

## **Integrazione di dati ottici e radar per la mappatura delle aree bruciate in foreste mediterranee**

Ramin Azar (\*), Daniela Stroppiana (\*\*), Mirco Boschetti (\*\*), Pietro A. Brivio (\*\*), Antonio Pepe (\*\*\*), Fabiana Calò (\*\*\*), João M. N. Silva (\*\*\*\*), e Riccardo Lanari(\*\*\*\*)

(\*) Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture Viarie, Rilevamento (DIAAR), Piazza L. da Vinci, 32, Milano, Italy, ramin.azar@yahoo.com

(\*\*) Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Via Bassini 15, 20133 Milano, Italy, +39 (0) 23699 297, +39 (0) 23699 300,

stroppiana.d@irea.cnr.it, boschetti.m@irea.cnr.it, brivio.pa@irea.cnr.it

(\*\*\*) Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Via Diocleziano 328 - 80124 Napoli, pepe.a@irea.cnr.it, calo.f@irea.cnr.it, imperatore.p@irea.cnr.it, lanari.r@irea.cnr.it

(\*\*\*\*) University of Lisbon, School of Agriculture, Forest Research Centre, Lisboa, Portugal, joaosilva@isa.utl.pt

### **Riassunto**

Nell'ambito del nostro lavoro di ricerca abbiamo proposto un metodo per la mappatura delle aree percorse da incendio (aree bruciate) a partire dalle immagini satellitari NASA Landsat TM/ETM+. Questo metodo si basa sull'utilizzo di indici spettrali derivati dalle bande visibile, infrarosso vicino e medio del sensore TM/ETM+, e sulla teoria degli insiemi *fuzzy* per l'interpretazione e l'integrazione del contributo degli indici. Il metodo è stato sviluppato e testato in ambito Mediterraneo e ha prodotto risultati soddisfacenti in termini di accuratezza delle mappe delle aree bruciate. Dal momento che il metodo sviluppato è flessibile ed aperto all'integrazione di dati provenienti da diverse fonti e/o sensori, in questo contributo presentiamo i risultati preliminari dell'integrazione di dati ENVISAT SAR (*Synthetic Aperture Radar*) nell'algoritmo *fuzzy*. Su un'area test in Portogallo abbiamo acquisito e processato due scene SAR per ottenere la differenza di ampiezza ( $\Delta\sigma^0$ ) tra due date; abbiamo condotto un'analisi statistica della variazione di  $\Delta\sigma^0$  in funzione della superficie osservata (bruciato, non bruciato, urbano, acqua) e analizzato la separabilità tra le diverse classi. Infine, il contributo di  $\Delta\sigma^0$  è stato introdotto nell'algoritmo *fuzzy* delle aree bruciate per evidenziare il miglioramento dell'accuratezza rispetto al risultato ottenuto con il solo utilizzo dei dati satellitari ottici Landsat TM.

### **Abstract**

In our research work we proposed a method for mapping burned areas from images acquired by the NASA Landsat TM/ETM+ sensor. This method relies on the use of spectra indices derived from the visible, near infrared and middle infrared bands of the TM/ETM+ sensor and on the fuzzy set theory for the interpretation and the integration of the contribution brought by the indices. Since the proposed method is flexible and open to data coming from different sources and/or sensors, we tested the contribution of ENVISAT SAR (*Synthetic Aperture Radar*) data for burned area mapping. Over a study area in Portugal, we acquired and processed two SAR scenes to derive the amplitude difference ( $\Delta\sigma^0$ ) between two dates. On the difference image we carried out statistical analyses over different surfaces (burned areas, unburned vegetation, water and urban areas) and computed the separability between the classes. Finally, the contribution of  $\Delta\sigma^0$  has been introduced in the fuzzy burned area algorithm to highlight the improvement in mapping accuracy.

