali "stata" addestrata una procedura integrata basata su tecniche di *data mining* ed *object classification* impiegata poi su tutta l'area comunale, su cui sono stati ottenuti alcuni interessanti risultati preliminari in termini di mappatura semiautomatica delle classi di vulnerabilità a HW ed UHI del tessuto urbano. E' stato quindi messo a punto un metodo di calibrazione sulla base di una tipica distribuzione di temperatura UHI derivata dai dati MODIS, che ha permesso di ottenere un'espressione analitica del modello di vulnerabilità, inizialmente introdotto su base semi-empirica.

Abstract

Densely built-up areas of the cities with a low percentage of green vegetation, are more sensitive to heat waves (HW) which are increasing in terms of frequency and intensity due to ongoing climate change (CC). Their negative effects may combine with those of the UHI (Urban Heat Island), local phenomenon that frequently determines air temperatures in the core of the city higher than those in the surrounding rural areas, with significant impact on the quality of urban environment and energy consumption. This work aims at design and development of methods based on aero-spatial remote sensing (EO) at medium-high resolution and GIS (Geographical Information Systems) techniques for the extensive characterization of the urban fabric response to these climatic aspects related to the temperature within the general framework of the support to the local and national activities and policies of sustainability and adaptation to CC. The municipality of Rome was selected as test area since it is suitably in terms of extension and built up residential typologies for methodology development and validation. In this perspective, the first goal was the classification of the various urban areas of Rome based on fundamental variables related both to the building type and density and the presence of vegetation/permeable surfaces connected to the local hydrological cycle and the distributed response to the environmental thermal forcing. First of all we started by operating through photo interpretation methodologies of cartography at detailed scale (CTR 1: 5000) on a reference area consisting of a transect of about 7x22 km., extending from the center to the periphery and comprising all the built up classes of interest. In addition to cartography at suitable scale, (EO) satellite remotely sensed data from new sensor Landsat 8 OLI were exploited. This sensor acquires from polar orbits the earth's surface multispectral images in nine spectral bands (visible RGB, NIR, SWIR, TIR) and with a resolution of 30 m. at the ground. According to the "supervised" classification scheme the reference built up classes found inside the transect were used as training areas within an integrated procedure based on data mining and objects classification techniques which is then used to classify the entire municipal area obtaining some interesting preliminary results in terms of the semi-automatic mapping of vulnerability to the HW and UHI for the identified built up classes. Using these mapped built up vulnerability classes a calibration method based on a typical UHI temperature distribution derived from MODIS data, was therefore developed to obtain an analytical expression of the vulnerability model, firstly introduced on semi-empirical basis.

Introduzione

Negli ultimi decenni i fenomeni relativi alle HW si stima abbiano determinato un numero crescente di vittime, specialmente tra gli anziani e tra coloro affetti da patologie specifiche, in varie aree del mondo ed anche nei paesi dell'Europa che si affacciano sul bacino del Mediterraneo. Qui nell'estate 2003, più caldo di quelli degli ultimi 500 anni, per vari giorni le temperature medie giornaliere sono risultate più alte di vari gradi rispetto a quelle relative alle annualità precedenti (situazione di HW), con temperature dei mesi di luglio ed agosto superiori alla media sino a 10° e massimi sulla Francia e nelle aree del centro-nord dell'Italia. Tali fenomeni hanno avuto un impatto notevole anche sulla salute dei cittadini a livello europeo con aumento dei decessi (oltre 50.000) ascrivibili a questo evento meteoclimatico estremo, concentrati prevalentemente nelle città (J. Larsen- Earth Policy Institute). In questo contesto al fine di prevenire e limitare queste possibili conseguenze negative degli eventi estremi connessi ai CC che rischiano di accentuare ulteriormente situazioni talora già critiche anche per altri fattori, sono in corso varie attività di analisi e ricerche per supportare interventi e politiche riguardanti la mitigazione e l'adattamento in ambito urbano, anche nella prospettiva dei programmi comunitari delle Smart Cities. In questo quadro si colloca quest'attività di ricerca mirante alla messa a punto di metodologie per la caratterizzazione morfotipologica degli insediamenti urbani relativa agli aspetti climatici connessi alla temperatura ed all'idrologia (HW, UHI, allagamenti,) in particolare per quanto riguarda gli aspetti tipologici, geometrici e strutturali del tessuto urbano sui quali possono intervenire efficacemente le varie politiche decisionali e di pianificazione nell'ambito di strategie locali e nazionali di mitigazione ed

