

# LIFE "METRO-ADAPT" Onde di Calore Urbano: analisi degli impatti su popolazione mediante dati satellitari

Pierluigi Adami, Achille Ciappa, Nicola Corsini, Maria Lucia Magliozzi, Monica Palandri

e-GEOS S.p.A. Via Tiburtina 965, 00156 Roma Italy, +390640793833, [monica.palandri@e-geos.it](mailto:monica.palandri@e-geos.it), [pierluigi.adami@e-geos.it](mailto:pierluigi.adami@e-geos.it), [achille.ciappa@e-geos.it](mailto:achille.ciappa@e-geos.it), [nicola.corsini@e-geos.it](mailto:nicola.corsini@e-geos.it), [marialucia.magliozzi@e-geos.it](mailto:marialucia.magliozzi@e-geos.it)

## Sinossi

e-GEOS, insieme con la capofila Città Metropolitana di Milano (CMM) e con i partner Ambiente Italia, CAP Holding, Legambiente Lombardia Onlus e l'ALDA, sta portando avanti il progetto "METRO-ADAPT - Climate Change Adaptation Project", nell'ambito del programma europeo LIFE. Il progetto si focalizza su alcuni dei problemi climatici che devono affrontare le aree metropolitane. Il progetto ha fra i suoi obiettivi quello di fornire uno strumento operativo per migliorare i processi di *governance* della città metropolitana e supportare, con dati obiettivi, l'attività conoscitiva del territorio e di pianificazione a vari livelli. Questo articolo descrive i risultati ad oggi ottenuti relativi alla mappatura delle isole di calore urbano e all'analisi del rischio della popolazione vulnerabile esposta alle ondate di calore. In alcune aree della città metropolitana, a causa della conformazione urbana, si riscontrano temperature molto elevate per diversi giorni consecutivi. Si definisce "Isola di Calore Urbano" (*Urban Heat Island*, UHI) una zona della città nella quale la temperatura è molto superiore (5°C e oltre) - per diversi giorni - rispetto a quella minima di riferimento misurata nell'area rurale circostante l'area urbana. Questa *anomalia termica* è particolarmente significativa durante le ore notturne. Vari studi hanno accertato che, durante le onde di calore, la mortalità nelle aree urbane aumenta significativamente. È dunque importante per le amministrazioni e per gli enti di Protezione Civile poter localizzare al meglio le aree della città dove si verifica il fenomeno delle isole di calore, al fine di provvedere con interventi tempestivi sulla popolazione (ad es. la distribuzione di acqua o la delocalizzazione delle persone vulnerabili in zone più fresche) e con misure di pianificazione urbanistica volte all'adozione di infrastrutture verdi e blu. L'uso di dati pluriennali satellitari multi-piattaforma, cartografici e informativi integrati in un GIS ha consentito di produrre un'analisi di rischio per la popolazione vulnerabile (anziani e bambini) esposta alle temperature estreme, durante le ondate di calore estivo. I risultati del progetto contribuiranno a supportare il Piano Territoriale della CMM con misure di adattamento climatico e lo sviluppo di nuove regole di costruzione e pianificazione nei comuni.

## Periodi delle onde di calore nella Città Metropolitana di Milano

I periodi di onde di calore sono stati individuati in base ai dati di temperatura della centralina meteo Brera, nel centro di Milano, e alle massime temperature negli aeroporti di Linate e Malpensa (dati METAR - METeorological Air Report)

durante le estati 2015-2018. Sono stati identificati come onde di calore i giorni consecutivi (almeno 3) con temperature massime diurne oltre i 30°C e minime notturne oltre 22°C. Su un totale di 488 giorni estivi, il numero totale di giorni di onde di calore risulta 193 (39.5%). Nella tabella che segue, sono riportati i periodi individuati come ondate di calore durante le estati 2015 - 2018.