## Introduzione

Gli incendi boschivi sono un fenomeno che impatta significativamente sugli ecosistemi dell'Europa meridionale (Italia, Francia, Spagna, Portogallo e Grecia) durante la stagione estiva. Questi paesi hanno quindi la necessità di implementare sistemi di monitoraggio per prevenire e combattere il fenomeno degli incendi boschivi (Chuvieco, 1997; Paganini et al., 2003). I dati da satellite possono fornire informazioni fondamentali e uniche a scala regionale sullo stato della vegetazione (condizioni di stress prima dell'incendio e propagazione dell'incendio) ed essere parte integrante di un sistema di monitoraggio insieme ai più tradizionali rilievi a terra e da aereo. Le immagini da satellite, infatti, possono fornire dati spazialmente distribuiti e con un'alta frequenza temporale (molte acquisizioni durante la stagione) rispetto, per esempio, ai più costosi rilievi a terra. Date le caratteristiche degli ecosistemi naturali in ambiente Mediterraneo (frammentazione ed eterogeneità delle coperture del suolo), i dati satellitari ad alta e media risoluzione spaziale sono i più adatti per la mappatura delle aree bruciate (Chuvieco et al., 2002). In particolare, i dati Landsat TM/ETM+ sono stati largamente utilizzati (Koutsias and Karteris, 1998; Bastarrika et al., 2011; Mitri and Gitas, 2004) soprattutto grazie all'opportunità offerta da US Geological Survey (USGS) di accedere in modo libero agli archivi storici di dati. Nel nostro lavoro di ricerca abbiamo sviluppato un approccio per la mappatura delle aree bruciate in ambiente Mediterraneo a partire da dati satellitari a media risoluzione spaziale (Boschetti et al., 2010). Il metodo, affinato per l'utilizzo di dati Landsat TM/ETM+, si basa sull'utilizzo di indici spettrali e della teoria degli insiemi *fuzzy* (Stroppiana et al., 2012) e su un algoritmo di *region growing*; testato su una serie di immagini acquisite nel 2003 sul bacino del Mediterraneo ha dimostrato di poter produrre risultati accurati nell'identificazione delle aree percorse da incendio. A partire dall'approccio *fuzzy* sviluppato e basato sull'utilizzo di dati acquisiti da sensori ottici, abbiamo valutato la possibilità di introdurre informazioni derivate da sensori di tipo attivo (radar) che potessero ulteriormente migliorare le prestazioni dell'algoritmo per la mappatura delle aree bruciate. Il metodo è flessibile ed aperto all'introduzione di dati multi-sensore ed in particolare, in questo contributo, presentiamo i primi risultati delle analisi condotte per l'integrazione di dati ottici e radar su un'area di studio in Portogallo.

## Dati e metodi

Per un'area di studio localizzata nel Portogallo centrale è stata acquisita una scena Landsat TM (path/row 204/032) in data 12/08/2003 (figura 1a) dal sito USGS GloVis (<http://glovis.usgs.gov>). Il 2003 è stato un anno particolarmente negativo per i numerosi incendi che hanno interessato tutto il bacino del mediterraneo ed, in particolare, Portogallo e Grecia. L'immagine TM è stata processata per la correzione radiometrica ed atmosferica con il codice 6S (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum) (Vermote et al., 2002) per ottenere la riflettanza al suolo nelle sei bande del sensore TM (visibile, infrarosso vicino e medio).

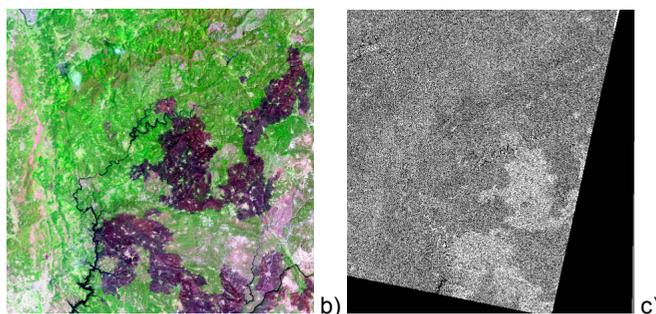


Figura 1. Il sito test in Portogallo per l'integrazione dei dati ottici (RGB 543) (a) e radar (b) nell'algoritmo fuzzy di mappatura delle aree bruciate.

