

Telerilevamento iperspettrale da aereo per il monitoraggio di ecosistemi forestali: mappa di specie e stima di parametri biofisici

Giulia Tagliabue (*), Cinzia Panigada (*), Roberto Colombo (*), Chiara Cilia (*), Francesco Fava (*), Frédéric Baret (**), Anke Schickling (***), Uwe Rascher (***), Kristin Vreys (****), Koen Meuleman (****), Micol Rossini (*)

(*) Università degli Studi di Milano-Bicocca, Piazza della Scienza 1, 20126 Milano, Italia
e-mail: g.tagliabue9@campus.unimib.it, cinzia.panigada@unimib.it, roberto.colombo@unimib.it
chiara.cilia@gmail.com, francesco.fava@unimib.it, micol.rossini@unimib.it

(**) Institut National de la Recherche Agronomique, Avignon, France
e-mail: baret@avignon.inra.fr

(***) Institute of Bio- & Geosciences - Plant Sciences (IBG-2), Forschungszentrum Jülich GmbH
Leo Brandt-Str., 52425 Jülich, Germany
e-mail: a.schickling@fz-juelich.de, u.rascher@fz-juelich.de

(****) VITO Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, Boeretang 200, 2400 Mol, Belgium
e-mail: kristin.vreys@vito.be, koen.meuleman@vito.be

Riassunto

Obiettivo del presente lavoro è la realizzazione della mappa delle tipologie forestali e del rispettivo contenuto di clorofilla totale della *canopy* (CCC) di una foresta planiziale mista (Forêt de Hardt, Francia) utilizzando dati acquisiti tramite il sensore iperspettrale aviotrasportato APEX (*Airborne Prism Experiment*) nell'ambito della campagna SEN2Exp, finanziata dall'Agenzia Spaziale Europea.

Parallelamente ai sorvoli aerei è stata effettuata una campagna a terra volta a quantificare parametri biochimici e strutturali della vegetazione (i.e., clorofilla fogliare e *Leaf Area Index* (LAI), da cui è stato calcolato il CCC come prodotto tra clorofilla fogliare e LAI), la composizione in specie e il loro stato di salute in corrispondenza di 22 siti di campionamento.

La mappa delle tipologie forestali dominanti – carpino (*Carpinus betulus* L.), quercia (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus robur* L.), tiglio (*Tilia* L.) e pino (*Pinus* L.) – è stata realizzata con un processo di classificazione *supervised*, utilizzando un algoritmo *Maximum Likelihood* e come input per la discriminazione delle classi 3 *features* spettrali calcolate come rapporti tra bande del *red edge* e una banda del blu e l'informazione multi-temporale ottenuta mediante la sovrapposizione delle immagini APEX acquisite in due tempi diversi (17/06/2013 e 04/09/2013).

La mappa ottenuta, la cui accuratezza globale è risultata essere pari a 74.4%, è stata utilizzata per produrre mappe di CCC per le latifoglie dominanti tramite modelli semi-empirici. Le regressioni statistiche individuate tra CCC misurato e l'indice ottico MTCI (*MERIS Terrestrial Chlorophyll Index*) sono state applicate alle immagini APEX di giugno e settembre, ottenendo mappe di CCC per specie nei due periodi del sorvolo. L'analisi degli istogrammi di frequenza dei valori di CCC a livello di singola specie in giugno e settembre ha permesso di rilevare andamenti specie-specifici nel tempo legati sia al ciclo fenologico, sia ad un fattore di stress rappresentato dalla presenza in giugno di larve di lepidottero, che ha determinato una defogliazione principalmente delle piante di carpino e quercia.

Abstract

Objective of this work is the production of a map of dominant forest species and the relative total canopy chlorophyll content (CCC) of a plain mixed forest (Forêt de Hardt, France) using data

acquired with the APEX (Airborne Prism EXperiment) hyperspectral airborne imaging spectrometer in the framework of SEN2Exp campaign, funded by the European Space Agency.

