

# Integrazione di dati Landsat e MODIS per la stima dell'evapotraspirazione reale in aree disomogenee

Marta Chiesi<sup>(a)</sup>, Angeli Luca<sup>(b)</sup>, Battista Piero<sup>(a)</sup>, Fibbi Luca<sup>(a)</sup>,  
Gardin Lorenzo<sup>(a)</sup>, Magno Ramona<sup>(a)</sup>, Pieri Maurizio<sup>(a)</sup>, Rapi Bernardo<sup>(a)</sup>,  
Romani Maurizio<sup>(a)</sup>, Sabatini Francesco<sup>(a)</sup>, Maselli Fabio<sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Biometeorologia, via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI), tel. 055 52260203, m.chiesi@ibimet.cnr.it

<sup>(b)</sup> Consorzio LaMMA, via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino, tel. 055 448301

## Introduzione

L'evapotraspirazione reale ( $ET_A$ ) è una delle principali componenti del ciclo dell'acqua la cui stima è fondamentale per gestire le risorse idriche soprattutto in campo agricolo. Questa variabile assume sempre più un'importanza cruciale in conseguenza dei cambiamenti climatici in atto. Le metodologie basate sull'uso delle immagini satellitari sono sicuramente promettenti perché consentono un'analisi sinottica del territorio con risoluzioni spazio-temporali adeguate; tra queste, il metodo NDVI-Cws è basato sull'uso di immagini NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e di dati meteorologici per la stima dell' $ET_A$  su superfici vegetate (Maselli et al., 2014). L'accuratezza che è possibile raggiungere dipende dalla tipologia dei dati di input disponibili; in particolare, in ambiente mediterraneo, spesso caratterizzato da elevata frammentazione ed eterogeneità, è necessario disporre di tecniche di integrazione di dati satellitari per ottenere immagini NDVI con alto dettaglio spazio-temporale. Si propone quindi l'utilizzo di un metodo, SEVIS (Spatial Enhancer of Vegetation index Image Series), recentemente proposto per integrare dati MODIS, la cui risoluzione temporale consente di seguire le dinamiche della vegetazione, con dati Landsat, il cui dettaglio spaziale è utile nelle zone frammentate (Maselli et al., 2018).

L'obiettivo del lavoro è quindi mostrare i risultati di un'applicazione del metodo NDVI-Cws utilizzando un dataset NDVI alla risoluzione spaziale del Landsat e temporale del MODIS per un'area a copertura erbacea, caratterizzata da forte disomogeneità, situata in una zona peri-urbana della città di Firenze.

## Area di studio

Lo studio è stato condotto all'interno del Parco delle Cascine, la principale area verde della città di Firenze (Figura 1). Il parco, che si estende complessivamente su una superficie di circa 150 ha, si trova lungo il fiume Arno, a circa 40 m s.l.m.. Il clima è sub-umido, con pioggia annua di circa 800 mm e temperatura media di 15.7 °C. La vegetazione è caratterizzata dalla prevalenza di latifoglie decidue, affiancate a sempreverdi, prati e, almeno in parte, anche a zone coltivate. Il suolo, che ha una tessitura franco-argillo-sabbiosa (52% di sabbia, con 24% di limo e 24% argilla), è abbastanza profondo (>2 m).



Figura 1 – Ortofoto del 2007 che mostra il parco delle Cascine (delimitato dalla linea rossa) e la posizione della stazione agrometeorologica ( $43.7854^{\circ}$  N,  $11.2183^{\circ}$  E) indicata dal quadrato nero e rosso.

### Dati di studio

All'interno del parco, in un campo di circa 0.15 ha, è stata installata una stazione agrometeorologica (Figura 1;  $43.7854^{\circ}$  N,  $11.2183^{\circ}$  E) che ha raccolto dati meteorologici giornalieri (temperatura minima e massima, precipitazione e radiazione solare) da luglio 2008 fino a febbraio 2013. Presso la stazione, è stato poi misurato, per lo stesso periodo, il contenuto idrico del suolo (SWC) a 0.2 m di profondità.

