

Analisi della copertura forestale in ambiente alpino: metodi di stima a confronto

Fabio Pastorella, Alessandro Paletto*

Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale (CRA-MPF), p.zza Nicolini 6, I-38123 Villazzano di Trento (TN - Italy) - *Corresponding Author: Alessandro Paletto (alessandro.paletto@entecra.it).

Abstract: *Forest canopy analysis in the Alpine environment: comparison among assessment methods.* Forest canopy is an important ecological feature of forest stands and can be expressed as Leaf Area Index (LAI) or canopy cover percentage. LAI is the ratio between leaf area and ground area ($m^2 m^{-2}$) and it can be measured using an angle of 180° . Instead, the canopy cover is the percentage of forest area occupied by the vertical projection of tree crowns; consequently, LAI expresses the canopy closure rather than the canopy cover. This paper focuses on the estimation of LAI and canopy cover percentage in 54 sampling points randomly distributed over the main forest types of Trentino (beech forests, Scots pine forests, Norway spruce forests and European larch forests). The main purpose was the analysis of relationship between LAI and canopy cover percentage, the latter measured with two different techniques: visual estimation and estimation using the spherical densiometer. In the last part of the paper, LAI data collected in the four main forest types of Trentino are compared with values reported in the literature for the same forest types.

Keywords: Leaf Area Index (LAI), Canopy Cover, Hemispherical Images, Visual Estimation, Spherical Densiometer, Trentino.

Received: Feb 18, 2013; Accepted: Mar 30, 2013; Published online: Apr 15, 2013

Citation: Pastorella F, Paletto A, 2013. Analisi della copertura forestale in ambiente alpino: metodi di stima a confronto. Forest@ 10: 43-54 [online 2013-04-15] URL: <http://www.sisef.it/forest@/contents/?id=efor0974-010>

Introduzione

L'indice di area fogliare (*Leaf Area Index* o LAI) e il grado di copertura (*canopy cover percentage*) sono due espressioni della copertura forestale che assumono una notevole rilevanza nella definizione dei modelli di sviluppo delle formazioni arboree e dell'analisi dei processi ecologici (Griffin et al. 2008). La distribuzione della luce sotto la copertura arborea è strettamente dipendente dal LAI e dal grado di copertura di un popolamento forestale e influenza la numerosità (Mercurio & Mercurio 2008) e la distribuzione della rinnovazione (Pastorella 2011). Secondo quanto dimostrato da Machado & Reich (1999), il LAI spiega il 90% della variazione giornaliera del flusso di fotoni, pertanto, il suo studio appare come un metodo efficiente per la stima della capacità di tolleranza all'ombra degli individui che crescono sotto copertura. Inoltre, l'accurata misura della copertura forestale è

di cruciale importanza per studi e ricerche in vari ambiti disciplinari quali l'idrologia, la selvicoltura, gli inventari forestali e il monitoraggio ambientale (Cutini & Giannini 2009, Paletto & Tosi 2009, Chianucci & Cutini 2012).

LAI e grado di copertura sono due caratteristiche misurate sulla *canopy* di un popolamento arboreo. Tuttavia, mentre il grado di copertura è misurato secondo la proiezione verticale delle chiome ed esprime la *canopy cover*, il LAI è misurato su un angolo di 180° con il vertice rivolto verso il basso ed esprime la *canopy closure* (Korhonen et al. 2006). In altre parole, la *canopy closure* rappresenta la porzione di cielo, osservata con uno strumento emisferico da un punto posto al di sotto delle chiome, che viene oscurata dalla vegetazione (Jennings et al. 1999). Nello specifico, i metodi che stimano il LAI si dividono in metodi basati su misure multiple simultanee della trasmit-

tanza (LAI-2000 e foto emisferiche) e metodi basati su misure singole (Ceptometer e foto ad angoli ristretti). A partire dalla misura della *canopy cover* è comunque possibile calcolare il LAI impiegando la legge di Beer-Lambert che correla la quantità di luce assorbita da un mezzo attraversato (copertura fogliare) alle caratteristiche del mezzo stesso quali la concentrazione e lo spessore (Macfarlane et al. 2007, Chianucci & Cutini 2013).

Il LAI è un indice che esprime l'area fogliare di un ecosistema (Liang et al. 2012) ed è dato dal rapporto tra la superficie occupata dalle chiome rispetto a una superficie di riferimento ($m^2 m^{-2}$ - Chen & Black 1992). Tale indice dinamico esprime la superficie fotosintetica e di traspirazione delle coperture forestali (Jonckheere et al. 2004) e dipende da vari fattori ambientali (climatici e di disponibilità idrica - Bréda 2003). In considerazione di questo fatto, il LAI può assumere un ampio range di valori in funzione della formazione vegetale analizzata (Aussenac 2000) e, nell'ambito della stessa formazione, in relazione alla disponibilità di risorse e allo stadio di sviluppo. Il LAI controlla, in maniera diretta o indiretta, una moltitudine di processi biologici, fisici e biogeochimici nei cicli dell'acqua, del carbonio e di varie sostanze nutritive (Fassnacht et al. 1994). In particolare, la densità fogliare delle chiome influenza la produzione primaria (fotosintesi), la traspirazione, il grado d'intercettazione delle precipitazioni e lo scambio di energia tra la vegetazione e l'atmosfera (Leuschner et al. 2006).

In letteratura si riscontra una moltitudine di metodi per la stima del LAI (Asner et al. 2003), classificabili principalmente in metodi diretti e metodi indiretti. I primi misurano le dimensioni delle foglie in maniera diretta e possono essere distruttivi (misura diretta su campioni prelevati dalle chiome) o non distruttivi (misure sulla lettiera), richiedono un gran dispendio di energie e sono più appropriati per formazioni erbacee o arbustive. I metodi indiretti utilizzano parametri (misure allometriche, trasmittanza) che possono essere misurati in maniera più speditiva (Liang et al. 2012), sono più idonei per misure in formazioni arboree e si dividono in metodi indiretti "di contatto" (misure allometriche, *plumb lines* e *inclined point quadrats*) e metodi indiretti di tipo ottico (Ceptometer, fotografie emisferiche, LAI-2000, TRAC, DEMON e *unidirectional view digital photography* - Lang & Xiang 1986, Neumann & Den Hartog 1989, Liu et al. 2013).

L'uso delle fotografie emisferiche per la stima dei valori di LAI è stato applicato per la prima volta da

Anderson (1964) ed è divenuto di uso comune in seguito allo sviluppo e alla diffusione di fotocamere digitali che hanno ridotto i tempi di acquisizione ed elaborazione delle immagini (Thimonier et al. 2010). La tecnica è largamente applicata in studi di tipo ecologico sulla luce e sul regime luminoso, sull'acqua, sull'insediamento e l'affermazione della rinnovazione, per la stima delle caratteristiche allometriche, per l'analisi degli effetti dei diradamenti, come indicatore della salute dei soprassuoli forestali e nello sviluppo di modelli previsionali.

