

Sezione Speciale: Atti 5° Congresso SISEF: Foreste e Società - Cambiamenti, Conflitti, Sinergie
(a cura di: E. Lingua, R. Marzano, G. Minotta, R. Motta, A. Nosenzo, G. Bovio)

Confronto tra tecniche di ripresa ottiche e digitali per la descrizione del clima luminoso nella foresta di Paneveggio (TN)

Vacchiano G* ⁽¹⁾, Tonon G ⁽²⁾, Panzacchi P ⁽²⁾, Muzzi E ⁽²⁾, Motta R ⁽¹⁾

(1) Dipartimento AGROSELVITER, Università degli Studi di Torino, Via Da Vinci 44, 10095 Grugliasco (TO); (2) Dipartimento di Colture Arboree, Università degli Studi di Bologna, Via Fanin 46, 40127 Bologna. - *Corresponding author: Vacchiano G - giorgio.vacchiano@unito.it

Abstract: Comparison of optical and digital techniques for light microclimate assessment in the Paneveggio Forest, Trentino, Italy. Hemispherical photography is a widely used tool for the indirect estimation of forest light environment and quantification of canopy openness, LAI, and direct and diffuse canopy light transmittance. Several comparisons have been made in existing literature between digital and film systems and their performance under different stand structures and light intensity levels, but the conclusions are not always in agreement. The aim of this research is to compare the light estimates coming from analysis of digital- and film-based hemispherical photographs taken in a mountain Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) forest in the Valbona forest reserve (Paneveggio - Pale di S. Martino Regional Park, Trent, Italy). Two 100x100m permanent plots were established in a previous study (Motta 2002), one each in a single- and a multi-storied stand. The images were taken from grid points 12.5 m apart using a digital camera equipped with a Nikon FC-E8 fisheye adapter, immediately followed by a film camera shot (Sigma 8mm F4 fisheye lens). Images were digitized and analyzed using Gap Light Analyzer (Frazer et al. 1999). The output variables (canopy openness, LAI, total, direct and diffuse transmitted PAR) were compared by statistical means across the full sample (48 photos) and for the two sites independently. The ratio between digital and film output was analyzed in its relationship to canopy cover, local tree density, spatial pattern of canopy gaps and zenith angle. Under the dense, even-aged cover the results were similar, while the digital images provided significantly lower transmittance estimates (up to 32% less than film-based estimates) in the uneven-aged stand. We addressed different sources of error for the two techniques; some corrective strategies are proposed herein.

Keywords: Hemispherical photograph, Light regime, Gap Light Analyzer, *Picea abies*, Paneveggio - Pale S. Martino Natural Park, Dolomites.

Received: Mar 11, 2006 - Accepted: Apr 10, 2006

Citation: Vacchiano G, Tonon G, Panzacchi P, Muzzi E, Motta R, 2006. Confronto tra tecniche di ripresa ottiche e digitali per la descrizione del clima luminoso nella foresta di Paneveggio (TN). *Forest@* 3 (2) 191-204. [online] URL: <http://www.sisef.it/>

Introduzione

La luce solare incidente è un fattore determinante per lo sviluppo e le dinamiche dei popolamenti forestali. L'ambiente luminoso che si instaura sotto le chiome è essenziale per l'insediamento e lo sviluppo della rinnovazione (Gray & Spies 1996, Oliver & Larson 1996, Brang 1998, Lieffers et al. 1999) e per l'accrescimento degli individui adulti (Monsi & Saeki 1953, Gersonde et al. 2004). Di conseguenza, la de-

scrizione del regime luminoso sotto copertura di un popolamento forestale fornisce informazioni utili a fini ecologici e gestionali, consentendo la previsione delle dinamiche competitive interne al popolamento e illustrando le conseguenze di ciascun trattamento che ne modifichi la struttura.

L'intensità e la qualità della luce sotto copertura variano nello spazio e nel tempo, in funzione della distribuzione spaziale e della geometria dei fusti e

delle chiome (Rich et al. 1993, Nicotra et al. 1999, Mizunaga 2000). Diversi metodi sono stati utilizzati per misurare, direttamente o indirettamente, la radiazione solare sotto copertura (Lieffers et al. 1999, Coomeau 2000). La fotografia emisferica (Evans & Coombe 1959) è una tecnica largamente utilizzata per stimare la struttura delle chiome, le caratteristiche spettrali dei popolamenti e la distribuzione spazio-temporale della radiazione luminosa in bosco (e.g., Canham 1988, Rich et al. 1993, Frazer et al. 2000). Tale metodo di analisi si è dimostrato utile allo studio di dettaglio della struttura delle chiome e alla modellizzazione della trasmissione dei raggi luminosi (Nilson & Ross 1979, Chen et al. 1991, Courbaud et al. 2003), così come all'analisi integrata nel tempo dei regimi di luce in un ampio spettro di ecosistemi, dalle foreste tropicali (Bonhomme & Ganry 1976, Smith et al. 1992, Trichon et al. 1998) a quelle temperate (Canham et al. 1994, Battaglia et al. 2003, Hardy et al. 2004). Una descrizione comprensiva delle tecniche di analisi è riportata da Pearcy (1989), Rich (1990) e Frazer et al. (1997).

I recenti progressi nelle tecnologie digitali (fotocamera e *software* di supporto) hanno reso rapido ed economico il processo di raccolta ed analisi dei dati, abbattendo i costi e i potenziali errori associati al trattamento e alla successiva scansione dei negativi e rendendo possibile la visualizzazione e la prima elaborazione dell'immagine direttamente in campo. Le tecniche di ripresa e di analisi digitale sono state utilizzate nella fotografia emisferica in modo crescente negli ultimi anni (Chazdon & Field 1987, Rich 1988, Becker et al. 1989, Rich 1989, Rich et al. 1993, ter Steege 1993, Canham 1995, Rich et al. 1998, Frazer et al. 1999, Kopp et al. 2002, Leblanc et al. 2005). Ai fini della comparabilità dei risultati è essenziale che il sistema tradizionale e quello digitale forniscano misurazioni simili del medesimo *light regime*, ma la letteratura riporta in merito informazioni contrastanti (Englund et al. 2000, Frazer et al. 2001, Hale & Edwards 2002). Questa ricerca ha l'obiettivo di comparare il clima luminoso di una pecceta subalpina delle Alpi sudorientali, stimato mediante tecniche di ripresa digitali e tradizionali in corrispondenza di una struttura coetaneiforme e di una disetaneiforme. In particolare, i parametri posti a confronto sono la *canopy openness* (percentuale di cielo visibile da un punto sotto copertura), il LAI (*Leaf Area Index*) effettivo (Chen et al. 1991) e la trasmittanza¹ della luce in-

cidente totale, diretta e diffusa (Frazer et al. 1997).