Ventitré immagini MODIS NDVI a bassa risoluzione spaziale (LR; 250 m) (<http://lpdaac.usgs.gov>; prodotto MOD13Q1-MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m Grid SIN) sono state ottenute per l'anno 2009. La scelta di questo anno è giustificata dal fatto che le immagini a più alta risoluzione spaziale disponibili per l'area sono riferite a tale anno. Sono quindi state scaricate dal sito USGS due immagini Landsat ad alta risoluzione spaziale (HR; 30 m): la prima è una Landsat 7 ETM+ del 10/04/2009, l'altra è una Landsat 5 TM del 29/07/2009. Entrambe le immagini sono prive di effetti di disturbo legati all'atmosfera e/o degradazione del sensore.

### Stima dell'evapotraspirazione reale

Valori di  $ET_A$  usate come riferimento sono stati ottenuti applicando un miglioramento del metodo classico basato sul concetto di coefficiente colturale,  $K_c$  (Allen et al., 1998; Chiesi et al., 2018). Successivamente, i dati satellitari sono stati utilizzati per la stima dell'  $ET_A$  mediante il metodo NDVI-Cws (Maselli et al., 2014). In particolare il profilo NDVI impiegato è stato derivato sia dalle immagini MODIS che da immagini ottenute integrando dati MODIS con dati

Landsat, al fine di migliorarne il dettaglio spaziale. L'efficacia del miglioramento è stata valutata sulla base del confronto con i valori di  $ET_A$  determinati da misure a terra. Brevemente si riportano i principali passaggi metodologici necessari a derivare l'evapotraspirazione utilizzando dati a terra e dati telerilevati.

### $ET_A$ da misure a terra

Il metodo classico proposto dalla FAO per la stima dell' $ET_A$  è basato sull'uso di coefficienti colturali ( $K_c$ ) (Allen et al., 2005), variabili a seconda dello sviluppo fenologico della coltura; tale metodo prevede che l'evapotraspirazione giornaliera possa essere calcolata come:

$$ET_{Ai} = ET_{0i} K_{ci} K_{si} \quad [1]$$

dove l'evapotraspirazione potenziale  $ET_0$  è stimata come proposto da Jensen e Heise (1963) e  $K_{ci}$  è il coefficiente colturale dello stesso giorno generalmente determinato con metodi semi-empirici (nella corrente applicazione varia tra un minimo di 0.6 ad inizio e fine stagione, e 1.2 durante la fase centrale). Il coefficiente legato allo stress idrico,  $K_s$ , è teoricamente derivabile dalle misure di SWC, ma la relazione tra SWC e traspirazione è comunque complessa; a ciò vanno aggiunte le difficoltà nel reperire misure di SWC sufficientemente rappresentative delle condizioni della vegetazione (es. misure raccolte a profondità diverse e in punti diversi del campo). È stato pertanto proposto un metodo per trasformare SWC in un indicatore dell'evapotraspirazione relativa, assumendo una relazione lineare tra le due variabili. Maggiori dettagli riguardanti la modalità con cui viene derivato il coefficiente  $K_s$  sono disponibili in Chiesi et al. (2018).

### $ET_A$ da dati satellitari

Il metodo NDVI-Cws prevede la stima dell'evapotraspirazione separando il contributo di evaporazione dal suolo e traspirazione della vegetazione, attraverso l'impiego del concetto di Fractional Vegetation Cover (FVC):

$$ET_{Ai} = ET_{0i} [FVC_i K_{cveg} Cws_i + (1-FVC_i) K_{csoil} AW_i] \quad [2]$$

dove  $ET_0$  è ottenuta come sopra, FVC è linearmente derivata dalle immagini NDVI (Gutman e Ignatov, 1998), mentre Cws e AW sono due coefficienti scalari che tengono conto dello stress idrico; tutto è riferito al giorno  $i$ .  $K_{cveg}$  e  $K_{csoil}$  corrispondono invece rispettivamente al coefficiente colturale massimo della vegetazione e del suolo (Maselli et al., 2014).

