

## Delimitazione di aree boschive montane percorse dal fuoco mediante immagini satellitari ad alta risoluzione geometrica

De Matteo E<sup>(1)</sup>, Colombo R\*<sup>(1)</sup>, Meroni M<sup>(1)</sup>, Comini B<sup>(2)</sup>, Fracassi G<sup>(2)</sup>, Cavini L<sup>(2)</sup>, Olivieri M<sup>(3)</sup>, Deligios G<sup>(3)</sup>

(1) Laboratorio di Telerilevamento delle Dinamiche Ambientali, DISAT, Università Milano-Bicocca, Milano (Italy); (2) ERSAF - Struttura Gestione Forestale e Monitoraggio Ambientale, Gargnano (BS - Italy); (3) Corpo Forestale dello Stato, Comando Regionale, Milano (Italy) - \*Corresponding author: Roberto Colombo (roberto.colombo@unimib.it).

**Abstract:** *Delineation of burnt mountain forest areas by high-resolution satellite images.* In this paper we present a remote sensing technique, based on very high spatial resolution Quickbird satellite data, aimed to map burnt forested areas located in alpine environment hit by winter fires occurred in Lombardia Region in the 2005 year. Quickbird satellite images have a spatial resolution of 2.5 m and are characterized by 4 spectral bands covering the regions of blue, green, red and near infrared. Burnt areas were automatically extracted by using an object oriented classification combined with a connectivity algorithm developed with the aim to join burnt isolates pixel with the main body of the area hit by fire. The proposed algorithm is based on the exploitation of a Gaussian function that produces a degree of membership to be burnt for every pixel not classified as burnt by means of the preliminary automatic classification. The membership function is established on the base of the spatial distance and it decrease according the full width at half maximum of the Gaussian function. The produced maps have been compared with the burnt area boundaries obtained by means of field survey based on GPS measurements; this allowed us to estimate the goodness of the proposed method. The comparison between the results produced by the connectivity algorithm and the reference measured in ground showed high degrees of accuracy with errors ranging from 3 to 20%.

**Keywords:** Telerilevamento satellitare, Aree bruciate, Ambiente alpino, Perimetrazione GPS.

*Received: Apr 12, 2007 - Accepted: Jun 20, 2007.*

**Citation:** De Matteo E, Colombo R, Meroni M, Comini B, Fracassi G, Cavini L, Olivieri M, Deligios G, 2007. Delimitazione di aree boschive montane percorse dal fuoco mediante immagini satellitari ad alta risoluzione geometrica. *Forest@* 4 (3): 264-271. [online] URL: <http://www.sisef.it/>.

### Introduzione

Il telerilevamento è uno strumento di analisi che, nell'ambito della gestione del territorio e della conservazione della natura, fornisce una serie di informazioni distribuite nello spazio e ripetute nel tempo riguardanti alcune proprietà delle superfici indagate. L'idoneità del telerilevamento a misurare le radianze spettrali, provenienti dalle superfici a terra, le cui dimensioni possono variare da qualche metro fino all'intero globo, conferisce a questa disciplina la potenzialità di procurare informazioni quantitative aggiornate che non possono essere ottenute facilmente attraverso le analisi compiute a terra mediante tecniche convenzionali. Questa peculiarità del telerilevamento è evidente soprattutto nel compiere le analisi

sulla vegetazione laddove le misure di laboratorio, di campo e da satellite consentono di ottenere informazioni sullo stato dell'ecosistema partendo dai dati raccolti a livello di foglia, di *canopy* e di paesaggio. Il monitoraggio dello stato della vegetazione in seguito all'evenienza di un incendio è una delle attività in cui le tecniche di telerilevamento sono positivamente impiegate a supporto delle tecniche convenzionali di rilevamento a terra.

L'individuazione e la mappatura delle superfici percorse dal fuoco da telerilevamento si basa sul riconoscimento della risposta spettrale della vegetazione bruciata che è tipicamente differente rispetto a quella della superficie non bruciata. La formazione di ceneri al suolo, l'imbrunimento dei tronchi delle

piante, la distruzione della clorofilla, la variazione dell'indice di area fogliare, la diminuzione del contenuto idrico comportano, infatti, un marcato aumento della riflettività nella regione dell'infrarosso medio ed una diminuzione di riflettanza nella zona di transizione rosso - infrarosso vicino. A tal proposito numerosi studi hanno dimostrato che le tecniche di telerilevamento forniscono soddisfacenti risultati per la mappatura delle aree bruciate, sia per applicazioni a scala continentale e globale (Fredericksen et al. 1990, Kasischke & French 1995, Fernandez et al. 1997, Eva & Lambin 1998, Arino & Piccolini 2000, Barbosa et al. 2002, Gimeno et al. 2002, Boschetti et al. 2003, Stroppiana et al. 2003, Roman-Cuesta et al. 2005), sia per applicazioni a scala regionale e nazionale (Chirici & Corona 2005, Giannetti & Gottero 2003). Ciò nonostante, la bontà del riconoscimento automatico delle aree boschive percorse dal fuoco mediante immagini remote è dipendente da molti fattori per lo più legati alle caratteristiche del dataset impiegato (risoluzioni geometrica e spettrale, immagini mono e multitemporali, geometria di presa e illuminazione), alla tipologia e condizioni della copertura al momento dell'evento nonché dalla dinamica dell'incendio.

