

## Monitoraggio delle condizioni della farnia (*Quercus robur* L.) nel Parco del Ticino mediante tecniche di telerilevamento iperspettrale

Rossini M\* <sup>(1)</sup>, Panigada C <sup>(1)</sup>, Meroni M <sup>(1)</sup>, Busetto L <sup>(1-2)</sup>, Castrovinci R <sup>(3)</sup>, Colombo R <sup>(1)</sup>

(1) Lab. Telerilevamento Dinamiche Ambientali, Dip. Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università Milano-Bicocca, Piazza della Scienza 1, 20126 Milano; (2) CNR-IIA, via Salaria, 00016 Monterotondo Stazione (RM); (3) Consorzio Lombardo della Valle del Ticino, via Isonzo 1, 20013 Pontevecchio di Magenta (MI). - \*Corresponding author: Micol Rossini (micol.rossini@unimib.it).

**Abstract:** Pedunculate oak forests (*Quercus robur* L.) survey in the Ticino Regional Park (Italy) by remote sensing. Pedunculate oak forests (*Quercus robur* L.) in the Ticino Regional Park (Italy) show sensible damage conditions due to different environmental stresses: insect attacks, summer drought and air pollution. Knowing whether oaks are healthy or stressed can provide useful information in order to conserve the forest ecosystems and avoid the lost of valuable natural resources. Environmental stresses can affect tree biochemical and structural variables, such as the concentration, composition and efficiency in light harvesting of foliar pigments, and the Leaf Area Index (LAI). Interest in the use of these variables for forest condition assessment has recently increased because they can be indirectly estimated from remote observations at leaf and canopy level. In particular, in this research we found that total chlorophyll (Chl) concentration, a biochemical variable related to crown discoloration rate, was the most suitable variable for the detection of pedunculate oak decline in the Ticino Park. A regression analysis between Chl concentration and optical indices computed from hyperspectral MIVIS data was performed in order to estimate Chl concentration from remote observations. The good correlation between field measurements of Chl concentration and MIVIS optical indices allowed the development of a model to map Chl concentration across the Ticino Park forested area. Promising results demonstrated that remotely sensed data can provide an accurate estimation of Chl concentration and indicated the potential of this technique for forest condition monitoring.

**Keywords:** Foliar pigments, Stress detection, Canopy reflectance, Optical indices, *Quercus robur*.

Received: Feb 07, 2006 - Accepted: Mar 27, 2007.

**Citation:** Rossini M, Panigada C, Meroni M, Busetto L, Castrovinci R, Colombo R, 2007. Monitoraggio delle condizioni della farnia (*Quercus robur* L.) nel Parco del Ticino mediante tecniche di telerilevamento iperspettrale. Forest@ 4 (2): 194-203. [online] URL: <http://www.sisef.it/>.

### Introduzione

I boschi di farnia (*Quercus Robur* L.) del Parco Regionale del Ticino Lombardo stanno attraversando da diversi anni una fase di deperimento, associabile all'azione congiunta di numerosi fattori di stress antropici e naturali quali, l'inquinamento atmosferico, il deficit idrico, le temperature estreme e le infestazioni di insetti defogliatori che si presentano con tempi di ritorno sempre più brevi. La conoscenza e il monitoraggio delle condizioni dei boschi del Parco sono importanti ai fini di una pianificazione territoriale sostenibile e della conservazione del patrimonio forestale.

Le strategie di monitoraggio forestale attualmente utilizzate a livello europeo sono basate sulla valutazione di indici qualitativi: discolorazione delle foglie e defogliazione delle chiome, assegnati tramite rilievi di campo. Queste metodologie, sebbene forniscano una buona descrizione delle condizioni dei boschi in esame, si basano su valutazioni soggettive, che comportano difficoltà nel confronto tra dati raccolti da operatori diversi o nella ricostruzione di andamenti realistici negli anni (Ferretti 1998).

Inoltre, i tradizionali metodi visivi non permettono di monitorare aree estese: le condizioni dei boschi a scala regionale vengono dedotte attraverso un

approccio statistico la cui attendibilità dipende strettamente dal numero e dalle dimensioni dei siti di campionamento selezionati e dal metodo di selezione impiegato (Innes 1995, Ferretti 1997).

Il declino dei boschi è il risultato di complessi processi fisiologici che determinano variazioni nelle caratteristiche biochimiche e strutturali della vegetazione, quali la concentrazione, la composizione e l'efficienza dei pigmenti fotosintetici e l'indice di area fogliare (*Leaf Area Index*, LAI). Il monitoraggio di tali variabili può quindi aiutare a descrivere la condizione dei boschi. Infatti, in presenza di fattori di stress, si possono riscontrare riduzioni della concentrazione di clorofilla totale (Chl, clorofilla a + clorofilla b), variazioni del rapporto clorofilla a/clorofilla b (Chl a/b) e variazioni del rapporto clorofilla/carotenoidi (Chl/Car - Young & Britton 1990, Biswall 1995, Merzlyak & Gitelson 1995, Demmig-Adams & Adams 1996, Taiz & Zeiger 1998, Gitelson et al. 2002, Lorenzini & Nali 2005). A livello di *canopy*, poiché il LAI è una variabile strutturale relazionata alla trasparenza delle corone e al vigore delle piante, una sua deviazione dal valore atteso in quelle particolari condizioni ecologiche può fornire ulteriori informazioni sulla condizione dei boschi.

La possibilità di stimare queste variabili mediante osservazioni remote, analizzando il comportamento spettrale della vegetazione nelle varie regioni dello spettro elettromagnetico, giustifica il crescente interesse nell'uso di queste variabili per il monitoraggio delle condizioni dei boschi (Carter & Knapp 2001, Zarco-Tejada et al. 2002, Sampson et al. 2003, Coops et al. 2004, Rossini et al. 2006). Nella letteratura più recente si riportano infatti validi risultati nella stima della concentrazione dei pigmenti fogliari (Carter 1994, Datt 1998, Zarco-Tejada et al. 2001, Sims & Gamon 2002, Dash & Curran 2004, Le Maire et al. 2004, Zarco-Tejada et al. 2005) e del LAI (Broge & Leblanc 2001, Meroni et al. 2002, Lee et al. 2004) mediante modelli semi-empirici di tipo regressivo basati sull'individuazione di correlazioni tra variabili misurate e indici ottici a banda stretta (5-10 nm) calcolati a partire da immagini acquisite con sensori iperspettrali.