Il metodo viene guidato con i dati meteo disponibili e con le immagini NDVI opportunamente processate per ottenere il dettaglio spazio-temporale adeguato. Punto di partenza è il profilo NDVI direttamente ottenuto estraendo il valore del pixel a 250 m di risoluzione spaziale dalle 23 immagini MODIS, corrispondente alla stazione di misura. Successivamente è stato applicato il metodo di integrazione proposto da Maselli et al. (2016; 2018), che si basa sui seguenti step principali: i) applicazione dell'algoritmo SMACC (Gruninger et al. 2004) alle immagini LR multitemporali per identificare gli NDVI endmembers dei tipi di vegetazione con sviluppo fenologico uniforme e le relative immagini di abbondanza; ii) miglioramento spaziale di queste immagini di abbondanza, ottenuto con una classificazione fuzzy delle immagini ad alta risoluzione disponibili; iii) ricomposizione degli endmembers NDVI e delle immagini di

abbondanza migliorate spazialmente per produrre immagini sintetiche HR. L'applicazione di questo metodo ha quindi prodotto 23 immagini con migliorata risoluzione spaziale dalle quali è stato estratto un nuovo profilo NDVI. Tutti i dati sono stati interpolati giornalmente, trasformati in FVC ed usati per stimare l'evapotraspirazione reale.

Il confronto tra l' $ET_A$  derivata da misure a terra e le stime di  $ET_A$  ottenute usando i diversi dataset di NDVI è stato effettuato mediante l'uso di classiche statistiche di accuratezza (coefficiente di determinazione,  $r^2$ , ed errore quadratico medio, RMSE).

## Risultati

L'andamento meteorologico del 2009 è tipico di un ambiente mediterraneo, con piogge moderate (760 mm) e con un'intensa siccità estiva (40 giorni con temperature massime superiori a 34 °C). La  $ET_0$  stimata presenta valori massimi intorno a 8 mm in corrispondenza del periodo estivo e, complessivamente, è circa 1100 mm. Dalla combinazione tra l' $ET_0$  e le misure di SWC prese come indicazione dello stress idrico, si ottiene il profilo di  $ET_A$  utilizzato come riferimento mostrato in Figura 2.

La vegetazione locale quindi è soggetta ad un periodo di stress idrico da luglio a settembre che solo parzialmente si riflette sull'andamento del profilo NDVI estratto dalle immagini MODIS originali (Figure 3). Le variazioni annue sono ridotte tra 0.4 e 0.6, con una leggera riduzione durante il periodo estivo; solo integrando i dati MODIS con i dati Landsat a più alta risoluzione spaziale mediante il metodo SEVIS, si ottiene un profilo NDVI maggiormente descrittivo del reale comportamento delle specie erbacee, la cui risposta alla siccità estiva è più marcata di quanto stimato (si raggiungono infatti valori minimi di 0.3).