Gli incendi boschivi in Regione Lombardia interessano soprattutto zone montane, in aree ad orografia accidentata e/o con eterogeneità della copertura forestale. In queste condizioni l'incendio, una volta superata una certa superficie, tende a frazionarsi in lingue irregolari, lasciando frequenti aree incluse non bruciate. Questa distribuzione spaziale fortemente irregolare rende lungo e oneroso il rilevamento a terra tramite le tradizionali misure di perimetrazione che risultano pertanto essere affette da tempi di rilievo crescenti all'aumentare della superficie percorsa. Inoltre, in particolari situazioni, può accadere che il rilevatore non si avveda di aree incluse non incendiate che richiederebbero anche una dettagliata esplorazione dell'area interna all'incendio. Le immagini satellitari multispettrali ad alta risoluzione geometrica (pochi metri) consentono invece di avere una

generale vista di insieme dell'estensione dell'area percorsa dal fuoco, anche in aree fortemente accidentate quali quelle alpine, fornendo dettagli sufficienti per delimitare le aree percorse con una potenziale buona precisione. Precedenti studi hanno, infatti, candidato il telerilevamento satellitare ad alta risoluzione spaziale alla mappatura accurata delle superfici percorse dal fuoco nel caso in cui le dimensioni siano maggiori di 10 ettari (AA.VV. 2005). Dal punto di vista giuridico, inoltre, la perimetrazione delle superfici percorse dal fuoco per mezzo di sistemi di monitoraggio satellitare è stata riconosciuta, dalla legge quadro n° 353/2000, fondamentale per lo studio ed il contenimento del fenomeno degli incendi boschivi.

In questo studio, promosso dalla Regione Lombardia - Direzione Generale Agricoltura e Direzione Generale Protezione Civile, Prevenzione e Polizia Locale, è stata valutata la possibilità di perimetrare alcune aree boschive interessate da incendi invernali di grande estensione avvenuti sul territorio regionale nell'anno 2005, impiegando immagini satellitari ad alta risoluzione spaziale *Quickbird*. Il principale obiettivo dello studio è quello di individuare una robusta strategia di classificazione automatica delle aree percorse dal fuoco in ambiente alpino e di verificarne la sua accuratezza confrontando le mappe prodotte con i rilievi di dettaglio condotti a terra tramite misure *Global Positioning System* (GPS).

### Dataset impiegato

Le immagini satellitari *QuickBird* impiegate presentano una risoluzione spaziale pari a 2.5 m e sono costituite da 4 bande spettrali poste nelle regioni del blu, del verde, del rosso e dell'infrarosso vicino e da un canale pancromatico tra 450 - 900 nm. In Fig. 1 sono mostrate le aree percorse dal fuoco nelle tre aree indagate di Cerete (BG), Mello (SO) e Primaluna (LC), ben riconoscibili sulle sintesi RGB:432 delle immagini satellitari.

Oltre alla superficie desunta dalle schede Anti In-

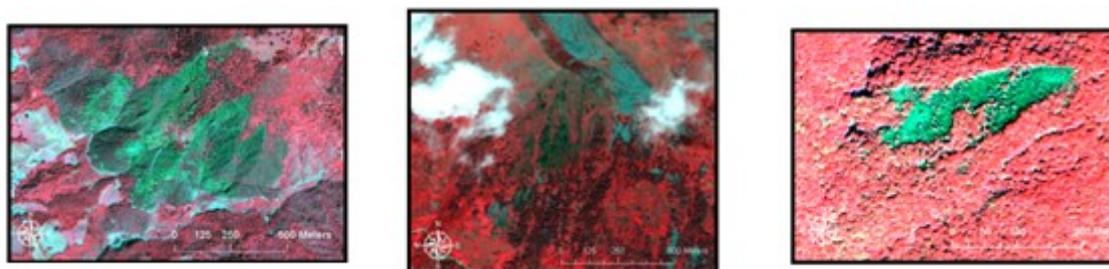


Fig. 1 - Rappresentazione delle aree bruciate degli incendi di Cerete (BG), Mello (SO) e Primaluna (LC) a sinistra, al centro e a destra rispettivamente.