Materiali e metodi

Area di studio

L'area di studio è rappresentata da due parcelle permanenti (100x100 m) nella riserva forestale integrale della Valbona (46°18'N, 11°45'E) nel Parco Naturale Paneveggio - Pale di S. Martino (TN). La specie dominante è l'abete rosso (*Picea abies* (L.) Karst.). La prima parcella è costituita da una pecceta coetaneiforme di età compresa tra 150 e 230 anni; la struttura verticale è monostatificata e la densità è colma (fig. 1a). La seconda parcella è rappresentata da una pecceta disetanea, con struttura pluristatificata (età comprese tra 70 e 320 anni) e tessitura a gruppi, insediata su un popolamento rado un tempo utilizzato a pascolo arborato e successivamente abbandonata (fig. 1b). I metodi di rilievo e i parametri dendrometrici sono descritti in Motta et al. (2002); i dati stazionali e strutturali di sintesi delle aree di studio sono riportati in tab. 1.

Acquisizione delle immagini e loro elaborazione

Una griglia regolare a maglia di 12.5 m è stata tracciata all'interno di un *subplot* (50x50 m) posto al centro dell'area di studio. In corrispondenza di ciascun nodo è stata scattata una fotografia emisferica tradizionale (fotocamera Nikon F75 con ottica *fish-eye* Sigma 8mm F4, pellicola Kodak Tmax b/n 400/27° ISO), immediatamente seguita da una fotografia digitale (Nikon Coolpix 5000, aggiuntivo *fish-eye* FC-E8). La pellicola è stata scelta per l'alto potere risolvibile e l'elevata sensibilità del sensore alla luce che permettono di massimizzare i contrasti lavorando in condizioni di bassa luminosità. La fotocamera digitale è dotata di un sensore CCD (*Charged Couple Device*) ad alta densità da 2/3" (4.9 megapixel effettivi); la sensibilità è stata impostata a 400/27° ISO. Le fotografie digitali sono state memorizzate per la prima area di studio come file JPEG (compressione 1:4) a colori, successivamente convertito in scala di grigi, e per la seconda come file TIFF b/n non compresso. In entrambi i casi la risoluzione è di 2560x1920 pixel per 300 dpi. Si è fatto inoltre ricorso alla funzione di *sharpening* per aumentare la nitidezza apparente dei fotogrammi.

Le fotografie sono state scattate nell'agosto 2005 in

co (PPFD [$\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$]) nello spettro della PAR (*Photosynthetically Active Radiation*, 400-700 nm) e alla proporzione della PPFD incidente trasmessa attraverso le chiome.

1 - In questo studio il termine "luce" e "trasmittanza" si riferiscono rispettivamente alla densità di flusso fotosinteti-

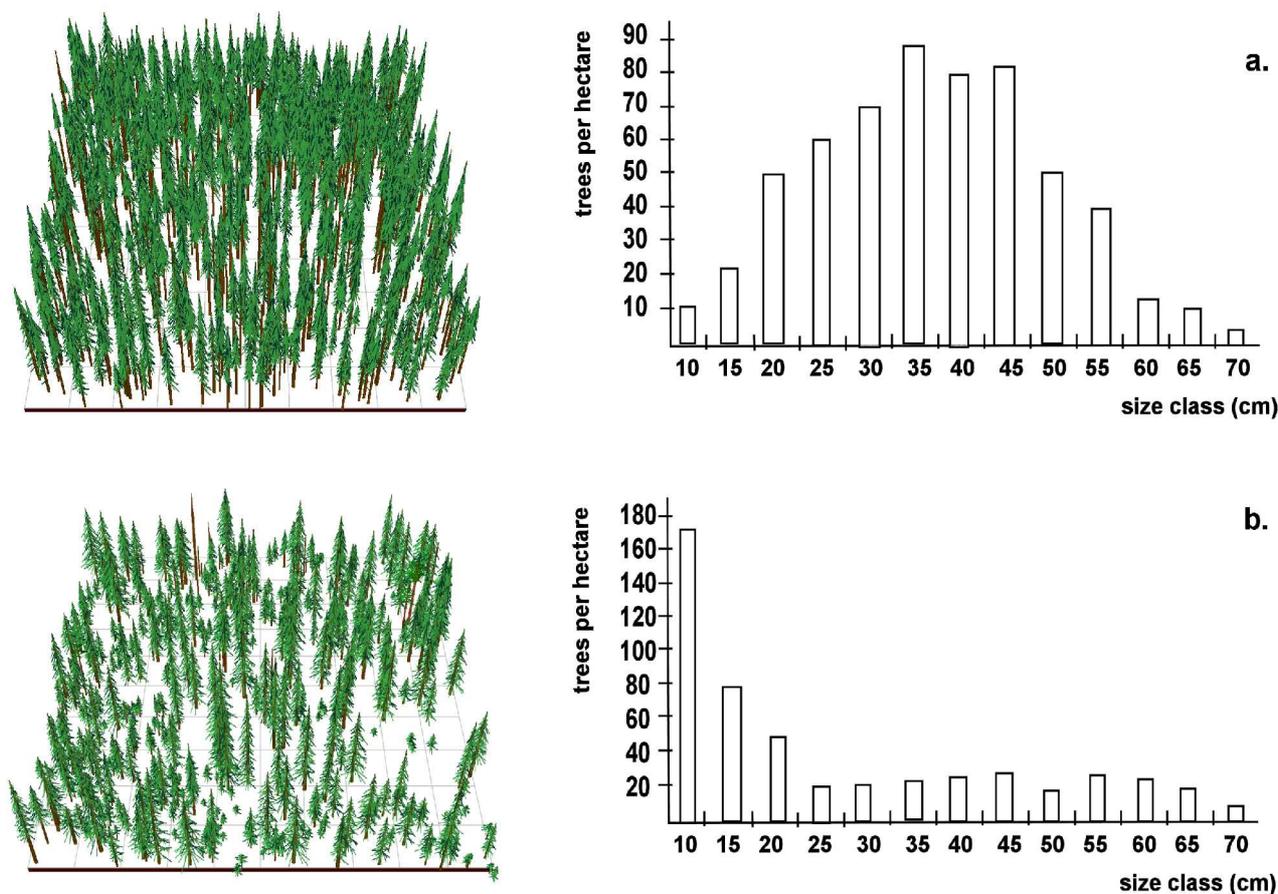


Fig. 1 - Struttura e distribuzione diametrica (da Motta 2002) delle aree di studio (a. popolamento coetaneo; b. popolamento disetaneo).

condizioni di cielo sereno all'alba o al tramonto o in condizioni di cielo uniformemente coperto. L'esposizione è stata impostata per ogni scatto in base alla luminosità del cielo ricorrendo all'uso di un esposimetro *spot* (Sekonic Corp., Tokyo), mantenendo un tempo di scatto sempre inferiore a 1/60 s. La fotocamera è stata sempre mantenuta orizzontale ad un'altezza di 80 cm dal suolo e orientata verso il Nord magnetico tramite l'impiego di un cavalletto. In seguito alla digitalizzazione dei negativi (Nikon Super Coolscan LS4000 ED) le pellicole sono state convertite in file TIFF con una risoluzione di 5825x3946 pixel per 2200 dpi. Tutte le immagini sono state orientate, processa-

te con un filtro *software* per aumentarne il contrasto del 100% e analizzate con il software *Gap Light Analyzer* (GLA - Frazer et al. 1999). I parametri utilizzati per l'analisi e le relative fonti utilizzate sono riassunti in tab. 2. Il modello di distribuzione della luce utilizzato è lo UOC (*Uniform Overcast Sky* - Steven & Unsworth 1980). Il software utilizzato ha permesso di correggere l'errore relativo alla proiezione sul piano delle immagini emisferiche mediante la selezione di modelli matematici di distorsione, specifici a seconda dell'ottica impiegata, in forma predefinita o personalizzabile da parte dell'utente (Herbert 1987, Inoue et al. 2004a).