Anno	Periodi	Numero di giorni
2015	4-8/6; 30/6-30/7; 3-9/8; 28/8-2/9	49
2016	20/6 - 13/7; 18-26/7; 23/8 - 14/9	56
2017	11-24/6; 5-13/7; 31/7 - 4/8; 24-31/8	35
2018	15-21/6; 8/7 - 13/8; 15-23/8	54

Tabella 1 - Distribuzione delle Onde di calore nelle estati 2015 - 2018

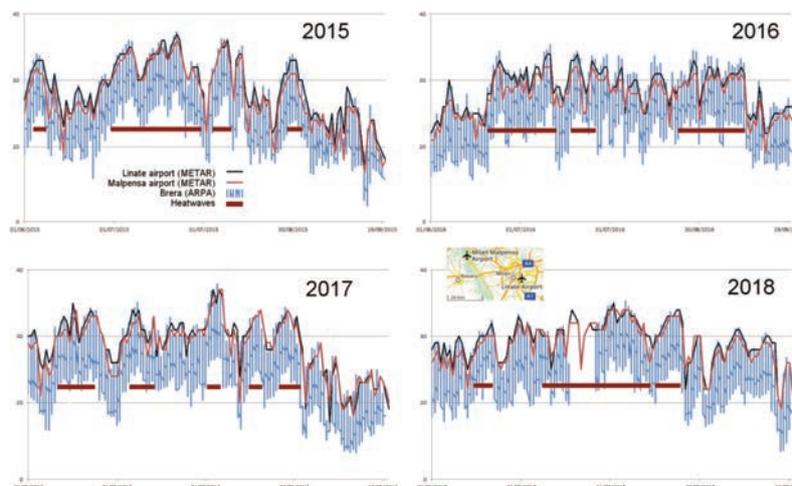


Figura 2 - Temperature dell'aria nelle estati 2015-2018: Malpensa, Linate e Brera

Un possibile effetto perturbativo nella distribuzione del calore al suolo può essere causato dal vento, che potrebbe "spostare" sottovento la posizione dell'isola di calore. Sono stati analizzati i dati di vento sull'area e nei periodi in esame, estratti dal METAR degli aeroporti, e si è riscontrato che il vento è inferiore a 15 km/h e pertanto nessuna immagine satellitare è stata scartata.

### Elaborazione dati satellitari

Attraverso dati termici satellitari, sono state individuate le zone più calde (zone "UHI") della CMM durante i periodi estivi tra il 2015 e il 2018. L'analisi ha utilizzato i dati di Land Surface Temperature (LST) del sensore MODIS (1 km risoluzione) montato sui satelliti Aqua e Terra, e le bande termiche del satellite Landsat-8 (100 m ris., pixel 30 m). Non sono stati usati i dati termici dei satelliti europei Sentinel-3, perché operativi dopo il 2016, ma le procedure qui illustrate sono applicabili anche ai dati Sentinel-3. MODIS acquisisce quotidianamente (2 immagini di giorno, 2 di notte), mentre il LANDSAT-8 ogni 16 giorni. La procedura seguita si può riassumere in tre passi:

1. Calcolo della LST media da MODIS durante i periodi di onde di calore;
2. Ricampionamento (downscaling) della LST (1 km ris.) alla risoluzione di 30 m per pixel, utilizzando i dati termici LANDSAT;
3. Produzione della mappa di *anomalia termica*, ovvero delle differenze di temperatura rispetto ad uno "0" di riferimento corrispondente alla temperatura delle aree rurali circostanti l'area urbana.

### Selezione dei dati MODIS e Landsat notturni

La qualità dei dati MODIS sull'area di studio è stata valutata calcolando la percentuale di pixel LST utilizzabili sul totale di 488 giorni estivi dal 2015 al 2018. Le percentuali sono molto basse nelle aree urbane come Vigevano, Pavia, Lodi (all'esterno della CMM), con minimi attorno al 4% nell'area urbana di Milano. Queste basse percentuali rivelano che la frequente opacità atmosferica è dovuta sia alla copertura nuvolosa (naturale) sia alla presenza di inquinanti atmosferici. Al fine di aumentare il numero di immagini sfruttabili, sono state considerate 5 sub-aree su cui selezionare separatamente le immagini senza nuvole. Alla fine, le medie ottenute su ciascuno dei 5 quadranti sono state mosaicate. Nel 2015, risultano 32 date per Terra e 28 per Aqua.