In questo contesto, nell'estate del 2003 è stata condotta una campagna aerea con il sensore iperspettrale aviotrasportato MIVIS (*Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer*) sulle aree boschive del Parco Regionale del Ticino Lombardo.

Obiettivo del presente lavoro è il confronto tra gli indici visivi (discolorazione e defogliazione), comunemente usati a livello europeo nel monitoraggio

delle condizioni dei boschi (UN-ECE 1998, UN-ECE 2004), e le variabili quantitative fogliari e della *canopy*. In particolare, le concentrazioni dei pigmenti fotosintetici (cioè, Chl, Car, Chl/Car e Chl a/b) sono state correlate con le classi di discolorazione, mentre il LAI con le classi di defogliazione.

Individuate le variabili meglio relazionate agli indici visivi si è quindi proceduto alla messa a punto della metodologia di spazializzazione a partire da osservazioni iperspettrali MIVIS.

## Materiali e metodi

### *Area di studio*

Oggetto del presente studio sono i boschi di farnia (*Quercus robur* L.) del Parco Regionale del Ticino Lombardo.

I boschi del Parco rappresentano un patrimonio ad altissimo contenuto di biodiversità e il fiume Ticino costituisce oggi l'unico *buffer* naturale, con zone umide e forestali, che tagli verticalmente la Lombardia mantenendo un corridoio ecologico di importanza strategica tra Catena Alpina ed Appennino e quindi tra Europa Continentale e bacino del Mediterraneo.

Nell'area boschiva del Parco sono state selezionate dieci aree di studio (codificate Q1-Q10; Fig. 1), caratterizzate da un elevato livello di omogeneità nella distribuzione delle specie e da *canopy* chiusa, proprietà utili per la spazializzazione delle variabili indagate, mediante i dati telerilevati.

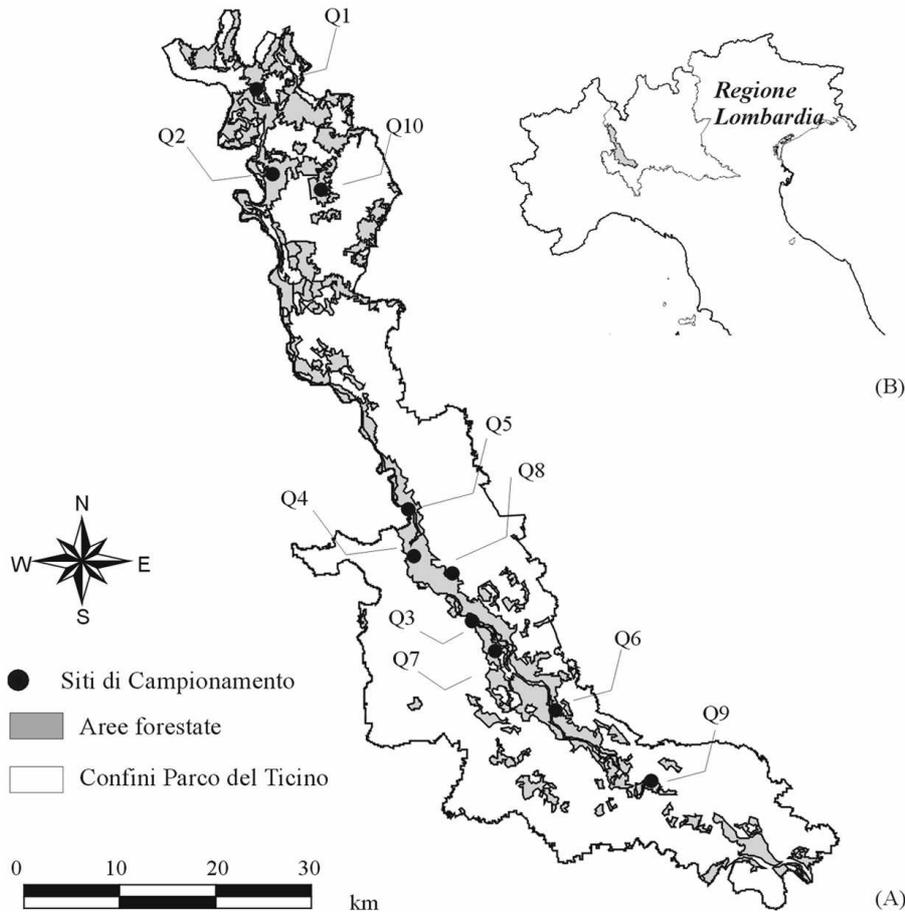
### *Acquisizione delle immagini telerilevate*

I dati telerilevati sono stati acquisiti tra le ore 9 e le ore 11 (ora solare locale) del giorno 2 luglio 2003 mediante il sensore iperspettrale aviotrasportato MIVIS. L'intera area boschiva del Parco è stata ripresa in dieci strisciate. Il volo è stato effettuato ad una quota di 2000 m circa, cui corrisponde una risoluzione dell'immagine al suolo di circa 4 x 4 m.

Le diverse strisciate MIVIS sono state georeferenziate utilizzando il *software* di ortorettificazione PAR-GE (*Parametric Geocoding for Airborne Optical Scanner Data*, RSL - Università di Zurigo). Per ulteriori approfondimenti relativi alla metodologia di georeferenziazione si rimanda a Panigada et al. (2005). La correzione atmosferica è stata effettuata mediante il codice di trasferimento radiativo *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum* (6S - Vermote et al. 1997).

### *Schema di campionamento a terra*

Un'intensa campagna a terra è stata condotta nei



**Fig. 1** - Posizione dei siti di studio (codificati Q1 - Q10) nel Parco Regionale del Ticino Lombardo (A) e sua posizione nel nord Italia (B).

giorni 2 - 4 luglio 2003, in corrispondenza del massimo vigore vegetativo, al fine di stimare gli indici visivi (discolorazione e defogliazione) e le variabili quantitative (concentrazione di pigmenti fotosintetici e LAI). Le misure a terra nei dieci siti di studio sono state condotte in tre giorni consecutivi a partire dal giorno del sorvolo MIVIS.