Tab. 1 - Caratteristiche delle aree di studio.

Sito	Quota (m)	Pen- denza	Esposi- zione	Piante ha ⁻¹ (DBH >7.5 cm)	G (m ² ha ⁻¹)	Età media	D medio (cm)	H _{dom} (m)	Struttura
1	1815	25°	NO	508	76.2	177	43.6	33.5	Coetaneiforme
2	1895	20°	NO	540	43.5	139	25.2	30.3	Disetaneiforme

Tab. 2 - Parametri adottati nell'analisi delle fotografie emisferiche con GLA e fonti utilizzate.

Parametro	Valore	Riferimenti
Solar constant	1367 kWm ⁻²	(Labs & Neckel 1971)
Cloudiness Index	0.43	Stazione meteo Bolzano (11.31° W ; 46.50° N) (integrazione dati mensili)
Spectral fraction	0.457	(Papaioannou et al. 1996)
Beam fraction	0.33	algoritmo (Frazer et al. 1999)
Clear sky transmission coeff.	0.62	(Donatelli & Campbell 1998)
Step di simulazione	2 min	
Durata stagione vegetativa	1/5 - 30/9	(Tranquillini 1979)

Il *thresholding* è stato effettuato separatamente per ogni immagine, assumendo come intensità di grigio discriminante tra oggetto e sfondo quella associata alla minima frequenza nell'istogramma delle intensità (fig. 2). In assenza di un minimo individuabile, il *thresholding* è stato effettuato manualmente mediante confronto con l'immagine originale; qualora lo sfondo del fotogramma presentasse disomogeneità marcate (cielo non uniformemente nuvoloso) il valore soglia è stato calcolato analizzando il settore più scuro dell'immagine.

Per ogni immagine è stato calcolato il valore della *canopy openness* (totale e in fasce di 10° di ampiezza dallo zenit all'orizzonte²), il LAI effettivo tra 0° e 60° (Stenburg et al. 1994), l'intensità della radiazione incidente totale, diretta e diffusa [mol m⁻² d⁻¹], l'intensità assoluta e relativa della radiazione trasmessa totale, diretta e diffusa.

Analisi statistica

Le distribuzioni delle variabili in *output* sono state sottoposte ad un test di Kolmogorov-Smirnov (Massey 1951) per verificarne la normalità. La correlazione tra output tradizionale e digitale è stata valutata su coppie di variabili omogenee (R di Pearson), per tutte le immagini e separatamente nei due siti. I valori medi di *openness*, LAI e PAR da ripresa tradizionale e digitale (su tutto il campione e per ciascun sito) sono stati sottoposti a un test *t* per campioni accoppiati, con l'obiettivo di evidenziare le differenze tra i metodi di ripresa. È stato esaminato e sottoposto ad ANOVA univariata il rapporto tra output digitale e tradizionale per ciascuna delle variabili in oggetto, in ciascuno dei siti in esame e per differenti angoli zenitali (settori circolari di 10° di ampiezza). Tale rappor-

2 - In questo lavoro un angolo di 0° indica convenzionalmente lo zenit.

to è stato infine correlato alla dimensione media dei *gap*, calcolata mediante analisi *software ImageJ* (Rasband 2004) a partire dalle immagini su negativo digitalizzate (che garantivano una risoluzione maggiore), e ad un indice di densità locale:

$$DL = \sum \arctan\left(\frac{dbh_i}{dist_i}\right)$$

dove *dbh_i* rappresenta il diametro a 1.30 m di altezza dell'*i*-esimo albero all'interno di un *buffer* di 12.5 m intorno a ciascun punto di campionamento, mentre *dist_i* è la distanza dell'albero *i* dal punto di ripresa (Rouvinen & Kuuluvainen 1997). Si è inteso in tal modo verificare la sensitività dei parametri analizzati alle limitazioni del sensore CCD, relative al potere risolutivo e all'effetto di dispersione della luce intorno a sorgenti puntiformi (*light scattering*). Le analisi sono state condotte mediante il *software* SPSS 12.0 (SPSS Inc., Chicago).

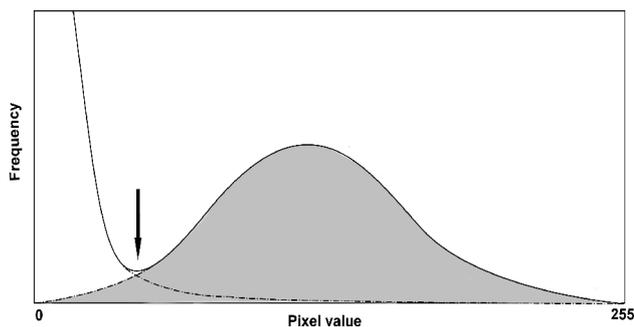


Fig. 2 - Esempio di istogramma dei valori di grigio di una fotografia emisferica e modalità di determinazione del valore soglia (freccia) per la classificazione binaria delle immagini e la discriminazione tra elementi di chioma (bianco) ed elementi di cielo (grigio). L'asse delle ordinate è in scala logaritmica (da Ishida 2004).

