

Supporto informativo del telerilevamento per il monitoraggio e la valutazione funzionale dei rimboschimenti come mezzi di lotta alla desertificazione

Riassunto

Il telerilevamento è una scienza che permette di ottenere informazioni qualitative e quantitative da un oggetto, un'area o un fenomeno tramite l'analisi di dati acquisiti da un dispositivo a distanza che non è in contatto con l'oggetto, l'area o il fenomeno investigato. Il telerilevamento passivo si basa sull'analisi della radiazione elettromagnetica riflessa dalla superficie investigata che è funzione delle sue proprietà chimico-fisiche e della lunghezza d'onda.

La vegetazione ha caratteristiche chimico fisiche che la rendono facilmente investigabile utilizzando il telerilevamento e per questo è possibile utilizzare questa tecnica anche per il monitoraggio dei rimboschimenti.

Schematizzandole, possono essere individuate diverse fasi in un intervento di rimboschimento: la scelta del sito, l'intervento, la verifica della riuscita del rimboschimento e il monitoraggio funzionale del soprassuolo forestale formatosi. Il telerilevamento può svolgere un'importante funzione di sostegno in molte di queste fasi.

Oggi sono disponibili molti sensori da piattaforme satellitari con diverse risoluzioni sia spaziali sia temporali, in grado di coprire quasi tutte le possibili esigenze. L'analisi di impianti forestali giovani e rimboschimenti recenti richiede però altissime risoluzioni spaziali che ad oggi solo il telerilevamento da piattaforma aerea riesce a garantire. In questo contesto, il sistema ASPIS messo a punto dal DISAFRI coniuga alte risoluzioni, flessibilità ed economicità, caratteristiche che lo rendono uno strumento idoneo al monitoraggio dei rimboschimenti e molto utile in zone remote o non accessibili facilmente.

I rimboschimenti come strumenti di lotta alla desertificazione assolvono anche altri compiti tra cui uno dei più importanti è l'assorbimento di CO₂ atmosferica. Il monitoraggio della capacità degli ecosistemi forestali nel fissare il carbonio è anche uno strumento per valu-

tarne l'efficienza funzionale. Esistono numerosi modelli per la stima della produttività primaria lorda e della produttività netta degli ecosistemi forestali ed il telerilevamento fornisce spesso degli input indispensabili, soprattutto nei modelli basati sull'efficienza d'uso della radiazione.

Abstract

Remote sensing is a discipline based on the use of sensors, carried by satellite or aerial platforms, to record electromagnetic radiation from Earth's surface, which can be interpreted to yield useful information. Passive remote sensing, notably, is based on the analysis of radiation emitted or reflected from the objects on the Earth's surface, which is dependant upon their physical-chemical characteristics.

Vegetation has a very characteristic spectral reflectance, that allows its identification and monitoring by remote sensing; accordingly, remote sensing can be used to monitor the condition of stands established in the process of reforestation to restore degraded sites.

Remote sensing is of operational use for several activities required by a reforestation intervention: site selection, monitoring of reforestation rooting and growth.

Nowadays a broad selection of satellite sensors is available, with different spatial and temporal resolutions to support nearly any application. However, the monitoring of recently established or young reforestation stands requires very high resolution imagery, currently offered by sensors mounted on aerial platforms. In this framework, the ASPIS system set up by DISAFRI combines high resolution, flexibility and cheapness, which enables reforestation monitoring to be carried out, especially in remote and inaccessible areas.

The rehabilitation of desertified areas by reforestation allows the restoration of many ecosystem services,

most importantly carbon sequestration; the monitoring of the assimilation of atmospheric carbon by forest ecosystems is crucial to assess their functional efficiency. Many models exist to estimate forest gross and net primary productivity and remote sensing provide important input variables for many of them, especially those based on the efficiency of use of electromagnetic radiation.