Si sono, inoltre, analizzate due scene radar ad apertura sintetica (SAR) acquisite lungo orbite discendenti (track 452, frame 2796) sulla medesima area di studio (figura 1c) dal sensore ENVISAT/ASAR dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) il 21/03/2003 ed il 21/11/2003, rispettivamente. In particolare, le due immagini SAR messe a nostra disposizione rappresentano prodotti ESA standard di livello 1 (Image Mode Precision), forniti nel formato Single Look Complex (SLC) e proiettate lungo la direzione "ground range" ad una scala di risoluzione di 12.5 x 12.5 metri. Sui dati SAR si è effettuata un'operazione preliminare di multilook (utilizzando una finestra di 2 x 2 campioni) a cui hanno fatto seguito i passi di calibrazione e georeferenziazione, entrambi realizzati mediante il pacchetto software NEST dell'ESA. Infine, per rendere comparabili le scale di risoluzione delle immagini SAR e ottiche, le mappe SAR sono state ricampionate su una griglia a 30 metri rispetto al sistema di proiezione UTM-WGS84 (zona 29N). A valle dell'operazione di calibrazione si è quindi in grado di ottenere, per ogni pixel della scena SAR, una misura del coefficiente di backscattering (sigma naught  $\sigma_0$ ) del terreno.

A partire dalle due immagini di ampiezza ( $\sigma^0$ ), abbiamo prodotto l'immagine differenza tra le due date ( $\Delta\sigma^0_{\text{post-pre}}$ ): per ridurre ulteriormente lo speckle presente nelle immagini, queste ultime sono inoltre filtrate con il filtro di Lee Dal momento che l'area coperta dalle acquisizioni SAR copre solo una parte della scena TM, quest'ultima è stata ritagliata sull'area del *frame* del dato SAR.

L'immagine differenza ( $\Delta\sigma^0$ ) è stata analizzata per valutare la separabilità di diverse classi di copertura della superficie (aree bruciate, vegetazione non bruciata, aree urbane, suolo ed acqua). Per ciascuna classe considerata è stato estratto un campione di pixel dall'immagine Landsat TM tramite foto-interpretazione e con il supporto della mappa di copertura del suolo Corine Land Cover 2000 (CLC2000). La separabilità tra le classi è stata calcolata sulla base della formula:

$$s = |\mu_{i,b} - \mu_{i,u}| / \sigma_{i,b} - \sigma_{i,u} \quad (\text{Eq. 1})$$

dove  $\mu_{i,b}$  e  $\sigma_{i,b}$ ,  $\mu_{i,u}$  e  $\sigma_{i,u}$ , sono la media e deviazione standard dei campioni rappresentanti le superfici bruciate e non bruciate, rispettivamente.

Il metodo di mappatura delle aree bruciate si basa sull'utilizzo di indici spettrali e sulla teoria degli insiemi *fuzzy* per l'interpretazione e l'integrazione del contributo degli indici. Gli indici spettrali (Tabella 1) vengono interpretati come evidenza positiva e negativa di bruciato, integrati in un indice sintetico di evidenza di bruciato che viene successivamente implementato in un algoritmo di *region growing*. La mappa finale è informato *raster* in cui ogni pixel ha un valore nell'intervallo 0-1 che rappresenta il grado di appartenenza alla classe bruciato.

Tabella 1. Indici spettrali utilizzati nell'algoritmo per la mappatura delle aree bruciate.

| Nome                                   | Formula  | Riferimento            |
|--|--|------------------------|
| Normalized Difference Vegetation Index | $NDVI = \rho_4 - \rho_3 / \rho_4 + \rho_3$                                 | Rouse et al., 1973     |
| Normalized Burn Index                  | $NBR = \rho_4 - \rho_7 / \rho_4 + \rho_7$                                  | Key and Benson, 1999   |
| Normalized Burn Index 2                | $NBR2 = \rho_5 - \rho_7 / \rho_5 + \rho_7$                                 | Key and Benson, 1999   |
| Char Soil Index                        | $CSI = \rho_4 / \rho_5$  | Smith et al., 2005     |
| Mid-Infrared Burn Index                | $MIRBI = 10 * \rho_7 - 9.5 * \rho_5 + 2$                                   | Trigg and Flasse, 2001 |
| Soil Adjusted Vegetation Index         | $SAVI = (\rho_4 - \rho_3) (1 + L) / (\rho_4 + \rho_3 + L)$                 | Huete, 1988            |
| Enhanced Vegetation Index              | $EVI = G * (\rho_4 - \rho_3) / (\rho_4 + C_1 * \rho_3 - C_2 * \rho_1 + 1)$ | Huete, 2002            |
| Two-band EVI                           | $EVI = G * (\rho_4 - \rho_3) / (\rho_4 + C_3 * \rho_3 + 1)$                | Jiang et al., 2008     |