Il grado di copertura, detto anche *site factor* (Anderson 1964), è definito in letteratura come la frazione di suolo coperta dalla proiezione verticale delle chiome degli alberi, ed è comunemente espresso in forma di percentuale (*canopy cover percentage* o, il suo inverso, *canopy openness percentage*). In Italia, nella normale pratica inventariale e assestamentale, il grado di copertura viene generalmente stimato a vista impiegando classi percentuali più o meno ampie. Nonostante questa consuetudine dettata da motivazioni economiche, il grado di copertura può essere misurato anche mediante l'utilizzo di strumenti che forniscono un valore meno soggettivo quali il tubo di Cajanus o i densimetri (Rautiainen et al. 2005), l'analisi d'immagini satellitari (Korhonen et al. 2006), l'applicazione di modelli probabilistici (Korhonen et al. 2007) e il LAI-2000 (Rautiainen et al. 2005).

A partire da queste considerazioni, il presente contributo si è focalizzato sullo studio del LAI e del grado di copertura dei principali tipi forestali del Trentino (faggete, pinete di pino silvestre, peccete e lariceti). Il principale obiettivo della ricerca è stato il confronto tra LAI e grado di copertura. Quest'ultimo è stato misurato con due differenti procedure: stima a vista e attraverso l'impiego del densimetro sferico. L'impiego di due differenti procedure si è reso necessario in quanto la stima a vista fornisce un risultato per la *canopy cover*, mentre il densimetro sferico stima la *canopy closure* impiegando un angolo di 60°. Nell'ultima parte del lavoro si è proceduto con la comparazione dei valori di LAI con i valori riportati in letteratura per gli stessi tipi forestali. Nel presente lavoro, così come nella letteratura internazionale, il termine LAI è stato utilizzato in sostituzione del più consono termine PAI (*Plant Area Index*).

Materiali e metodi

Area di studio

L'area di studio è la provincia di Trento il cui territorio è quasi esclusivamente montano (soltanto poco

meno del 10% del territorio provinciale è posto al di sotto dei 500 m s.l.m.) e comprende dieci cime che superano i 3000 m. Dal punto di vista geologico la provincia di Trento è molto eterogenea ed è stata modellata dai fenomeni esogeni tipici dell'area Alpina, di cui le valli glaciali sono la massima testimonianza. I principali tipi di rocce che ne caratterizzano la litografia rientrano tra le rocce metamorfiche (in particolare scisti), le rocce vulcaniche (graniti, dioriti, porfidi), e le rocce sedimentarie (calcari e dolomie - Bosellini et al. 1999).

Nella provincia di Trento il clima è di tipo temperato-continentale con alcune significative differenze tra le valli orientali, quelle occidentali e il fondovalle. Nella valle dell'Adige la temperatura media annua è di 11.5 °C con una pluviometria media annua di 883 mm caratterizzata da un picco primaverile (94 mm di pluviometria media nel mese di maggio) e uno autunnale (110 mm di pluviometria media nel mese di ottobre). Dal punto di vista bioclimatico il Trentino rientra in prevalenza nelle categorie sovratemperato umido e orotemperato umido secondo la classificazione di Rivas-Martinez (Tab. 1).

In Trentino l'indice di boscosità, secondo i dati dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio (INFC), corrisponde a circa il 60% dell'intero territorio provinciale (372 879 ha). I principali tipi forestali presenti in provincia di Trento sono le peccete pure o miste ad abete bianco (*Abies alba* Mill., 41.0%), i lariceti puri e misti con pino cembro (*Pinus cembra* L., 16.9%), le faggete (16.7%) e le pinete di pino silvestre (*Pinus sylvestris* L., 5.7% - De Natale & Pignatti 2011). Il 75% dei boschi provinciali è soggetto ad un piano di gestione: risultano assestate tutte le proprietà pubbliche, appartenenti prevalentemente ai comuni e al demanio provinciale, nonché le proprietà collettive (Magnifica Comunità della Val di Fiemme, Regole Spinale-Manez, Consortele della Val di Rabbi, Amministrazioni Separate per il Beni di Uso Civico, ecc.) e le grandi proprietà priva-

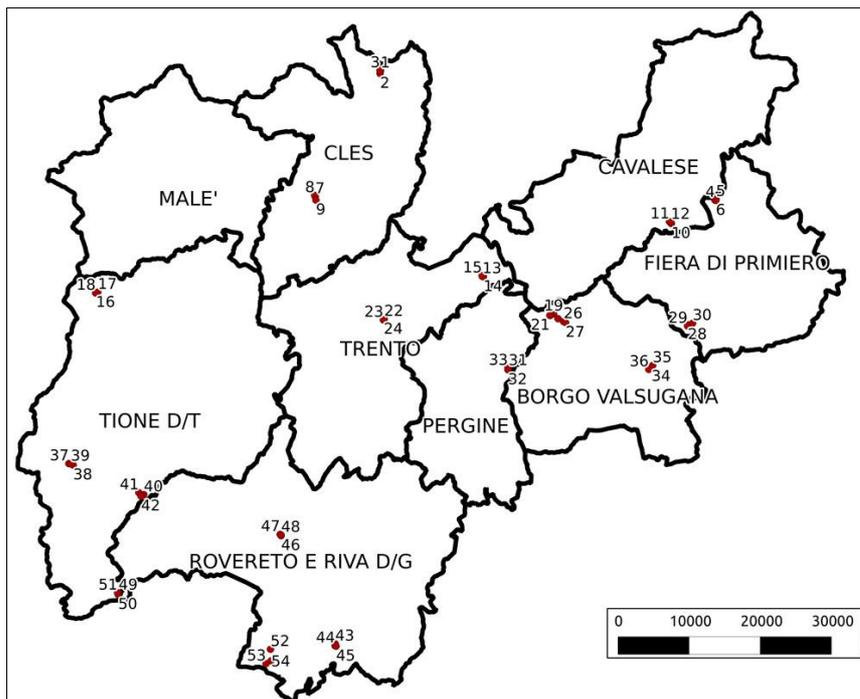
Tab. 1 - Classificazioni climatiche e bioclimatiche nel territorio della Provincia di Trento e numero di aree di saggio (AdS) ricadenti in ciascun classe. WBCS (*World wide Bioclimatic Classification System*). Fonte: modificato da Sboarina & Cescatti (2004).

Indice	Classi [% del territorio provinciale]	Numero AdS
Corrispondenza tra pluviofattore di Lang e classificazione fitoclimatica di Pavari	<i>Lauretum</i> (13.1)	3
	<i>Castanetum</i> (26.2)	15
	<i>Fagetum</i> (20.5)	15
	<i>Picetum</i> (36.3)	21
	assenza di humus (3.9)	-
Indice igrotermico di Amann	oceanico temperato (35.4)	9
	continentale (20.3)	3
	intermedio (44.3)	42
Indice di continentalità pluviale di Angot	alpico (90.5)	50
	endoalpico (9.5)	4
WBCS di Rivas Martinez	Indice di continentalità temperato oceanico (98.4)	51
	temperato continentale (1.6)	3
Indice di termicità	sovra temperato (27.6)	9
	mesotemperato (72.4)	45
Indice ombrotermico	subumido (0.3)	-
	umido (95.1)	49
	iperumido (4.6)	5

te. Al contrario la proprietà privata di piccole e medie dimensioni, che corrisponde a poco più del 20% dell'area forestale totale, non risulta, invece, soggetta a piano di gestione, ma è periodicamente inventariata e monitorata dal Servizio Foreste della Provincia Autonoma di Trento (PAT).