Tab. 1 - Caratteristiche degli incendi analizzati

Località	Data evento	Data passaggio satellitare	Sup. CFS (ha)	Sup. GPS (ha)	Dinamica incendio	Copertura CFS	Est (GB)	Nord (GB)
Cerete (BG)	19/03/05	06/07/05	75	49.61	Suolo (5%), Radente (80%), Chioma (15%)	Bosco (100%)	1578147	5078884
Mello (SO)	29/05/05	06/08/05	25	20,91	Radente (70%) Chioma (30%)	Bosco (30%), non B. (70%)	1541774	5113709
Primaluna (LC)	22/03/05	01/07/05	6	4,72	Radente	Bosco (100%)	1533855	5093692

incendio Boschivo / Foglio Notizie (AIB/FN) del Corpo Forestale dello Stato (CFS) al momento dell'evento, sono stati condotti i rilievi a terra con strumenti GPS al fine di delimitare accuratamente le aree bruciate in accordo con le Linee Guida proposte da AA.VV. (2005). Nei tre incendi selezionati è stata condotta un'intensiva campagna di rilevamento, impiegando tre differenti GPS (*Trimble*, *Ashtech* e *MobileMapper*) in modalità differenziale, che ha permesso di ottenere le informazioni utili alla valutazione delle perimetrazioni condotte con le immagini satellitari. Per l'incendio di Cerete (BG) sono stati condotti anche alcuni sopralluoghi per valutare quantitativamente l'altezza della scottatura sul fusto e individuare singoli alberi e piccoli interclusi non percorsi dal fuoco inseriti nel poligono rilevato a terra. Alcune caratteristiche degli eventi analizzati sono riportate in Tab. 1.

L'incendio di Cerete si è sviluppato partendo dal punto d'innescò a quota 700 metri, coinvolgendo una copertura a bosco di altofusto di resinose misto di pino silvestre e abete rosso con aree di ceduo di latifoglie. L'incendio di Mello, collocato sul versante meridionale delle Retiche valtelinesi, sviluppatosi a quote superiori ai 1500 m, ha interessato una copertura prevalentemente rada con bosco d'alto fusto misto di latifoglie e resinose, rappresentate rispettivamente da betulla pubescente e pino silvestre, con ampie aree a prato. L'immagine relativa a questo evento è stata acquisita in presenza di copertura nuvolosa che fortunatamente non ha coperto l'area d'interesse. Infine, l'evento di Primaluna, sviluppatosi su una superficie prevalentemente piana, con punto di innescò alla quota di 600 m, ha invaso un ceduo semplice e matricinato misto di castagno e faggio.

Gli incendi boschivi alpini analizzati si sono pertanto sviluppati in aree ad elevata variabilità dei soprassuoli boschivi in termini di composizione, di governo e di trattamento, determinando un andamento variabile dell'incendio, in termini di altezza di fiamma, di intensità e di grado di danneggiamento.

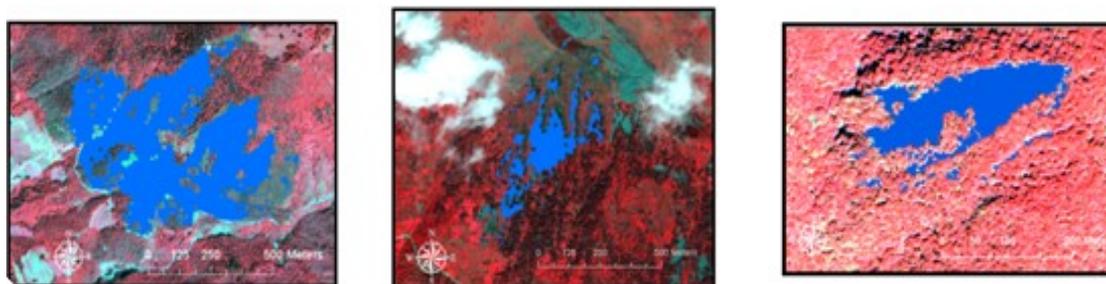
Sono inoltre stati acquisiti e impiegati nelle fasi di elaborazione del metodo il Modello Digitale del Terreno, la cartografia tecnica e la carta tematica regionale di uso del suolo (DUSAF).

### Individuazione delle aree percorse dal fuoco

Le immagini sono state inizialmente ortorettificate, utilizzando il metodo RPC (*Rational Polynomial Coefficients*) con il modello digitale del terreno a 20 m di risoluzione spaziale, impiegando dai 10 ai 20 punti di controllo per ciascuna immagine. Gli errori riscontrati al termine del processo di registrazione sono stati sempre inferiori al pixel.

Il punto d'innescò dell'incendio, ricavato dalle schede compilate dal personale del CFS, è stato collocato sull'immagine multispettrale in sintesi falsi colori. È stata quindi ritagliata una porzione limitata dell'immagine in modo da includere l'area bruciata ed eliminare le superfici distanti dal corpo principale, ragionevolmente non interessate dall'evento.