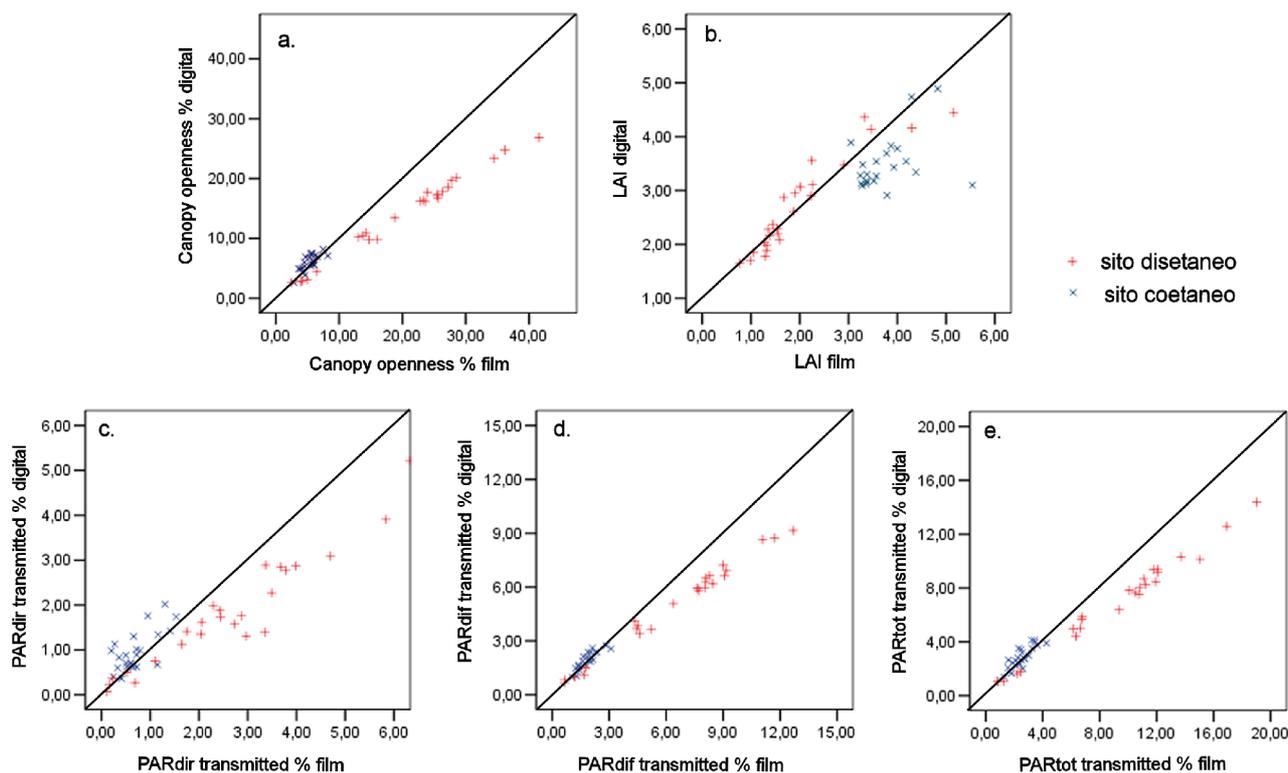


Fig. 3 - Correlazioni tra i risultati ottenuti da analisi di foto emisferiche digitali e tradizionali nei due siti analizzati. - a. *canopy openness* ($R_{\text{disetaneo}} = 0.995$, $R_{\text{coetaneo}} = 0.753$), b. LAI ($R_{\text{disetaneo}} = 0.956$, $R_{\text{coetaneo}} = 0.485$), c. PAR trasmessa, radiazione diretta ($R_{\text{disetaneo}} = 0.956$, $R_{\text{coetaneo}} = 0.691$), d. PAR trasmessa, radiazione diffusa ($R_{\text{disetaneo}} = 0.994$, $R_{\text{coetaneo}} = 0.858$), e. PAR trasmessa, radiazione totale ($R_{\text{disetaneo}} = 0.993$, $R_{\text{coetaneo}} = 0.822$) nei due siti analizzati.

Risultati

I valori di *canopy openness*, LAI e PAR trasmessa dalla copertura ottenuti dall'analisi di foto tradizionali e digitali sono tra loro fortemente correlati ($R > 0.92$, $p < 0.01$ per tutte le coppie di variabili, $N = 48$). Considerando i popolamenti singolarmente, le correlazioni risultano più forti nel popolamento disetaneo, dove i dati esibiscono una stretta associazione lineare anche se si discostano progressivamente dalla linea 1:1 all'aumentare dei valori di trasmittanza (fig. 3).

I valori medi dei parametri esaminati nei due popolamenti e con le due tecniche di ripresa sono sintetizzati in tab. 3. La media dei valori di *canopy openness* (CO) calcolati da negativo è superiore del 30.8% rispetto a quella derivante dalle riprese digitali nel popolamento disetaneo, mentre nel popolamento coetaneo sono le fotografie digitali a fornire valori di CO superiori nella media del 10.4% rispetto a quelli da immagini tradizionali (tab. 3). I parametri direttamente legati alla CO mostrano, come atteso, lo stesso comportamento, risultando la PAR trasmessa totale, diffusa e diretta stimata con foto digitali superiore

nel popolamento coetaneiforme e inferiore in quello disetaneiforme. Conseguentemente opposto è il comportamento dei valori di LAI.

La PAR totale trasmessa assume valori compresi tra il 4% e il 14% e tra il 3% e il 61% della PAR incidente, pari a 30.60 e 31.01 mol m⁻² d⁻¹, rispettivamente nel popolamento monoplano e in quello stratificato.

Da un punto di vista statistico il *paired-t test* mostra che le differenze tra le due tecniche sono significative ($p < 0.05$) per tutte le variabili, tranne che per la trasmittanza della luce diffusa nel sito coetaneo e per il LAI su tutto il campione (tab. 4). Le differenze tra coppie di variabili sono più accentuate in valore assoluto e caratterizzate da una maggiore dispersione nel sito disetaneo.

La fig. 4a mostra l'andamento del *gap fraction* misurato nei due siti mediante tecnica tradizionale e digitale in funzione dello zenit; i valori massimi si riscontrano per angoli zenitali compresi tra 20° e 30° nel popolamento coetaneo e tra 30-40° in quello disetaneo, mentre nei settori prossimi all'orizzonte il *gap fraction* si avvicina a zero. Nel popolamento diseta-

Tab. 3 - Statistiche descrittive di *canopy openness*, LAI e PAR trasmessa ottenuti dall'analisi di immagini digitali e su pellicola nei due siti analizzati.

Parameter	Sito 1 Struttura coetaniforme (N = 23)				Sito 2 Struttura disetaneiforme (N = 25)			
	Min	Max	Media	Errore std	Min	Max	Media	Errore std
<i>Canopy openness [%]</i>								
digitale	2.63	8.16	5.962	.277	2.62	26.88	13.971	1.409
film	2.81	8.22	5.343	.255	2.49	41.58	20.202	2.117
<i>LAI</i>								
digitale	2.99	4.76	3.703	.085	1.25	4.98	2.630	.204
film	3.23	4.79	4.002	.088	.73	5.61	2.134	.248
<i>PARdir trasmessa</i>								
digitale	.04	.22	.107	.010	.01	.58	.200	.027
film	.02	.17	.078	.008	.01	.70	.286	.036
<i>PARdif trasmessa</i>								
digitale	.05	.13	.089	.004	.03	.42	.228	.023
film	.05	.14	.086	.004	.03	.58	.294	.031
<i>PARtot trasmessa</i>								
digitale	.05	.13	.095	.005	.03	.46	.220	.023
film	.04	.14	.084	.005	.03	.61	.292	.031

neo le maggiori differenze tra i due metodi di analisi sono state misurate in prossimità dell'orizzonte, con valori progressivamente più simili per elevazioni superiori; nel sito coetaneo invece il rapporto dei *gap fraction* misurati con le due tecniche è pressoché costante, con un leggero incremento per zenit di 60-70° (fig. 4b).

La correlazione tra il rapporto digitale/pellicola in termini di LAI e la densità locale nei punti di campionamento, misurata in modo indipendente mediante l'indice di Rouvinen & Kuuluvainen (1997) è statisticamente significativa. Tale rapporto decresce al crescere della densità locale nei punti di campionamento. In altri termini l'analisi dell'immagine digitale rivela una copertura progressivamente minore di quella tradizionale al crescere della densità locale ($R^2 = 0.430$, fig. 5a). Inoltre, all'aumentare delle dimensioni medie dei *gap* le immagini digitali producono un LAI più elevato rispetto a quelle tradizionali ($R^2 = 0.588$, fig. 5b).