Lo studio è stato condotto in 54 punti di campionamento estratti in maniera casuale all'interno delle quattro principali categorie della carta dei tipi forestali redatta dalla Provincia di Trento (faggete, pinete di pino silvestre, peccete e lariceti - Fig. 1). Al fine di semplificare l'analisi dal punto di vista statistico le formazioni ad abete bianco, anche per via delle proprie caratteristiche ecologiche e strutturali, sono state considerate congiuntamente alle peccete. Le unità di campionamento impiegate sono state, in analogia con quelle impiegate dall'INFC, delle aree di saggio circolari di 13 m di raggio (532 m²). La selezione dei centri delle aree di saggio è stata effettuata in ambiente GIS (Quantum-GIS) secondo due fasi: nella prima fase, a partire dalla carta dei tipi forestali sono stati estratti casualmente 18 poligoni con superficie maggiore a 10 ha stratificando per tipo forestale. Successivamente, al loro interno, sono state estratte le coordinate dei centri delle aree di saggio in nume-

Fig. 1 - Distribuzione dei punti di campionamento all'interno del territorio della provincia di Trento ripartiti per distretti forestali.



ro di 3 per ciascun poligono (54 aree di saggio). Le aree di saggio sono risultate così ripartite per tipo forestale: 21 in peccete e abetine (44.5%), 12 in faggete (22.2%), 12 in pinete (22.2%) e 6 in lariceti (11.1%). Suddette aree di saggio sono distribuite in un ampio intervallo altitudinale (410-1963 m s.l.m.) e con pendenze medie comprese tra 0° e 40° (Tab. 2). Tale ripartizione delle 54 aree di saggio ci consente di ipotizzare che il campione selezionato ben rappresenti la variabilità altitudinale e morfologica dei tipi forestali presenti in provincia di Trento.

La densità delle formazioni analizzate è risultata piuttosto variabile con un numero di piante ad ettaro compreso tra un minimo di 377 e un massimo di 3467. Nello specifico le pinete di pino silvestre sono risultate le formazioni con il più alto numero medio di soggetti a ettaro (2049 piante ha⁻¹) mentre i lariceti quelli con il minor numero medio di soggetti ad ettaro (462 piante ha⁻¹). In termini di area basimetrica si riscontrano valori medi di circa 70 m² ha⁻¹ per le pinete di pino silvestre e di circa 60 m² ha⁻¹ per i lariceti, mentre valori piuttosto bassi si sono riscontrati per le faggete (28.5 m² ha⁻¹). Il numero di specie rilevato in ciascun'area di saggio è risultato variabile da un minimo di una sola specie, in particolare nelle peccete, ad un massimo di nove specie.

All'interno di ciascun'area di saggio (AdS), su tutti i soggetti arborei con diametro a petto d'uomo superiore a 4.5 cm è stata rilevata la specie e sono stati effettuati tre tipi di misure: (1) di posizione (distanza e azimut relativi calcolati rispetto al centro dell'area di

saggio); (2) dendrometriche (diametro a petto d'uomo); e (3) di copertura (grado di copertura espresso in percentuale e stima del LAI attraverso l'impiego delle foto emisferiche).

Struttura orizzontale

Le misure di posizione e dendrometriche sono state impiegate per analizzare la struttura orizzontale dei popolamenti forestali oggetto di analisi, quest'ultima utilizzata quale espressione della distribuzione delle piante nello spazio e della loro differenziazione diametrica (Pommerening 2002). La scelta di dare particolare enfasi alla stima della struttura orizzontale del popolamento è stata dettata dallo stretto legame tra questa caratteristica e la copertura forestale (Tan et al. 2011). La struttura orizzontale è stata misurata attraverso l'impiego di due indici sintetici: l'indice di differenziazione diametrica e l'indice di aggregazione di Clark-Evans.

L'indice di differenziazione diametrica (TM), così come elaborato da Fuldner (1995), prende in considerazione la distribuzione dei diametri all'interno dell'area di saggio e può assumere valori tra 0 e 1. Valori dell'indice inferiori a 0.3 indicano una bassa differenziazione diametrica, mentre valori superiori a 0.8 indicano un'elevata differenziazione diametrica (eqn. 1):

$$TM = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (1 - d_{ij})$$

dove TM è l'indice di differenziazione diametrica; n

Tab. 2 - Principali informazioni dendrometriche e strutturali delle 54 aree di saggio (AdS).

Tipo forestale	AdS	Alberi (n ha ⁻¹)	Area basimetrica (m ² ha ⁻¹)	Altitudine (m s.l.m.)	TM	R	x	y
Faggeta	22	2469	36.4	540	0.42	0.99	66°40'06"	51°13'707"
	23	773	30.9	536	0.5	1.66	66°38'72"	51°13'555"
	24	1244	45.2	553	0.4	1.44	66°39'17"	51°13'636"
	40	565	21.3	410	0.49	1.39	65°70'87"	50°67'651"
	41	1847	20	543	0.43	1.51	65°70'86"	50°67'353"
	42	867	25.8	488	0.48	1.58	65°72'66"	50°67'313"
	46	565	21.3	1209	0.49	1.39	64°80'06"	50°66'873"
	47	565	24.5	1408	0.39	1.69	64°80'04"	50°66'856"
	48	735	30.3	1386	0.29	1.55	64°77'25"	50°65'469"
	52	1055	36.4	132	0.52	1.59	62°47'08"	50°75'391"
	53	660	21.6	1281	0.42	1.54	62°48'89"	50°75'489"
	54	2073	43.9	1235	0.41	1.33	62°50'70"	50°75'709"
			1118.2	28.5		0.44	1.47	
Lariceto	16	773	85.6	1602	0.5	1.27	62°34'71"	51°17'396"
	17	433	71.9	1632	0.31	1.01	62°33'91"	51°17'132"
	18	433	81.1	1679	0.18	1.06	62°29'31"	51°17'134"
	31	113	42.1	1888	0.45	1.64	68°14'65"	51°06'681"
	32	641	36.3	1864	0.49	1.66	68°13'91"	51°06'484"
	33	377	37	1862	0.26	1.83	68°13'89"	51°06'725"
			461.7	59.0		0.36	1.41	
Pecceta	4	716	55.6	1549	0.42	1.67	71°08'76"	51°31'310"
	5	1168	75.2	1538	0.49	0.98	71°09'36"	51°31'234"
	6	1018	61.5	1568	0.5	1.32	71°10'37"	51°31'192"
	10	754	47.4	1901	0.52	1.12	70°41'18"	51°27'537"
	11	829	51.7	1894	0.44	1.19	70°41'10"	51°27'493"
	12	490	38.5	1963	0.53	1.01	70°42'66"	51°27'486"
	19	1168	45.1	1594	0.47	0.96	68°78'15"	51°14'420"
	20	396	41.2	1592	0.28	1.17	68°73'26"	51°14'177"
	21	1074	56.2	1601	0.41	1.15	68°72'83"	51°14'197"
	25	490	60.1	1413	0.21	1.7	68°85'62"	51°13'713"
	26	377	56.6	1476	0.45	1.61	68°92'01"	51°13'346"
	27	471	63.7	1479	0.45	1.87	68°94'93"	51°13'175"
	28	1018	73.1	1490	0.46	1.61	70°72'86"	51°12'890"
	29	1112	55.5	1470	0.48	1.64	70°66'33"	51°12'698"
	30	565	36	1610	0.61	1.59	70°73'37"	51°13'086"
	34	1545	37.8	1460	0.41	1.4	70°15'81"	51°06'954"
	35	1734	58.3	1410	0.32	1.53	70°17'25"	51°07'102"
	36	791	37.9	1552	0.56	1.57	70°11'69"	51°06'544"
	37	810	68.2	1453	0.49	1.78	63°00'84"	50°88'760"
	38	1112	40.2	1327	0.38	1.48	62°95'60"	50°89'105"
	39	471	54.4	1634	0.46	1.50	62°98'05"	50°88'576"
49	829	73.3	1707	0.45	1.72	61°69'06"	50°99'906"	
50	1206	47.7	1715	0.44	1.55	71°45'70"	51°53'588"	
51	848	53.5	1771	0.39	1.49	61°67'09"	51°00'411"	
		874.7	53.7		0.44	1.44		-
Pineta	1	1734	40.9	1137	0.25	1.12	66°35'55"	51°48'128"
	2	2544	44.8	1195	0.36	1.15	66°34'25"	51°48'478"
	3	622	38.3	1129	0.27	0.98	66°33'44"	51°48'030"
	7	2751	45.7	997	0.45	0.9	65°42'76"	51°31'093"
	8	2601	41.6	952	0.39	0.94	65°42'78"	51°31'239"
	9	2638	37	924	0.4	0.95	65°44'92"	51°30'468"
	13	1545	50.6	924	0.42	0.81	67°78'02"	51°19'711"
	14	1545	38.4	924	0.4	1.03	67°79'24"	51°19'685"
	15	1281	48.8	924	0.44	1.03	67°77'49"	51°19'831"
	43	2148	30.9	1070	0.42	1.47	64°94'98"	50°82'966"
	44	1715	40.4	1090	0.51	1.49	64°94'09"	50°83'111"
	45	3467	34.4	1085	0.35	1.18	64°95'02"	50°83'055"
			2049.3	69.7		0.39	1.09	