1. Introduzione

I rimboschimenti rappresentano una realtà forestale molto diffusa nei Paesi del bacino del Mediterraneo, dove rappresentano complessivamente l'11,6% della superficie forestale totale (Quézel e Médail 2003). Considerando i soli Paesi del Nord-Africa che si affacciano sul Mediterraneo – ove gran parte del territorio è esposta al rischio di desertificazione¹ – mediamente il 47% della superficie forestale nazionale è rappresentata da piantagioni (FAO 2001). La consistenza delle attività di rimboschimento nei Paesi mediterranei è in gran parte motivata dalla necessità, storica e attuale, di contrastare il degrado delle terre determinato da una complessa maglia di relazioni fattori ambientali predisponenti e pressioni antropiche sulle risorse naturali (Yassoglou 1999, López-Bermudez *et al.* 1999). Ciò ha determinato l'esposizione di vaste porzioni di territorio al rischio di desertificazione².

Gli interventi di rimboschimento consistono in un impianto di specie arboree (ed eventualmente arbustive) autoctone corrispondenti ad un livello più o meno avanzato della successione vegetazionale, che teoricamente si avrebbe a partire da un suolo nudo o comunque fortemente degradato sotto il profilo pedologico-vegetazionale. In linea generale si tende a favorire, fin dall'inizio e ove possibile, la costituzione di sistemi forestali complessi – attraverso impianti plurispecifici – prefigurando cicli colturali relativamente lunghi, al cui termine viene preferibilmente favorita la rinnovazione naturale del soprassuolo.

Il rimboschimento esercita un'azione progressiva e graduale nel corso del ciclo colturale, che può considerarsi opposta a quella della distruzione della copertura forestale (Ciancio e Iovino 1995): ad una fase iniziale in cui gli effetti immediati sulla regimazione delle acque lungo i versanti sono dovuti alle tecniche di preparazione del suolo (gradonamenti o di lavorazioni profonde), segue quella di protezione del suolo per la copertura delle chiome e successivamente di miglioramento del suolo per gli apporti di lettiera che variano con le specie impiegate. Questa azione di

miglioramento della fertilità del suolo “catalizza” nel corso del tempo i processi successionali, favorendo la ricolonizzazione delle aree rimboschite da parte delle specie forestali native (rinaturalizzazione).

L'azione di recupero funzionale dei terreni attraverso i rimboschimenti può quindi schematizzarsi in: i) aumentata capacità di protezione del suolo; ii) recupero della produttività biologica dei terreni e, conseguentemente, aumento della loro capacità di assorbimento di carbonio. Questo ultimo aspetto, di grande attualità per gli impegni derivanti dal Protocollo di Kyoto, pone i rimboschimenti come possibile strumento di intervento ‘trasversale’ dei programmi nazionali di attuazione della UNCCD e del Protocollo di Kyoto.

Tuttavia è bene sottolineare che il rimboschimento nelle zone sensibili alla desertificazione non è un intervento tecnicamente semplice date le notevoli limitazioni ambientali di queste aree (siccità, aridità, morfologie acclivi, suoli altamente erodibili e fortemente drenanti, ecc.). Al buon esito del rimboschimento concorrono vari fattori quali: l'idoneità delle specie impiegate alle caratteristiche ecologiche della stazione, la qualità del materiale vivaistico, le tecniche di lavorazione del suolo ed una corretta e tempestiva attuazione delle cure colturali. Non ultimo, è di fondamentale importanza per non vanificare gli sforzi compiuti, la partecipazione delle comunità locali fin dalle fasi d'impianto e, nel tempo, la condivisione in queste dei benefici derivanti dal recupero dei terreni attraverso il rimboschimento (es. prodotti legnosi e non).

In questo contesto, il telerilevamento è tecnica di indagine che può essere efficacemente impiegata per supportare le scelte operative sia nella fase di individuazione dei siti da rimboschire, che di verifica dell'efficacia dell'intervento.