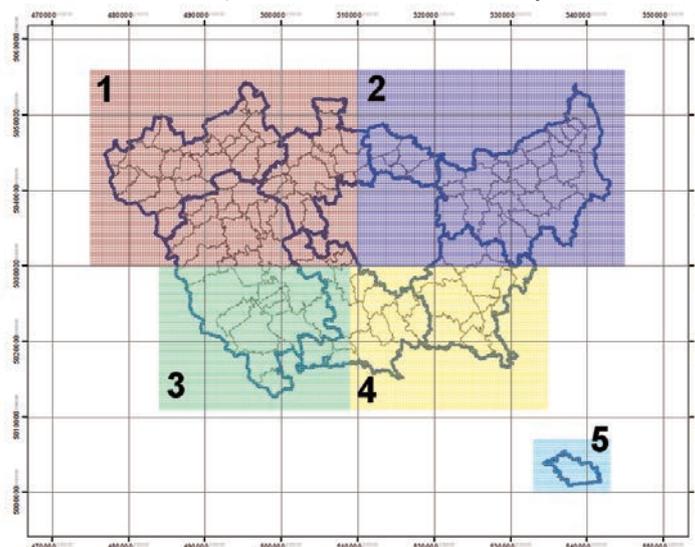


Figura 3 - Le 5 sub-aree della CMM su cui sono state selezionate le immagini MODIS

Sono state poi acquisite 11 immagini notturne Landsat-8 tra il 2015-18, di cui 4 sono state scartate per la copertura nuvolosa. Delle 7 immagini rimaste, 5 sono state ulteriormente scartate dopo un'accurata ispezione, perché affette da minori disturbi atmosferici. Le restanti due, del 02.08.2015 e del 26.08.2018 sono state utilizzate per il downscaling delle immagini MODIS.

### Landsat processing

La LST da Landsat può essere calcolata a partire dai digital numbers (DN) della banda termica 10 (la 11 è in genere troppo rumorosa). Le bande Landsat non consentono la correzione atmosferica come per MODIS, pertanto la LST Landsat è stimata al *Top of Atmosphere* (TOA). I passi per produrre le TOA LST (dati notturni o diurni) consistono in (Avdan, Jovanovska, 2016), (Sobrino et al., 2004), (Stathopoulou, Cartalis, 2007):

- a. Calcolo della radianza spettrale TOA a partire dall'immagine della banda 10, da scale factor e offset nel file MTL nel GEOTIFF;

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L - O_i \quad (0.1)$$

- b. Calcolo della temperatura di brillantezza (BT):

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273.15 \quad (0.2)$$

con le costanti (dal file MTL):  $K_1 = 774.8853$ ,  $K_2 = 1321.0789$ ;

c. Calcolo della TOA-LST, ottenuta dalla BT:

$$T_s = \frac{BT}{\{1 + [(\lambda BT / \rho) \ln(\varepsilon_\lambda)]\}} \quad (0.3)$$

con  $\lambda$  = lunghezza d'onda della radianza emessa  $\lambda = 10.895 \mu\text{m}$ ,  $\rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{mK}$  (prodotto delle costanti di Planck e Boltzmann) ed  $\varepsilon_\lambda$  = l'emissività.

L'emissività è stata stimata attraverso valori assegnati a classi di uso del suolo (acqua, suolo nudo, suolo misto, copertura vegetale) derivate dall'indice di vegetazione NDVI. Quest'ultimo è stato stimato a partire da immagini Landsat8 diurne più prossime dal punto di vista temporale a quelle notturne utilizzate per il calcolo della BT.

### Downscaling

Il downscaling è un processo di ricampionamento che converte un dato a bassa risoluzione spaziale (come il MODIS) in uno a più alta risoluzione attraverso le informazioni estratte da un dato di riferimento (come il Landsat). Il metodo usato nel progetto si basa sulla LST, con l'assunzione della stabilità nel tempo del rapporto tra il valore del pixel di LST da MODIS e da Landsat. La connessione tra i pixel termici Landsat e MODIS è stabilita sotto-campionando i pixel Landsat alla risoluzione del MODIS e confrontando i dati. La sovrapposizione delle due griglie permette di individuare i pixel Landsat che ricadono in ciascuna cella MODIS. Mediando i valori di LST Landsat su ogni cella MODIS, si ottiene dalla immagine Landsat una immagine termica ad 1km analoga al MODIS. Ora è possibile esprimere il rapporto tra la LST a piccola e larga scala attraverso i rapporti di ciascun pixel:

$$R_{i,j} = LST_{i,j}^{30m} / LST^{1km}$$

dove  $LST_{i,j}^{30m}$  è il valore del pixel Landsat e  $LST^{1km}$  è il corrispondente valore mediato sulla griglia MODIS. I rapporti  $R_{i,j}$  costituiscono una matrice di trasformazione  $R'$ . Se il rapporto è invariante nel tempo, è possibile convertire una qualunque immagine MODIS LST ad 1km in un'immagine a 30m:

$$LST_{i,j}^{30m} = LST^{1km} \cdot R_{i,j}$$

dove ora i valori LST ad 1km vengono dal MODIS.

Questo metodo rispetto al SADFAT (Weng et al., 2014) non necessita di un dataset di immagini contemporanee MODIS e Landsat. Tuttavia, visto che la matrice di trasformazione  $R$  può essere ottenuta da qualsiasi immagine Landsat, è importante verificare che la matrice  $R$  sia invariante nel tempo.

### Produzione Mappe Anomalie Termiche notturne

Le mappe di anomalie termiche sono state prodotte dai dati notturni. Dousset et al. (2011) hanno studiato gli effetti dell'onda di calore dell'agosto 2003 nell'area di Parigi con dati termici satellitari, riportando che la correlazione tra gli incrementi di mortalità e la distribuzione spaziale delle temperature era più significativa per le temperature notturne che non per le diurne. È risultato che

un incremento delle minime notturne di solo 0.5 °C aveva causato il raddoppio dell'incremento della percentuale di decessi. Analizzando i dati di temperatura dell'aria delle stazioni ARPA sul territorio, l'intervallo di valori delle minime notturne, di circa 5°C, è ben più ampio di quello massimo diurno, di 2°. Dunque la temperatura presenta una maggiore variabilità spaziale durante la notte, mentre durante il giorno, le aree urbanizzate tendono a riscaldarsi in maniera uniforme, ad eccezione ovviamente delle aree verdi. Questo fenomeno è dovuto al rilascio del calore immagazzinato durante il giorno in alcune zone della città limitate dalla struttura urbana, causando quindi maggiori differenze di temperatura. Le MODIS LST notturne sono state mediate e mosaicate e la mappa media è stata ricampionata sul pixel di 30m Landsat più recente (agosto 2018). Infine, dalla LST media a 30m è stata ottenuta la distribuzione della anomalia termica, ovvero delle isole di calore UHI. Intendendo per anomalia termica l'eccessiva differenza di temperatura tra zone nel centro urbano e un'area rurale di riferimento, essa vale zero all'esterno della città e aumenta sino al massimo nelle zone urbane UHI. Ad esempio, nei passaggi notturni (1:00 – 3:00) di Aqua, la LST media nelle zone rurali è stata 23°C, mentre nelle aree urbane si riscontrano picchi di circa 5°C superiori. Le temperature misurate dal satellite Aqua, acquisiti tra l'01:00 e le 03:00, sono inferiori a quelli di Terra, acquisiti tra le 21:00 e le 23:00, a seguito del raffreddamento notturno. I risultati ottenuti per Terra ed Aqua si sono dimostrati comunque simili, confermando che le aree più calde restano tali in entrambe le fasce orarie. È stato quindi verificato che la matrice R di trasformazione per il downscaling a 30m delle immagini Modis sia sostanzialmente stabile nel tempo, a meno di consistenti variazioni dell'uso del suolo. Sono state confrontate le due matrici R relative alle due immagini Landsat-8 notturne del 2015 e 2018. La verifica ha dimostrato che le differenze degli elementi  $R_{ij}$  sono molto piccole (inferiori a 0.05) sulla totalità dell'area urbana (ove si sviluppano le UHI), mentre differenze di poco superiori si riscontrano nelle zone non urbanizzate, dove i dati termici acquisiti a tre anni di distanza catturano variazioni dell'uso del suolo. Quindi il downscaling dei MODIS tramite le due Landsat notturne è sostanzialmente equivalente ai fini della mappatura delle UHI, ovvero produce gli stessi risultati. Dunque la risposta termica del suolo, quando non siano sopravvenuti cambiamenti di uso, è sostanzialmente stabile nel tempo. Altra considerazione riguarda la comparazione delle mappe di anomalia termica ottenute dalle LST medie da dati Terra e Aqua. Nonostante le due mappe siano state generate da due dataset diversi, in orari diversi (21:00 – 23:00 Terra e 01:00 – 03:00 Aqua) e con valori medi LST lievemente più "freddi" per Aqua, si è riscontrata la completa coerenza tra le due mappe.