In ogni sito sono state campionate cinque foglie di tre alberi dominanti di farnia, dalla parte superiore della chioma al fine di massimizzare la corrispondenza con le informazioni acquisite attraverso le tecniche di telerilevamento, per un totale di 150 foglie, successivamente sottoposte ad estrazione dei pigmenti fotosintetici.

Sono state inoltre acquisite fotografie emisferiche digitali con un obiettivo *fish-eye*. La loro elaborazione mediante il software *Can\_Eye* 3.6 ([http://www.aviignon.inra.fr/can\\_eye/](http://www.aviignon.inra.fr/can_eye/)) ha permesso la stima del LAI.

Infine, impiegando la metodologia riportata nel manuale europeo (UN-ECE 1998), sono state valutate visivamente le percentuali di discolorazione delle foglie e di defogliazione delle chiome, successivamente ripartite in quattro classi.

#### *Estrazioni di pigmenti*

Le analisi chimiche di laboratorio sono state eseguite sulle foglie campionate e conservate a  $-80^{\circ}\text{C}$ . L'estrazione è stata effettuata con N,N-dimetilformamide (DMF) su una porzione di tessuto fogliare di 2.3 cm di diametro. I campioni di tessuto fogliare sono stati sminuzzati aggiungendo azoto liquido, lasciati in 5 ml di DMF per tre ore e poi centrifugati a  $4^{\circ}\text{C}$  e 3000 g per 30 minuti per rimuovere il particolato. La concentrazione dei pigmenti fogliari è stata quindi calcolata sulla base dell'assorbanza misurata con uno spettrometro *Thermo Spectronic Unicam UV 500* alle lunghezze d'onda: 663.8, 646.8 e 480 nm, utilizzando i coefficienti di estinzione derivati da Porra et al. (1989). È stata quindi calcolata la concentrazione su peso ( $\text{g g}^{-1}$ ) e su area ( $\text{g cm}^{-2}$ ) di Chl a, Chl b e Car.

#### *Indice di area fogliare e misure forestali*

Il LAI è stato quantificato attraverso fotografie emisferiche che permettono il calcolo del valore di *gap fraction* a diversi angoli di vista zenitali. La distribuzione dei *gaps* è relazionata alla struttura della *ca-*

**Tab. 1** - Tabella a doppia entrata che combina le classi di discolorazione e defogliazione in classi di danno (valori in corsivo; UN-ECE 1998).

Classi	Classe di discolorazione			
	0	1	2	3
0	0	0	1	2
1	1	1	2	2
2	2	2	3	3
3	3	3	3	3

nopy, e quindi al LAI, attraverso modelli di estinzione della luce solare nella canopy (Jonckheere et al. 2004, Weiss et al. 2004).

Le immagini sono state analizzate in modo semi-automatico con il software Can\_Eye 3.6 ([http://www.avignon.inra.fr/can\\_eye/](http://www.avignon.inra.fr/can_eye/)) al fine di calcolare il valore di gap fraction a diversi angoli zenitali e derivare le corrispondenti caratteristiche strutturali della canopy (LAI e angolo medio di inclinazione fogliare).

Le misure forestali sono state condotte all'interno di plot di 10 x 10 m localizzati al centro di ogni sito. In ogni plot sono stati valutati la specie, il numero, il diametro a 1.30 m (DBH) e le altezze delle piante presenti.

*Indici visivi per la valutazione delle condizioni delle chiome*

La valutazione della condizione dei boschi di farnia è stata basata sulla stima visiva, da terra, di defogliazione e discolorazione di singole corone, impiegando la metodologia riportata nel manuale europeo (UN-ECE 1998, UN-ECE 2004). Le valutazioni visive nei dieci siti sono state effettuate dallo stesso operatore in luglio 2003.

La perdita di foglie e la proporzione di ingiallimento sono state stimate e raggruppate in quattro classi che corrispondono ai seguenti livelli (da 0 a 3) di defogliazione e discolorazione percentuali: < 10, 11 - 25, 26 - 60 e 61 - 100%.

La defogliazione viene stimata sulla base di un al-

bero di riferimento cui è attribuito il valore 0 (defogliazione < 10%); come albero di riferimento viene preso un riferimento locale, ossia un albero considerato rappresentativo delle condizioni ecologiche del sito.

L'incrocio, secondo Tab. 1, degli indici di defogliazione e discolorazione fornisce la classe cumulativa di danno che è quella che rappresenta la condizione complessiva del bosco in oggetto: non danneggiato (classe 0), debolmente danneggiato (classe 1), mediamente danneggiato (classe 2) e fortemente danneggiato (classe 3).

*Stima delle variabili quantitative*

La stima delle variabili quantitative a partire dalle osservazioni iperspettrali è stata effettuata impiegando modelli semi-empirici. Tali modelli utilizzano relazioni statistiche nelle quali un numero limitato di misure in situ della variabile indagata viene correlato alle proprietà ottiche, cioè alle misure di riflettanza o ad indici ottici derivati. Gli indici ottici impiegati in questo lavoro sono riportati in Tab. 2.

I modelli per la stima delle variabili a livello di canopy sono stati sviluppati a partire dalle firme di riflettanza MIVIS mediate su aree di 3 x 3 pixel (144 m<sup>2</sup>) posizionate sull'immagine mediante misure effettuate in campo con un GPS differenziale (Trimble GeoXT).

L'applicazione in modo distribuito di questi modelli è stata effettuata utilizzando le immagini MIVIS dopo averle sottoposte ad alcune pre-elaborazioni. In particolare si sono mascherati i pixel di chiome appartenenti a specie vegetazionali diverse da farnia, sulla base della mappa di vegetazione redatta dal personale tecnico del Parco mediante classificazione numerica delle immagini MIVIS (Boschetti et al. 2005), e i pixel di ombra dovuti alla complessa architettura del bosco e alle geometrie di ripresa.

*Analisi statistica*

Il confronto tra indici di discolorazione e defogliazione e variabili quantitative (Chl, Car e LAI) è stato

**Tab. 2** - Indici ottici impiegati per la stima delle variabili quantitative tramite le riflettanze acquisite dal sensore aviotrasportato MIVIS. R è la riflettanza alla lunghezza d'onda specificata nel pedice (nm). B indica la banda MIVIS corrispondente.