adattamento ai CC. L'utilizzo delle correnti tecniche di telerilevamento aerospaziale a medio-alta risoluzione e delle tecnologie GIS (Geographical Information Systems) basate sui più recenti sviluppi in ambito nazionale ed internazionale (ex. utilizzo di sensori recenti come il Landsat 8 o di prossimo impiego come quelli della missione Sentinel 2 del programma europeo Copernicus) costituisce un elemento rilevante delle applicazioni sviluppate sia per gli aspetti di standardizzazione che di replicabilità nonché di validazione (tramite le mappe di temperatura ottenibili sistematicamente da satellite e dalla disponibilità dalle serie storiche/di previsione) delle metodologie sviluppate. L'area di progetto selezionata è quella del comune di Roma, che per ampiezza e presenza di diverse tipologie edilizie rappresentative della realtà italiana ben si presta a fornire un banco di prova valido per lo sviluppo di una metodologia adeguata ad essere applicata proficuamente a livello generale. L'obiettivo iniziale è stato quello della caratterizzazione delle varie aree del transetto urbanisticamente omogenee, preventivamente individuate sulla base della rete viaria, con l'assegnazione di attributi quantitativi legati sia alla tipologia/densità edilizia sia alla presenza di vegetazione/superfici permeabili connesse sia alla risposta idrologica che a quella termica alle ondate di calore. Tale approccio è finalizzato alla valutazione di un indice numerico di vulnerabilità (INV) per ognuna delle aree individuate che sintetizza l'effetto cumulativo dei 3 fattori stimato tramite i relativi punteggi (score). Partendo anche da conoscenze pregresse e studi urbanistici effettuati sono state definite 3 variabili di riferimento quali tipologia, compattezza, permeabilità, per ciascuna delle quali sulla base di differenti pesi relativi sono stati assegnati gradi crescenti di vulnerabilità parziale tramite la fotointerpretazione. Infine la stima dell'INV per ognuna delle aree del transetto è stata derivata sommando i contributi parziali derivanti dalle tre variabili. La fase successiva ha riguardato l'implementazione e test della procedura semiautomatica basata sui dati di telerilevamento satellitare elaborati tramite tecniche di classificazione e di data mining per migliorare l'analisi ed estenderla all'intero territorio comunale utilizzando i risultati parziali ottenuti per l'area del transetto.

Fotointerpretazione: metodologie e risultati

In una prima fase si è proceduto pertanto mediante metodi di fotointerpretazione ad una classificazione delle aree residenziali del transetto precedentemente individuate tramite la rete viaria. Sono state considerate le tipologie prevalenti degli edifici, la loro compattezza, intesa come numero dei piani ed ampiezza delle vie contigue, da ultimo è stata valutata la percentuale di superfici permeabili, vegetazione inclusa. La classificazione dei poligoni è stata effettuata tramite foto interpretazione con copertura del territorio totale e topologicamente verificata (assenza di poligoni sovrapposti e/o "buchi") e poligono minimo di grandezza approssimativa di 5000 mq. Per la caratterizzazione della risposta termica degli edifici residenziali del transetto si è tenuto conto quindi dei seguenti parametri valutati anche come intensità (score) in termini di fattore di vulnerabilità parziale all'interno di un intervallo prefissato:

1. tipologia prevalente degli edifici (11 tipi definiti sulla base di studi pregressi, con score massimo 20);
2. compattezza del tessuto insediativo (4 classi: alta, medio-alta, medio-bassa, bassa, con relativi score di 5, 10, 20, 35);
3. presenza di superfici permeabili (3 classi: bassa, media, alta, con relativi score di 45, 20, 1).