A ulteriore riprova della robustezza della procedura, anche il confronto tra la mappa media dai dati 2015 e un dato acquisito durante l'ondata di calore dell'estate 2018 (01.08.2018), mostra la stessa distribuzione termica.

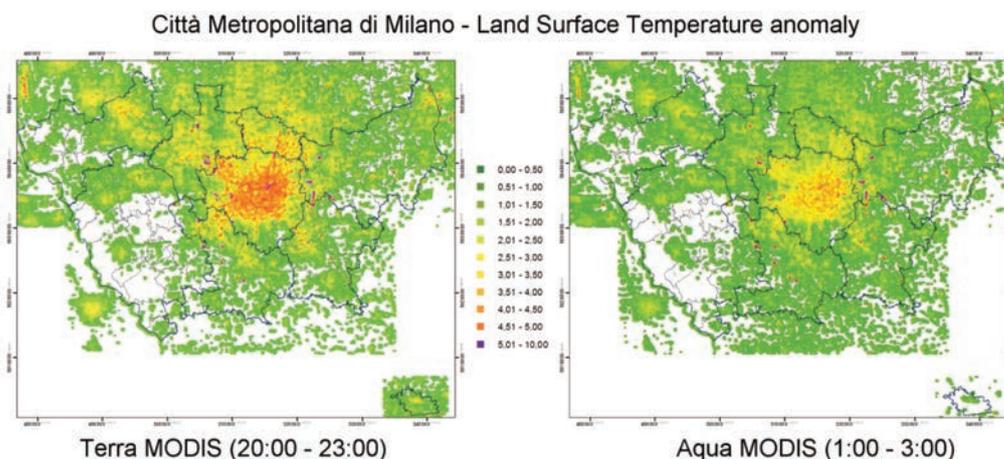


Figura 4 - Anomalie termiche notturne sull'area della CMM osservate da satellite

### Produzione Mappe di Rischio e Vulnerabilità da Anomalie Termiche

Obiettivo di questo task del progetto è stato il calcolo dell'indice di rischio della popolazione vulnerabile esposta alle anomalie termiche durante le ondate di calore estivo. L'intensa onda di calore che ha colpito l'Europa nel 2003, ha avuto letali conseguenze specialmente in Francia, con un incremento di mortalità del 40% nei piccoli centri sino a 80% a Lione e 141% a Parigi (Vandentorren et al., 2004). Un'analogica onda di calore sulla costa occidentale degli U.S.A. causò l'incremento di mortalità del 150% a New York (Kalkstein et al., 2008). All'interno del progetto i dati in input utilizzati sono stati la mappa delle anomalie termiche notturne (nelle UHI 2015-18); le Carte Tecniche Regionali della Regione Lombardia (rilascio DBT 2017) e dati ISTAT del censimento 2011.

Il rischio termico è stato calcolato come funzione della *minaccia* – ovvero il verificarsi dell'evento termico estremo – e della vulnerabilità della popolazione:

$$iR = iM \times iV$$

dove  $iM$  è l'indice di minaccia e  $iV$  è l'indice di vulnerabilità.

$iM$  ed  $iV$  sono stati calcolati normalizzando le misure nell'unità di superficie rispetto al valore massimo nell'area di riferimento.  $iR$ ,  $iM$  ed  $iV$  hanno dunque valore in relazione all'area di riferimento per la quale sono stati calcolati, ovvero alla macroscale dell'intera CMM e a livello dei singoli comuni.