Discussione

Coerentemente con quanto riportato in letteratura si è riscontrata nel presente lavoro una forte correlazione positiva tra i risultati ottenuti tramite tecniche

di fotografia emisferica su supporto digitale e su pellicola, nonostante la diversa risoluzione utilizzata. Frazer et al. (2001) hanno calcolato coefficienti di correlazione di 0.796, 0.636 e 0.750 per la *canopy openness*, il LAI e la PAR rispettivamente, con le correlazioni più forti associate ai popolamenti maturi e meno densi.

Nel popolamento coetaneiforme, benché la media dei valori registrati con le due tecniche non abbia differito in modo sostanziale, la correlazione è risultata meno forte. Nel popolamento disetaneo, caratterizzato da una tessitura a gruppi che dà luogo ad ampie aperture tra le chiome e ad una minore densità locale, si è osservata una migliore correlazione tra i dati ottenuti con le due tecniche, ma al crescere del grado di apertura delle chiome il rapporto digitale/pellicola è risultato discostarsi progressivamente da 1. All'aumentare della dimensione media dei *gap* le immagini digitali forniscono infatti valori di LAI progressivamente superiori (fig. 5), restituendo valori inferiori di trasmittanza.

Il diverso rapporto di compressione dell'immagine digitale impiegato nelle due aree, fornendo comunque immagini alla stessa risoluzione non pare poter spiegare il comportamento osservato. L'algoritmo di

Tab. 4 - Statistiche descrittive della differenza tra le medie di *canopy openness*, LAI e PAR trasmessa ottenute dall'analisi di immagini digitali e su pellicola nei due siti analizzati e risultati del *paired-t* test.

Sito	Min	Max	Media	Errore std	Valore di t (2 code)	P
<i>Canopy openness [%]</i>						
Sito 1	-1.14	2.20	.61957	.18832	3.290	.003
Sito 2	-14.70	.13	-6.23120	.72870	-8.551	.000
Totale	-14.70	2.20	-2.94854	.63118	-4.671	.000
<i>LAI</i>						
Sito 1	-1.23	.73	-0.29826	.08821	-3.381	.003
Sito 2	-.63	1.49	.49600	.08003	6.198	.000
Totale	-1.23	1.49	.11542	.08245	1.400	.168
<i>PARdir trasmessa</i>						
Sito 1	-.05	.10	.02895	.00764	3.788	.001
Sito 2	-.22	.02	-.08590	.01336	-6.429	.000
Totale	-.22	.10	-.03087	.01143	-2.701	.010
<i>PARdif trasmessa</i>						
Sito 1	-.02	.02	.00352	.00252	1.394	.177
Sito 2	-.16	.01	-.06653	.00876	-7.594	.000
Totale	-.16	.02	-.03296	.00692	-4.763	.000
<i>PARtot trasmessa</i>						
Sito 1	-.02	.04	.01097	.00310	3.533	.002
Sito 2	-.16	.01	-.07217	.00927	-7.784	.000
Totale	-.16	.04	-.03233	.00786	-4.115	.000

compressione può causare una perdita di informazione, "mediando" i valori di pixel vicini; diversi autori (Frazer et al. 2001; Inoue et al. 2004b) hanno tuttavia riscontrato che la differenza rimane trascurabile finché la compressione JPEG non supera, come nel nostro caso, valori di 1:4.

Per quanto concerne il valore assoluto delle variabili misurate i nostri dati sono in linea con quelli riportati in letteratura. Kussner & Mosandl (2000) hanno riscontrato valori di LAI effettivo compresi tra 0.68 e 4.84 in peccete mature della Germania orientale. In Sonohat et al. (2004) la trasmittanza della radiazione globale in popolamenti di abete rosso è compresa tra 0.7% e 30%.

La variabilità della CO è sempre maggiore rispetto a quella del LAI e della PAR, indicando come la CO sia il parametro più sensibile all'eterogeneità spaziale della risorsa luce in foresta (cfr. Trichon et al. 1998).

Come osservato, al diminuire della densità di fusti e del fogliame, le immagini digitali tendono a produrre stime di trasmittanza progressivamente minori rispetto alle immagini tradizionali, soprattutto in

presenza di struttura stratificata. Le differenze maggiori sono riscontrate nelle stime del LAI, la cui variabilità è amplificata dal fatto che tale variabile ha una relazione logaritmica con la *canopy openness* (differenze moderate in CO producono grandi differenze in LAI). In letteratura l'analisi di immagini digitali ha fornito generalmente valori più alti di trasmittanza rispetto al negativo (Englund et al. 2000, Frazer et al. 2001); tuttavia, la fotografia emisferica è stata spesso considerata incapace di discriminare correttamente l'intensità luminosa in presenza di chiome molto dense (Chazdon & Field 1987, Roxburgh & Kelly 1995, Machado & Reich 1999, Hale 2001, Hale & Edwards 2002).

In fase di ripresa l'esposizione è stata determinata in modo da attribuire al cielo un'intensità di grigio standardizzata. Tuttavia, le immagini digitali appaiono più scure di quelle riprese con fotocamera tradizionale e digitalizzate successivamente. Confrontando gli istogrammi (fig. 6 e fig. 7) si nota come le immagini digitali siano caratterizzate da un decadimento molto più rapido nei valori tendenti al bianco, non raggiungendo mai valori maggiori di 200 nella

Fig. 4 - (a) *Gap fraction* misurato da immagini tradizionali e digitali in funzione dell'angolo zenitale nei due siti: il *gap fraction*, o *unweighted openness*, è il conteggio dei pixel che definiscono la proporzione di cielo visibile in un determinato settore di cielo; contrariamente alla *canopy openness*, la misura non viene corretta in base al coseno dell'angolo di incidenza della luce solare (Rich et al. 1998) - (b) Rapporto tra *gap fraction* stimato con i due metodi (digitale/pellicola) per diversi angoli allo zenit. Le barre rappresentano $\pm \epsilon$ (errore standard). L'orizzonte corrisponde a 90° , lo zenit a 0° .

