

È POSSIBILE UTILIZZARE IL TELERILEVAMENTO SATELLITARE PER L'ANALISI DELLA SEVERITÀ DEGLI EFFETTI DEGLI INCENDI SULLA VEGETAZIONE NATURALE?

Luigi BOSCHETTI (*), David P. ROY (**), Simon N. TRIGG (***)

(*) Department of Geography, 1113 LeFrak Hall, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA; email: luigi.boschetti@hermes.geog.umd.edu

(**) Geographic Information Science Center of Excellence, Wecota Hall Box 506B South Dakota State University, Brookings, SD 57007, USA; email: david.roy@sdstate.edu

(***) Department of Geography, 1113 LeFrak Hall, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA; email: trigg@umd.edu

RIASSUNTO

Il telerilevamento satellitare è correntemente usato con successo nell'individuazione dei fuochi attivi e nella mappatura delle aree percorse dal fuoco. Sia per studi di tipo ecologico, sia per la gestione degli interventi di ripristino della vegetazione, l'informazione fornita da tali prodotti tematici deve essere integrata dalla caratterizzazione della severità degli effetti del fuoco. Svareti lavori hanno recentemente proposto di utilizzare a tal fine un indice spettrale chiamato *Normalized Burn Ratio* (NBR). Il presente lavoro valuta il comportamento spettrale dell'NBR, rispetto ai requisiti teorici di un indice che sia sensibile alla severità degli incendi. Un indice, per soddisfare tali requisiti, dovrebbe avere isolinee perpendicolari alla direzione dei cambiamenti spettrali indotti dal fuoco. Al fine di verificare in quale misura l'indice NBR abbia un comportamento ottimale, nel presente lavoro sono stati utilizzati dati Landsat e dati MODIS. Nonostante lavori precedenti riportino una buona correlazione fra misure di campo di severità e valori di NBR derivati da dati telerilevati, i nostri risultati non mostrano che NBR sia ottimale nel caratterizzare la severità di un incendio nel periodo immediatamente successivo all'evento. I cambiamenti spettrali dovuti agli incendi non sono generalmente perpendicolari alle isolinee e di conseguenza non è possibile affermare che NBR sia primariamente e costantemente sensibile alla severità degli incendi. Tali risultati suggeriscono che lo sviluppo della prossima generazione di metodi per la stima da dati telerilevati della severità degli effetti degli incendi sulla vegetazione sia esplicitamente basato sull'analisi di come diversi livelli di severità si traducano in spostamenti nello spazio multispettrale.

ABSTRACT

Satellite remote sensing is being successfully used for active fire monitoring and burned area mapping. Both for ecological studies, and for planning post-fire recovery interventions, the information provided by such thematic products has to be integrated by a characterization of the severity of the impact of fire on the vegetation. Increasingly, fire severity has been estimated using a spectral index called the Normalized Burn Ratio (NBR). The present work assesses the performance of the NBR against ideal requirements of a spectral index designed to measure fire severity. According to index theory, the NBR would be optimal for quantifying fire severity if its isolines were perpendicular to the spectral displacements induced by the fire. We assess how well NBR meets this condition Landsat and MODIS data. Although previous studies report high correlation between fire severity measured in the field and satellite derived NBR, our results do not

provide evidence that the performance of the NBR is optimal in describing fire-severity shortly after fire occurrence. Spectral displacements due to burning occur in numerous directions relative to the NBR index isolines, suggesting that the NBR may not be primarily and consistently sensitive to fire severity. Findings suggest that the development of the next generation of methods to estimate fire severity remotely should incorporate knowledge of how fires of different severity displace the position of pre-fire vegetation in multispectral space

INTRODUZIONE

Il telerilevamento satellitare è stato diffusamente utilizzato negli ultimi anni per la mappatura degli incendi a scala locale, regionale e globale. Numerosi algoritmi sono stati sviluppati per l'individuazione degli incendi attivi e, più recentemente, delle aree percorse dal fuoco. Mentre i prodotti globali a bassa risoluzione (risoluzione spaziale nell'ordine dei chilometri) sono prevalentemente destinati alla comunità scientifica coinvolta nello studio delle emissioni atmosferiche (Korontzi et al., 2004), i prodotti a media ed alta risoluzione spaziale (dalle centinaia alla decine di metri) possono essere utilizzati come ausilio alla gestione del territorio. Un fattore rilevante nell'utilizzo delle mappe derivate da dati telerilevati per studi ecologici e per la gestione degli interventi di ripristino è la caratterizzazione degli effetti del fuoco sulla vegetazione naturale all'interno delle singole aree bruciate.