è il numero di alberi interni all'area di saggio con diametro superiore a 4.5 cm a petto d'uomo; d_{ij} è il rapporto tra il diametro a petto d'uomo più piccolo e quello più grosso tra l'albero i e i suoi tre più prossimi vicini.

L'indice di aggregazione di Clark & Evans (1954) fornisce un valore sintetico della struttura orizzontale di un popolamento forestale sulla base della distanza tra alberi. Tale indice (R) può assumere valori compresi tra 0 e 2.1491. Secondo gli autori i valori inferiori a 0.86 sono indicativi di una struttura a cluster, mentre valori superiori a 1.29 indicano una struttura regolare. Valori compresi tra queste due soglie, invece, indicano una distribuzione randomizzata degli alberi. L'indice di aggregazione di Clark-Evans può essere così espresso dal punto di vista matematico (eqn. 2):

$$R = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i}{0.5 \sqrt{\frac{Pl}{n}}}$$

dove R è l'indice di aggregazione di Clark-Evans; n è il numero di alberi interni all'area di saggio con diametro superiore a 4.5 cm a petto d'uomo; r è la distanza dell'albero i dal suo più prossimo vicino (m); Pl è la dimensione dell'area di saggio (m^2).

I boschi oggetto d'indagine mostrano dal punto di vista strutturale (Tab. 2) un'ampia diversità ai cui estremi si posizionano i cedui plurispecifici sotto fustaia di pino silvestre e le fustaie monospecifiche e monoplane principalmente ad abete rosso. Osservando i risultati medi riferiti ai due indici strutturali impiegati ci si rende conto che le faggete e le peccete

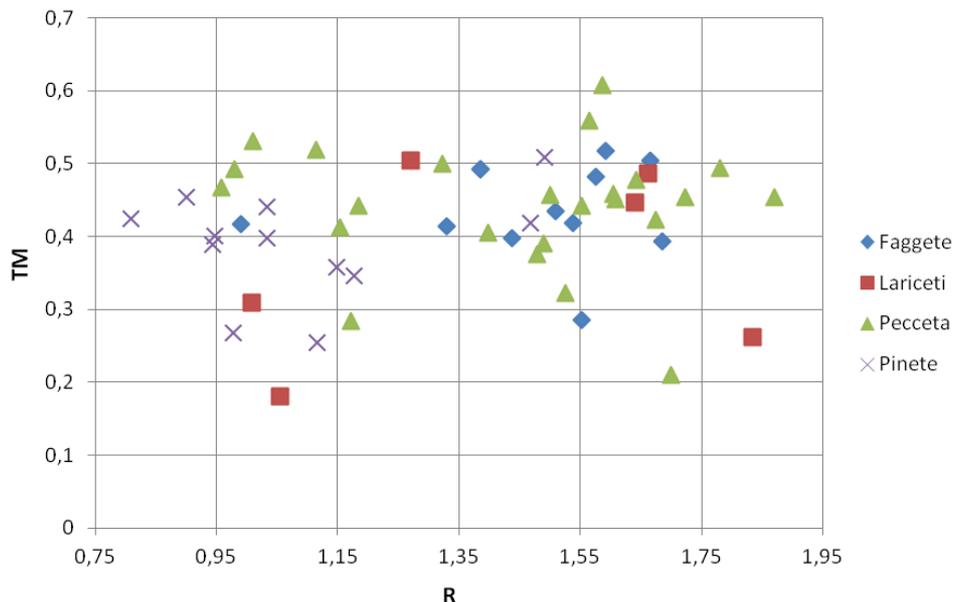
del campione analizzato presentano una struttura analoga ($TM_{peccete}=0.44$, $R_{peccete}=1.44$; $TM_{faggete}=0.44$, $R_{faggete}=1.47$). Tuttavia le faggete mostrano una distribuzione più omogenea e risultano raggruppate nell'area del grafico con valori alti di R e di TM (Fig. 2). Al contrario le peccete sono separate in due gruppi con analoghi valori di TM , ma con valori di R maggiori e minori di 1.35 (rispettivamente strutture regolari e randomizzate). I valori più bassi in termini strutturali si riscontrano per le pinete di pino silvestre ($TM_{pinete}=0.39$; $R_{pinete}=1.09$).

Grado di copertura e LAI

Il grado di copertura è stato stimato sia a vista sia attraverso l'impiego di un densiometro sferico. La stima a vista del grado di copertura, per entrambi i metodi, è stata condotta da un unico operatore con pregressa esperienza nella valutazione delle coperture forestali. Nel presente lavoro, ai fini di un confronto con i dati raccolti con il densiometro sferico, è stato chiesto all'operatore di attribuire un valore medio di copertura dell'intera area di saggio, evitando l'impiego delle classi di copertura.