$\rho_i$  è la riflettanza nelle bande TM 1, 2, ... 7 e  $C1=6, C2=7.5, C3=2.4, G=2.5, L=0.5$

Il metodo è stato sviluppato per le immagini acquisite da sensori ottici a media risoluzione spaziale (Boschetti et al., 2010; Stroppiana et al., 2012) ma è flessibile ed aperto all'integrazione di dati provenienti da diverse fonti e/o sorgenti (Carrara et al., 2008). L'informazione portata da  $\Delta\sigma^0$  è stata interpretata in termini di evidenza di non bruciato (informazione negativa) (Stroppiana et al., 2011) ed integrata nell'algoritmo *fuzzy* con l'evidenza positiva e negativa portata dagli indici spettrali. Le funzioni *fuzzy* per gli indici derivati dall'immagine TM sono state mantenute come proposte da Stroppiana et al. (2012) e la funzione *fuzzy* di  $\Delta\sigma^0$  è stata definita come segue:

$$\begin{aligned} &\text{se } \Delta\sigma^0_{\text{post-pre}} < -0.1, f=1 \\ &\text{se } -0.1 \leq \Delta\sigma^0_{\text{post-pre}} < 2, f=0.95-0.48*\Delta\sigma^0_{\text{post-pre}} \\ &\text{se } \Delta\sigma^0_{\text{post-pre}} \geq 2, f=0 \end{aligned}$$

Sono state prodotte due mappe delle aree bruciate: una con il solo dato ottico TM e l'altra con entrambi i dati, ottici e radar, dove il contributo del radar è stato codificato come descritto sopra. L'accuratezza delle due mappe è stata valutata per confronto con i perimetri di riferimento delle aree bruciate per l'anno 2003 fornite da *Landsat based Fire Atlas of Portugal* (Pereira, J.M.C. e Santos, M.T.N., 2003, *Fire Risk and Burned Area Mapping in Portugal*. Direcção-Geral das Florestas, Lisboa).

## Risultati

La figura 2 presenta gli istogrammi dei valori di  $\Delta\sigma^0$  per le classi di copertura del suolo bruciato, vegetazione non bruciata, suolo, acqua ed urbano e le statistiche sono rappresentate come boxplot (figura 2b). I risultati evidenziano come l'ampiezza del segnale misurato dal sensore radar aumenti quando la superficie vegetata brucia rispetto alle classi che rimangono invariate (vegetazione, suolo, urbano). Nel boxplot di figura 2b la mediana della distribuzione della classe bruciato è infatti superiore a zero, valore che identifica superfici invariate tra due acquisizioni. La classe acqua presenta una sua variabilità intrinseca che ai fini del nostro lavoro è irrilevante in quanto queste aree possono essere mascherate a priori con una mappa di copertura del suolo perché non sono interessate da incendi.

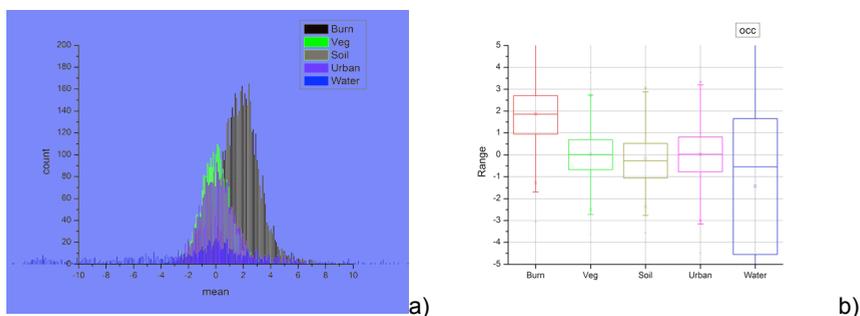


Figura 2. Istogramma di  $\Delta\sigma^0$  per le classi di copertura del suolo indicate in legenda (a) e le statistiche delle distribuzioni rappresentate come boxplot.