Per la stima dell'INV, le 11 tipologie sono state raggruppate in 6 classi aventi vulnerabilità parziale da 2 a 20 (2, 4, 6, 8, 10, 20) ed associate alle relative classi di compattezza fotointerprestate, per un totale di 11 classi di morfotipo 1° liv. (CL-) con score nel range da 7 a 55 (Tabella 1), che sintetizza la risposta parziale specifica delle strutture edilizie ed urbane (Fig. 1- parte sinistra). Successivamente in base alla combinazione delle 11 classi del morfotipo di 1° liv. e delle 3 categorie del parametro di permeabilità, sono state individuate 12 livelli di INV crescente (vedi immagine di destra di fig.1). Tali stime di INV corrispondono alle diverse combinazioni ottenute ipotizzando empiricamente per i 3 parametri tipologia, compattezza e permeabilità una distribuzione dei contributi percentuali sintetizzata come descritto e pesi rispettivi di 20, 35 e 45. Il risultato di questa classificazione "manuale" basata sulle caratteristiche suddette del tessuto urbano estratte sia mediante fotointerpretazione della cartografia a scala adeguata sia da rilievi fotogrammetrici ha permesso l'individuazione e la caratterizzazione di circa 280 poligonali rilevate dalla cartografia dell'area del transetto e delimitate prevalentemente dalla rete viaria. Per ottenere questo risultato, sono stati identificati vari livelli di vulnerabilità (morfl) in base ai parametri di tipologia e compattezza del tessuto urbano

CL n°	CL	score
1	A	7
2	B	12
3	C	14
4	D	16
5	E	24
6	F	26
7	G	28
8	H	30
9	I	43
10	L	45
11	M	55

Tabella 1 - Morfotipo di 1° livello (morfl).

(morfotipo 1° livello) ai quali poi è stato aggiunto il contributo della permeabilità dei suoli ottenendo 12 livelli di INV inteso come vulnerabilità relativa percentuale alle ondate di calore e ai consueti fenomeni di UHI

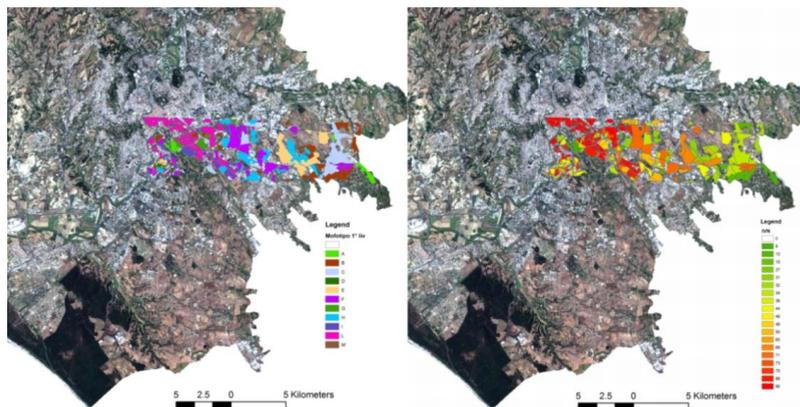


Figura 1 - Distribuzione delle 11 classi di vulnerabilità parziale del tessuto urbano corrispondenti al morfotipo di 1° livello (sinistra) e della vulnerabilità complessiva INV (destra). In sovrapposizione a combinazione "true color" dell'immagine multispettrale del territorio Comunale di Roma ripresa dal satellite Landsat 8 il 27-07-2013.

connessi ad aumenti della temperatura. Tali classi di vulnerabilità sono state individuate per ciascun poligono corrispondente ad aree residenziali all'interno del transetto di riferimento indicato in figura 1. La distribuzione dell'INV ottenuta, riportata nella stessa figura 1 a destra, come si vede, plausibilmente, in generale decresce dal centro alla periferia compatibilmente

con la diminuzione della densità del tessuto urbano e di suolo impermeabile unitamente alla maggior presenza di aree verdi o a suolo nudo.

Remote sensing e Object Classification

La metodologia per la classificazione delle unità territoriali (poligonali) omogenee del territorio comunale di Roma (figura 1) sulla base delle loro caratteristiche derivabili dalle riprese satellitari, parte da un approccio "object oriented" tenendo conto che mediamente esse corrispondono nelle immagini Landsat ad insiemi (oggetti) più o meno numerosi di pixel. Poiché in tale approccio sono prese in considerazione non le caratteristiche del singolo pixel ma quelle relative all'insieme considerato, è possibile in tal modo rilevare ed elaborare parametri relativi alla tessitura o morfologici relativi all'area considerata. Quest'ultimo aspetto risulta notevolmente importante per