Tradizionalmente tale caratterizzazione è ottenuta con osservazioni dirette di campo o mediante fotointerpretazione di immagini ad alta risoluzione (Key et al., 2005; Roy and Landmann, 2005). Uno degli indicatori qualitativi utilizzati per quantificare gli effetti del fuoco sulla vegetazione è la cosiddetta severità dell'incendio (*fire severity*); esistono svariate definizioni di severità di un incendio, ma in generale essa è collegata alla misura in cui un ecosistema è modificato dal fuoco o al tipo di risposta dell'ecosistema in seguito all'incendio (Key et al., 2005; Roy and Landmann, 2005; Ryan et al., 1985; White et al., 1996; Cocke et al., 2005). Vi sono inoltre differenze in letteratura su quanto tempo debba passare tra l'incendio e l'acquisizione delle misure di severità: da giorni ad anni di distanza (è necessario un ritardo molto forte se si vuole osservare il tipo di evoluzione dell'ecosistema successivamente all'evento).

I parametri utilizzati per la stima della severità sul terreno includono la condizione ed il colore del suolo, la quantità di combustibile consumato, l'eventuale presenza di germogli dopo l'incendio, lo stato della corteccia degli alberi, la profondità dello strato di suolo bruciato ed i cambiamenti nell'umidità della biomassa. Nel caso di alcuni di questi parametri, non è evidente alcun legame con cambiamenti osservabili nelle misure di riflettanza dei dati telerilevati. Tuttavia, svariati studi hanno recentemente proposto l'utilizzo di indici spettrali per ottenere mappe tematiche di severità degli incendi, utilizzando sia tecniche multitemporali, sia tecniche basate su una sola immagine (Key et al., 2005; van Wagendonk, et al. 2004; Epting et al., 2005). Uno degli indici maggiormente utilizzati è il *Normalized Burn Ratio* (NBR) (Key et al., 2005), definito come la differenza fra la riflettanza nel vicino infrarosso e nell'infrarosso medio, divisa per la loro somma.

L'utilizzo dell'NBR non pare tuttavia fondato né su una base teorica né sui risultati di una validazione sistematica. NBR era stato inizialmente proposto come indice per l'individuazione delle aree bruciate e non per la loro caratterizzazione; non è stato verificato se esso soddisfi le condizioni di ottimalità di un indice spettrale (Verstraete et al., 1996a, Verstraete et al 1996b) e l'accuratezza riportata in letteratura nel caratterizzare diversi livelli di severità è relativamente bassa. Infine, la severità stessa è un parametro essenzialmente qualitativo che non può essere legato in maniera univoca né a misure di campo, né a misure telerilevate.

Il presente lavoro, basandosi su un esteso insieme di dati Landsat ETM+ e MODIS, analizza sistematicamente i cambiamenti indotti dal fuoco sulla firma spettrale della vegetazione, studiando quale sia la relazione fra la direzione dei cambiamenti spettrali dovuti al fuoco e la direzione delle isolinee dell'indice NBR. I dati utilizzati sono rappresentativi di tre ecosistemi largamente colpiti dagli incendi: foresta boreale (Siberia), Savana (Australia) e foresta pluviale (Amazzonia).

CARATTERIZZAZIONE DELL'OTTIMALITÀ DELL'INDICE NORMALIZED BURN RATIO (NBR)

Il NBR è un indice normalizzato ottenuto dalla riflettanza nell'infrarosso vicino (NIR) e medio (MIR) come:

$$NBR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{MIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{MIR}} \quad -1 \leq NBR \leq 1 \quad (1)$$

Di conseguenza, le sue isolinee sono linee rette passanti per l'origine (Fig. 1a). La differenza fra valori di NBR precedenti e successivi ad incendio è stata proposta come misura di severità dell'incendio (Key et al. 2005):

$$\Delta NBR = NBR_{pre-fire} - NBR_{post-fire} \quad (2)$$

La definizione di indice spettrale ottimale per osservare un cambiamento richiede che la traiettoria nello spazio della riflettanza multispettrale, indotta da tale cambiamento, sia perpendicolare alle isolinee dell'indice (Verstraete et al., 1996 a). Nel nostro caso, sarebbe necessario che la traiettoria descritta da diversi livelli di severità a partire dalle medesime condizioni iniziali, sia perpendicolare alle isolinee di figura 1 a. In figura 1b è illustrata una traiettoria ideale da non bruciato (U) a bruciato (B'), in cui la traiettoria è perpendicolare alle isolinee. Essendo le isolinee, definite dall'equazione 1, un fascio di rette passante per l'origine, una traiettoria perpendicolare ad esse descrive un arco di circonferenza centrata nell'origine.