2. Telerilevamento a supporto dei rimboschimenti nelle aree sensibili alla desertificazione

Il telerilevamento ottico si fonda sulla possibilità di differenziare ed analizzare alcune caratteristiche chimico fisiche degli elementi che compongono il paesaggio (suolo/roccia nuda, vegetazione, acqua, aree edificate, ecc.) in base alla diversa intensità di riflessione mostrata da ciascuna superficie, in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente. In particolare, la riflettanza della vegetazione si caratterizza per un particolare contrasto nella risposta nell'intervallo compreso



tra 0,6 e 1,3 μm , con un consistente assorbimento nel rosso (0,6-0,7 μm) e una forte riflessione nell'infrarosso vicino (0,7-1,3 μm). Tale risposta si distingue nettamente dalla riflettanza dell'acqua o del suolo/roccia nuda. Per sintetizzare le informazioni contenute nel diverso comportamento spettrale delle superfici con particolare riguardo alla vegetazione verde vengono spesso utilizzati degli indici basati sul rapporto delle riflettanza in queste due regioni spettrali (visibile e vicino infrarosso), consentendo quindi di discriminare la presenza di una copertura vegetale in un determinato territorio e il vigore dell'attività vegetativa. Tra i più usati a tale scopo ci sono il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), il Simple Ratio (SR) e l'Enhanced Vegetation Index (EVI).

Tutti questi indici sono indicatori di attività fotosintetica e rappresentano delle efficienti *proxy-variables* per identificare le zone con vegetazione in stress idrico, fattore che espone la vegetazione forestale al degrado da incendi forestali (Marchetti e Ricotta 2004). Inoltre essi possono essere impiegati per una stima del grado di copertura della vegetazione, considerati insieme agli incendi forestali uno dei fattori critici nello sviluppo del processo di erosione del suolo e di desertificazione nei territori forestali³. Il monitoraggio del territorio attraverso l'uso di questi indici e del loro andamento nel tempo sono quindi uno strumento utile per individuare trend negativi e predisporre eventuali misure di contrasto.

A tal fine possono essere elaborati indici multitemporali normalizzati come quello proposto da Chirici e Corona (2005), che si basa sull'NDVI calcolato per anni successivi:

$$T_{NDVI} = \frac{NDVI_n - NDVI_{n-1}}{NDVI_n + NDVI_{n-1}}$$

dove *NDVI* è il valore dell'assunto dall'indice nell'immagine telerilevata e *n* è l'anno di acquisizione dell'immagine stessa.

Tale indice, variabile tra -1 e 1, permette di evidenziare i trend di variazione dell'NDVI nel corso del tempo⁴.

3. Ambiti di impiego

Il telerilevamento può essere utilmente impiegato in diverse delle fasi operative che caratterizzano un intervento di rimboschimento (Figura 1):

Fase pre-intervento

– l'individuazione su scala vasta di siti potenziali da rimboschire.

Fase post-intervento

– monitoraggio del grado di affermazione dell'impianto (raggiungimento di una sufficiente copertura del suolo, protezione del suolo);

– monitoraggio dell'efficienza funzionale dell'impianto, attraverso la stima della sua produttività primaria netta e di ecosistema (analisi del *carbon-sink* nel lungo periodo).

3.1 Individuazione delle aree da rimboschire

L'individuazione dei siti da rimboschire può essere condotta a partire da mappe di sensibilità del territorio al rischio desertificazione, dove il telerilevamento può essere utilizzato per derivare una o più variabili di input per l'elaborazione dell'indice di rischio. In questo ambito, è in corso di sviluppo un Sistema Informativo Geografico per la mappatura della vulnerabilità al rischio desertificazione nella Regione Sardegna, basata sull'integrazione in un indice sintetico degli output di diversi modelli in modo da ottenere una indicazione della vulnerabilità del territorio⁵. Il modello si basa sugli output di 6 diversi modelli (produttività della vegetazione, impatto pascolamento, intrusione salina, erosione idrica, erosione eolica, degrado del suolo) ed in particolare sulla velocità di cambiamento dei valori stimati consentendo di evidenziare su territori molto estesi (scala regionale e sovra-regionale) le aree più esposte ai processi di degrado. Ovviamente, le scelte programmatiche delle aree da rimboschire dovranno discendere da specifiche valutazioni tecniche e socio-economiche accennate nel § 1.