le aree urbanizzate (Hanqiu, 2007) ed in particolare per la nostra applicazione in quanto si ipotizza realisticamente che tali parametri di tessitura siano legati alla componente "compattezza" del tessuto urbano considerato utilizzata per la stima dell'indice di vulnerabilità IVN. L'identificazione di questi oggetti intesi come insiemi di pixel contigui si basa su una preventiva "segmentazione" delle immagini multispettrali effettuata tramite algoritmi che utilizzano vari parametri relativi alla scala (dimensione media), geometria e colore degli oggetti da individuare come aree omogenee all'interno dell'immagine raster. Una volta individuate tali aree esse possono essere caratterizzate singolarmente dalle proprietà dell'insieme di pixel relativo in termini di risposte spettrali, tessiture e morfologia. Tenendo conto della necessità di ridurre il numero delle variabili iniziali in input selezionando quelle maggiormente indipendenti e connesse alle risposte spettrali tipiche della vegetazione e degli elementi infrastrutturali urbani, meno sensibili agli eventuali effetti di noise (atmosferico,..) ed in grado di ottimizzare i segnali utili si è scelto di operare con 3 indici spettrali derivati dai rilievi Landsat OLI per ogni pixel: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NBUI. (Normalized Built Up Index) e NDGI (Normalized Difference Green Index) definiti secondo le equazioni 1, 2 e 3:

$$NDVI=(R_4-R_3)/(R_4+R_3) \quad (1); \quad NBUI=(R_6-R_5)/(R_5+R_6) \quad (2); \quad NDGI=(R_3-R_2)/(R_2+R_3) \quad (3)$$

dove con R_i è indicata la risposta spettrale al sensore nella banda i -esima.

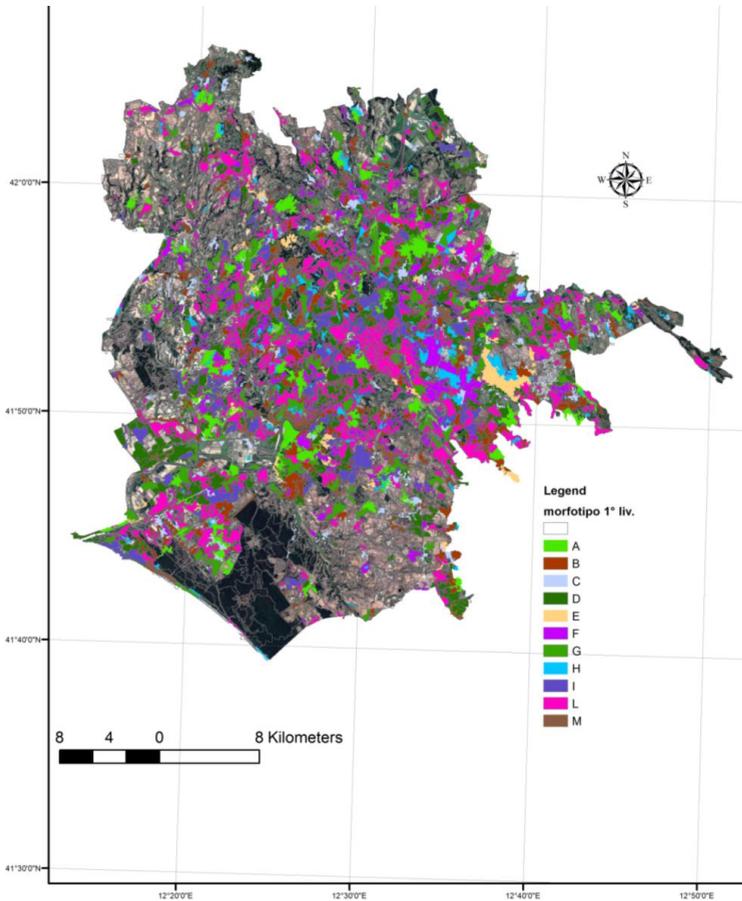
Il passo successivo è stato quindi quello di utilizzare una preventiva segmentazione (Baatz et al., 1999) della distribuzione dei 3 indici spettrali che ha portato ad una suddivisione del territorio comunale in poligoni omogenei (objects) dal punto di vista spettrale/tessiturale (circa 3400) da cui successivamente sono state individuate quelle da utilizzare come aree campione (training) tramite operazioni zonali e confronto tramite overlay topologico con quelle precedentemente analizzate del transetto. Le 280 aree del transetto, delimitate dalla rete viaria individuate durante la fotointerpretazione sulla base di vari requisiti urbanistici spesso risultano non omogenee in termini spettrali e tessiturali per cui tale operazione ha portato ad una selezione di circa 40 poligoni maggiormente omogenee derivanti dalla segmentazione da utilizzare come training areas per la classificazione supervised. Non avendo il riferimento delle aree residenziali per l'intero territorio comunale sono state considerate esclusivamente le poligoni della segmentazione contenenti una percentuale minima (15%) di pixel di urbanizzato, individuato preventivamente tramite una classificazione per pixel standard (supervised "Maximum Likelihood). Partendo dal file costituito dalle distribuzioni dei suddetti indici spettrali per ciascuna delle poligoni individuate sono stati calcolati valori relativi alle varie variabili derivate connesse sia alle risposte spettrali delle aree d'interesse sia alle loro caratteristiche tessiturali. In particolare le risposte spettrali derivate includono l'ampiezza (max-min), la media, la moda la standard-deviation e la somma dei valori dei pixel interni. Per la caratterizzazione delle tessiture si è passati attraverso parametri ottenuti dalle GLCM (Gray-Level Cooccurrence Matrix) quali la dissimilarità (sensibile al contrasto locale), l'entropia (ordine locale) e l'omogeneità (differenze locali). In totale le variabili derivate ammontano a 51. Tali variabili spaziali sono state poi utilizzate preventivamente per la classificazione supervised delle poligoni (objects) corrispondenti alle training areas (40) precedentemente individuate, per mezzo di vari algoritmi, sviluppati nell'ambito delle tecniche di "data mining" al fine di selezionare quello maggiormente idoneo in base all'accuratezza (Overall Accuracy) ottenuta. In particolare gli algoritmi testati maggiormente efficaci sono stati quelli di Decision Tree (C4.5) o albero decisionale (Jungho et al.