Il calcolo dell'indice di minaccia  $iM$  è stato eseguito per ogni pixel: il differenziale della temperatura viene normalizzato per il valore più alto dei pixel nell'area di riferimento (CMM o comune). Si ottiene così un indice (con valori tra 0 ad 1), che relativizza il rischio rispetto alla minaccia massima.

La vulnerabilità in assoluto è la differenza tra le caratteristiche che indeboliscono e quelle che permettono di resistere a una data minaccia. Nel caso in analisi, si calcola la vulnerabilità della popolazione, attraverso i dati del censimento del 2011, spazializzati a livello di sezioni di censimento. Tra le informazioni disponibili sono state prese in considerazione: E2-Edifici e complessi di edifici utilizzati; E3-Edifici ad uso residenziale; E16-Edifici residenziali costruiti dopo il 2005; P1-Popolazione residente totale; P14-Popolazione res. età <5 anni; P15-Popolazione res. età 5-9 anni; P28-Popol. res. età 70-74 anni; P29-Popol. Res. età >74 anni. Come elementi di debolezza si è presa in considerazione la popolazione costituita da bambini e anziani

(P14, P15, P28, P29). Si è calcolato per ogni sezione di censimento la densità della popolazione vulnerabile (in numero di abitanti/kmq). Non è stato possibile considerare come fattore di resistenza gli edifici più recenti (E16), in effetti a efficienza energetica superiore rispetto all'edificato precedente, in quanto non è presente una statistica che indichi quanta parte della popolazione sensibile viva in questi edifici. Altre informazioni più di natura socio-economica, come il reddito o il livello di occupazione, pur essendo fattori di resistenza, sono spazializzate solo a livello comunale.

Per il calcolo dell'indice di rischio si è utilizzato il metodo di ottimizzazione data clustering "Natural Breaks" (Jenks), a 5 classi, che riduce al minimo la varianza interna a ciascuna classe (rende gli elementi interni il più possibile simili) e massimizza la varianza tra le classi (rende le classi il più diverse possibili). In questo modo, sono state individuate le aree più omogenee possibili per ogni classe di rischio. I prodotti realizzati, a livello CMM e comuni, sono stati:

- Indice di vulnerabilità della popolazione residente alle anomalie termiche
- Indice di rischio della popolazione residente alle anomalie termiche

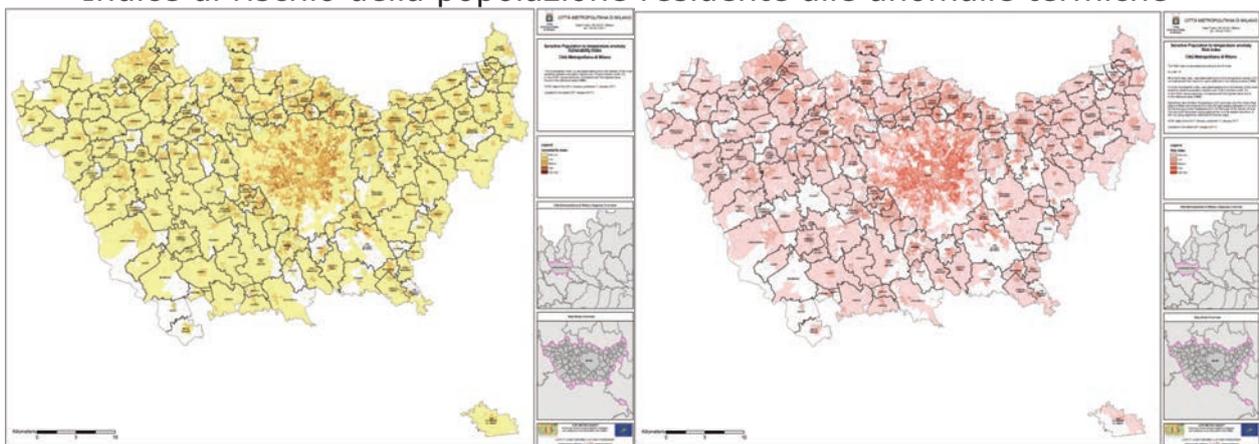


Figura 5 - Popolazione Sensibile alle anomalie di temperatura: Indice di Vulnerabilità (sinistra) ed Indice di Rischio (destra)