A field campaign was conducted concurrently with the airborne data acquisition in 22 sampling sites in order to quantify biochemical and structural vegetation variables (i.e., leaf chlorophyll content and Leaf Area Index (LAI), which were used to calculate CCC as the product between leaf chlorophyll and LAI). Tree species composition and crown conditions were also evaluated.

The map of dominant forest species – hornbeam (*Carpinus betulus* L.), oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus robur* L.), linden (*Tilia* L.) and pine (*Pinus* L.) – was realized by means of a Maximum Likelihood supervised classification. Discrimination of the classes was performed using as input 3 spectral features computed as ratios between red edge bands and a blue band. The algorithm performances were improved by the multi-temporal information gained through the overlapping of APEX images acquired in two different vegetative stages (i.e., 17/06/2013 and 04/09/2013).

The species map obtained has an overall accuracy of 74.4% and it was used to produce CCC maps for dominant broadleaves applying semi-empirical models. Statistical regressions between measured CCC and MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index), the best performing optical index, were applied to June and September APEX images, obtaining CCC maps at species level in the two different acquisition periods. Analysis of CCC frequency histograms for each species in June and September allowed the detection of species-specific trends related to phenological development. In addition, CCC maps evidenced a significant defoliation of hornbeam and oak plants in June caused by the presence of Lepidoptera larvae.

Introduzione

Negli ultimi anni, il riconoscimento dell'importanza del ruolo rivestito dagli ecosistemi forestali all'interno delle dinamiche ambientali a scala sia locale che globale ha fornito nuovi impulsi all'analisi della loro variabilità spazio-temporale.

In passato, il monitoraggio del comparto forestale si è focalizzato principalmente sulla valutazione delle condizioni delle corone per mezzo dell'utilizzo di indici di defogliazione e discolorazione. Tali indici vengono stimati visivamente da esperti forestali e forniscono pertanto una valutazione soggettiva, rendendo difficile il confronto di dati raccolti da differenti operatori e la ricostruzione di trend affidabili negli anni (Ferretti, 1998).

In tale contesto, il telerilevamento è uno strumento dalle grandi potenzialità rispetto al solo utilizzo di metodi tradizionali, in quanto offre la possibilità di mappare ripetutamente nel tempo aree estese in modo sostenibile in termini di tempi e costi.

In tempi recenti, l'avvento di una nuova generazione di sensori iperspettrali, grazie alla caratteristica di avere un elevato numero di bande strette di acquisizione che consente di indagare variazioni nel comportamento spettrale della vegetazione in regioni specifiche dello spettro elettromagnetico, ha determinato una svolta sia nel campo della mappatura forestale, sia in quello della quantificazione di parametri relazionati alle condizioni di salute (Panigada et al., 2010). Tra questi, ha mostrato notevole applicabilità la stima mediante indici di vegetazione sensibili del contenuto di clorofilla totale della *canopy* (CCC) (Broge, 2002; Gitelson, 2005).

Obiettivo del presente lavoro è l'analisi della variabilità spazio-temporale di una foresta mista di media latitudine mediante la mappatura delle tipologie forestali presenti e del relativo CCC, a partire da dati aerei iperspettrali acquisiti in due momenti dello sviluppo fenologico della vegetazione.

Materiali e metodi

Acquisizione e pre-elaborazione delle immagini telerilevate

I dati telerilevati sono stati acquisiti tramite il sensore iperspettrale aviotrasportato APEX (*Airborne Prism EXperiment*), sviluppato da un consorzio svizzero-belga per conto dell'Agenzia Spaziale Europea. APEX presenta 288 bande di acquisizione posizionate nelle regioni spettrali del visibile,

infrarosso vicino e infrarosso a onde corte, che consentono una dettagliata riproduzione del comportamento spettrale delle superfici indagate.

Le immagini aeree sono state acquisite il 17 giugno 2013 e il 4 settembre 2013 in corrispondenza della Forêt de Hardt, bosco misto pianiziale localizzato in Alsazia (Francia), volando ad una quota di circa 6000 m a cui corrisponde una risoluzione geometrica al suolo di circa 3 m. Al fine di minimizzare l'effetto di ombre, l'acquisizione è stata effettuata con sole allo zenit (h 12:30±30 minuti solari), volando nel piano solare principale.