Indice	Referimento	Bande MIVIS corrispondenti
MTCI	Dash & Curran 2004	$(B_{17} - B_{14}) / (B_{14} - B_{13})$
$R_{750} / R_{710}$	Zarco-Tejada et al. 2001	$B_{17} / B_{15}$
$(R_{780} - R_{710}) / (R_{780} - R_{680})$	Datt 1999, Maccioni et al. 2001	$(B_{18} - B_{15}) / (B_{18} - B_{13})$
$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$	Gitelson & Merzlyak 1994	$(B_{17} - B_{14}) / (B_{17} + B_{14})$

**Tab. 3** - Livelli di defogliazione e discolorazione dei siti codificati Q1 - Q10. Vengono riportate anche le classi di danno risultanti: 0 = non danneggiato, 1 = debolmente danneggiato, 2 = mediamente danneggiato, 3 = fortemente danneggiato.

Codice del sito	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
Classe di defogliazione	0	2	1	1	1	0	3	0	1	0
Classe di discolorazione	0	2	1	3	2	1	3	1	2	0
Classe di danno	0	3	1	2	2	0	3	0	2	0

effettuato mediante un'analisi della varianza (ANOVA) ad una via seguita dal test di Tukey. È stato inoltre calcolato il coefficiente di correlazione ( $r$ ) tra indici visivi e variabili quantitative.

Le relazioni tra indici ottici e variabili quantitative sono state valutate utilizzando il metodo di regressione ortogonale *Reduced Major Axis* (RMA). Questo tipo di regressione assume che siano soggette a errore sperimentale sia la variabile dipendente che quella indipendente. Risulta perciò più appropriato della tecnica regressiva ai minimi quadrati ordinari (OLS), nel caso di definizione di relazioni empiriche tra riflettanze e variabile vegetazionale indagata poiché entrambe queste variabili sono soggette ad errore (Curran & Hay 1986, Cohen et al. 2003). La bontà della correlazione è stata valutata in base al coefficiente di determinazione ( $r^2$ ), mentre la qualità del modello in termini di predizione è stata ottenuta impiegando la tecnica *leave-one-out*, esplicitando il coefficiente  $r^2_{cv}$  (percentuale di varianza spiegata dal modello in predizione) e l'errore in predizione in termini di errore quadratico medio ( $RMSE_{cv}$ ).

## Risultati e discussione

### Confronto tra indici visivi e variabili quantitative

In Tab. 3 sono riportate le classi medie di defogliazione, discolorazione e danno risultante valutate per i dieci siti investigati.

La classe di danno 1 (debolmente danneggiato) è poco rappresentata nei dati. Questo dipende dal fatto che dieci siti possono non essere sufficienti per rappresentare le quattro condizioni di danno ed anche dalle difficoltà riscontrate dall'operatore nel discriminare corone non danneggiate (classe 0) da corone debolmente danneggiate (classe 1). Inoltre, stati incipienti di discolorazione possono verificarsi nelle porzioni superiori delle chiome non visibili dall'operatore che valuta la discolorazione da terra.

Le statistiche descrittive (minimo, massimo, media e deviazione standard) delle variabili quantitative indagate sono riportate in Tab. 4.

Indici visivi e variabili quantitative sono stati con-

frontati con un'analisi di correlazione. Le concentrazioni di pigmenti fogliari sono state correlate con le classi di discolorazione, mentre il LAI con le classi di defogliazione. Le correlazioni sono mostrate in Fig. 2.

È stata quindi effettuata un'ANOVA ad una via tra le concentrazioni di pigmenti e le classi di discolorazione. Sono state calcolate le statistiche descrittive all'interno di ogni gruppo ed è stato effettuato il test di Tukey per valutare se i valori di pigmenti differiscono significativamente tra le diverse classi di discolorazione (Tab. 5).

La concentrazione di clorofilla totale e Chl a/b sono risultate le variabili maggiormente correlate con le classi di discolorazione ( $r = -0.857$ ,  $P < 0.01$  e  $r = 0.812$ ,  $P < 0.01$ , rispettivamente) ed hanno permesso di distinguere tre dei quattro livelli riscontrati visivamente. In particolare, il test di Tukey ha mostrato che le differenze di Chl e Chl a/b tra le classi di discolorazione 1 e 2 non sono statisticamente significative.

Discrepanze tra le classi di discolorazione e le variabili quantitative possono dipendere dalla strategia di campionamento: le variabili quantitative sono state misurate su foglie campionate dalla porzione superiore della *canopy* mentre le valutazioni visive sono state condotte sulla porzione di *canopy* visibile

**Tab. 4** - Statistiche descrittive (minimo, massimo, media e deviazione standard) delle variabili quantitative indagate.

Variabile	Min	Max	Media	DS
<i>Pigmenti</i>				
Chl ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ )	32.97	69.83	51.50	8.18
Car ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ )	6.19	15.87	9.15	1.34
Chl a/b	1.67	4.97	3.40	0.56
Chl/Car	4.09	6.98	5.64	0.56
<i>Strutturali</i>				
LAI ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ )	2.1	3.3	2.7	0.42
Area basimetrica ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ )	25.08	52.87	34.48	10.00