Altre tipologie di indagine territoriale per la valutazione del grado di attitudine al rimboschimento delle aree sensibili, comprendono ad esempio analisi condotte implementando in ambiente GIS modelli di valutazione basati sulla metodologia generale della *land suitability/land capability* (FAO 1976). In questo ambito, possono trovare valida applicazione sistemi di valutazione basati su un approccio multicriteriale con logica sfocata (*fuzzy*), che consentono di classificare la suscettibilità del territorio alla realizzazione di impianti forestali secondo un grado di idoneità variabile tra 0 e 1 (Chirici *et al.* 2002).

3.2 Monitoraggio degli impianti

Soprattutto nel caso d'interventi di rimboschimento condotti su aree molto estese, in luoghi difficilmente accessibili, o frammentati all'interno

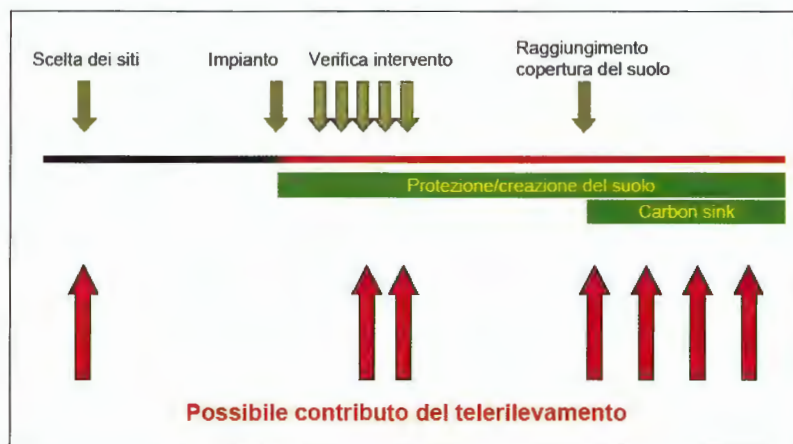


Figura 1. Contributo del telerilevamento nella realizzazione e monitoraggio dei rimboschimenti.

nel mosaico paesistico, può rendersi utile un'azione di monitoraggio del grado di affermazione degli impianti attraverso telerilevamento, operazione altrimenti onerosa se effettuata attraverso ricognizioni sul territorio. In particolare, l'insieme di fattori limitanti che caratterizzano le aree degradate si traducono spesso in un generale effetto xero-termico che porta ad uno dei tipici pro-

blemi della fase di attecchimento del rimboschimento: il superamento delle crisi di aridità. Per monitorare lo stato vegetativo delle aree recentemente rimboschite sono necessarie immagini acquisite da sensori con risoluzione geometrica molto elevata, che riescano a discriminare lo stress idrico di singole chiome, ad esempio attraverso gli indici di vegetazione citati precedentemente. Nei