La pre-elaborazione delle immagini APEX è stata effettuata dall'ente di ricerca belga VITO. È stata effettuata la calibrazione radiometrica e successivamente la correzione geometrica, utilizzando in input il DTM (*Digital Terrain Model*) della regione e i dati registrati durante l'acquisizione dal GPS (*Global Positioning System*) e dall'IMU (*Inertial Measurement Unit*) del sensore (sistema di riferimento UTM WGS84 zona 32N). Infine, le immagini sono state corrette atmosfericamente mediante l'uso del codice di trasferimento radiativo MODTRAN4, impiegando le stime di visibilità, tipologia di aerosol e contenuto di vapore acqueo ottenute dalle misure effettuate *in situ* tramite un fotometro solare (Microtops II, Solar Light Company, Inc, USA).

Acquisizione dei dati a terra

Parallelamente ai sorvoli, è stata condotta una campagna di misure a terra volta a caratterizzare la composizione in specie del bosco, a valutarne visivamente le condizioni e a quantificarne alcuni parametri biofisico-strutturali (i.e., clorofilla totale fogliare - C_{ab} , *Leaf Area Index* - LAI). I campionamenti sono stati effettuati all'interno di 22 unità elementari di campionamento di circa 20 m di lato (Figura 1).

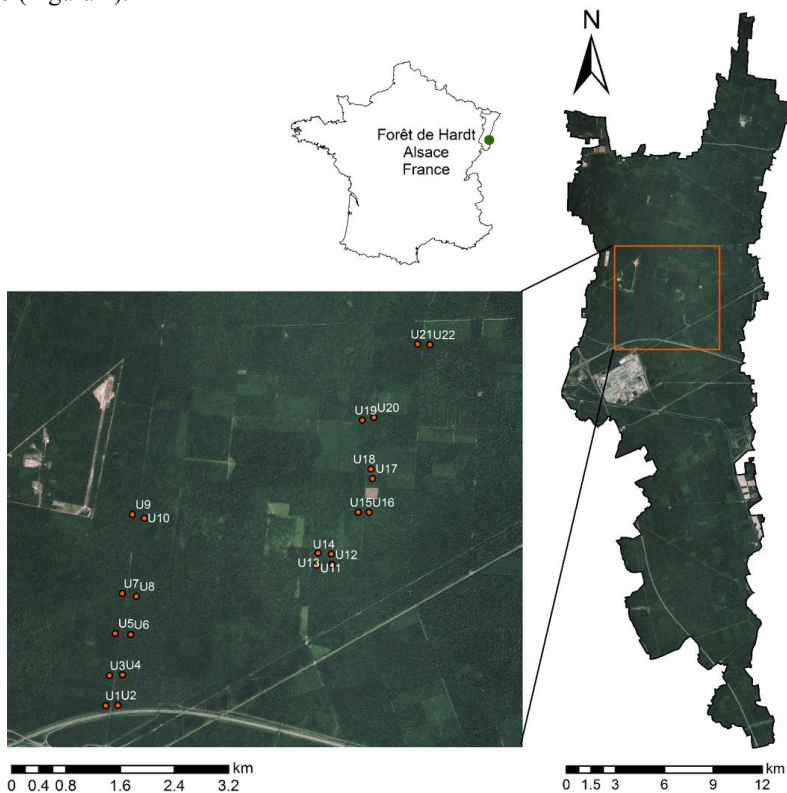


Figura 1 - Area di studio e localizzazione delle unità elementari di campionamento.