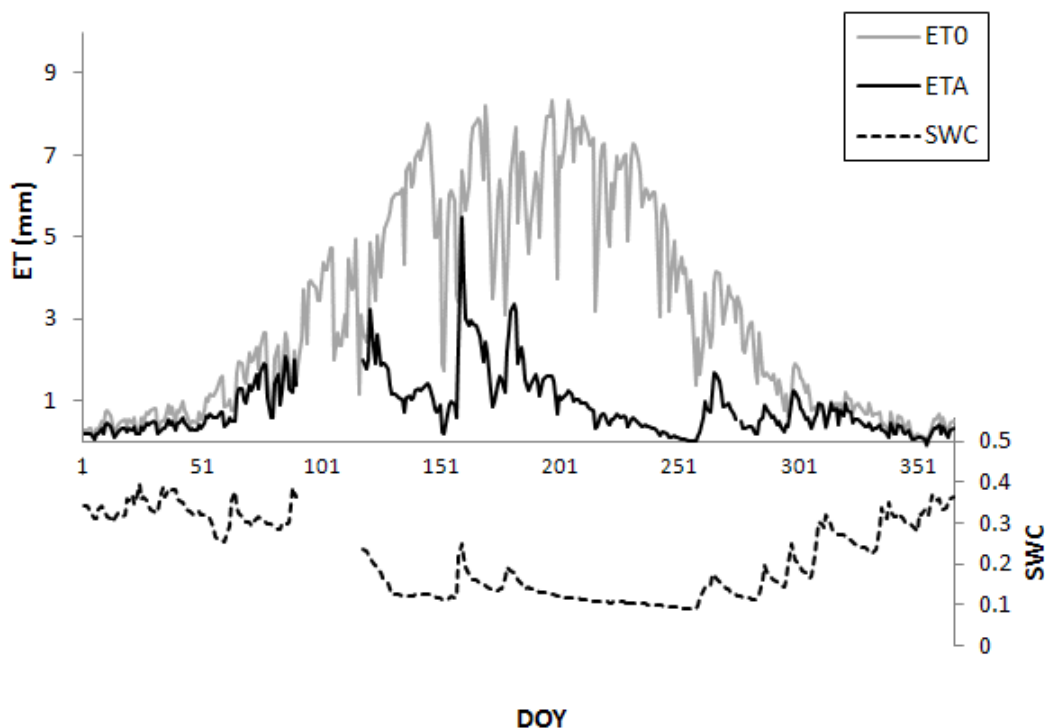


Figura 2 – Andamento di  $ET_0$  ed  $ET_A$  ottenuta usando le misure di SWC (linea tratteggiata) come indicazione di stress idrico. Dati relativi al 2009.

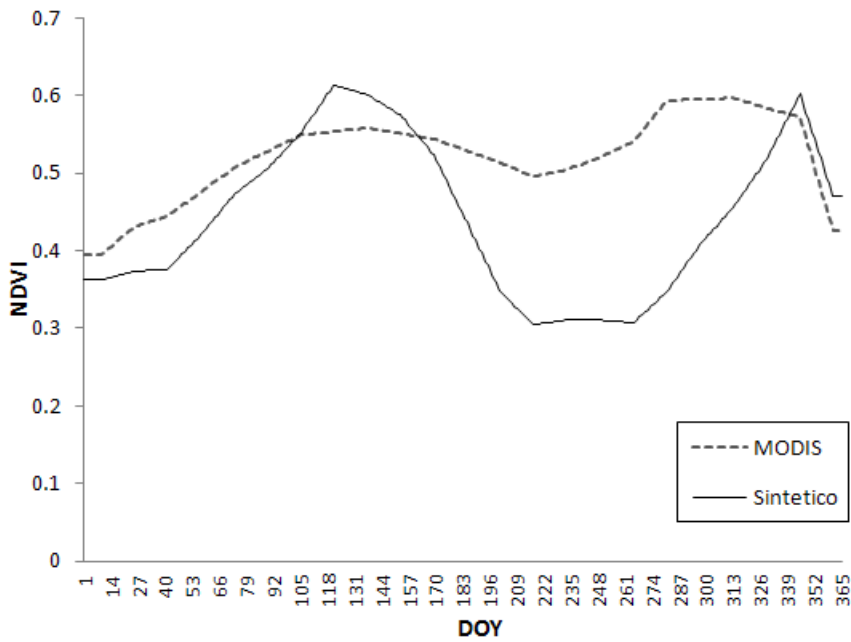


Figura 3 – Andamento giornaliero dell' NDVI ottenuto dalle immagini MODIS del 2009 e ricostruito integrando le immagini MODIS e Landsat mediante il metodo SEVIS.

L'utilizzo di questi due datasets ha prodotto l' $ET_A$  riportata in Figura 4. Le maggiori differenze si concentrano ovviamente durante il periodo in cui la vegetazione è soggetta a maggiore stress idrico, ovvero tra giugno ed ottobre. Da un punto di vista numerico il miglioramento dovuto all'impiego del dataset sintetico corrisponde a circa il 13% di varianza spiegata in più e ad una riduzione dell'errore (RMSE) che passa da 0.78 mm a 0.54 mm.