Le immagini satellitari multispettrali sono state classificate con approccio *object oriented*, tramite un classificatore *k-Nearest Neighbour* con logica *fuzzy*, implementato nel *software eCognition 2.1* (eCognition 2001). Tale *software* consente di realizzare il processo di segmentazione mediante la messa a punto di fattori di scala, forma e colore, i quali concorrono alla definizione dei poligoni che sono successivamente classificati automaticamente. Le tre immagini sono state segmentate con fattore di scala variabile tra 10 e 15 e impiegando gli indici di colore, forma, peso, compattezza e media posti rispettivamente pari a 0.8, 0.2, 1, 0.1 e 0.9. Nel processo di classificazione automatica oltre alle immagini multispettrali sono stati impiegati anche un indice di vigore vegetativo ed un indice di luminosità della scena. In particolare sono stati impiegati gli indici *Normalised Difference Vegetation Index* (NDVI - p. es. Rouse et al. 1973) e *Brightness* (eCognition 2001). È stato definito un numero di classi, per ciascuna delle immagini da classificare, variabile in funzione delle diverse tipologie di coper-



**Fig. 2** - In colore blu sono riportate le aree classificate come bruciate ottenute mediante segmentazione e classificazione delle immagini satellitari mostrate in Fig. 1.

ture presenti e delle condizioni al momento della ripresa. Per esempio, l'evento di Mello è stato classificato in alto fusto e prato (per entrambi bruciato e non bruciato), nuvole, detrito e affioramenti, con un numero di poligoni di training variabile tra 7 e 10 per ciascuna classe.

In Fig. 2 sono mostrate le immagini satellitari relative ai tre eventi e le corrispondenti mappe derivate.

Le classificazioni ottenute evidenziano diverse situazioni, con la presenza di pixel classificati come bruciati ma isolati e distanti rispetto al corpo principale dell'area bruciata che a sua volta può includere aree classificate come non bruciate. A pochi mesi di distanza tra l'evento e l'acquisizione remota, i valori NDVI di alcuni pixel classificati come non bruciati, ma interessati dall'evento come verificato sulla base delle osservazioni di campo, sono risultati pressoché simili a quelli classificati come non bruciati riscontrati in aree non interessate dal passaggio del fuoco. Le piante interessate dall'evento mostrano, quindi, un vigore delle chiome apparentemente regolare che induce ad ipotizzare che la dinamica radente e non invasiva, tipica di questi incendi alpini, non limiti lo sviluppo vegetativo. In questi casi le mappe delle aree bruciate ottenute dalla classificazione sottostimano la reale superficie interessata dall'evento e non sono facilmente confrontabili con i poligoni delle

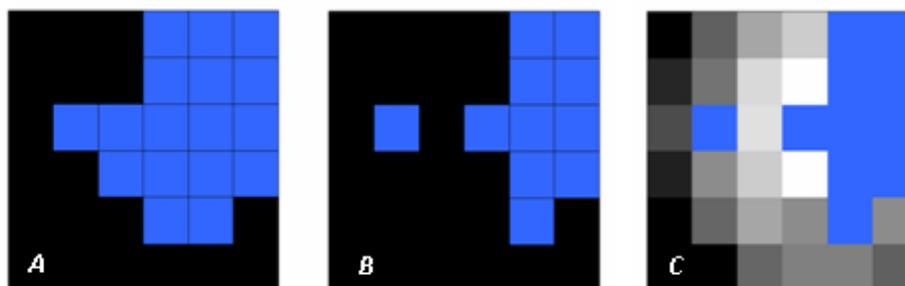
aree delimitate a terra.

Al fine di individuare le aree bruciate sotto copertura è stata pertanto sviluppata una procedura di connettività che consente di attribuire a tutti i pixel dell'immagine un grado di probabilità ad essere stati bruciati. È stato ipotizzato che la ricrescita estiva della vegetazione abbia cancellato le tracce del passaggio del fuoco e che i pixel classificati come non bruciati potessero essere bruciati con una probabilità decrescente al crescere della loro distanza da eventuali pixel bruciati isolati o appartenenti al corpo principale. I pixel isolati dapprima sono stati individuati e selezionati automaticamente e poi connessi al poligono principale attraverso una probabilità di appartenenza stimata tramite la seguente funzione gaussiana (p. es., Kreyzig 2005 - eqn. 1):

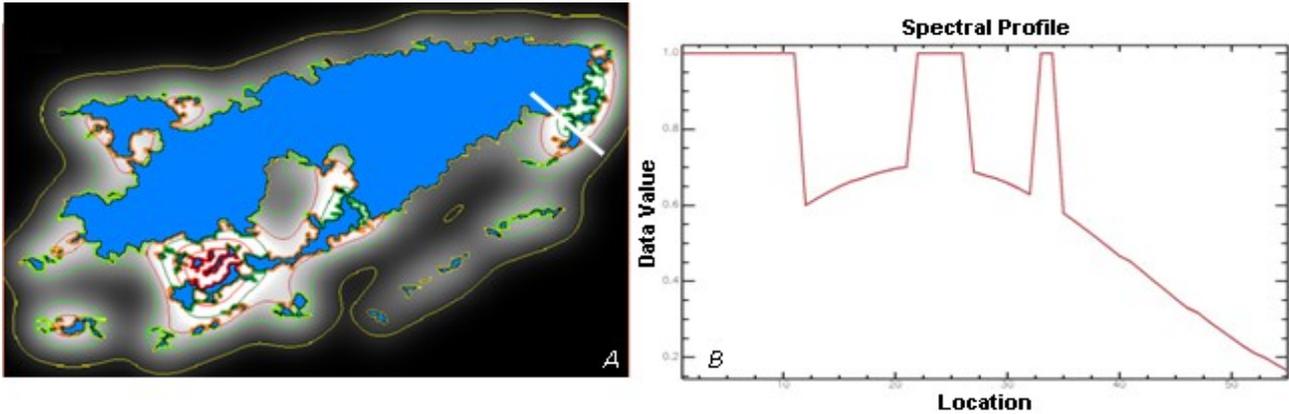
$$f(x) = \frac{2.335}{FWHM \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-x^2}{2(FWHM/2.335)^2}}$$