Ogni unità elementare è stata caratterizzata da esperti forestali mediante la descrizione e la distribuzione percentuale delle specie principali presenti nel piano forestale dominante. Dalle principali specie presenti è inoltre stato campionato un numero adeguato di foglie dalla sommità della chioma, dalle quali, successivamente, sono stati estratti i pigmenti fogliari. L'indice di area fogliare (LAI) è stato invece calcolato a partire da fotografie digitali emisferiche ottenute con un obiettivo *fish-eye* ed elaborate con il software dedicato CAN-EYE (<https://www4.paca.inra.fr/can-eye/CAN-EYE-Home/Welcome>). Il contenuto di clorofilla totale della *canopy* (CCC) è stato infine ottenuto dal prodotto tra i valori di C_{ab} da estrazione di laboratorio e i valori di LAI.

Classificazione

La mappa delle tipologie forestali individuate essere dominanti nella Forêt de Hardt - carpino (*Carpinus betulus* L.), quercia (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus robur* L.), tiglio (*Tilia* L.) e pino (*Pinus* L.) - è stata realizzata seguendo un approccio di classificazione *supervised*.

Mediante l'integrazione di fotointerpretazione di ortofoto ad elevata risoluzione geometrica e conoscenze relative alla distribuzione delle diverse specie derivanti dalle osservazioni di campo, per ciascuna delle classi definite è stato selezionato sulle immagini APEX un *endmember set*, necessario ad addestrare l'algoritmo classificatore al riconoscimento ed all'assegnazione di tutti i pixel dell'immagine alle rispettive classi.

Per ciascuna classe, sono stati selezionati pixel puri di corona da aree omogenee dislocate su tutta l'area di studio, per un totale di circa 400 pixel distribuiti tra tutte le classi considerate. Oltre alle classi di vegetazione, è stata definita una classe "ombra", che identifica le zone di ombra inter-corona.

Come criterio di decisione per l'assegnazione dei pixel dell'immagine è stato scelto un algoritmo di classificazione *Maximum Likelihood*, utilizzando come input per la discriminazione delle classi, al fine di evitare il problema della ridondanza di informazione, indici spettrali nella regione del *red edge* (Boschetti et al., 2007). Più in dettaglio, sono stati calcolati i rapporti tra tre bande del *red edge* (i.e., bande APEX 45 (659.2 nm), 58 (701.6 nm) e 68 (480.8 nm)) e una banda del blu (i.e., banda APEX 7 (480.8 nm)) a partire dalle immagini APEX in radianza di giugno e settembre, al fine di sfruttare l'informazione spettrale relazionata al diverso sviluppo fenologico delle specie considerate nei due tempi del sorvolo.

La mappa di specie prodotta è stata validata confrontando il risultato della classificazione con la realtà in corrispondenza di 250 *testing samples* selezionati secondo uno schema di campionamento random stratificato. Si è calcolato: (i) l'accuratezza globale, che esprime la percentuale di pixel che sono stati classificati correttamente rispetto al totale di *testing samples*, (ii) l'accuratezza del produttore, che rappresenta per ogni classe la percentuale di pixel classificati correttamente rispetto al totale di *testing samples* per quella classe, e (iii) l'accuratezza dell'utente, che rappresenta per ogni classe la percentuale di pixel classificati correttamente rispetto al numero totale di pixel assegnati a quella classe.

Stima della concentrazione di clorofilla a livello di *canopy* (CCC)

La mappa delle tipologie forestali prodotta è stata utilizzata per produrre mappe di CCC a livello di singola specie per le latifoglie dominanti.

Per la stima del CCC a partire dalle immagini APEX si è ricorso a modelli semi-empirici di tipo regressivo, basati sull'individuazione di correlazioni statistiche tra variabili misurate in campo e indici ottici di vegetazione calcolati a partire dai dati telerilevati. Sono stati testati diversi indici ottici che da letteratura mostrano buone prestazioni nella stima del contenuto di C_{ab} (Figura 2).