2012) BVM e C-SVC che sono 2 tipologie di algoritmi SVM (Support Vector Machine) di recente sviluppo, K-NN

	Train/test (70-30)	
	O.A.	err.rate
C4.5	0.50	0.92
BVM	0.65	0.92
C-SVC	0.88	0.85
K-NN	0.33	0.85
RnTr	0.98	0.50

Tabella 2 "Accuratezza (O.A.) sulle training areas per vari algoritmi.

(K-Nearest Neighborhood) e RnTr (Random Forest Tree) (Breiman, 2001), la cui accuratezza è risultata più elevata anche in termini di error-rate utilizzando uno schema con test indipendente su una selezione random del 30% dei dati. Si è proceduto infine con l'algoritmo di classificazione



object RnTr, risultato maggiormente performante, sull'intera area, utilizzando la serie di 51 variabili spettrali/spaziali indipendenti preventivamente estratta dal dataset multilayer raster precedentemente utilizzato per la segmentazione. Nella mappa tematica risultante (figura 2) delle 1481 poligonali classificate è stato riscontrato un buon accordo con la distribuzione delle classi di urbanizzato del Corinne Land Cover 2006. Sebbene dalla mappa ottenuta sarebbe stato agevole stimare la distribuzione INV tramite il modello messo a punto in fase di fotointerpretazione sulla base del valore medio di NDVI per le aree considerate, rappresentativo della percentuale di aree permeabili presenti, tale obiettivo è stato ottenuto utilizzando un modello maggiormente efficace descritto nel successivo paragrafo.

Figura 2 - Distribuzione delle classi di morfotipo di 1° livello del territorio comunale di Roma ottenuta tramite Object Classification (RnTr) su Landsat 8 OLI true-color del 27-07-2013.

Temperature dell'UHI e calibrazione INV

Sebbene l'approccio seguito ci ha permesso una prima individuazione delle 12 classi di vulnerabilità INV relative al tessuto urbano del transetto esso non permette di evidenziare il diverso peso dei fattori considerati che potrebbero contribuire quantitativamente in maniera diversa al valore globale del parametro né di quantificare più accuratamente la sua stima sulla base delle distribuzioni di temperature rilevate in relazione anche ai fenomeni summenzionati. Per questo nell'ultima fase del lavoro invece ci si è maggiormente focalizzati sugli aspetti di calibrazione e validazione su base fisica del modello per il calcolo numerico dell'INV partendo dagli effetti che i fenomeni d'interesse relativi alle HW ed all'UHI hanno avuto sul tessuto urbano considerato. A tal fine sono state utilizzate le distribuzioni di temperatura rilevate dai sensori satellitari MODIS in

occasione di manifestazioni particolarmente rilevanti di questi fenomeni dell'estate 2003 e documentate dalle serie storiche dei dati meteo e satellitari disponibili. In tal modo si è mirato da una parte a verificare l'effettivo contributo all'indice di vulnerabilità delle varie componenti e dall'altra a migliorare la stima dei relativi fattori di peso, inizialmente introdotti empiricamente.