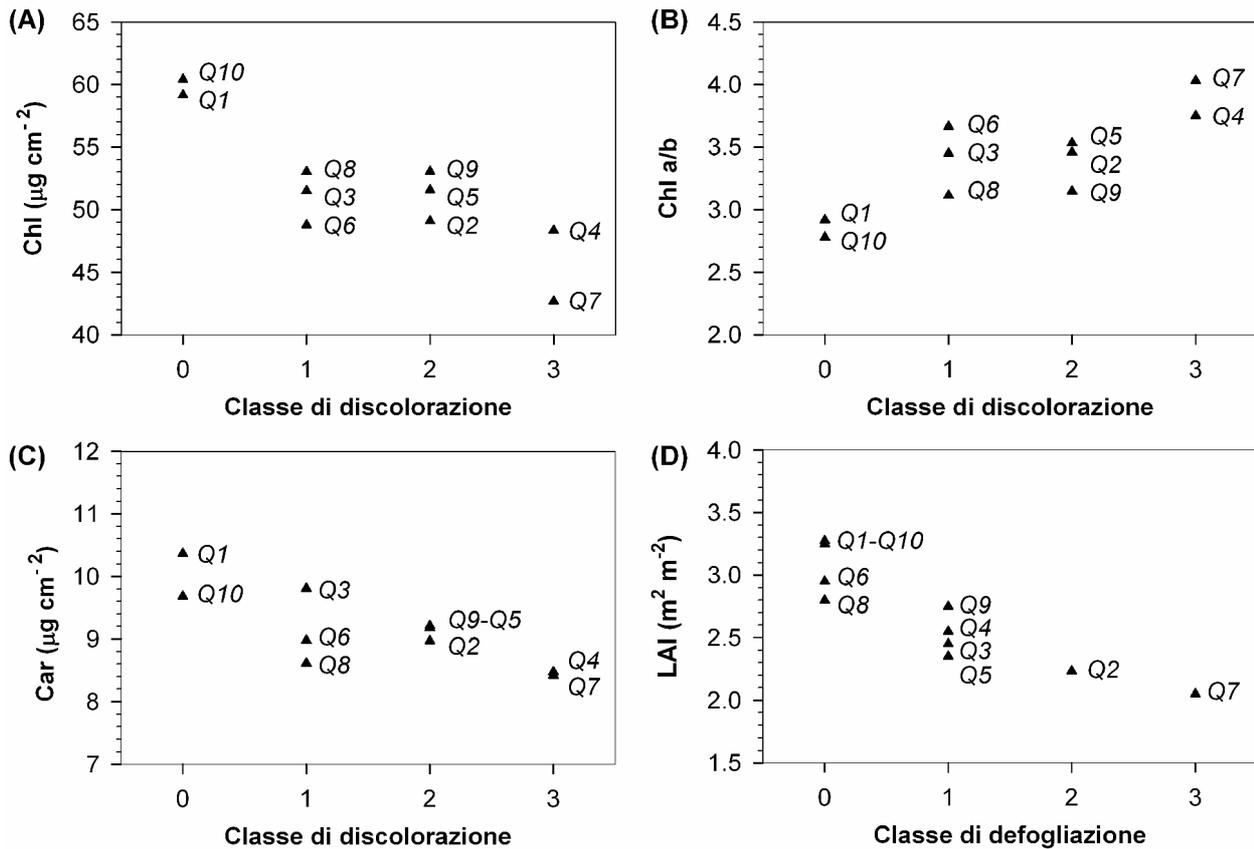


Fig. 2 - Chl (A), Chl a/b (B) e Car (C) rappresentati rispetto alle classi di discolorazione; LAI rappresentato rispetto alle classi di defogliazione (D).

dal basso. Questo può causare discrepanze, in modo particolare quando la *canopy* è densa e chiusa (per esempio, Q6 e Q9). Si sottolinea inoltre che in questo studio vengono confrontate categorie discrete (classi di discolorazione e defogliazione) con variabili continue (cioè, concentrazione di pigmenti fogliari e LAI). La variazione tipica delle variabili naturali è difficilmente esprimibile mediante categorie discrete, tipicamente usate nella valutazione delle condizioni dei boschi, e questo può essere causa di ulteriori discrepanze tra i dati.

Per quanto riguarda le proprietà strutturali della

*canopy*, il LAI è risultato correlato sia con l'area basimetrica ( $r^2 = 0.461$ ,  $P < 0.05$ ) che con i valori di defogliazione ( $r = -0.884$ ,  $P < 0.001$ ), assegnati dall'operatore in campo: appare piuttosto sospetto che più il sito è sviluppato (LAI maggiore), minore è la classe di defogliazione a cui appartiene.

La valutazione della defogliazione viene effettuata sulla base di un confronto tra l'albero investigato in campo e un albero di riferimento (in foto e/o nella memoria dell'operatore). Quando le condizioni ecologiche dei siti sono eterogenee, come in questa area di studio, la stima dell'indice di defogliazione può

Tab. 5 - Risultati del test di Tukey effettuato tra classi di discolorazione sulle concentrazioni di pigmenti fogliari. Medie statisticamente diverse ( $P < 0.05$ ) sono indicate con lettere diverse.

Variabile	Classi di discolorazione								Gruppi
	0 - assente		1 - debole		2 - media		3 - forte		
	Media	DS	Media	DS	Media	DS	Media	DS	
Chl (µg cm <sup>-2</sup> )	59.65a	7.17	51.31b	7.28	51.16b	6.51	45.49c	6.98	3
Car (µg cm <sup>-2</sup> )	10.09a	1.64	9.13b	1.21	9.13b	1.14	8.45b	1.12	2
Chl a/b	2.86c	0.50	3.40b	0.52	3.38b	0.39	3.89a	0.42	3
Chl/Car	5.95a	0.43	5.65ab	0.63	5.63ab	0.50	5.39b	0.49	2