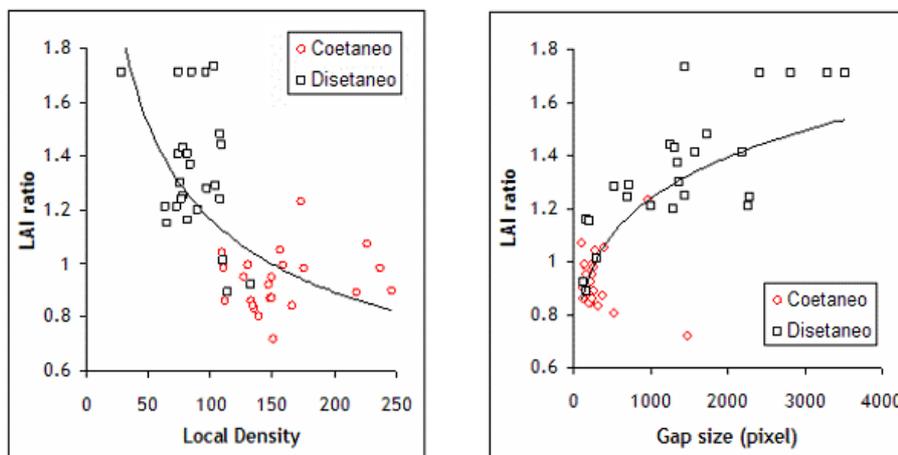
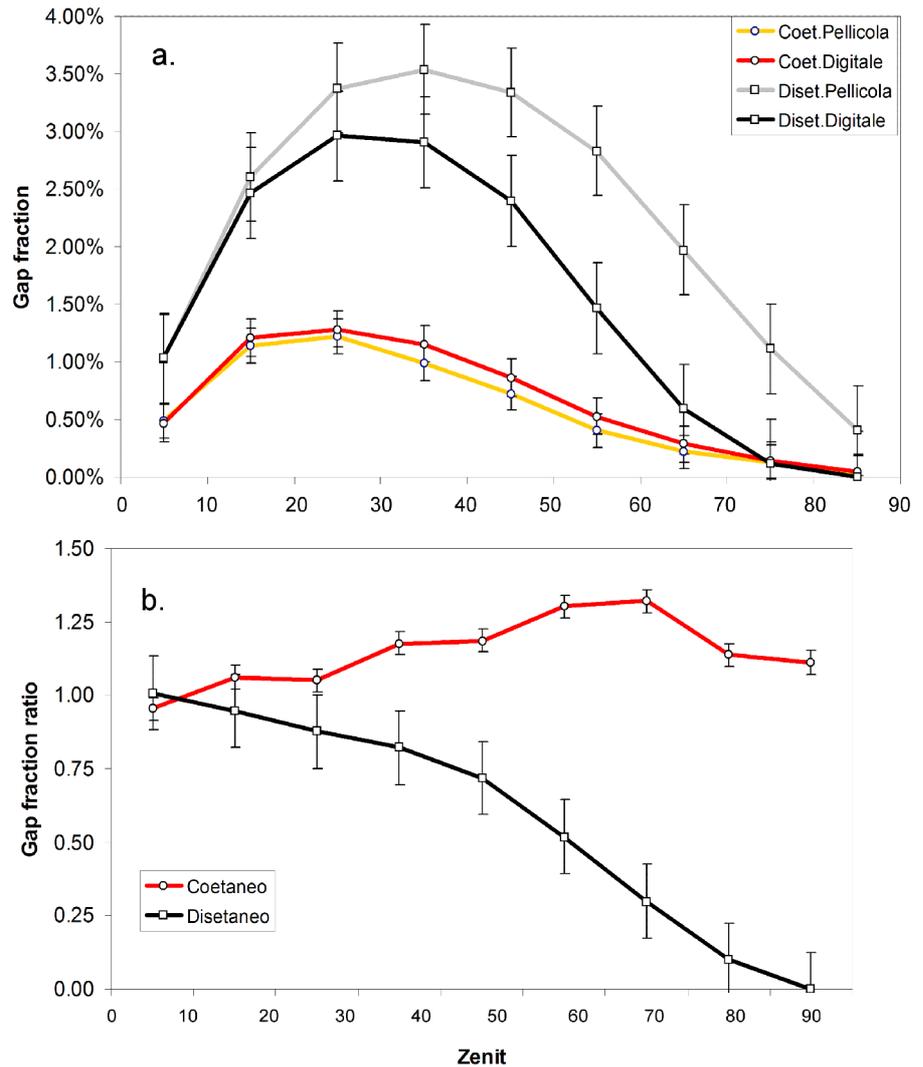


Fig. 5 - Rapporto tra LAI digitale e da pellicola nei due siti in funzione (a) della densità di fusti (indice di competizione secondo Rouvinen & Kuuluvainen 1997) e (b) del fogliame, espressa come dimensione media dei *gap* di chioma in pixel, calcolata grazie alla funzione *particle analysis* del software *ImageJ* (Rasband 2004). Modello di regressione non lineare, $R^2 = 0.430$ e 0.588 rispettivamente.

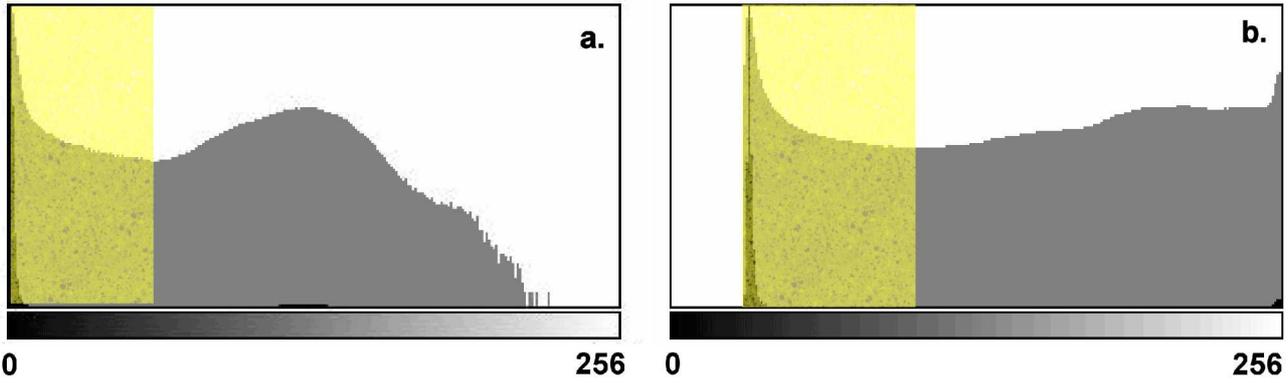


Fig. 6 - Istogramma della scala di grigi relativo al punto 1 del sito disetano (a. immagine digitale, b. immagine tradizionale), in scala logaritmica. Si constata il rapido decadimento dell'immagine digitale nella zona del bianco, così come l'intensità minima pari a 30 risultante dalla digitalizzazione dell'immagine su negativo. L'intensità media (DN) è 10.269 (range da 0 a 247) e 51.574 (range da 30 a 255) rispettivamente nell'immagine digitale e in quella ottica. L'area colorata indica la porzione di pixel classificata come fogliame in base al valore-soglia individuato. La proporzione di pixel classificati come fogliame è del 91.4% nel primo caso e dell'81.6% nel secondo, che è quindi caratterizzato da una stima di trasmittanza più alta.