Indice	Riferimento	Equazione	Bande APEX corrispondenti
MTCI	Dash e Curran (2004)	$(R754-R709)/(R709-R681)$	$(b71-b60)/(b60-b52)$
ZMI	Zarco-Tejada et al. (2001)	$R750/R710$	$b71/b60$
NDVI705	Gitelson et al. (1994)	$(R750-R705)/(R750+R705)$	$(b71-b60)/(b71+b60)$
PRI	Gamon et al. (1992)	$(R531-R570)/(R531+R570)$	$(b13-b19)/(b13+b19)$
NDVI	Rouse et al. (1974)	$(R800-R680)/(R800+R680)$	$(b81-b52)/(b81+b52)$
PSSR	Blackburn (1998)	$R800/R680$	$b81/b52$

Figura 2 - Indici ottici di vegetazione testati per la stima del contenuto di C_{ab} . R_x è la riflettanza alla lunghezza d'onda specificata in nm. b è la banda APEX corrispondente.

La migliore relazione trovata in termini di R^2 è stata invertita analiticamente ed applicata alle immagini APEX in riflettanza acquisite in giugno e settembre al fine di mappare il CCC delle singole specie.

I valori di CCC ottenuti sono stati discretizzati in cinque classi di ampiezza omogenea nell'intervallo di calibrazione del modello semi-empirico utilizzato, inoltre sono state definite due ulteriori classi per i valori al di fuori del limite inferiore e superiore dell'intervallo di applicabilità. Le mappe di CCC per le latifoglie dominanti nei due periodi del sorvolo così prodotte sono state confrontate al fine di individuare variazioni nel contenuto di CCC relazionate al ciclo fenologico o ad eventuali condizioni di stress della vegetazione.

Risultati

Il processo di classificazione ha consentito la realizzazione di una mappa tematica delle tipologie forestali dominanti nella Forêt de Hardt, di cui è riportato un dettaglio in Figura .

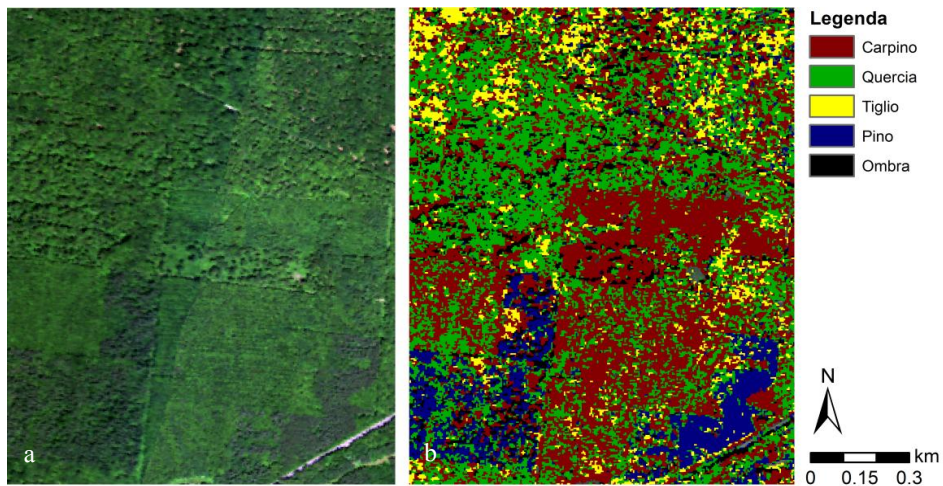


Figura 3 - a) Sintesi RGB a colori reali di un ritaglio di immagine APEX, b) Risultato della classificazione.

Il grado di accordo con la realtà è stato valutato attraverso i tre parametri descrittivi dell'accuratezza ottenuti dalla matrice di confusione. L'accuratezza globale è risultata essere pari al 74.4%, valore in linea con quelli relativi a studi analoghi riportati in letteratura (Martin et al., 1998; Boschetti et al., 2007; Dalponte et al., 2013; Marcinkowska et al., 2014); l'accuratezza del produttore è risultata essere compresa tra il 60% e l'85.92%, con i valori maggiori per quercia e pino; l'accuratezza dell'utente è risultata essere compresa tra il 61% e il 90%, con i valori più elevati per le classi carpino e pino. La mappa generata, la cui accuratezza suggerisce un adeguato accordo con la realtà,

ha permesso, grazie alla possibilità di lavorare sui pixel dell'immagine appartenenti a singole tipologie forestali, di realizzare mappe di CCC per le latifoglie dominanti.