Nella realtà, le misure telerilevate sono affette da fattori di disturbo quali l'effetto dell'atmosfera, le variazioni bi-direzionali della riflettanza o cambiamenti spettrali non legati al fenomeno in esame. La figura 1c schematizza le conseguenze di tali fattori di disturbo: il valore di riflettanza misurato successivamente all'incendio (B) non si trova sullo stesso arco di circonferenza di U.

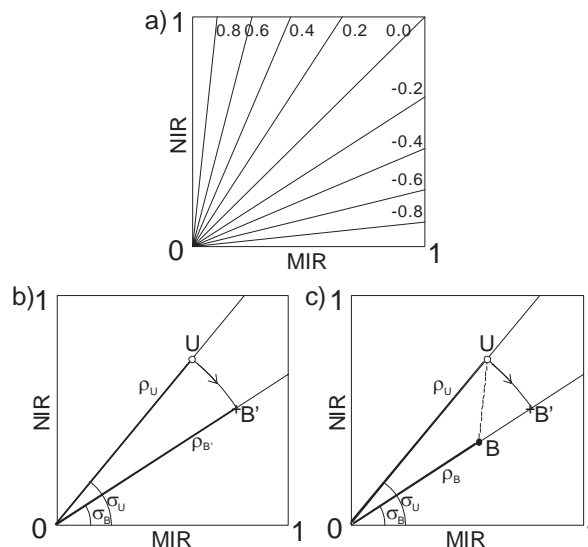


Figura 1: a) isolinee dell'indice NBR nello spazio della riflettanza nelle lunghezze d'onda dell'infrarosso vicino (NIR) e medio (MIR). b) l'arco UB' corrisponde alla traiettoria ideale dalle condizioni antecedenti all'incendio U alle condizioni successive all'incendio B', rispettando la condizione di ortogonalità alle isolinee. c) la distanza $|BB'|$, fra le condizioni successive all'incendio nel caso ideale B' e reale B, è una misura dei cambiamenti spettrali ai quali l'indice NBR è insensibile.

La distanza $|B B'|$ è quindi funzione dei cambiamenti ai quali l'indice NBR è insensibile e può essere usata come misura dell'ottimalità dell'indice NBR. Osservando che $|UB| \geq |BB'|$, si può porre (Roy et al., 2005):

$$\Delta NBR \text{ optimality} = 1 - \frac{|BB'|}{|UB|} \quad (3)$$

$$0 \leq \Delta NBR \text{ optimality} \leq 1$$

Nel caso di un comportamento ideale dell'indice, i cambiamenti avvengono unicamente lungo l'arco di circonferenza passante per U e B': di conseguenza $|BB'|=0$ e $\Delta NBR \text{ optimality} =1$. Nel caso di un cambiamento unicamente lungo un'isolinea, $|BB'| = |UB'|$ e $\Delta NBR \text{ optimality} =0$.

ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI

Dati multispettrali Landsat ETM+

La figura 2 mostra i valori di riflettanza di dati Landsat 7 ETM+, atmosfericamente corretti, acquisiti prima e dopo 19 incendi controllati appiccati durante la stagione secca dell'emisfero australe nel Kruger National Park (KNP) e nella Madikwe game Riserve (MGR) in Sud Africa. I dati Landsat sono stati acquisiti entro un intervallo di otto giorni dagli incendi, con l'eccezione di sei punti nella MGR, acquisiti due mesi prima dell'incendio a causa della persistente copertura nuvolosa (Roy and Landmann, 2005). I siti presi in esame si trovano in un ambiente di savana, con copertura arborea inferiore al 50%. In corrispondenza di ciascun punto sono disponibili misure di completezza della combustione (cc) e di frazione di area bruciata (f). Nei siti del KNP cc varia fra 0.06 ed 1, e f fra 0.48 e 0.84, mentre nei punti della MGR cc varia fra 0.39 e 0.83 e f fra 0.35 e 0.80. È quindi possibile affermare che i dati siano relativi ad una vasta gamma di livelli di severità.