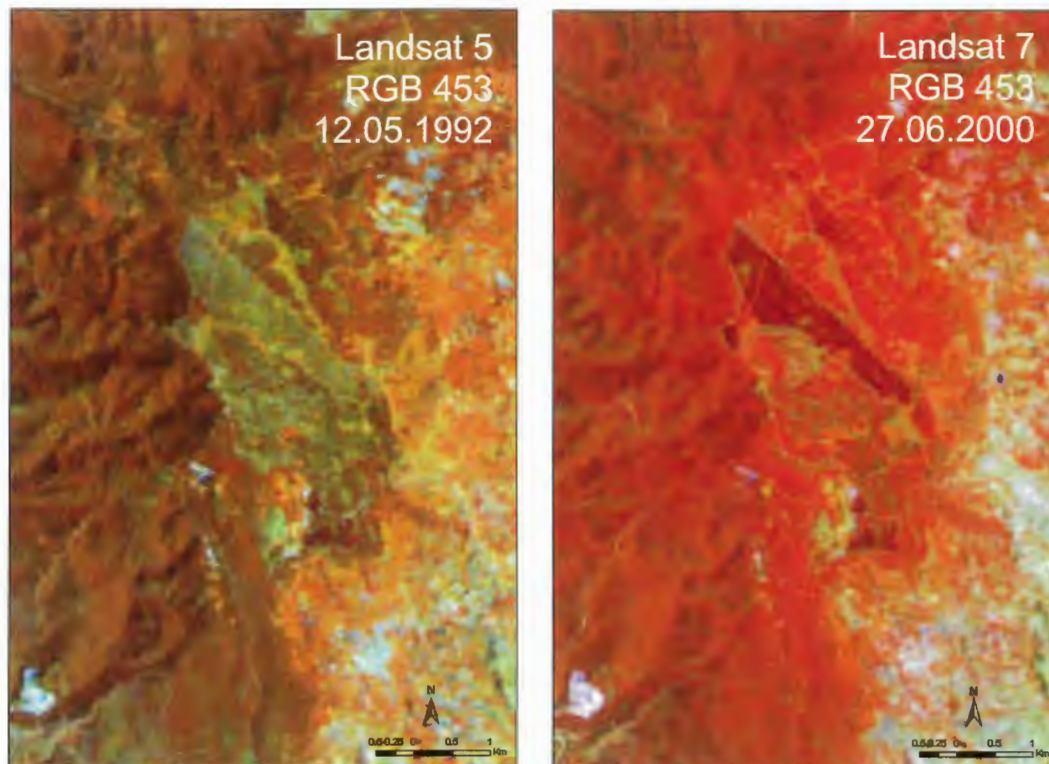


Figura 2. Regione Sardegna. Ripresa multi-temporale di un'area recentemente rimboschita (destra), in cui predomina la risposta spettrale del suolo, e del rimboschimento dopo otto anni (sinistra), attraverso il sistema satellite-sensore Landsat 5 e 7 (risoluzione geometrica rispettivamente 30 e 15 m).



giovani impianti, infatti, le chiome arrivano a coprire solo una frazione relativamente ridotta della superficie interessata dall'intervento, essendo il diametro della chioma generalmente inferiore al metro e la distanza tra le singole piante generalmente variabile tra 1,5 e 3 metri; elevato è quindi il contributo alla risposta spettrale del terreno tra le file del sesto d'impianto. I rimboschimenti risultano quindi pressoché invisibili in immagini satellitari di media risoluzione, fintantoché le chiome non arrivano a coprire gran parte dell'area interessata (Figura 2).

Poiché, in linea generale, un grado di copertura della vegetazione superiore al 40% è considerato sufficiente per contrastare l'erosione idrica su terreni in pendenza (vd. Enne e Zucca 2000), si può ragionevolmente affermare che l'efficienza funzionale del rimboschimento – sotto il profilo della protezione del suolo – inizi a manifestarsi quando lo sviluppo della copertura forestale raggiunge tale soglia. Anche in questo caso l'uso di immagini ottiche telerilevate ad alta risoluzione può supportare il monitoraggio del raggiungimento di tale target (ad esempio la risoluzione del canale pancromatico di QuickBird è 0,7 m; Ikonos 1 m; Spot5 2,5 m).

Nonostante l'offerta di sensori satellitari commerciali sia sempre più vasta e punti anche a risoluzioni geometriche spinte, in molti casi i sensori satellitari non sono utilizzabili. Un esempio sono le prime fasi del rimboschimento dove sono necessarie risoluzioni geometriche sub-metriche che ad oggi possono essere raggiunte solamente attraverso l'utilizzo di sensori multi-spettrali montati su piattaforme aeree, come nel caso del sistema ASPIS (Belli 2003, Papale *et al.* 2001). L'ASPIS (Advanced SPectroscopic Imaging System) è un sensore multispettrale a 4 bande molto maneggevole e flessibile nell'utilizzo, sviluppato dal DISAFRI. Basato su 4 sensori CCD, acquisisce immagini digi-

tali spettrali attraverso filtri interferenziali intercambiabili e selezionabili in volo. Uno dei suoi principali vantaggi è nella piattaforma aerea utilizzata (Sky Arrow 650 TC, Figura 3) che garantisce al tempo stesso flessibilità di manovra ed economicità. Chiaramente, trattandosi di un sensore aereo la risoluzione geometrica dipende dalla quota di volo ma non è difficile arrivare a risoluzioni al suolo di 15 cm, volando ad una quota ed una velocità tali da consentire comunque acquisire immagini su un transetto lungo 100 km e largo 400 metri in un'ora (Figura 4).