La tabella 2 presenta la separabilità calcolata tra le classi di copertura non bruciato (vegetazione, suolo, urbano e acqua) e la classe bruciato sulla base della metrica di Eq. 2. I risultati mettono in evidenza una buona separabilità tra le classi grazie alla variazione indotta sulla misura di ampiezza dal passaggio del fuoco sulle superfici vegetate. Dal momento che la classi bruciato e suolo hanno una separabilità alta, il contributo di  $\Delta\sigma^0$  è stato formalizzato come evidenza negativa (non bruciato) e come descritto nel paragrafo dei metodi.

Tabella 2. Separabilità tra la classe bruciato e le classi non bruciato, numerosità, media, deviazione standard e varianza di  $\Delta\sigma^0$  nel campione di ciascuna classe.

|             | N pixel | media    | Dev. std | Varianza | separabilità |
|-------------|---------|----------|----------|----------|--------------|
| Bruciato    | 5061    | 1.87     | 1.39809  | 1.95466  | 0            |
| Vegetazione | 2536    | 0.02828  | 1.0507   | 1.10397  | 0.753372     |
| Suolo       | 1158    | -0.16803 | 1.21559  | 1.47765  | 0.780953     |
| Urbano      | 2474    | 0.03161  | 1.25679  | 1.57953  | 0.693636     |
| Acqua       | 1342    | -1.43552 | 5.3975   | 29.1333  | 0.693636     |

La figura 3 presenta un esempio delle mappe prodotte dall'algoritmo *fuzzy* applicato con il solo dato TM (figura 3b) e con il contributo dell'informazione estratta dal dato SAR,  $\Delta\sigma^0$  (figura 3c). Questi risultati mostrano il contributo dell'informazione relativa alla variazione di ampiezza nella discriminazione tra aree bruciate e aree non bruciate coperte da vegetazione sparsa. L'utilizzo del solo dato ottico comporta un errore di commissione (aree ciano in figura 3b) che viene notevolmente ridotto con l'utilizzo dell'informazione di evidenza negativa introdotta dal dato SAR.

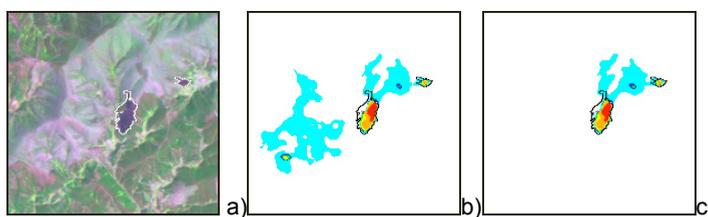


Figura 3. Per una finestra estratta dall'immagine TM visualizzata in falsi colori (RGB 543) (a) un esempio delle mappe delle aree bruciate prodotte con il solo dato ottico TM (b) e con l'integrazione dell'informazione estratta dai dati SAR,  $\Delta\sigma^0$  (c). La scala di colori rappresenta il grado di appartenenza fuzzy dell'indice sintetico prodotto dall'algoritmo: bianco (0.0-0.5), ciano (0.5-0.6), verde (0.6-0.7), giallo (0.7-0.8), arancione (0.8-0.9) e rosso (0.9-1.0). I poligoni di riferimento delle aree bruciate sono indicati dalla linea nera continua.

## Conclusioni

In questo lavoro proponiamo l'integrazione di dati ottici Landsat TM e radar ENVISAT SAR in un algoritmo *fuzzy* per la mappatura di aree bruciate in ambiente Mediterraneo. Due scene SAR sono state acquisite e processate su un'area di studio in Portogallo per derivare la differenza di ampiezza tra due date ( $\Delta\sigma^0$ ); l'analisi statistica ha messo in evidenza come per le aree vegetate che bruciano tra le due date l'ampiezza misurata dal sensore radar aumenti rispetto a superfici rimaste invariate (vegetazione non bruciata ed aree urbane). Nell'ambito dell'algoritmo *fuzzy* l'informazione ottenuta dal dato SAR è stata interpretata come evidenza negativa ed integrata all'evidenza sia positiva che negativa portata dal dato ottico TM. La mappa ottenuta dall'integrazione dei due tipi di dati ha un'accuratezza superiore rispetto quella ottenuta utilizzando solo il dato ottico soprattutto per quanto riguarda gli errori di commissione tra bruciato ed aree non bruciate coperte da vegetazione sparsa. Questi risultati preliminari sono incoraggianti per l'applicazione del metodo su altre aree test e con diverse formalizzazioni del contributo sia radar che ottico.