dove  $x$  rappresenta la distanza spaziale e FWHM (*Full Width at Half Maximum*) è l'ampiezza della gaussiana a metà massimo che deve essere impostata dall'operatore. In questo studio è stato stabilito un valore di FWHM pari a 50 pixel (circa 120 metri sulle immagini multispettrali).

In Fig. 3a e 3b è mostrata, a titolo di esempio, la di-



**Fig. 3** - In (A) è riportato un esempio di area bruciata (in blu 1/0), in (B) quello osservabile a seguito di un processo di classificazione automatica (in blu 1/0). In (C) è mostrata in toni di grigio le probabilità dei pixel ad essere stati percorsi dal fuoco.



**Fig. 4** - In (A) è riportata in blu l'area classificata come bruciata nell'incendio di Primaluna e in toni di grigio la distribuzione di probabilità dei pixel ad essere bruciati. Le isolinee corrispondono a livelli differenti di probabilità e il loro andamento nello spazio è riportato per il transetto considerato (B).

screpanza tra l'area realmente interessata dall'evento e la mappa tematica ottenuta con la classificazione automatica, mentre in Fig. 3c è riportato il risultato ottenuto dall'applicazione dell'algoritmo per l'esempio considerato. Ad ogni pixel classificato come non bruciato, è stato associato un grado di appartenenza all'evento, attraverso l'equazione 1, in modo da ricostruire l'area bruciata completa, definendo per ciascun pixel la probabilità ad essere stato percorso dal fuoco. Il grado di appartenenza, basato esclusivamente sulla distanza dai pixel bruciati, è stato ottenuto come sommatoria delle probabilità di essere stato percorso dal fuoco di ciascun pixel, normalizzata per la massima densità di probabilità riscontrata, al fine di scalare i valori tra 0 e 1.

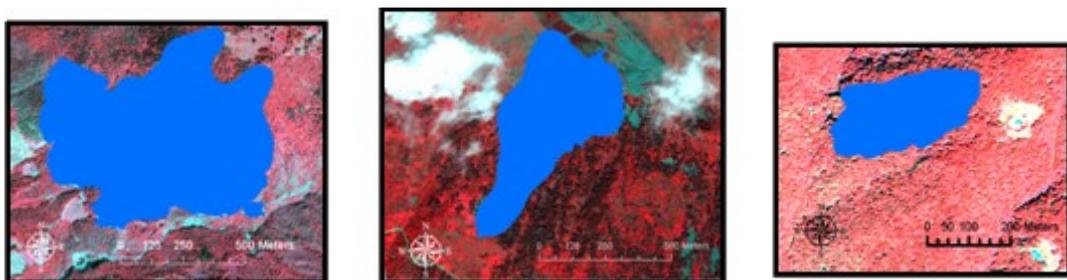
Questa tecnica consente di rappresentare in modo continuo la probabilità di un pixel di essere stato interessato dall'evento e permette di generare una mappa delle aree bruciate confrontabile con quella rilevata a terra in accordo con le modalità proposte in AA.VV. (2005). La possibilità di collegare i pixel isolati al corpo centrale dell'evento permette di confrontare i poligoni modellati con quelli rilevati a terra, senza introdurre errori causati dal mancato con-

trollo sulle isole interne. Non è infatti possibile escludere che queste superfici non siano state interessate dall'evento, tanto più che i sopralluoghi hanno evidenziato che alcune isole interne alle aree, identificate a terra come percorse dal fuoco, non erano bruciate. Questo aspetto evidenzia i vantaggi e le potenzialità delle immagini multispettrali ad alta risoluzione geometrica per un dettagliato riconoscimento delle aree percorse dal fuoco.