La spazializzazione del CCC è stata effettuata impiegando i modelli semi-empirici basati sulla regressione tra CCC ed MTCI, l'indice ottico che ha mostrato la correlazione maggiore con il dato misurato ($R^2 = 0.55, 0.69, 0.48$ per carpino, quercia e tiglio rispettivamente). A titolo di esempio è rappresentato in Figura 4 un dettaglio delle mappe di CCC della quercia nei due momenti del sorvolo.

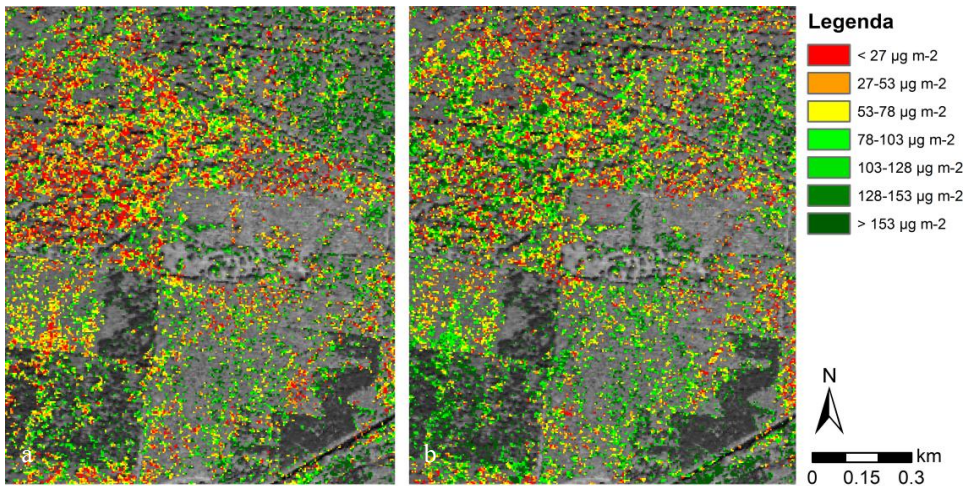


Figura 4 - Mappe di CCC relative alla quercia in giugno (a) e settembre (b).

L'analisi del CCC nel tempo, effettuata confrontando gli istogrammi di frequenza dei valori di CCC nei due periodi del sorvolo per le tre latifoglie considerate, ha mostrato una variabilità specie-specifica: il carpino è caratterizzato da una generale uniformità dei valori di CCC in giugno e settembre, la quercia da un lieve aumento in settembre e il tiglio da una significativa diminuzione.

Gli andamenti osservati sono il risultato del contributo delle due variabili, C_{ab} fogliare e LAI, che non necessariamente covariano tra di loro e i cui effetti sulla risposta spettrale misurata dal sensore non possono essere distinti. Da ciò consegue che, in una situazione di forte eterogeneità spaziale come quella considerata, l'effetto di elevati valori di C_{ab} associati a bassi valori di LAI non può essere distinto da quello di bassi valori di C_{ab} ed elevati valori di LAI, e viceversa.

Tuttavia, l'analisi statistica delle misure di C_{ab} e LAI effettuate durante le campagne a terra in giugno e settembre, integrata alle mappe di CCC prodotte ha permesso di fare alcune ipotesi circa le dinamiche dell'ecosistema forestale.

Per quanto riguarda il LAI, si osservano valori più bassi in giugno, rispetto a settembre, dovuti alla presenza consistente di larve di lepidottero, riscontrata nel corso della prima campagna di misure. Questa ha determinato una defogliazione significativa in particolare in quercia e carpino. In settembre, la presenza di nuove foglie a sostituire quelle danneggiate ha prodotto un incremento statisticamente significativo dei valori di LAI.