Il monitoraggio dell'efficienza funzionale dell'impianto può essere realizzato tramite l'analisi delle variazioni della produttività dei rimboschimenti nel corso del ciclo culturale. Esistono diversi metodi per la stima della Produttività Primaria Netta (NPP) e della Produttività Netta dell'Ecosistema (NEP) e parte di questi utilizza dei dati telerilevati. Ad esempio, attraverso tecniche di fotogrammetria digitale applicate a fotografie aeree digitalizzate (Zagalikis *et al.* 2005), è possibile stimare con sufficiente accuratezza, quei parametri dendrometrici dei popolamenti forestali quali area basimetrica, altezza, volume e densità – tradizionalmente raccolti attraverso rilievi a terra – utilizzati per la valutazione della massa legnosa di un soprassuolo forestale.

Un altro approccio molto diffuso è quello modellistico. Esistono diversi modelli per la stima delle produttività degli ecosistemi terrestri che partono da presupposti e basi molto diversi. Modelli di processo, come Orchidee (Krunner *et al.* 2005) e LPJ (Sitch *et al.* 2003) ad esempio si basano su assunzioni derivanti dalla conoscenza dei processi biologici, che cercano di riprodurre. Vi sono poi una serie di modelli che si affermano sempre più che vengono definiti *data-oriented*, in quanto non partono da assunzioni e conoscenza dei processi ma basano la loro parametrizzazione



Figura 3. Lo Sky Arrow 650 TC ed il sensore ASPIS.

esclusivamente o quasi sui dati, senza assunzioni relativamente ai processi. Tra questi ultimi, molti hanno degli input derivanti da dati telerilevati insieme ad altre variabili meteorologiche; esempi di questa tipologia di modelli sono le reti neurali artificiali (Papale e Valentini 2003) e soprattutto i modelli basati sull'efficienza d'uso della radiazione (ϵ) che hanno un'equazione del tipo:

$$GPP = \epsilon \cdot fAPAR \cdot PAR$$

dove PAR è la radiazione incidente nell'intervallo spettrale fotosinteticamente attivo, fAPAR è la percentuale di PAR che viene effettivamente assorbita dalla vegetazione ed è il parametro stimato attraverso il telerilevamento, ed ϵ è l'efficienza nella trasformazione dell'energia in carbonio fissato, che spesso viene modificata in funzione delle condizioni ambientali. Nemeni *et al.* (2003) ad esempio propongono di modificare ϵ a seconda della temperatura minima e del VPD secondo un'equazione del tipo $\epsilon = \epsilon_{max} \cdot f_1(T_{min}) \cdot f_2(VPD)$. Altre modifiche riguardano ad esempio l'ottimizzazione dei valori di ϵ utilizzando misure di produttività degli ecosistemi effettuate tramite la tecnica dell'eddy covariance (Reichstein *et al.* 2003a) o l'abbinamento a modelli di respirazione per la stima della NEP (Reichstein *et al.* 2003b).

L'utilizzo di modelli di questo tipo permette un monitoraggio costante della produttività; esistono infatti sensori satellitari che acquisiscono immagini con risoluzione temporale giornaliera anche se poi spesso le mappe di fAPAR vengono prodotte con risoluzioni settimanali o di 10 giorni. Nonostante i valori assoluti di produttività abbiano delle

incertezze abbastanza larghe, l'analisi dei trend nel tempo permette di capire se il soprassuolo forestale è soggetto a stress o problemi che ne pregiudichino o limitino l'efficienza funzionale.

4. Conclusioni

Il telerilevamento è una tecnica di indagine che può essere efficacemente impiegata a supporto della realizzazione e monitoraggio d'interventi di rimboschimento orientati al recupero funzionale di aree degradate, con processi di desertificazione in atto.