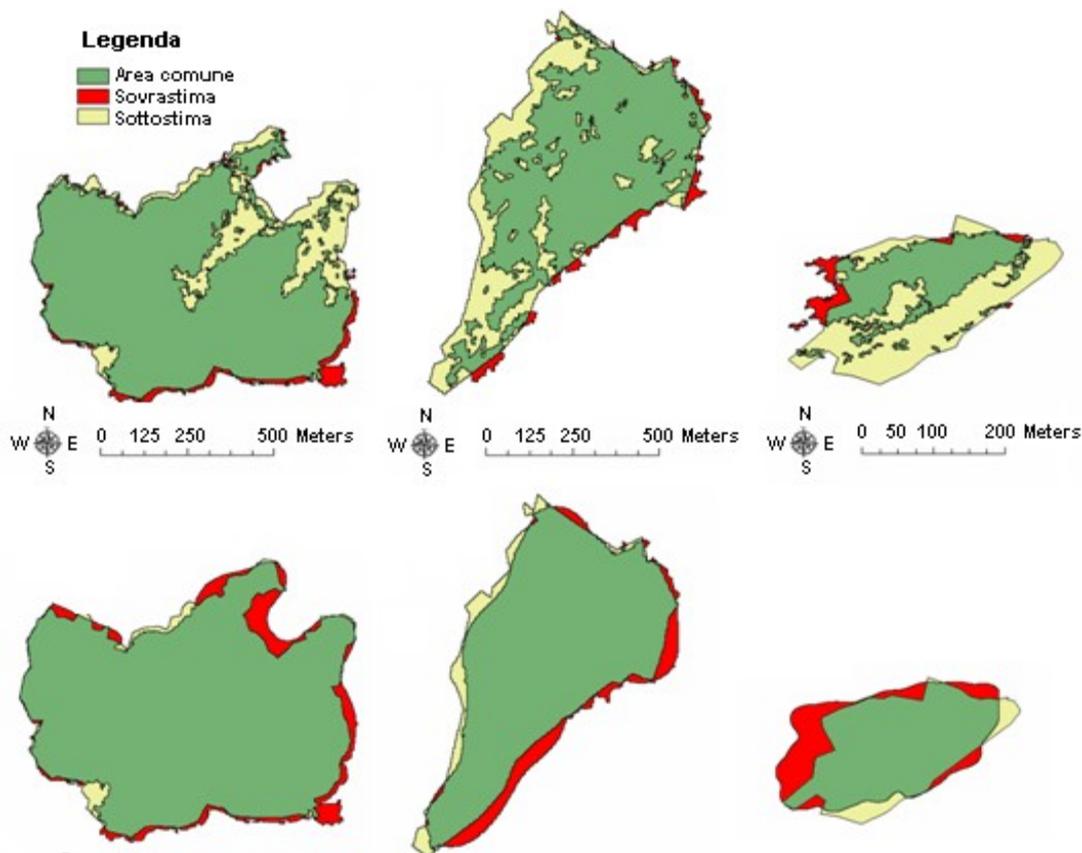
In Fig. 4a è rappresentato il caso dell'incendio di Primaluna in cui sono particolarmente evidenti pixel isolati classificati come bruciati in fase di classificazione automatica. Le isolinee di probabilità prodotte dall'algoritmo mostrano valori più elevati in corrispondenza di raggruppamenti localizzati di pixel, come rappresentato dal loro andamento nel transetto riportato in Fig. 4b.

Imponendo una soglia di probabilità è inoltre possibile ottenere una mappa binaria delle aree bruciate per ciascuno dei tre eventi analizzati (Fig. 5).

L'applicazione del metodo proposto sembra ben adattarsi alle modalità di generazione e propagazione degli incendi boschivi nel contesto lombardo. Il loro sviluppo avviene prevalentemente in periodi in-



**Fig. 5** - In colore blu sono riportate le mappe delle aree bruciate a seguito dell'applicazione dell'algoritmo di connettività.



**Fig. 6** - In alto sono riportati i confronti tra le misure a terra e le mappe ottenute tramite classificazione automatica per i tre incendi analizzati. In basso sono riportate le corrispondenze rispetto al risultato ottenuto applicando l’algoritmo di connettività alle immagini classificate.

vernali e raramente interessa la chioma, al contrario di quanto accade negli incendi dell’area mediterranea. Questo tipo di dinamica, ovvero di fuoco radente, può complicare la possibilità di valutare, tramite osservazioni remote, se l’area boschiva sia stata o meno percorsa dal fuoco, soprattutto se le specie vegetali interessate sono resistenti all’attacco.

### Stima dell’accuratezza

La stima dell’accuratezza della classificazione è stata effettuata confrontando i dati rilevati a terra, mediante rilievi GPS, con le mappe generate in seguito all’applicazione delle due tecniche sopra descritte. La bontà del riconoscimento è stata valutata calcolando sia un errore (E1) comprensivo di sovrastima ( $S_0$ ) e sottostima ( $S_U$ ) rispetto all’area di riferimento delimitata a terra ( $A_R$ ), sia come errore (E2) legato solamente alla discrepanza tra  $A_R$  e area classificata con tecnica a oggetti o con algoritmo di connettività ( $A_C$  - eqn. 2, eqn. 3):

$$E1 = (S_0 + S_U) / A_R$$

$$E2 = |A_C - A_R| / A_R$$

La stima di E1 può essere affetta da errori di coregistrazione, che sono particolarmente evidenti ai bordi dei poligoni in Fig. 6. Tale figura mostra le distribuzioni delle aree classificate correttamente con i metodi proposti e gli errori di sottostima e sovrastima ottenuti rispetto alle perimetrazioni condotte a terra.