I densimetri sono strumenti che permettono di ottenere risultati attendibili sul grado di copertura in modo semplice e speditivo. Il densiometro sferico (*Spherical Densiometer*), impiegato nella presente ricerca, è stato sviluppato da Paul E. Lemmon e consiste in uno specchio concavo o convesso con sopra incisa una griglia di 24 quadrati all'interno dei quali si identificano 4 punti di osservazione. Per ciascuno dei 96 punti di osservazione totali l'operatore deve indicare se è coperto o meno dalle chiome degli alberi. Il numero totale dei punti coperti va successivamente

Fig. 2 - Dispersione dei 54 punti di campionamento sulla base dell'indice di aggregazione di Clark-Evans (R) e l'indice di differenziazione diametrica (TM).



moltiplicato per un coefficiente (1.04) al fine di ottenere la percentuale di copertura (Lemmon 1956). Il densiometro sferico stima il grado di copertura impiegando un angolo di osservazione pari a 60°; conseguentemente è più corretto dire che tale strumento restituisce la *canopy closure percentage* anziché la *canopy cover percentage*. Si noti che al fine di stimare la *canopy cover* sarebbe necessario impiegare unicamente i 4 quadrati più prossimi all'operatore (16 punti di osservazione). La misura con densiometro sferico è stata eseguita dall'operatore posizionandosi a una distanza di 10 m dal centro dell'area di saggio in direzione dei quattro punti cardinali ed effettuando quattro misure in ciascun punto di osservazione. Il valore finale di copertura dell'intera area di saggio è stato calcolato come media delle sedici letture (quattro letture per ciascun punto di osservazione).

Inoltre, in corrispondenza del centro dell'area di saggio sono state scattate 4 fotografie emisferiche (una per ciascun punto cardinale) al fine di stimare il LAI. Le fotografie sono state scattate con una Nikon Coolpix 990 ed un *Fish-eye converter* Nikon FC-E8 (180° *field of view*) ponendo la fotocamera ad 1 m dal suolo e con la parte superiore in corrispondenza del punto cardinale prescelto. La fotocamera è stata utilizzata in modalità *programme* con esposizione e apertura automatici e parametri fissati sul programma FISHEYE1.

L'analisi delle fotografie emisferiche per la stima del LAI, in formato JPG e risoluzione 2048 x 1536 pixel, come consigliato da Frazer et al. (2001), è stata effettuata mediante il *software* gratuito *Spot Light Intercept Model* (SLIM) 3.02a (Comeau & MacDonald 2012). Le operazioni di *thresholding* sono state eseguite in modalità automatica (*Ridler clustering method*), mentre la selezione della porzione d'immagine analizzata è stata effettuata manualmente.

L'esposizione è considerata una delle maggiori cause di errore nella stima del LAI (Chen et al. 1991). Come evidenziato da Chianucci & Cutini (2012) la migliore esposizione per le fotografie emisferiche è quella in cui il cielo appare il più chiaro possibile tale da garantire il miglior contrasto tra le chiome e il cielo. Secondo suddetti autori il metodo più efficiente per ottenere tale risultato prevede di settare manualmente l'esposizione. Tuttavia, l'algoritmo di Ridler è molto robusto e minimizza gli effetti che il formato del file e la selezione della banda dell'immagine, che influenzano anche la scelta della migliore esposizione, hanno sulla stima dei parametri forestali (Pueschel et al. 2012, Jonckheere et al. 2005). Si ritiene, dunque, che l'applicazione dell'algoritmo di

Ridler, accompagnato dall'esecuzione delle fasi di campionamento in giornate di cielo coperto ed in un limitato periodo dell'anno, possa minimizzare gli errori di stima causati dall'uso dell'esposizione automatica.

I valori di LAI e il grado di copertura stimato (a vista e con densiometro sferico) sono stati confrontati in termini statistici. Considerando che i dati di copertura non si distribuiscono in modo normale (test di Shapiro-Wilk: $W=0.932$, $p=0.002$; test di Anderson-Darling: $A^2=0.915$, $p=0.018$), si è optato per l'impiego del test non-parametrico di Wilcoxon per evidenziare eventuali differenze statisticamente significative tra la stima del grado di copertura a vista e con densiometro sferico. Il test di correlazione di Spearman è stato utilizzato, invece, per analizzare la relazione esistente tra LAI e grado di copertura a vista e tra LAI e grado di copertura stimata con densiometro sferico.

Infine, i valori di LAI riscontrati in ciascuna tipologia sono stati confrontati con i riferimenti riportati in bibliografia per gli stessi tipi forestali. La ricerca è stata condotta utilizzando i dati raccolti nel database *Global Leaf Area Index Data from Field Measurements, 1932-2000* (Scurlock et al. 2001) e integrati con quelli pubblicati in anni più recenti. La ricerca all'interno dei database è stata condotta sulla base della specie prevalente (*dominant species*) provvedendo successivamente a scremare la lista in considerazione della metodologia utilizzata.

Risultati e discussioni

I valori di LAI stimati attraverso l'elaborazione delle foto emisferiche sono compresi tra 1.16 e 4.76, mentre i valori di copertura forestale si distribuiscono in un intervallo tra 30% e 95% per la stima a vista e tra 67% e 96% per le misure con densiometro sferico. I valori medi per tipo forestale, con le rispettive deviazioni standard, sono illustrati nella Tab. 3. La prima differenza sostanziale riguarda la stima del grado di copertura a vista rispetto a quella rilevata attraverso l'impiego del densiometro sferico. Per tutti i tipi forestali il grado di copertura stimato a vista è inferiore a quello stimato con densiometro sferico, tali differenze si accentuano con il diminuire del grado di copertura e risultano massime nei lariceti, dove la differenza nella stima della copertura tra i due metodi è del 35%, e nelle peccete, dove tale differenza risulta di poco inferiore al 25%. La differenza risulta inferiore al 10% soltanto nelle faggete il cui grado di copertura medio si attesta tra l'80% e il 90%.

Questo fatto è stato confermato anche dal test non-

Tab. 3 - Valori medi di LAI e grado di copertura per i principali tipi forestali del Trentino (tra parentesi sono riportati i rispettivi errori standard).

Tipo forestale	LAI	Grado copertura a vista (%)	Grado copertura densiometro (%)
Faggeta	3.36 (0.20)	81.3 (3.85)	90.9 (1.73)
Lariceto	1.87 (0.31)	48.3 (7.03)	83.9 (1.36)
Pecceta	2.60 (0.13)	63.3 (2.74)	87.5 (1.24)
Pineta	3.06 (0.27)	70.8 (4.99)	89.0 (1.78)
Media totale	2.79 (0.12)	67.3 (2.36)	88.2 (0.82)

parametrico di Wilcoxon che ha messo in luce delle differenze statisticamente significative nella stima del grado di copertura con l'impiego dei due strumenti ($V=9$, valore atteso=742.5, varianza=13488.75, $p<0.0001$). Nello specifico, tali differenze sono sintetizzabili nel fatto che il densiometro sferico tende a restituire valori di copertura significativamente più alti di quelli stimati a vista con una differenza del 20%. Si evidenzia, inoltre, che la deviazione standard interna ai singoli tipi forestali risulta molto più alta nel caso della stima a vista. Questi due tipi d'informazione ci portano a pensare che l'occhio umano è molto sensibile a piccole variazioni nel grado di copertura, causando una potenziale sovrastima dei "vuoti" nella copertura rispetto ai "pieni". La letteratura suggerisce, invece, che l'impiego del densiometro sferico utilizzando tutti i 96 quadrati tende a sovrastimare il grado di copertura come dimostrato da alcuni autori (Bunnell & Vales 1990, Paletto & Tosi 2009).

La correlazione tra i valori di LAI e grado di copertura stimato con le due tecniche ha messo in luce una

correlazione significativa sia per il confronto tra LAI-grado di copertura a vista ($r=0.492$, $p=0.000$) sia per quello LAI-grado di copertura con densiometro sferico ($r=0.420$, $p=0.002$). In Fig. 3 sono riportati i due diagrammi di correlazione con il rispettivo coefficiente di correlazione.