### La procedura automatica e-GEOS di produzione Mappe termiche

E' stata sviluppata una procedura semiautomatica per la generazione delle mappe delle anomalie termiche nelle zone urbane, a partire dalla definizione dell'area e del periodo di interesse. Questa consta di tre catene di processing:

- una che ha come input il dato MODIS, seleziona le date corrispondenti alle ondate di calore e i valori di LST che hanno un'incertezza < 1 Kelvin;
- la seconda ha come input il dato Landsat 8 diurno e notturno, per la stima dell'emissività e della LST a 30 metri di risoluzione;
- l'ultima opera il downscaling e il calcolo della mappa di anomalia.

Si rendono ovviamente necessari controlli di qualità intermedi sulle mappe LST MODIS in quanto la procedura per la selezione automatica delle date relative alle ondate di calore non tiene conto di possibili fenomeni perturbativi dovuti alla presenza di vento. Nell'immagine che segue viene riportato il workflow del codice sviluppato per la generazione delle mappe delle anomalie termiche. Per i dettagli di processing si veda i paragrafi precedenti.

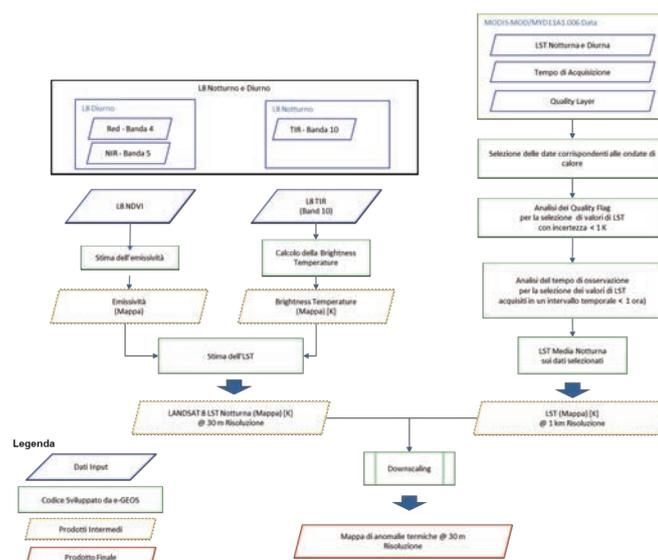


Figura 6 – Processing sviluppato per la generazione semiautomatica delle mappe

## Conclusioni e prospettive

Allo scopo di generare e commercializzare su richiesta Mappe di Anomalie Termiche e di Vulnerabilità della popolazione alle onde di calore urbano, e-GEOS ha realizzato una specifica APP che gestisce la richiesta on demand. La APP permette, attraverso la zonizzazione del territorio in isole di calore urbano, definire quali siano le aree a diverso grado di priorità di intervento di adattamento climatico. Quest'analisi è fondamentale per individuare le aree maggiormente indicate per ricevere benefici, in termini di adattamento agli effetti dell'onda di calore, per esempio dall'installazione di tetti verdi o pavimentazione drenanti o rivestimenti freddi.

## Riferimenti bibliografici

Avdan U. and G. Jovanovska (2006), "Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data", *Journal of Sensors*, Volume 2016, Article ID 1480307, 8 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1480307>

Dousset, B., Gourmelon, F., et al. (2011), "Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area", *International Journal of Climatology*, 31(2), 313–323.

Nichol, J. (2009), "An emissivity modulation method for spatial enhancement of thermal satellite images in urban heat island analysis", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(5), 547–556.

Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., Paolini, L., (2004), "Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5", *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434–440.

Stathopoulou, M., & Cartalis, C. (2007), "Daytime urban heat islands from Landsat ETM and Corinelandcover data: An application to major cities in Greece", *Solar Energy* 81, 358–368.

Vandentorren S, Suzan F, Medina S, Pascal S, Maulpoix A, Cohen JC, Ledrans M., (2004), "Mortality in 13 French Cities during the August 2003 heat wave", *American Journal of Public Health* 94: 1518–1520.

Weng, Q.; Fu, P.; Gao, F. "Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data", *Remote Sens. Environ.*, 145, 55–67.