Riguardo alla C_{ab} invece, si sono osservate diminuzioni nel carpino e nel tiglio, indice di una degradazione dei pigmenti fotosintetici connessa ad un inizio della fase di senescenza, più evidente per quest'ultima specie. I valori di C_{ab} restano invece costanti nella quercia.

Alla luce di questo, la mappa del carpino, che mostra una distribuzione dei valori di CCC sostanzialmente invariata tra giugno e settembre fa ipotizzare che l'aumento del LAI in settembre sia compensato da una lieve diminuzione della C_{ab} . La mappa della quercia mostra invece un incremento dei valori di CCC in settembre, probabilmente relazionata alla presenza delle nuove

foglie cresciute dopo l'attacco del lepidottero. Infine, la mappa del taglio mostra valori di CCC più bassi in settembre, ad indicare l'inizio della fase di senescenza.

Conclusioni

Il presente lavoro si è focalizzato sulla realizzazione di una mappa delle tipologie forestali dominanti nella Forêt de Hardt, e delle mappe del relativo contenuto di CCC. L'analisi delle mappe di CCC relative ai due sorvoli (giugno e settembre), ha permesso di rilevare andamenti specie-specifici di questa variabile, relazionati da un lato all'avanzamento della stagione vegetativa, e dall'altro ad un elemento di stress rappresentato dalla presenza in giugno di larve di lepidotteri defogliatori, che hanno determinato bassi valori di CCC nella prima campagna di misure.

Questo studio ha evidenziato l'utilità del CCC quale bioindicatore delle condizioni della vegetazione, confermando l'utilità delle osservazioni remote integrate alle tradizionali misure di campo per il monitoraggio degli ecosistemi forestali, al fine di individuare in modo precoce eventuali condizioni di stress.

Bibliografia

Boschetti M., Boschetti L., Oliveri S., Casati L., Canova I. (2007), "Tree species mapping with Airborne hyper-spectral MIVIS data: the Ticino Park study case", *International Journal of Remote Sensing*, 28:1251-1261

Blackburn G.A. (1998), "Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves", *International Journal of Remote Sensing*, 19:657-675

Broge N.H., Mortensen J.V. (2002), "Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data", *Remote Sensing of Environment*, 81:45-57

Dalponte M., Orka H.O., Gobakken T., Gianelle D., Naesset E. (2013), "Tree species classification in boreal forests with hyperspectral data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51:2632-2645

Dash J., Curran P.J. (2004), "The MERIS terrestrial chlorophyll index", *International Journal of Remote Sensing*, 25:5403-5413

Ferretti M., (1998), "Potential and limitation of visual indices of tree condition", *Chemosphere*, 36:1031-1036

Gamon J.A., Peñuelas J., Field C.B. (1992) "A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency", *Remote Sensing of Environment*, 41:35-44

Gitelson A., Merzlyak M.N. (1994) "Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation", *Journal of Plant Physiology*, 143:286-292

Gitelson A., Viña A., Ciganda V., Rundquist D.C., Arkebauer T.J., (2005), "Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops", *Geophysical Research Letters*, 32

Marcinkowska A., Zagajewski B., Ochtyra A., Jarocińska A., Raczko E., Kupková L., Stych, P., Meuleman K. (2014), "Mapping vegetation communities of the Karkonosze National Park using APEX hyperspectral data and Support Vector Machines", *Miscellanea Geographica*

Martin M.E., Newman S.D., Aber J.D., Congalton R.G. (1998), "Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data", *Remote Sensing of Environment*, 65:249-254

Panigada C., Rossini M., Busetto L., Meroni M., Fava F., Colombo R. (2010), "Chlorophyll concentration mapping with MIVIS data to assess crown discoloration in the Ticino Park oak forest", *International Journal of Remote Sensing*, 31:3307-3332

Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. (1974), "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS", *Third ERTS-1 Symposium*, 10-14 Dec. 1973

Zarco-Tejada P.J., Miller J.R., Noland T.L., Mohammed G.H., Sampson P.H. (2001), "Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39:1491-1507