**Tab. 6** - Correlazioni tra Chl e indici ottici calcolati a partire dalle riflettanze MIVIS.

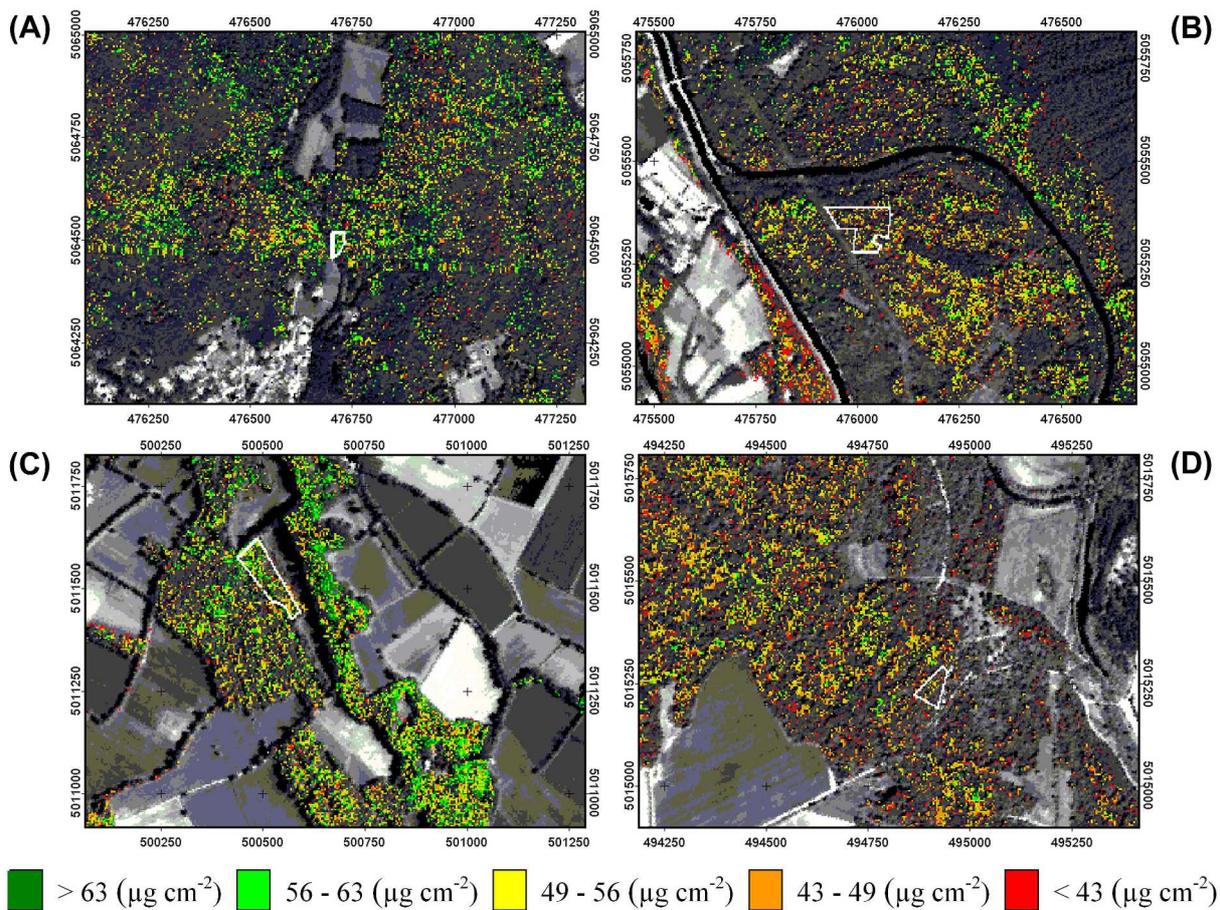
Indice	P - OLS	r <sup>2</sup>	r <sup>2</sup> <sub>cv</sub>	RMSE <sub>cv</sub>
MTCI	P < 0.001	0.822	0.728	2.891
R <sub>750</sub> / R <sub>710</sub>	P < 0.01	0.729	0.603	3.489
(R <sub>780</sub> - R <sub>710</sub> ) / (R <sub>780</sub> - R <sub>680</sub> )	P < 0.01	0.708	0.526	3.814
(R <sub>750</sub> - R <sub>705</sub> ) / (R <sub>750</sub> + R <sub>705</sub> )	P < 0.01	0.686	0.565	3.654

risultare piuttosto complessa in quanto diviene necessario definire un albero di riferimento sito-specifico. In realtà, in tali condizioni, si opera più spesso una stima della trasparenza della chioma, in quanto è più immediato valutare la densità del fogliame presente sulla chioma piuttosto che i fenomeni di abscissione di foglie realmente emesse (Scarascia Mugnozza 1999). E' possibile che in questa area di studio, caratterizzata da un elevato livello di eterogeneità, i punteggi assegnati dall'operatore rispecchino la trasparenza più che la defogliazione delle chiome, e non siano perciò necessariamente relazionati alla presenza di avversità nella stagione in corso. A no-

stro giudizio, la concentrazione di Chl e il rapporto Chl a/b risultano quindi le variabili più idonee per la valutazione delle condizioni dei boschi in un contesto eterogeneo quale il Parco Regionale del Ticino Lombardo.

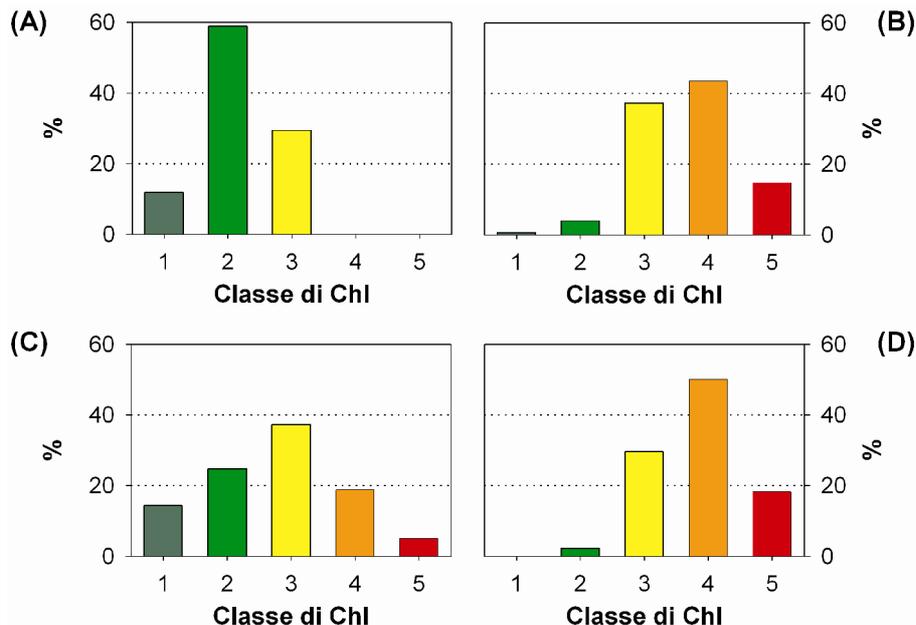
*Stima delle variabili quantitative a partire dalle osservazioni remote*

È stato sviluppato il modello semi-empirico per la stima della concentrazione di Chl a partire dalle osservazioni remote. Non si è proceduto alla creazione di un modello per la spazializzazione di Chl a/b in quanto non è possibile, alla risoluzione spettrale del



**Fig. 3** - Mappa di clorofilla totale spazializzata nell'intorno di quattro dei dieci siti in esame: Q1 (A), Q2 (B), Q6 (C) e Q7 (D). Colori rosso-arancione corrispondono a basse concentrazioni di clorofilla, mentre gradazioni di verde fino al verde scuro indicano concentrazioni elevate di clorofilla.