I valori di LAI della presente ricerca variano da un minimo di 1.87 dei lariceti ad un massimo del 3.36 delle faggete. Il confronto tra questi valori e quelli riportati in bibliografia (Appendice 1) evidenzia come i dati di LAI del presente lavoro risultino leggermente più bassi. Complessivamente il LAI medio stimato dalle ricerche analizzate è pari a 4.97 per il faggio, 4.66 per il larice, 4.73 per l'abete rosso e 6.20 per il pino silvestre (Fig. 4). Le principali differenze sono dovute al metodo di stima impiegato, se consideriamo unicamente i lavori di stima del LAI attraverso LAI-2000 e foto emisferiche i valori medi sono in linea con quelli stimati dal presente lavoro: faggio (3.33), larice (2.98), abete rosso (3.49), pino silvestre (2.17).

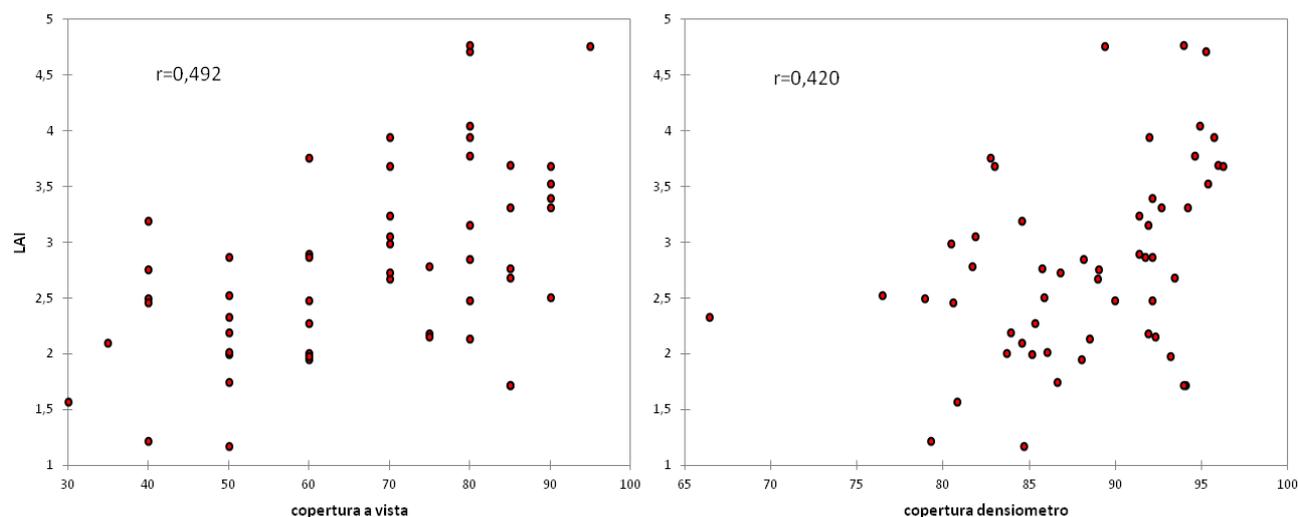


Fig. 3 - Diagrammi di correlazione LAI-grado di copertura a vista (a sinistra) e LAI-grado di copertura con densiometro sferico (a destra).

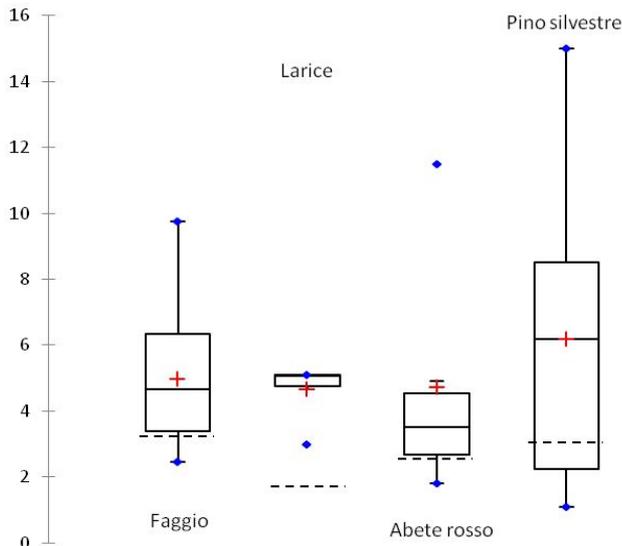


Fig. 4 - Box plot per i valori di LAI riscontrati in letteratura per tipo forestale (la linea tratteggiata indica i valori medi di LAI nei tipi forestali del Trentino).

Conclusioni

Il presente lavoro ha misurato il LAI e il grado di copertura in un significativo numero di punti di campionamento estratti casualmente all'interno dei quattro principali tipi forestali del Trentino. L'analisi dei dati raccolti ha messo in luce alcuni aspetti di notevole rilevanza che possono essere sintetizzati in una notevole variabilità della distribuzione orizzontale degli alberi e, di conseguenza, delle caratteristiche delle chiome, sia in termini di LAI sia di copertura, nonché una discreta correlazione tra i valori di LAI e quelli del grado di copertura indipendentemente dalla tecnica di stima impiegata.

La differenziazione strutturale mostra che, in Trentino, le formazioni forestali hanno, in genere, una media differenziazione diametrica e una distribuzione regolare delle piante. Tuttavia, non mancano formazioni con distribuzione randomizzata, soprattutto tra le peccete e le pinete.

La notevole differenza tra il grado di copertura stimato a vista e con densiometro sferico ci porta, invece, a dedurre che l'impiego dell'una o dell'altra tecnica negli inventari forestali o nella pianificazione forestale non è indifferente. La stima a vista richiede dei tempi pari a un terzo del tempo di stima con densiometro sferico e anche quest'aspetto deve essere tenuto nella debita considerazione ai fini della scelta della tecnica da adottare. Per quanto concerne la stima a vista del grado di copertura, che rappresenta una pratica usuale nei rilievi speditivi, deve essere condotta da rilevatori esperti e, se possibile, ap-

positamente formati nel contesto territoriale dove andranno ad operare. La presente indagine ha evidenziato come l'attribuzione di un valore puntuale, anziché l'impiego di una classe di copertura, può portare a delle differenze rilevanti rispetto all'impiego di altre tecniche meno influenzate dall'esperienza dell'operatore, come ad esempio i densiometri. Questo fatto può essere dovuto a due ordini di fattori, il primo legato alla scarsa abitudine dei tecnici ad attribuire un valore unico preferendo l'impiego di classi di copertura, il secondo dovuto al rischio di sovrastimare l'elemento meno rappresentato (cielo o copertura fogliare).

La stima del LAI mediante fotografie emisferiche presenta delle interessanti potenzialità d'impiego dovute ai non eccessivi tempi di rilievo in campo, stimabili in circa venti minuti per area di saggio, e nell'analisi delle immagini a video. I valori di LAI stimati nel presente lavoro sono in linea con quelli indicati dalla letteratura internazionale negli stessi tipi forestali e stimati con la medesima tecnica (foto emisferiche o LAI-2000), mentre alcune differenze importanti si notano quando vengono impiegati i metodi diretti.