In accordo anche con precedenti lavori, dall'analisi visiva delle distribuzioni LST riportate in figura 4, si rileva come la situazione di UHI con massimi (in rosso più intenso) sul centro della città, è relativa solo a quelle notturne, mentre nel passaggio diurno mattiniero la situazione denota una rapida evoluzione legata all'aumento d'irradiazione solare parzialmente schermata dalle strutture 3D del compatto tessuto urbano centrale. Tenendo conto di questa considerazione, nell'ottica di pervenire ad un'espressione e calibrazione dell'INV maggiormente basata sugli effetti della distribuzione di LST in situazione di UHI, sono state considerate queste 2 mappe di temperature notturne del 12 e 16 Luglio 2003, giorni caratterizzati anche dalla presenza di HW, per implementare un modello regressivo lineare multivariato. Sono stati utilizzati i valori normalizzati delle variabili di morfotipo di 1° livello (morfl), derivato dalla fotointerpretazione unitamente all'NDVI (derivato dal dato satellitare), come proxy della permeabilità ed all'altimetria locale (alt), che costituisce un fattore rilevante nello scambio radiativo e della conseguente distribuzione di

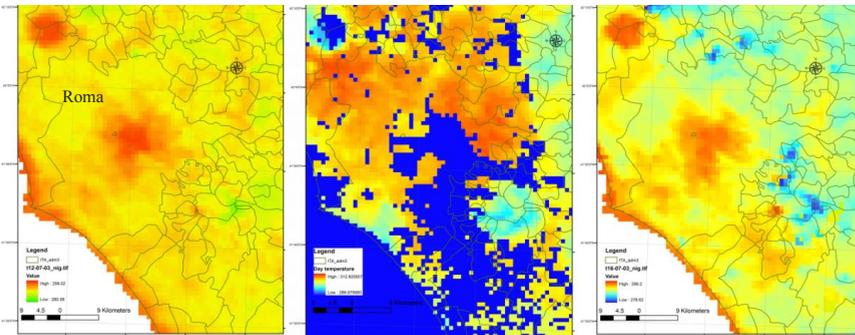


Figura 3 - LST (Land Surface Temperature) Rilevata dal sensore MODIS nei giorni 12-7-2003 alle 21.30 (sinistra) e 09.30 (centro), e 16-7-2003 alle 21.30 (destra) sul comune di Roma.

temperatura. In aggiunta all'NDVI, sono state selezionate inoltre ulteriori variabili tra quelle più significative utilizzate nella fase precedente di classificazione, tramite tecniche di

backward stepwise regression per tener conto di

eventuali possibili ulteriori variabili del tessuto urbano rilevabili tramite le tecniche EO impiegate e connesse alla distribuzione LST. In aggiunta quindi a quelle precedentemente utilizzate per la classificazione ad oggetti, le ulteriori variabili alt e LST sono state ricavate rispettivamente dalla distribuzione delle altimetrie disponibile a 20 m. di risoluzione e da quella delle temperature MODIS di figura 4 (sinistra e destra), arrivando tramite metodo OLS (Ordinary Least Squares) ad un modello sufficientemente robusto i cui parametri statistici e relativi coefficienti sono riportati nella seguente tabella 3. Come si vede, con una correlazione significativa ($P\text{-value}(F) < 10^{-5}$), tra le variabili indipendenti risultanti nella stima del modello compaiono quella relativa al morfotipo (morfl) ottenuta dalle caratteristiche fotointerpretate, l'altimetria locale e tre variabili ottenute dai rilievi Landsat 8: i due indici NDVI e NBUI ed inoltre il parametro dissimilarità della tessitura legato al contrasto locale di quest'ultimo indice stimato dalle GLCM. Dai coefficienti del modello riportati in tabella 3 (col. 2) si evince il contributo positivo all'aumento di temperature dovuto alle caratteristiche del tessuto urbano sintetizzate nelle variabili morfl e Diss. NBUI di tessitura, mentre di segno contrario sono quelli connessi agli indici NDVI e NBUI ed alle altimetrie. In definitiva la distribuzione LST rilevata da MODIS nella notte del 12-07-2003 è esprimibile:

$$LST = 765 * \text{morfl} - 980.66 * \text{NDVI} - 589.74 * \text{NBUI} - 0.0086 * \text{alt (m.)} + 1.46 * \text{Diss.NBUI} + 302.91 \quad (4)$$