## Riferimenti bibliografici

- Bastarrika, A., Chuvieco, E., Pilar Martín, M., (2011). Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: balancing omission and commission errors. *Remote Sensing of Environment* 115 (4), 1003–1012.
- Boschetti, M., Stroppiana, D., Brivio, P.A., (2010). Mapping burned areas in a Mediterranean environment using soft integration of Spectral Indices from high-resolution satellite images. *Earth Interactions* 14 (17), 1–20.

- Carrara, P., Bordogna, G., Boschetti, M., Brivio, P.A., Nelson, A., Stroppiana, D., (2008). A flexible multi-source spatial-data fusion system for environmental status assessment at continental scale. *International Journal of Geographical Information Science* 22 (7), 781–799.
- Chuvieco, E., (1997). Remote sensing applications in forest fires. In: Balabanis, P., Eftichidis, G., Fantechi, R. (Eds.), *Forest Fire Risk and Management*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, pp. 193–207.
- Chuvieco, E., Martín, M.P., Palacios, A., (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discriminations. *International Journal of Remote Sensing* 23 (23), 5103–5110.
- Huete, A.R., (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25 (3), 295–309.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G., (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83 (1–2), 195–213.
- Jiang, Z., Huete, A., Didan, K., Miura, T., (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment* 112 (10), 3833–3845.
- Key, C.H., Benson, N.C., (1999). Measuring and remote sensing of burn severity. In: Neuenschwander, L.F., Ryan, K.C. (Eds.), *Proc. Joint Fire Science Conference and Workshop*, vol. II, Boise, ID, 15–17 June 1999. University of Idaho and International Association of Wildland Fire. 284 pp.
- Koutsias, N., Karteris, M., (1998). Logistic regression modelling of multitemporal Thematic Mapper data for burned area mapping. *International Journal of Remote Sensing* 19 (18), 3499–3514.
- Mitri, G.H., Gitas, I.Z., (2006). Fire type mapping using object-based classification of Ikonos imagery. *International Journal of Wildland Fire* 15 (4), 457–462.
- Paganini, M., Arino, O., Benvenuti, M., Cristaldi, M., Bordin, M., Coretti, C., Musone, A., (2003). ITALSCAR, a regional burned forest mapping demonstration project in Italy. *Proc. Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '03)*. IEEE 2, 1290–1292.
- Rouse J.W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., (1973) .Monitoring vegetation systems the Great Plains with ERTS. *Proc. 3rd ERTS Symposium*, NASA SP-351, vol. 1, 309–317.
- Smith, A.M.S., Wooster, M.J., Drake, N.A., Dipotso, F.M., Falkowski, M.J., Hudak, A.T., (2005). Testing the potential of multi-spectral remote sensing for retrospectively estimating fire severity in African savanna environments. *Remote Sensing of Environment* 97 (1), 92–115.
- Stroppiana, D., Bordogna, G., Boschetti, M., Carrara, P., Boschetti, L., Brivio, P.A., (2011). Positive and negative information for assessing and revising scores of burn evidence. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9 (3), 363–367.
- Stroppiana, D., G. Bordogna, P. Carrara, M. Boschetti, L. Boschetti, P.A. Brivio, (2012). A method for extracting burned areas from Landsat TM/ETM+ images by soft aggregation of multiple Spectral Indices and a region growing algorithm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 69, 88–102.
- Trigg, S., Flasse, S., (2001). An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub savanna. *International Journal of Remote Sensing* 22 (13), 2641–2647.
- Vermote E.F, Saleous N, Justice C.O, Kaufman Y.J, Privette J.L, Remer L, Roger J.C, Tanré, D., (2002). Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOSMODIS data over land surfaces: Background, operational algorithm, and validation”, *Journal of Geophysical Research*, 102 (D14): 17131–17141.