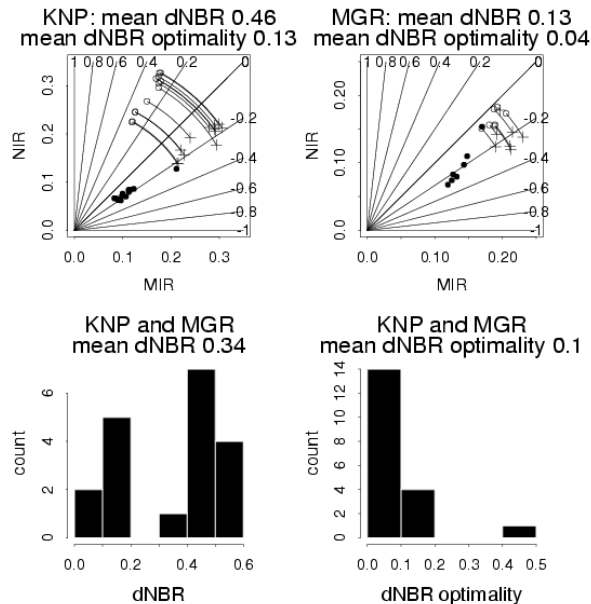


Figura 2. In alto: valori medi di riflettanza nelle bande 4 (NIR) e 7 (MIR) del sistema Landsat 7 ETM+, su aree di 120 x 120 metri prima (cerchi vuoti) e dopo (cerchi pieni) incendi controllati in 12 siti nel Kruger National Park (KNP) e 7 siti nella Madikwe Game Riserve (MGR). Gli archi mostrano per ciascun punto la traiettoria da condizioni pre-fuoco (cerchi aperti) a condizioni ideali post-fuoco (croci), che dovrebbe essere descritta se NBR fosse un indice ottimale. In basso, istogramma dei valori di ΔNBR e $\Delta NBR \text{ optimality}$ per i 19 siti.

In figura 2, in basso, sono mostrati i relativi valori di ΔNBR e $\Delta NBR \text{ optimality}$. Il valore medio di $\Delta NBR \text{ optimality}$ sui 12 siti KNP è 0.13 e 0.04 sui 7 siti MGR; complessivamente la media è 0.1

sui 19 punti complessivi. Il basso valore di ΔNBR optimality indica che l'indice è sub-ottimale per i casi di incendi in ambiente di savana presi in esame.

Dati multispettrali MODIS

Una seconda valutazione del comportamento dell'indice NBR è stata condotta utilizzando dati MODIS a 500 m di risoluzione spaziale. La figura 3 mostra gli istogrammi di ΔNBR e ΔNBR optimality calcolati a partire da dati in ambiente di foresta boreale (Repubblica Federativa Russa), foresta tropicale (Sud America) e savana (Australia).

Tali dati sono stati ottenuti esaminando le bande MODIS 2 e 7 in corrispondenza dei punti in cui sono stati individuati incendi attivi alla risoluzione di 1 chilometro (Giglio et al., 2003)

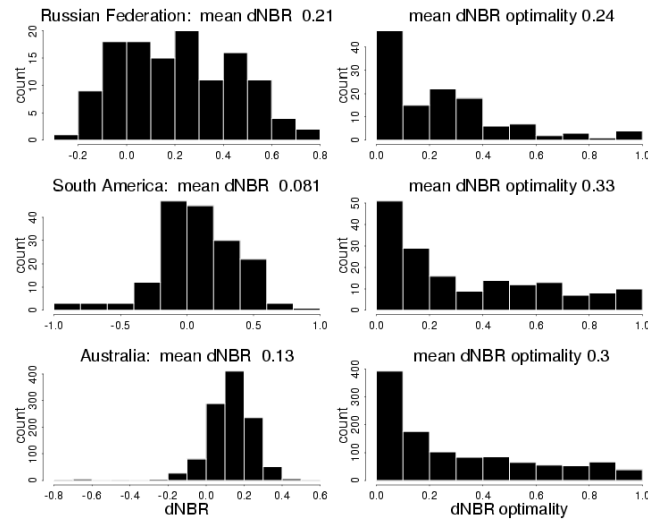


Figura 3: Istogrammi di ΔNBR e ΔNBR optimality calcolati con dati MODIS (risoluzione spaziale 500 m), utilizzando le bande 2 e 7. I dati sono relativi ad incendi nella Repubblica Federativa Russa (125 pixel) in Sud America (169 pixel) ed in Australia (1120 pixel). Sono state utilizzate soltanto osservazioni con zenit del sensore minore od uguale a 20° .