Ringraziamenti

La ricerca è stata eseguita nell'ambito di un progetto *post-doc* finanziato dalla Fondazione CARITRO (Cassa di Risparmio di Trento e Rovereto). Gli autori ringraziano CARITRO per il contributo concesso necessario alla realizzazione del presente lavoro.

Bibliografia

- Alvera B (1973). Estudios en bosques de coníferas del Pirineo Central. Pirineos 109: 17-29.
- Anderson MC (1964). Studies of the woodland light climate: I. The photographic computation of light conditions. *Journal of Ecology* 52 (1): 27-41. - doi: [10.2307/2257780](https://doi.org/10.2307/2257780)
- Andersson F (1973). IBP-studies on plant productivity of south Swedish forest ecosystems. In: "Modeling forest ecosystems" (Reichle DE et al. eds). Report EDFB-IBP-73-7, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA, pp.11-26.
- Asner GP, Scurlock JMO, Hicke J (2003). Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography* 12: 191-205. - doi: [10.1046/j.1466-822X.2003.00026.x](https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00026.x)
- Aussenac G (2000). Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science* 57: 287-301. - doi: [10.1051/forest:2000119](https://doi.org/10.1051/forest:2000119)

- Bolstad PV, Gower ST (1990). Estimation of leaf area index in fourteen southern Wisconsin forest stands using a portable radiometer. *Tree Physiology* 7: 115-124. - doi: [10.1093/treephys/7.1-2-3-4.115](https://doi.org/10.1093/treephys/7.1-2-3-4.115)
- Bosellini A, Castellarin A, Dal Piaz GV, Nardin M (1999). Carta litologica e dei lineamenti strutturali del Trentino (1:200.000). Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento, Trento.
- Bréda N (2003). Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* 54: 2403-2417. - doi: [10.1093/jxb/erg263](https://doi.org/10.1093/jxb/erg263)
- Bunnell FL, Vales DJ (1990). Comparison of methods for estimating forest overstory cover: divergences among techniques. *Canadian Journal of Forest Research* 20: 101-107. - doi: [10.1139/x90-014](https://doi.org/10.1139/x90-014)
- Chen JM, Black TA (1992). Foliage area and architecture of clumped plant canopies from sunfleck size distributions. *Agricultural and Forest Meteorology* 60: 249-266. - doi: [10.1016/0168-1923\(92\)90040-B](https://doi.org/10.1016/0168-1923(92)90040-B)
- Chen JM, Black TA, Adams RS (1991). Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand. *Agricultural and Forest Meteorology* 56: 129-143. - doi: [10.1016/0168-1923\(91\)90108-3](https://doi.org/10.1016/0168-1923(91)90108-3)
- Chianucci F, Cutini A (2012). Digital hemispherical photography for estimating forest canopy properties: current controversies and opportunities. *iForest* 5: 290-295. - doi: [10.3832/ifor0775-005](https://doi.org/10.3832/ifor0775-005)
- Chianucci F, Cutini A (2013). Estimation of canopy properties in deciduous forests with digital hemispherical and cover photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 168: 130-139. - doi: [10.1016/j.agrformet.2012.09.002](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.002)
- Clark PJ, Evans FC (1954). Distance to nearest neighbour as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology* 35: 445-453. - doi: [10.2307/1931034](https://doi.org/10.2307/1931034)
- Comeau P, MacDonald R (2012). Modeling light using SLIM & LITE. Web site. [online] URL: http://www.ualberta.ca/~pcomeau/Light_Modeling/lightusingSLIM_and_LITE.htm
- Cutini A, Giannini T (2009). Effetti della consociazione con *Alnus cordata* sulla funzionalità di impianti di noce comune (*Juglans regia* L.) sottoposti a diradamento. *Forest@* 6 (1): 29-38. - doi: [10.3832/efor0553-006](https://doi.org/10.3832/efor0553-006)
- De Natale F, Pignatti G (2011). Estensione e composizione dei boschi italiani. In: "L'Inventario nazionale delle foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC 2005" (Gasparini P, Tabacchi G eds). Secondo inventario forestale nazionale italiano. Metodi e risultati. Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, Corpo Forestale dello Stato, Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Edagricole, Milano, pp. 99-111.
- Dufrene E, Bréda N (1995). Estimation of deciduous forest leaf-area index using direct and indirect methods. *Oecologia* 104: 156-162. - doi: [10.1007/BF00328580](https://doi.org/10.1007/BF00328580)
- Ellenberg H (1971). Integrated experimental ecology. *Ecological studies* 2, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, pp. 214.
- Fassnacht KS, Gower ST, Norman JM, McMurtric ER (1994). A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 71: 183-207. - doi: [10.1016/0168-1923\(94\)90107-4](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90107-4)
- Frazer GW, Fournier RA, Trofymow JA, Hall RJ (2001). A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission. *Agricultural and Forest Meteorology* 109: 249-263. - doi: [10.1016/S0168-1923\(01\)00274-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00274-X)
- Füldner K (1995). Zur Strukturbeschreibung in Mischbeständen. *Forstarchiv* 66: 235-240.
- Gower ST, Reich PB, Son Y (1993). Canopy dynamics and aboveground production of five tree species with different leaf longevities. *Tree Physiology* 12: 327-345. - doi: [10.1093/treephys/12.4.327](https://doi.org/10.1093/treephys/12.4.327)
- Gower ST, Norman JM (1991). Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaf plantations. *Ecology* 72 (5): 1896-1900. - doi: [10.2307/1940988](https://doi.org/10.2307/1940988)
- Griffin AMR, Popescu SC, Zhao K (2008). Using LIDAR and Normalized Difference Vegetation Index to remotely determine LAI and percent canopy cover. In: Proceedings of 8th International Conference on "LiDAR applications in forest assessment and inventory" (Hill RA, Rosette J, Suárez J eds). Edinburgh, UK, pp. 446-455.
- Jennings SB, Brown ND, Sheil D (1999). Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry* 72 (1): 59-74. - doi: [10.1093/forestry/72.1.59](https://doi.org/10.1093/forestry/72.1.59)
- Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, Muys B, Coppin P, Weiss M, Baret F (2004). Review of methods for *in situ* leaf area index determination. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 19-35. - doi: [10.1016/j.agrformet.2003.08.027](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027)
- Jonckheere I, Nackaerts K, Muys B, Coppin P (2005). Assessment of automatic gap fraction estimation of forests from digital hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 132: 96-114. - doi: [10.1016/j.agrformet.2005.06.003](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.06.003)
- Jordan CF (1983). Productivity of tropical rain forest ecosystems and the implications for their use as future wood and energy sources. In: "Ecosystems of the world. 14A. Tropical rain forest ecosystems, structure and function" (Golley FB ed). Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 117-136.