Esiste oggi un'ampia gamma di immagini telerilevate utilizzabili per il monitoraggio della vegetazione. Per applicazioni a scala di dettaglio (scala $\geq 1:10.000$), quale il monitoraggio dello stato vegetativo di impianti forestali in fase di affermazione, il telerilevamento aereo rimane il mezzo più flessibile ed a più alta risoluzione geometrica disponibile; per contro il telerilevamento aereo è stato sempre considerato più costoso e complesso da trattare rispetto alle immagini satellitari e non utilizzabile per il monitoraggio di aree molto vaste. Strumenti economici e flessibili come il sistema ASPIS permettono l'utilizzo del telerilevamento aereo anche per il monitoraggio di vaste aree ed in settori dove tipicamente questo tipo di strumenti non viene impiegato per problemi relativi ai costi.

Il segmento tecnologico dei sensori ottici ad alta risoluzione è attualmente soggetto a una forte spinta innovativa, che potrà consentire in futuro una crescente capacità di discriminazione e analisi

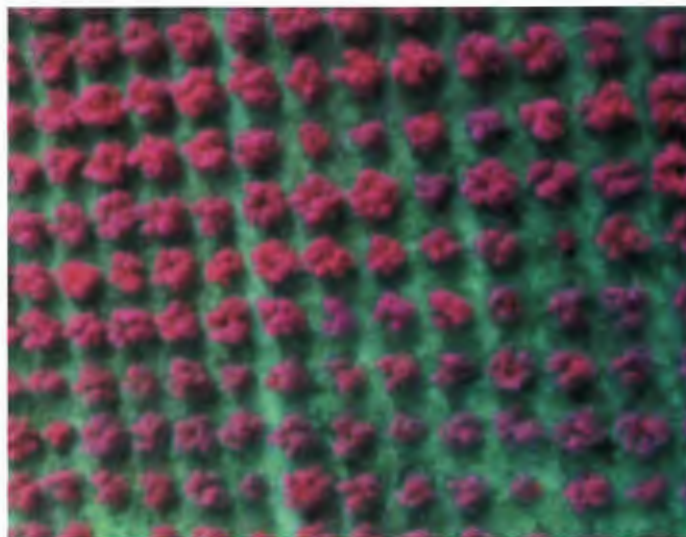


Figura 4. Esempio di ripresa multispettrale attraverso il sistema A.S.P.I.S di un impianto arboreo. L'immagine è una composizione falsi colori con risoluzione geometrica di circa 15 cm.



dello stato vegetativo delle foreste. Da segnalare, nel 2008, il previsto lancio del sistema satellitare WorldView2, con risoluzione spaziale di 50 cm nel pancromatico e 2 m nel multispettrale, (8 canali, di cui due nel rosso e due nell'infrarosso vicino).

Il telerilevamento fornisce anche degli input importanti nell'ambito dei modelli per la stima dell'efficienza funzionale (ad esempio la quantità di carbonio fissata, ecc.) modelli che sono oggetto di continui aggiornamenti e miglioramenti. L'utilizzo di tali modelli consente un monitoraggio in tempo quasi reale degli ecosistemi forestali e dei rimboschimenti a costi molto contenuti.