**Fig. 4** - Istogrammi in cui vengono riportate le percentuali di pixel appartenenti a ciascuna classe di Chl, relativi ai quattro siti di cui sono state mostrate le mappe: Q1 (A), Q2 (B), Q6 (C) e Q7 (D). Colori rosso-arancione corrispondono a basse concentrazioni di clorofilla, mentre gradazioni di verde fino al verde scuro indicano concentrazioni elevate di clorofilla.



senso MIVIS, separare i contributi specifici di Chl a e Chl b a causa della parziale sovrapposizione degli assorbimenti dei due pigmenti.

I risultati delle analisi di regressione tra gli indici ottici calcolati a partire dalle riflettanze misurate dal sensore MIVIS e la concentrazione di Chl sono riportati in Tab. 6.

Gli indici più correlati alla concentrazione di Chl sono risultati quelli basati sulle lunghezze d'onda della porzione di spettro denominata *red edge* (690-750 nm). In particolare il *MERIS terrestrial chlorophyll index* (MTCI, Dash & Curran 2004), per il sensore MIVIS definito da  $(R_{758} - R_{700}) / (R_{700} - R_{680.5})$ , è risultato l'indice maggiormente correlato alla concentrazione di Chl ( $r^2 = 0.822$ ,  $r^2_{cv} = 0.728$ ,  $RMSE_{cv} = 2.89 \text{ g cm}^{-2}$ ).

La relazione utilizzata per la stima spazializzata di Chl è la seguente:

$$Chl = 11.02 + 3.28 \cdot MTCI$$

Tale relazione è stata applicata ai *pixel* delle immagini MIVIS allo scopo di produrre le mappe di Chl relative ai querceti nell'intorno dei dieci siti campione. Sulla base del *range* di variabilità della clorofilla estratta sono state definite cinque classi di concentrazione: classe 1:  $> 63 \mu\text{g cm}^{-2}$ , classe 2:  $56 - 63 \mu\text{g cm}^{-2}$ , classe 3:  $49 - 56 \mu\text{g cm}^{-2}$ , classe 4:  $43 - 49 \mu\text{g cm}^{-2}$  e classe 5:  $< 43 \mu\text{g cm}^{-2}$ .

Vengono mostrate le mappe prodotte in quattro dei dieci siti di studio rappresentativi delle diverse classi di discolorazione (Fig. 3): Q1 (classe 0), Q2 (classe 2), Q6 (classe 1) e Q7 (classe 3). Negli istogrammi (Fig. 4) sono riportate le percentuali di *pixel* appartenenti a ciascuna classe di Chl. Si conferma la

congruenza tra indici visivi dello stato della vegetazione (discolorazione) e variabili quantitative stimate da telerilevamento (Chl). Siti con bassa percentuale di discolorazione presentano infatti alte concentrazioni di Chl, mentre siti con alta percentuale di discolorazione presentano basse concentrazioni di Chl.

### Conclusioni

Obiettivo principale di questo lavoro è stato confrontare indici visivi, comunemente usati a livello europeo nel monitoraggio delle condizioni dei boschi, e variabili quantitative fogliari e della *canopy*. In particolare le concentrazioni dei pigmenti fotosintetici (Chl, Car, Chl/Car e Chl a/b) sono state correlate alle classi di discolorazione, mentre il LAI alle classi di defogliazione.

La concentrazione di Chl e Chl a/b sono risultate le variabili maggiormente correlate al livello di discolorazione e hanno permesso di distinguere tre dei quattro livelli riscontrati visivamente.

Il LAI è risultato correlato sia con lo sviluppo del sito (in termini di area basimetrica) che con i punteggi di defogliazione assegnati dall'operatore. Si è constatato che in questa area di studio, caratterizzata da un elevato livello di eterogeneità, i punteggi assegnati dall'operatore rispecchiano la densità del fogliame presente sulle chiome (trasparenza) più che la loro defogliazione (abscissione di foglie realmente emesse). In conclusione, la concentrazione di Chl risulta essere la variabile più relazionata alle condizioni dei boschi nel Parco Regionale del Ticino Lombardo.

Si è quindi messa a punto la metodologia per la sti-

ma spazializzata di Chl mediante le immagini riprese dal sensore iperspettrale MIVIS.

Indici ottici calcolati a partire dalle bande del sensore localizzate nella porzione di spettro elettromagnetico denominata *red edge* sono risultati ben correlati con la concentrazione di Chl; si è quindi proceduto alla mappatura della concentrazione di Chl nell'intorno dei dieci siti campione. Le mappe di Chl prodotte hanno permesso di evidenziare in modo distribuito le diverse condizioni manifestate dai boschi di farnia del Parco.

In conclusione, questo lavoro suggerisce che la concentrazione di Chl è la variabile più idonea per la valutazione delle condizioni dei boschi in un contesto molto eterogeneo quale il Parco Regionale del Ticino Lombardo. Oltre ad essere ben correlata con il livello di discolorazione, la concentrazione di Chl è infatti ben correlata con le proprietà spettrali acquisite con il sensore MIVIS; ciò permette la produzione di mappe periodicamente aggiornabili relative all'intero territorio del Parco.

### Ringraziamenti

Questo studio è stato finanziato dal Parco Regionale del Ticino Lombardo nell'ambito del progetto: "Bioindicatori di Stress Forestale da Telerilevamento". Gli autori desiderano ringraziare il personale tecnico e i forestali del Parco Regionale del Ticino Lombardo per la collaborazione nelle campagne a terra, in particolare I. Canova, F. Caronni, V. Parco, G. Penna. Si ringraziano inoltre M. Orlandi del DISAT-UNIMIB di Milano per le estrazioni di laboratorio, C. Giardino e M. Boschetti del IREA-CNR di Milano per la correzione atmosferica dei dati MIVIS. Un grazie particolare va a L. Casati, R. Barbieri, D. Zanusso, R. Felderer, M. Migliavacca, F. Fava, A. Marchesi per la collaborazione al progetto nell'ambito delle loro tesi di laurea.