Ind. variables	Dependent variable: LST Observations: 1481 Date:12/07/2003 Hour: 21:30			
	Coefficient	Std. Error	t-ratio	p-value
const	302.911	0.44005	6.883.549	<0.00001
morfl	765.497	912.251	83.913	<0.00001
NDVI	-980.661	0.432202	-226.899	<0.00001
NBUI	-589.741	0.27131	-217.368	<0.00001
alt	-0.0086179	0.000782623	-110.116	<0.00001
Diss. NBUI	1.46E+00	2.96E-01	49.298	<0.00001
Mean dependent var	2.929.284		S.D. dependent var	1.494.684
Sum squared resid	1.953.394		S.E. of regression	1.150.797
R-squared	0.409215		Adjusted R-squared	0.407212
F(5, 1475)	2.043.356		P-value(F)	1.10E-165

Tabella 3 - risultati ottenuti per il modello dell'eq. n. 4 con le 5 variabili indipendenti tutte significative ($p\text{-value}<0.00001$) ed $R^2 > 0.4$.

con coefficienti determinati su base fisica tramite OLS. Utilizzando la distribuzione LST del 16-07-2003 il segno dei coefficienti rimane invariato mentre si registrano piccole variazioni nei loro valori unitamente ad un lieve abbassamento dell' R^2 , presumibilmente dovuto alla presenza di nuvole e noise diffuso su alcune aree dell'immagine.

Risultati e Conclusioni

Nel presente lavoro è stata implementata e messa a punto una metodologia per la stima della sensibilità/vulnerabilità del tessuto urbano all'innalzamento delle temperature connesse ai sempre più frequenti fenomeni climatici relativi alle ondate/isole di calore (Heat Waves/Islands) tramite l'utilizzo integrato di tecniche di fotointerpretazione e di metodi basati su GIS ed EO. In particolare uno degli obiettivi ha riguardato lo sviluppo di una procedura di classificazione dei dati telerilevati ad alta risoluzione spaziale dal sensore Landsat 8 OLI basata su tecniche di classificazione ad oggetti per la più efficace caratterizzazione del tessuto urbano finalizzata alla valutazione della sua risposta termica ed a supporto dei metodi fotointerpretativi. La capacità di rilievo termico del sensore MODIS è stata inoltre utilizzata per la messa a punto di una metodologia di calibrazione e validazione del modello introdotto nella fase di fotointerpretazione, sulla base della distribuzione di temperature LST relativa ad una situazione di UHI notturna tipica dell'area romana.

Va rilevato infine che questi risultati preliminari sebbene interessanti risentono di alcuni limiti intrinseci alle metodologie fotointerpretative qui utilizzate, che comunque miriamo a rendere maggiormente efficaci con una maggiore integrazione tra i metodi utilizzati e soprattutto l'individuazione preventiva delle poligoni da fotointerpretare tramite segmentazione automatica basata su algoritmi consolidati ai fini di migliori prospettive di generalizzazione.

Bibliografia

- 1- Hanqiu Xu. Extraction of Urban Built-up Land Features from Landsat Imagery Using a Thematic oriented Index Combination Technique. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 73, No. 12, December 2007, pp. 1381-1391.
- 2- Baatz, M., Schäpe A. : Object-Oriented and Multi-Scale Image Analysis in Semantic Networks. In: Proc. of the 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing August 16th -20th 1999. Enschede. ITC.
- 3- Jung Ho I., Zhenyu L., Jinyoung R., Lindi J. Q. Impervious surface quantification using a synthesis of artificial immune networks and decision/regression trees from multi-sensor data. Remote Sensing of Environment 117 (2012) 102-113
- 4- Breiman, L. (2001). "Random Forests". Machine Learning 45 (1): 5-32. doi:10.1023/A:1010933404324.