Bibliografia

- Belli C. (2003) L'Advanced Spectroscopic Imaging System (ASPIS). Un nuovo sistema digitale di telerilevamento aereo per lo studio delle risorse agricole - forestali. *Tesi di Dottorato di Ricerca in Ecologia Forestale XV Ciclo*. DISAFRI, Università degli Studi della Toscana.
- Chirici G., Corona P., Marchetti M., Travaglini D., Wolf U. (2002) Modello di valutazione dell'attitudine fisica del territorio per la realizzazione di piantagioni di noce comune e di douglasia in Italia meridionale. *Monti e Boschi*, 6: 25-31.
- Chirici G., Corona P. (2005) An overview of passive remote sensing for post-fire monitoring. *Forest@*, 2: 282-289.
- Ciancio O., Iovino F. (1995) I sistemi forestali e la conservazione del suolo. *I Geografici-Settima Serie*, XLI:85-146.
- Enne G., Zucca C. (2000) Desertification indicators for the European Mediterranean region. State of the art and possible methodological approaches. ANPA, Rome, pp. 121.
- FAO (1976) A framework for land evaluation. *Fao Soils Bulletin* 32, Roma.
- FAO (2001) State of the World's Forests 2001. FAO, Rome.
- Krinner G., Viovy N., de Noblet-Ducoudre N., et al. (2005) A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19.
- López-Bermúdez Francisco, Barberá Gonzalo G., Belmonte-Serrato Francisco (2000). How to measure desertification and degradation processes. In: Enne G., Zanolla C., Peter D., "Desertification in Europe: mitigation strategies, land-use planning". *Proceedings of the Advanced Study Course*, Alghero, 30/5 - 9/6 1999. European Commission. EUR 19390, pp. 30-45.
- Marchetti M., Ricotta C. (2004) Monitoraggio Contributo del telerilevamento. In: Blasi C., Bovio G., Corona P., Marchetti M., Maturani A. (eds.). "Incendi e complessità ecosistemica: dalla pianificazione forestale al recupero ambientale", Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, Società Botanica Italiana, Accademia Italiana di Scienze Forestali, Roma, pp. 220-225.
- Nemani RR., Keeling C.D., Hashimoto H., et al. (2003) Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300: 1560-1563.
- Papale D., Vitullo M., Belli C., Valentini R. (2001) Un nuovo strumento di proximal sensing per lo studio degli ecosistemi agroforestali: l'A.S.P.I.S. (Advanced Spectroscopic Imaging System), *Atti del III Congresso Nazionale SISEF*, 15-18 Ottobre 2001, Viterbo, pp. 153-157.
- Papale D., Valentini R. (2003) A new assessment of European forests carbon exchanges by eddy fluxes and artificial neural network spatialization. *Global Change Biology*, 9: 525-535.
- Quézel P., Médail F. (2003) *Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. Elsevier, pp. 571.
- Reichstein M., Dinh N., Running S., et al. (2003a) Towards improved European carbon balance estimates through assimilation of MODIS remote sensing data and CARBOEUROPE eddy covariance observations into an advanced ecosystem and statistical modeling system. In: *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'03)*, Toulouse, France, 21-25 July 2003.
- Reichstein M., Rey A., Freibauer A., et al. (2003b) Modelling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochemical Cycles*, 17: 15/11-15/15.
- Sitch S., Smith B., Prentice I.C., et al. (2003) Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 9: 161-185.
- Yassoglou N. J. (1999) History and development of desertification in the Mediterranean and its contemporary reality. In: Enne G., Zanolla C., Peter D., "Desertification in Europe: mitigation strategies, land-use planning". *Proceedings of the Advanced Study Course*, Alghero, 30/5 - 9/6 1999. European Commission, EUR 19390, pp. 9-15.
- Zagalikis G., Cameron A.D., and Miller D.R. (2005) The application of digital photogrammetry and image analysis techniques to derive tree and stand characteristics. *Canadian Journal of Forest Research* 35(5): 1224-1237.

Note

¹ Cfr. "Map to sensitivity to desertification for Northern African Countries", http://dismed.eionet.eu.int/Facilities/dismed_productsg.

² Cfr. "Map of Sensitivity to desertification and drought in the Mediterranean Basin" http://dismed.eionet.eu.int/Facilities/dismed_productsg.

³ Vd. in proposito il Vegetation Quality Index della metodologia ESA (Environmental Sensitive Areas to Desertification-ESAs) sviluppata nell'ambito del progetto MEDALUS www.medalus.demon.co.uk.

Vd. ad esempio Annual Trend Analysis dell'NDVI nei Paesi mediterranei su: http://dismed.eionet.eu.int/Facilities/dismed_products/ndvi_annual.jpg.

⁵ Regione Sardegna: Progettazione e realizzazione di un GIS per il monitoraggio delle aree della Sardegna a rischio di desertificazione. Santini et al. in preparazione.