La stima dell’accuratezza e degli errori riscontrati per gli incendi di Cerete, Mello e Primaluna è riportata in Tab. 2.

Nel caso dell’evento di Mello, durante la perimetrazione a terra, sono state incluse coperture di detrito di versante, di dimensione variabile, all’interno del poligono dell’area bruciata. Questo approccio è in accordo con le indicazioni stabilite dalle linee guida della Regione Lombardia circa l’assegnazione delle superfici di piccole dimensioni non percorse dal fuoco presenti all’interno dell’area bruciata. Al contrario, la classificazione di partenza delle immagini satellitari ha permesso correttamente di escludere il detrito di versante. La differente valutazione circa l’appartenenza di queste aree alla classe bruciato è

**Tab. 2** - Errori (E1 e E2) ottenuti con segmentazione e classificazione a oggetti (CO) e tramite applicazione dell'algoritmo di connettività combinato alla classificazione (COC).

Evento	Superficie GPS (ha)	Superficie classificata CO (ha)	Superficie classificata COC (ha)	E1 (CO) (%)	E2 (CO) (%)	E1 (COC) (%)	E2 (COC) (%)
Cerete	49.61	42.99	52.64	20.88	13.34	10.62	6.11
Mello	20.91	15.67	21.51	31.96	25.08	16.31	2.86
Primaluna	4.72	2.40	5.68	60.81	49.15	33.90	20.34

causa della sottostima della superficie complessivamente percorsa dal fuoco da parte della procedura di classificazione ad oggetti. Le discrepanze tra i due metodi di perimetrazione evidenziano pertanto alcuni limiti nel confrontare le immagini satellitari con i perimetri rilevati a terra. Considerando invece il poligono ottenuto a seguito dell'applicazione dell'algoritmo di connettività è possibile condurre una valutazione degli errori in condizioni simili, che porta ad una loro notevole diminuzione, con accuratezza pari a circa il 97%. Gli errori riscontrati nell'evento di Primaluna sono attribuibili al tipo di incendio che si è parzialmente sviluppato, in talune aree, con dinamica poco invasiva e scottature radenti. Pertanto, al momento dell'acquisizione estiva si è riscontrata una normale ripresa vegetativa che ha limitato la visibilità delle porzioni di sottobosco e di fusto interessate dall'incendio. Questo esempio evidenzia alcune criticità sull'impiego di osservazioni satellitari acquisite lontano dalla data dell'evento e motiva lo sviluppo di una procedura di connettività che permetta di ridurre le incertezze della classificazione. Gli errori diminuiscono di circa il 60% con una accuratezza complessiva pari a circa l'80%. Le difficoltà di riconoscimento permangono comunque anche a seguito dell'applicazione del metodo proposto, ed in particolare aumentano le sovrastime. A causa della complessità e dell'eterogeneità della copertura interessata dal fuoco, gli errori riscontrati per l'evento di Cerete possono essere ricondotti a ragioni diverse. Le sottostime sono generate dalla presenza di aree incluse non percorse dal fuoco, dalla presenza di aree percorse dal fuoco ma in corrispondenza delle quali la ricrescita della vegetazione ha cancellato le tracce e da errori legati alla presenza di aree percorse dal fuoco non visibili poiché fortemente coperte con chiome fitte e verdi. L'accuratezza riscontrata è comunque risultata pari al 94% e rivela la bontà del metodo per la mappatura delle aree percorse dal fuoco.

Nel complesso, l'algoritmo di connettività determina una significativa diminuzione dell'errore, com-

presa tra 40 ed il 50%, da ricondursi prevalentemente alla diminuzione degli errori di sottostima. Per contro, l'errore di sovrastima subisce un aumento per tutti e tre gli incendi analizzati, anche se proporzionalmente minore rispetto a quello di sottostima. Ciò può determinare errate inclusioni di pixel non bruciati nell'area percorsa dal fuoco ma anche utili indicazioni per controlli mirati alla valutazione dell'effettivo grado di danneggiamento.

### Conclusioni

In questo studio è proposto un metodo che prevede l'impiego di immagini satellitari ad alta risoluzione geometrica *Quickbird* per la perimetrazione delle superfici boschive percorse dal fuoco. Il metodo sviluppato è stato applicato per la delimitazione di tre incendi verificatisi nelle aree alpine in regione Lombardia durante l'anno 2005 ed è stato valutato confrontando i risultati ottenuti con le aree di riferimento rilevate a terra con misure GPS.