- Hall FG, Huemmrich KF, Strebel DE, Goetz SJ, Nickeson JE, Woods KD (1992). Biophysical, morphological, canopy optical property, and productivity data from the superior national forest. NASA Technical Memorandum no 104568, National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA.
- Havas P (1981). IBP woodlands data set. In: "Dynamic properties of forest ecosystems" (Reichle DE ed). IBP 23, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 582.
- Holm E, Jensen V (1972). Aerobic chemoorganotrophic bacteria of a Danish beech forest. *Oikos* 23: 248-260. - doi: [10.2307/3543413](https://doi.org/10.2307/3543413)
- Karpov VG (1981). IBP woodlands data set. In: "Dynamic properties of forest ecosystems" (Reichle DE ed). IBP 23, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 628.
- Kazimirov NI, Morozova RM (1981). IBP woodlands data set. In: "Dynamic properties of forest ecosystems" (Reichle DE ed). IBP 23, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 629-645.
- Korhonen L, Korhonen KT, Rautiainen M, Stenberg P (2006). Estimation of forest canopy cover: a comparison of field measurement techniques. *Silva Fennica* 40: 577-588. [online] URL: <http://metla.eu/silvafennica/full/sf40/sf404577.pdf>
- Korhonen L, Korhonen KT, Stenberg P, Maltamo M, Rautiainen M (2007). Local models for forest canopy cover with beta regression. *Silva Fennica* 41: 671-685. [online] URL: <http://metla.eu/silvafennica/full/sf41/sf414671.pdf>
- Lang ARG, Xiang YQ (1986). Estimation of leaf-area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 37: 229-243. - doi: [10.1016/0168-1923\(86\)90033-X](https://doi.org/10.1016/0168-1923(86)90033-X)
- Lawrence WT (2012). FED/MAC data leaf area indices - Larch measurements. The role of spatial heterogeneity in forest ecosystem dynamics. [online] URL: <http://forest.g-sfc.nasa.gov/data/html/fedmac/lai/larch.html>
- Lemee G (1981). IBP woodlands data set. In: "Dynamic properties of forest ecosystems" (Reichle DE ed), IBP 23. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 583, 598, 599.
- Lemmon PE (1956). A spherical densiometer for estimating forest overstory density. *Forest Science* 2: 314-320.
- Leuschner C, Voss S, Foetzki A, Clases Y (2006). Variation in leaf area index and stand leaf mass of European beech across gradients of soil acidity and precipitation. *Plant Ecology* 182: 247-258. - doi: [10.1007/s11258-006-9127-2](https://doi.org/10.1007/s11258-006-9127-2)
- Liang S, Li X, Wang J (2012). Advanced remote sensing: terrestrial information extraction and applications. Academic Press, Amsterdam, The Netherlands.
- Liu J, Pattey E, Admiral S (2013). Assessment of *in situ* crop LAI measurement using unidirectional view digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 169: 25-34. - doi: [10.1016/j.agrformet.2012.10.009](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.10.009)
- Machado JL, Reich PB (1999). Evaluation of several measures of canopy openness as predictors of photosynthetic photon flux density in deeply shaded conifer-dominated forest understory. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 1438-1444. - doi: [10.1139/x99-102](https://doi.org/10.1139/x99-102)
- Macfarlane C, Grigg A, Evangelista C (2007). Estimating forest leaf area using cover and fullframe fisheye photography: thinking inside the circle. *Agricultural and Forest Meteorology* 146: 1-12. - doi: [10.1016/j.agrformet.2007.05.001](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.05.001)
- Mercurio I, Mercurio R (2008). Effetto del regime luminoso sulla rinnovazione naturale dell'abete bianco (*Abies alba* Mill.) nel bosco di Archiforo, Calabria. *Forest@* 5 (1): 171-175. - doi: [10.3832/efor0524-0050171](https://doi.org/10.3832/efor0524-0050171)
- Moeller CM, Mueller D, Nielsen J (1954). The dry matter production of European beech. *Forstliche Forschungsarbeiten* 21: 253-335.
- Morisette J, Baret F, Privette JL, Myneni RB, Nickeson J, Garrigues S, Shabanov N, Weiss M, Fernandes R, Leblanc S, Kalacska M, Sanchez-Azofeifa GA, Chubey M, Rivard B, Stenberg P, Rautiainen M, Voipio P, Manninen T, Piliant D, Lewis T, Iiams J, Colombo R, Meroni M, Busetto L, Cohen W, Turner D, Warner D, Petersen GW, Seufert G, Cook R (2006). Validation of global moderate resolution LAI Products: a framework proposed within the CEOS Land Product Validation subgroup. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44: 1804-1817. - doi: [10.1109/TGRS.2006.872529](https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872529)
- Neumann HH, Den Hartog G (1989). Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall. *Agricultural and Forest Meteorology* 45: 325-345. - doi: [10.1016/0168-1923\(89\)90052-X](https://doi.org/10.1016/0168-1923(89)90052-X)
- Ovington JD (1957). Dry matter production by *Pinus sylvestris* L. *Annals of Botany* 21: 287-314. [online] URL: <http://aob.oxfordjournals.org/content/21/2/287.short>
- Paletto A, Tosi V (2009). Forest canopy cover and canopy closure: comparison of assessment techniques. *European Journal of Forest Research* 128 (3): 265-272. - doi: [10.1007/s10342-009-0262-x](https://doi.org/10.1007/s10342-009-0262-x)
- Pastorella F (2011). Analisi del microclima luminoso, in pinete artificiali a pino d'Aleppo, idoneo alla rinnovazione delle principali specie forestali dell'area del Mediterraneo. *Dendronatura* 2: 53-73.
- Pommerening A (2002). Approaches to quantifying forest structures. *Forestry* 75 (3): 305-324. - doi: [10.1093/forestry/75.3.305](https://doi.org/10.1093/forestry/75.3.305)
- Popescu-Zeletin I (1981). IBP woodlands data set. In: "Dynamic properties of forest ecosystems" (Reichle DE ed), IBP 23. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 613.

- Pueschel P, Buddenbaum H, Hill J (2012). An efficient approach to standardizing the processing of hemispherical images for the estimation of forest structural attributes. *Agricultural and Forest Meteorology* 160: 1-13. - doi: [10.1016/j.agrformet.2012.02.007](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.02.007)
- Rautiainen M, Stenberg P, Nilson T (2005). Estimating canopy cover in scots pine stands. *Silva Fennica* 39: 137-142. [online] URL: <http://www.metsantutkimuslaitos.fi/silva-fennica/full/sf39/sf391137.pdf>
- Scurlock JMO, Asner GP, Gower ST (2001). Global leaf area index data from field measurements, 1932-2000. Data set. From the Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA. [online] URL: <http://www.daac.ornl.gov>
- Sboarina C, Cescatti A (2004). Il clima del Trentino. Distribuzione spaziale delle principali variabili climatiche. Report no. 33, Centro di Ecologia Alpina, Trento.
- Stenberg PL, Linder S, Smolander H, Flower-Ellis J (1994). Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating leaf area index of some Scots pine stands. *Tree Physiology* 14: 981-995. - doi: [10.1093/treephys/14.7-8-9.981](https://doi.org/10.1093/treephys/14.7-8-9.981)
- Tan SA, Salim R, Hamzah KA, Mamat MR (2011). Correlation of forest canopy and forest ecological structures in a logged over forest. *The Malaysian Forester* 74 (1): 31-36.
- Thimonier A, Sedivy I, Schleppi P (2010). Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland: a comparison of methods. *European Journal of Forest Research* 129: 543-562. - doi: [10.1007/s10342-009-0353-8](https://doi.org/10.1007/s10342-009-0353-8)

Materiale Supplementare

Appendice 1 - Valori di LAI riportati in letteratura per metodo.

Link: [Pastorella_974@suppl001.pdf](#)