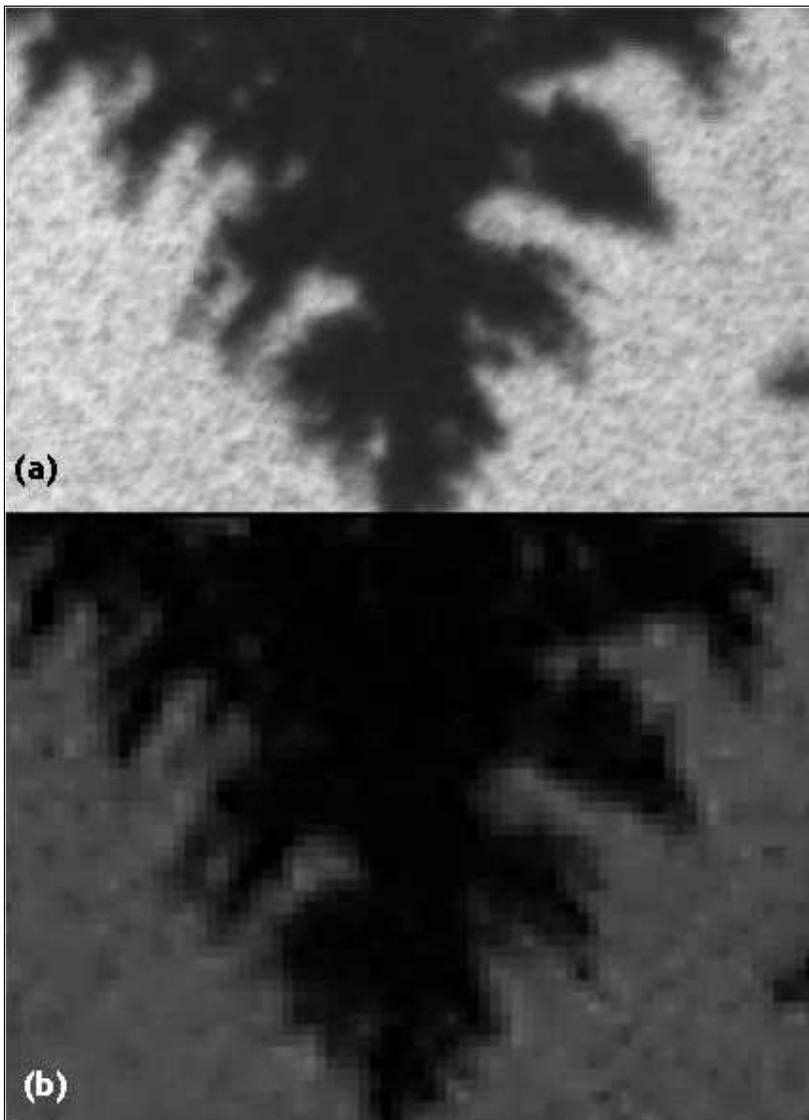


Fig. 7 - Potere risolvante di un'immagine da pellicola (a, successivamente digitalizzata a 2200 dpi) e di un'immagine digitale (b, TIFF a 300 dpi). Si noti la differenza nella dimensione dei pixel, nel dettaglio delle foglie e dei gap più piccoli e nella luminosità generale dell'immagine (effetto descritto dalla fig. 6).

scala di grigi. L'origine del fenomeno è da ricercare negli algoritmi di bilanciamento applicati automaticamente dalla fotocamera digitale per evitare la sovrassaturazione dell'immagine e adeguare la curva di risposta alla luce alla successiva visualizzazione (correzione gamma), su cui non è stato possibile esercitare un pieno controllo. Dall'altro lato, il processo di digitalizzazione dei negativi ha regolato l'intensità minima (nero) a un DN di 30 e quella massima a 255, aumentando così l'ampiezza dell'istogramma (*Auto Contrast*). Pur applicando lo stesso metodo di *thresholding*, la percentuale di pixel classificati come neri risulta dunque maggiore nelle immagini digitali, originando stime inferiori di trasmittanza.

Secondo Wagner (2001), l'intensità di grigio di un pixel dell'immagine emisferica è influenzata da tre fattori: l'esposizione dell'immagine, dipendente dalla luminosità complessiva del cielo (Chen et al. 1991; Macfarlane et al. 2000), la differenza di luminosità tra diverse regioni del cielo stesso, anche in presenza di una copertura nuvolosa uniforme, e la vignettatura dell'obiettivo, che può dare origine a differenze di luminosità in diverse zone del fotogramma anche per oggetti teoricamente omogenei. Una minore esposizione comporta un decadimento della nitidezza dell'immagine, un'incorretta individuazione dei bordi e un aumento lineare dei valori di trasmittanza (Zhang et al. 2005). In letteratura una sottoesposizione di uno *stop* è stata associata ad una differenza di +13% nel LAI (Macfarlane et al. 2000). Differenti metodi sono stati proposti per tenere in considerazione tali fonti di variabilità durante l'analisi di una singola fotografia, come la segmentazione per zone proposta da Wagner (2001), o una sovraesposizione sistematica di due o tre *stop*, capace di far apparire il cielo bianco e massimizzare al tempo stesso il contrasto tra gli alti e i bassi toni di grigio (Chen et al. 1991, Zhang et al. 2005).

Sebbene entrambe le fotocamere siano limitate dalla qualità dell'ottica utilizzata, le riprese digitali sono soggette ad ulteriori forme di rumore relative alle caratteristiche del sensore CCD e all'elettronica di supporto, che possono influenzare negativamente la qualità spettrale e spaziale dell'immagine (Holst 1996). La memorizzazione diretta delle immagini digitali in scala di grigio implica un processo di codifica delle bande di colore su cui non è possibile esercitare un pieno controllo. In particolare, i sensori CCD possiedono generalmente un numero maggiore di elementi sensibili al verde allo scopo di imitare la sensibilità dell'occhio umano, più accentuata in questa banda; questo potrebbe tuttavia causare distorsio-

ni nel rapporto tra fogliame e cielo nell'immagine memorizzata. Il *blooming*, un fenomeno dovuto alla diffusione di energia tra pixel adiacenti e risultante in aree o bande di saturazione bianca sull'immagine, costituisce un'importante fonte di aberrazione capace di alterare la lettura dei pixel situati nelle aree di confine tra alte luci ed ombre. L'effetto atteso è una maggiore proporzione di pixel classificati come sfondo nelle immagini digitali, specialmente al diminuire della dimensione media delle aperture nelle chiome, quando cioè le fonti di luce assumono aspetto puntiforme. L'effetto è riportato essere maggiore vicino allo zenit e con cieli sereni o coperture nuvolose uniformi e molto riflettenti, e minore per angoli allo zenit di 45-60° (Leblanc & Chen 2001). Nel sito disetaneo la differenza riscontrata tra i due metodi è minima allo zenit, che frequentemente è collocato al centro di un *gap*, e cresce avvicinandosi al piano delle chiome (aree prossime all'orizzonte). Nel sito coetaneo, caratterizzato da una copertura dal *pattern* più fine, è verosimile che l'effetto *blooming* abbia compensato la sottoesposizione delle immagini digitali, cosicché le stime prodotte dai due metodi sono risultate nella media paragonabili. Per minimizzare l'influenza del *light scattering* e dell'aberrazione cromatica, Zhang et al. (2005) hanno proposto di utilizzare la banda del blu per l'analisi delle immagini emisferiche.