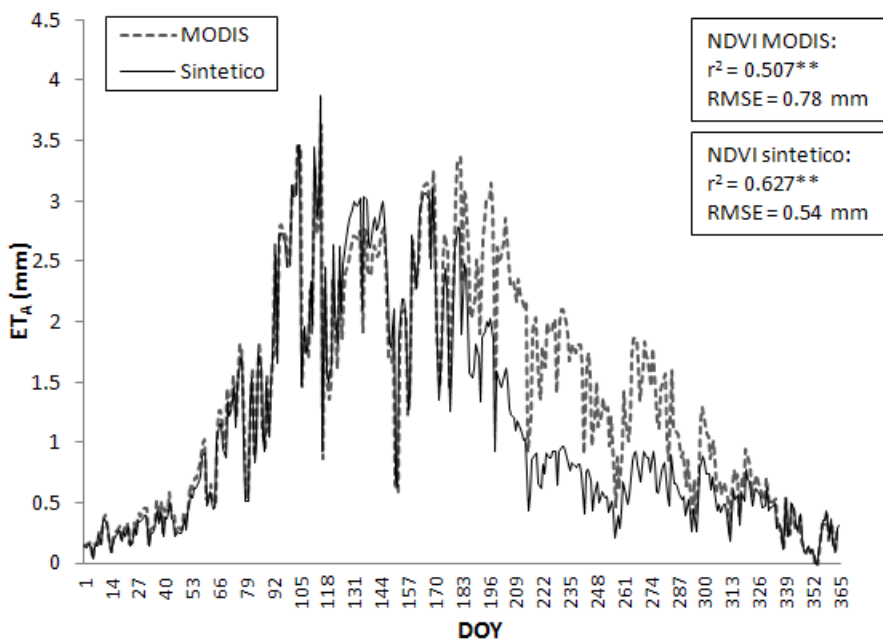


Figura 4 – Andamento giornaliero dell'  $ET_A$  stimata applicando il metodo NDVI-Cws inizializzato con il profilo NDVI ottenuto dalle immagini MODIS e con quello ricostruito integrando dati MODIS e Landsat (\*\* = correlazione altamente significativa,  $P < 0.01$ ).

## Conclusioni

L'applicazione presentata riguarda la combinazione di due metodi, NDVI-Cws e SEVIS, per la stima dell'evapotraspirazione reale in un ambiente particolarmente frammentato come il parco urbano delle Cascine di Firenze.

La possibilità di disporre di valori di  $ET_A$  di riferimento ottenuti con una variante del metodo classico che usa dati di SWC come indicatori dello stress idrico ha consentito di valutare l'effetto dell'introduzione di un dataset sintetico per stimare l'evapotraspirazione in una zona altamente frammentata come un parco urbano. L'uso del SEVIS in particolare, si è mostrato efficace nel riprodurre le variazioni a carico della vegetazione sulla base di una coppia di immagini ad alta risoluzione spaziale, permettendo di migliorare le stime di evapotraspirazione reale.

Risultati simili sono previsti anche per tutte le aree caratterizzate da alta frammentazione, tipiche dell'ambiente mediterraneo.

## Riferimenti bibliografici

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., (1998), "Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper 56". FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 300 pp.

Allen R.G., Pereira L.S., Smith M., Raes D., Wright J.L. (2005), "FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1): 2-13.

Chiesi M., Battista P., Fibbi L., Gardin L., Pieri M., Rapi B., Romani M., Maselli F. (2018), "A semi-empirical method to estimate actual evapotranspiration in Mediterranean environments", *Advances in Meteorology*, submitted.

Gruninger J., Ratkowski A.J., Hoke M.L. (2004), "The Sequential Maximum Angle Convex Cone (SMACC) endmember model", in Proc. SPIE, Algorithms for multispectral and hyper-spectral and ultraspectral imagery, 5425-1, Orlando FL, Aug. 2004.

Gutman G., Ignatov A. (1998), "The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models", *International Journal of Remote Sensing*, 19: 1533-1543.

Jensen M.E., Haise H.R. (1963), "Estimating evapotranspiration from solar radiation", *Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE*, 89: 15-41.

Maselli F., Chiesi M., Angeli L., Papale D., Seufert G. (2014), "Operational monitoring of daily evapotranspiration by the combination of MODIS NDVI and ground meteorological data: Application and evaluation in Central Italy", *Remote Sensing of Environment*, 152: 279-290.

Maselli F., Chiesi M., Pieri M. (2016), "A novel method to produce NDVI image series with enhanced spatial properties", *European Journal of Remote Sensing*, 49: 171-184.

Maselli F., Chiesi M., Pieri M. (2018), "A new method to enhance the spatial properties of multitemporal NDVI image series", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, in revision.