I dati sono stati estratti utilizzando il metodo illustrato in Roy et al., 2002 e Roy et al., 2005: sono prese in considerazione soltanto le osservazioni non affette da nubi o da aerosol, acquisite entro 10 giorni dalla rilevazione dell'incendio attivo e con angolo di zenit del sensore minore o uguale a 20° . I dati sono relativi ad aree con regimi di incendi completamente differenti e plausibilmente includono vari livelli di severità. I valori di ΔNBR sono minori di quanto osservato con dati Landsat in Sud Africa, perché molti degli incendi rilevati dall'algorithmo MODIS hanno dimensione molto minore di 1km^2 . Tuttavia anche in questo caso i valori di ΔNBR optimality sono molto bassi (il valore medio è rispettivamente 0.24, 0.3 e 0.33) e gli istogrammi mostrano che la maggioranza dei valori sono vicini allo 0, cioè sub-ottimali.

CONCLUSIONI

Il risultato dell'analisi del comportamento dell'indice NBR con dati Landsat relativi ad ambiente di savana in Sud Africa e con dati MODIS relativi ad ambiente di savana in Australia e di foresta nella Repubblica Federativa Russa ed in Sud America, evidenzia una risposta sub-ottimale dell'indice ai cambiamenti indotti dal fuoco nella vegetazione. In molti casi l'indice è pressoché insensibile ai cambiamenti spettrali, i quali si dispongono in prevalenza parallelamente alle isolinee.

Tali risultati pongono seri interrogativi sull'opportunità di utilizzare l'indice NBR per produrre cartografia tematica di severità degli incendi.

Come futuro argomento di ricerca, un indice spettrale per la severità degli incendi dovrebbe essere basato sullo studio della traiettoria spettrale indotta dal fuoco, in modo tale che le bande utilizzate siano quelle in cui la sensibilità è massima e che le isolinee dell'indice siano orientate perpendicolarmente ai cambiamenti e parallelamente ai fattori di disturbo.

BIBLIOGRAFIA

- Cocke, A.E, Fule P.Z, Crouse J.E, "Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data," *International Journal Of Wildland Fire*, vol.14 (2), pp.189-198, 2005.
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C.O., Kaufman, Y.J., "An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS," *Remote Sensing of Environment*, vol. 87, pp.273-382, 2003.
- Key, C.H., Benson, N.C.. Landscape Assessment: Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio; and ground measure of severity, the Composite Burn Index. In Lutes, D.C., Keane, R.E., Caratti, J.F., Key, C.H., Benson, N.C., Gangi, L.J. [in press]. *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. RMRS-GTR, Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, in press.
- Korontzi, S., Roy, D.P., Justice, C.O. and Ward, D.E., Modeling and sensitivity analysis of fire emissions in southern Africa during SAFARI 2000, *Remote Sensing of Environment*, 92(3) 2004, Pages 376-396
- Ryan, K. C., and Noste, N. V., "Evaluating prescribed fires," *Proceedings of the Symposium and workshop on Wilderness Fire*. USDA Forest Service General technical report INT-182. Intermountain Forest and range Experiment Station, Ogden, UT. pp.230–238, 1985.
- Roy, D., Lewis, P., Justice, C., "Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data - a bi-directional reflectance model-based expectation approach," *Remote Sensing of Environment*, vol.83, pp.263-286, 2002.
- Roy, D.P., Jin, Y., Lewis, P.E., Justice, C.O., "Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 97, pp. 137-162, 2005
- Roy, D., Boschetti, L., Trigg, S., Remote Sensing of Fire Severity: Assessing the performance of the Normalized Burn Ratio, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, in press.
- Roy, D.P., Landmann, T. (2005) Characterizing the surface heterogeneity of fire effects using multi-temporal reflective wavelength data, *International Journal of Remote Sensing*, in press.
- Verstraete, M. M. and B. Pinty (1996a) 'Designing optimal spectral indices for remote sensing applications', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34, 1254-1265
- Verstraete, M.M., Pinty, B., Myneni, R.B., "Potential and limitations of information extraction on the terrestrial biosphere from satellite remote sensing," *Remote Sensing of Environment*, vol.58, pp.201-214, 1996b
- van Wagtenonk, J., Root, R. and Key, C., Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity, *Remote Sensing of Environment*, Volume 92, Issue 3, 30 August 2004, Pages 397-408
- White, J., Ryan, K., Key, C., and Running, S., "Remote sensing of fire severity and vegetation recovery," *International Journal of Wildland Fire*, vol. 6, pp.125-136, 1996.
- Epting, J., Verbyla, D., Sorbel, B., "Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+," *Remote Sensing of Environment*, in press.
- Rogan, J. and Yool, S.R., "Mapping . fire-induced vegetation depletion in the Peloncillo Mountains, Arizona and New Mexico", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, pp. 3101–3121, 2001.