### Bibliografia

- Biswall B (1995). Carotenoid catabolism during leaf senescence and its control by light. *Journal of Photochemistry and Photobiology (B)* 30: 3-14.
- Boschetti M, Canova I, Casati L, Oliveri S (2005). Mappatura delle specie arboree del Parco del Ticino mediante Telerilevamento iperspettrale. *Consorzio Parco Lombardo della Valle del Ticino*.
- Broge NH, Leblanc E (2001). Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment* 76: 156-172.
- Carter GA (1994). Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing* 15: 697-703.
- Carter GA, Knapp AK (2001). Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany* 88: 677-684.
- Cohen WB, Maieringer TK, Gower ST, Turner DP (2003). An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. *Remote Sensing of Environment* 84: 561-571.
- Coops NC, Stone C, Culvenor DS, Chisholm L (2004). Assessment of crown condition in eucalypt vegetation by remotely sensed optical indices. *Journal of Environmental Quality* 33: 956-964.
- Curran PJ, Hay A (1986). The importance of measurement error for certain procedures in remote sensing at optical wavelengths. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52: 229-241.
- Dash J, Curran PJ (2004). The MERIS terrestrial chlorophyll index. *International Journal of Remote Sensing* 25:5403-5413.
- Datt B (1998). Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a + b and total carotenoid content in eucalyptus leaves. *Remote Sensing Environment* 66: 111-121.
- Datt B (1999). Visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in *Eucalyptus* leaves. *International Journal of Remote Sensing* 20: 2741-2759.
- Demmig-Adams B, Adams WW (1996). Xanthophyll cycle and light stress in nature: uniform response to excess direct sunlight among higher plant species. *Planta* 198: 460-470.
- Ferretti M (1997). Forest health assessment and monitoring - Issues for consideration. *Environmental Monitoring and Assessment* 48: 45-72.
- Ferretti M (1998). Potential and limitation of visual indices of tree condition. *Chemosphere* 36: 1031-1036.
- Gitelson AA, Merzlyak MN (1994). Spectral reflectance changes associate 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 AA, Zur Y, Chivkunova OB, Merzlyak MN (2002). Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. *Photochemistry and Photobiology* 75: 272-281.
- Innes JL (1995). Theoretical and Practical Criteria for the Selection of Ecosystem Monitoring Plots in Swiss Forests. *Environmental Monitoring and Assessment* 36: 271-294.
- Jonckheere I, Fleck K, Muys B, Coppin P, Weiss M, Baret F (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical

- photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 19-35.
- Lee KS, Cohen WB, Kennedy RE, Maersperger TK, Gower ST (2004). Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. *Remote Sensing of Environment* 91: 508-520.
- Le Maire G, Francois C, Dufrene E (2004). Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment* 89: 1-28.
- Lorenzini G, Nali C (2005). *Le piante e l'inquinamento dell'aria*. Springer Verlag, Italia.
- Maccioni A, Agati G, Mazzinghi P (2001). New vegetation indices for remote measurement of chlorophylls based on leaf directional reflectance spectra. *Journal of Photochemistry and Photobiology (B)* 61: 52-61.
- Meroni M, Panigada C, Colombo R, Boschetti M, Brivio PA, Marino CM (2002). Osservazioni remote iperspettrali e multiangolari per la stima dei parametri biofisici della vegetazione: parte II - tecniche di telerilevamento. *Rivista Italiana di Telerilevamento* 24: 15-23.
- Merzlyak MN, Gitelson AA (1995). Why and what for the leaves are yellow in autumn? On the interpretation of optical spectra of senescing leaves (*Acer platanoides* L.). *Journal of Plant Physiology* 145: 315-320.
- Panigada C, Rossini M, Meroni M, Busetto L, Colombo R, Marino CM (2005). Telerilevamento iperspettrale per il monitoraggio forestale: Valutazione dello stato di salute dei querceti del Parco Ticino Lombardo. *Rivista Italiana di Telerilevamento* 33/34:119-135.
- Porra RJ, Thompson WA, Kriedemann PE (1989). Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochimica et Biophysica Acta* 975: 384-394.
- Rossini M, Panigada C, Meroni M, Colombo R (2006). Assessment of oak forest condition based on leaf biochemical variables and chlorophyll fluorescence. *Tree Physiology* 26: 1487-1496.
- Sampson PH, Zarco-Tejada PJ, Mohammed GH, Miller JR, Noland TL, Fleming RL (2003). Hyperspectral remote sensing of forest condition: estimation of chlorophyll content in tolerant hardwoods. *Forest Science* 49: 381-391.
- Scarascia Mugnozza G (1999). *Ecologia strutturale e funzionale di faggete italiane*. Edagricole, Bologna.
- Sims DA, Gamon JA (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment* 81: 337-354.
- Taiz L, Zeiger E (1998). *Plant Physiology*. 2<sup>nd</sup> edition. Sinauer Associates Ltd., Sunderland, Massachusetts.
- UN-ECE (1998). Manual on methods and criteria for harmonizing sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests, Hamburg, Germany. [online] URL: <http://www.icp-forests.org>
- UN-ECE (2004). Manual on methods and criteria for harmonizing sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Visual Assessment of Crown Condition, including Assessment of Damage Causes. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests, Hamburg, Germany. [online] URL: <http://www.unece.org>
- Vermote EF, Tanrè D, Deuzè JL, Herman M, Morcrette JJ (1997). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum. 6S: An Overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35: 675-686.
- Weiss M, Baret F, Smith GJ, Jonckheere I, Coppin P (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 37-53.
- Young A, Britton G (1990). Carotenoids and Stress. In: "Stress Responses in Plants: Adaptation and Acclimation Mechanisms" (Alscher RG, Cumming JR eds). Wiley-Liss, New York, pp. 87-112.
- Zarco-Tejada PJ, Miller JR, Noland TL, Mohammed GH, Sampson PH (2001). Scaling-up and model inversion methods with narrow band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39: 1491-1507.
- Zarco-Tejada PJ, Miller JR, Mohammed GH, Noland TL, Sampson PH (2002). Vegetation stress detection through chlorophyll a + b estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery. *Journal of Environmental Quality* 31: 1433-1441.
- Zarco-Tejada PJ, Berjón A, López-Lozano R, Miller JR, Martín P, Cachorro V, González MR, de Frutos A (2005). Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sensing of Environment* 99: 271-287.