E' stata inizialmente applicata una tecnica di segmentazione ad oggetti, associata ad una classificazione automatica delle immagini satellitari, che ha permesso di ottenere le mappe delle aree percorse dal fuoco per i tre eventi considerati. Queste mappe hanno mostrato errori di sottostima della superficie bruciata, rispetto ai poligoni determinati a terra. Le osservazioni di campo hanno comunque dimostrato che gli errori di sottostima non possono essere imputati solo ed esclusivamente all'analisi condotta con i dati satellitari ad alta risoluzione geometrica, poiché è stato osservato che alcune isole effettivamente non bruciate sono state impropriamente incluse nei poligoni individuati a terra. Tuttavia la non contemporaneità di acquisizione delle immagini satellitari rispetto al verificarsi dei tre eventi incide significativamente sulla generazione dell'errore di sottostima e risulta essere la maggior criticità del metodo. Infatti, l'analisi condotta con osservazioni remote acquisite a mesi di distanza dall'evento può essere compromessa dalla normale ricrescita della vegetazione arborea, la quale si verifica qualora l'evento sia stato di bassa in-

tensità o invasivo solo sulla parte basale dei tronchi. L'acquisizione dei dati nel periodo primaverile o estivo ha in ogni caso il vantaggio di consentire la rilevazione di più incendi attraverso l'utilizzo di un numero inferiore di immagini, contrariamente all'acquisizione immediata post-incendio invernale, la quale richiederebbe l'acquisizione di molte più osservazioni. Inoltre, l'impiego di immagini estive può essere conveniente in fase di classificazione poiché consente di avere un marcato contrasto tra area bruciata e area non bruciata, facilitando l'individuazione dell'area percorsa dal fuoco.

Pertanto, al fine di sfruttare i vantaggi dovuti all'impiego di immagini primaverili o estive, è stato necessario far fronte alle criticità causate dalla crescita della copertura arborea. Per superare tale limite è stato sviluppato un efficace algoritmo di connettività che associa ai pixel isolati, apparentemente non percorsi dal fuoco, una probabilità ad essere stati interessati dall'evento. Il confronto tra il risultato prodotto dall'algoritmo di connettività con le aree di riferimento misurate a terra ha mostrato elevati gradi di accuratezza con errori variabili dal 3 al 20%, a testimonianza della bontà del metodo nell'individuazione delle aree boschive percorse dal fuoco nel periodo invernale. Questa procedura ben si presta, quindi, ad individuare incendi invernali caratterizzati da una dinamica di tipo radente che interessano solo porzioni di fusto; sembra inoltre bene adattarsi ai casi in cui la risposta spettrale delle superfici bruciate risulti estremamente variabile anche all'interno dello stesso evento.

## Bibliografia

- AA. VV. (2005). Linee guida per la perimetrazione a terra delle superfici percorse da incendio. Regione Lombardia.
- Arino O, Piccolini I (2000). Development and testing of algorithms for a global burnt area product from ERS ATSR-2, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proc. IGARSS 2000, 304-306.
- Barbosa PM, San-Miguel J, Martinez B, Schmuck G (2002). Burnt area mapping in southern Europe using irs-wifs, In: Forest Fire Research & Wildland Fire Safety (Viegas T ed). Millpress, Rotterdam, The Netherlands.
- Boschetti L, Brivio PA, Gregoire JM (2003). The use of Meteosat and GMS imagery to detect burned areas in tropical environments. *Remote Sensing of Environment* 85: 78-91.
- Chirici G, Corona P (2005). An overview of passive remote sensing for post-fire monitoring. *Forest@ 2* (3): 282-289.
- eCognition (2001). E-cognition users guide. Definiens Imaging, GmbH Germany.
- Eva H, Lambin EF (1998). Burnt area mapping in Central Africa using ATSR data, *International Journal of Remote Sensing* 19: 3473-3497.
- Fernandez A, Illera P, Casanova L (1997). Automating mapping of surfaces affected by forest fires in Spain using AVHRR NDVI composite image data. *Remote Sensing of Environment* 60: 153-162.
- Fredericksen PS, Langaas S, Mbaye M (1990). NOAA-AVHRR and GIS-based monitoring of fire activity in Senegal - a provisional methodology and potential applications Fire in the tropical biota. In: *Ecosystem processes and global challenges*. Ecological Studies (Goldammer JG ed), vol. 84, pp. 400-417. Springer-Verlag, Berlin.
- Giannetti F, Gottero F (2003). Immagini satellitari per la delimitazione di aree percorse da incendi boschivi. *Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi* 90 (6/03): 1-6.
- Gimeno M, San-Miguel J, Barbosa P, Schmuck G (2002). Using ERS-SAR images for burnt area mapping in Mediterranean landscapes. In: *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. (Viegas T ed). Millpress, Rotterdam, 90 ISBN 90-77017-72-0 - ORA/PRO 63450.
- Kasischke ES, French NHF (1995). Locating and estimating the areal extent of wildfires in Alaskan boreal forests using multiple-season AVHRR NDVI composite data. *Remote Sensing of Environment* 51: 263- 275.
- Kreyszig E (2005). *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons, Inc.
- Roman-Cuesta RM, Retana J, Gracia M, Rodriguez R (2005). A quantitative comparison of methods for classifying burned areas with LISS\_III imagery. *International Journal of Remote Sensing* 26: 1979-2003.
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I: 309-317.
- Stroppiana D, Tansey K, Grégoire J-M, Pereira JM (2003). An Algorithm for Mapping Burnt Areas in Australia Using SPOT-VEGETATION data. *IEEE Transaction on geoscience and remote sensing* 41: 907-909.