Ulteriori fonti di errore in fase di analisi sono relative alla differente proiezione geometrica utilizzata dall'ottica impiegata, e alla fase di *thresholding*. Per quanto riguarda la prima, Frazer et al. (2001) e Schwalbe (2005) hanno riscontrato una distorsione nell'aggiuntivo FC-E8 non riportata dalla casa produttrice, e hanno suggerito un'equazione correttiva basata su un polinomio di terzo ordine. Inoltre, il campo ripreso dall'aggiuntivo Nikon ha un'ampiezza di 183°, mentre l'obiettivo Sigma copre un angolo visuale di soli 180°. Dal momento che GLA non prevede correzioni in merito, l'effetto è quello di una differente suddivisione dell'emisfero, e in particolare in stime digitali di trasmittanza assai più basse soprattutto vicino all'orizzonte (dove la vegetazione è più fitta). Per quanto riguarda la fase di classificazione binaria delle immagini, il metodo utilizzato ha garantito una certa oggettività nella scelta dei valori-soglia. Sebbene molti lavori abbiano utilizzato un metodo soggettivo (Chazdon & Field 1987, Machado & Reich 1999, Englund et al. 2000, Frazer et al. 2001, Hale 2001, Hale & Edwards 2002), negli ultimi anni è cresciuto l'interesse verso algoritmi di classificazione binaria dell'immagine, capaci di garantire una mag-

giore oggettività (Wagner 1998, Ishida 2004, Nobis & Hunziker 2005). Leblanc et al. (2005) hanno proposto di classificare l'immagine analizzando separatamente settori circolari concentrici (10 settori da 9°) e determinando per ciascuno una soglia inferiore ("puro fogliame") ed una superiore ("puro cielo") per i valori di grigio; i pixel "misti" sono analizzati da un apposito *software*.

In questo lavoro si è riscontrata la necessità di fare ricorso, almeno parzialmente, ad un *thresholding* manuale per le immagini del sito disetaneo, probabilmente a causa delle condizioni del cielo meno uniformi che si sono incontrate in fase di ripresa. Il ricorso a tale metodologia può introdurre un significativo fattore di arbitrarietà dovuto all'osservatore nella determinazione del valore-soglia per la classificazione dell'immagine (Glasbey & Horgan 1995, Englund et al. 2000, Jonckheere et al. 2004, Nobis & Hunziker 2005).

Il potere risolutivo della fotocamera (capacità del sensore) riveste un ruolo importante. Secondo Blenow (1995) la fotografia digitale ad alta risoluzione è stata dimostrata capace di discriminare l'area fogliare più accuratamente di quella tradizionale, evitando inoltre l'aggregazione dei pixel caratteristica di immagini a risoluzione inferiore. La risoluzione "teorica" della pellicola 35mm, che è riportata da diversi autori in un *range* compreso tra 6 e 50 milioni di pixel (cfr. Clark 2005), dipende da caratteristiche fisiche e chimiche peculiari di ciascuna emulsione (sensibilità, rapporto segnale-rumore, coefficiente di granularità, latitudine di posa, curva di risposta spettrale). Se il potere risolutivo della fotocamera *consumer-grade* utilizzata fosse inferiore a quello dei sistemi analogici, ciò si tradurrebbe in una minore capacità dell'immagine digitale nel registrare il *pattern* del fogliame e nel riconoscerne i bordi, particolarmente in presenza di una trama fine di aperture nel piano delle chiome. Nel sito disetaneo ciò non avviene, poiché le immagini sono caratterizzate da grandi aperture e bordi piuttosto netti anche a bassi angoli di zenit, cioè vicino all'orizzonte, grazie alla tessitura a gruppi del popolamento.

Infine, il confronto tra sistema di ripresa digitale e analogico non può essere effettuato prescindendo dal mezzo utilizzato. La fotografia digitale può offrire vantaggi oggettivi, eliminando almeno quella parte di variabilità dovuta alle differenze tra le emulsioni. Tuttavia, anche l'ottica utilizzata sono dotate di caratteristiche specifiche, quali il rendimento dell'obiettivo descritto dalle curve MTF - *Modulation*

Transfer Function (che non è stato possibile reperire per questo studio). Per questi motivi, il confronto tra le due tecniche di ripresa, così come la valutazione stessa del regime luminoso sotto copertura mediante fotografia emisferica, devono considerarsi di applicabilità limitata al contesto ambientale e al mezzo tecnico caratteristici della situazione in cui sono stati effettuati (Macfarlane et al. 2000).

Conclusioni

La comparabilità di fotografie emisferiche riprese con tecnica tradizionale e digitale è innanzitutto funzione della struttura del popolamento analizzato. Sotto una copertura coetanea densa e in presenza di struttura monostratificata le fotografie digitali forniscono stime di trasmittanza comparabili a quelle derivanti da immagini su pellicola. In un popolamento disetaneo, con tessitura a gruppi e aperture tra le chiome di dimensioni maggiori, la fotocamera digitale ha invece prodotto stime di trasmittanza significativamente inferiori (fino al 32%). Tale effetto è attribuito alla differente esposizione delle immagini, dovuta alle caratteristiche della fotocamera e al processo di digitalizzazione dei negativi, e al fenomeno del *light scattering*, più evidente dove la copertura è caratterizzata da *gap* piccoli tra le chiome e distribuiti in modo eterogeneo. Sono stati descritti alcuni degli errori a cui le due tecniche di ripresa sono soggette; non disponendo di misure dirette e indipendenti di trasmittanza per valutare quale fosse la tecnica più efficace, è stato tuttavia possibile minimizzare le potenziali fonti di errore, uniformando le condizioni di ripresa (orientamento della fotocamera, condizioni del cielo, esposizione) e di analisi dell'immagine (digitalizzazione, *thresholding*, parametri del modello di illuminazione).

La tecnica digitale gode di indubbi vantaggi tecnici e logistici rispetto a quella tradizionale per quanto riguarda le fasi di ripresa ed acquisizione dell'immagine. Tuttavia, il sistema ottico, la capacità risolutiva e la sensibilità (*quantum efficiency*) del sensore CCD influenzano fortemente le prestazioni delle fotocamere *consumer-grade*. Le variabili che caratterizzano entrambi i sistemi (aberrazioni ottiche degli obiettivi, distorsione, tipo di sensore/pellicola, trattamento del negativo, tipo di scanner e algoritmi di compressione) fanno sì che non possa essere determinato un metodo "corretto".

L'analisi dell'ambiente luminoso in foresta mediante fotografia digitale deve avvalersi del più completo controllo sui processi ottici caratteristici delle

fasi di ripresa e digitalizzazione. Ai fini della comparabilità dei risultati, non è possibile prescindere dallo specificare le caratteristiche tecniche dei mezzi di ripresa utilizzati, i possibili errori che questi introducono e la scelta delle misure adottate per correggerli.

Bibliografia

- Battaglia MA, Mitchell RJ, Mou PP, Pecot SD (2003). Light Transmittance Estimates in a Longleaf Pine Woodland. *Forest Science* 49(5): 752-762.
- Becker P, Erhart DW, Smith AP (1989). Analysis of Forest Light Environments. 1. Computerized estimation of solar radiation from hemispherical canopy photographs. *Agricultural and Forest Meteorology* 44: 217-232.
- Blennow K (1995). Sky view factors from high-resolution scanned fish-eye lens photographic negatives. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 12: 1357-1362.
- Bonhomme R, Ganry J (1976). Mesure de l'indice foliaire du bananier par photographies hémisphériques faites "in situ". *Fruits* 31: 421-425.
- Brang P (1998). Early seedling establishment of *Picea abies* in small forest gaps in the Swiss Alps. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 626-639.
- Canham CD (1988). An index for understory light levels in and around canopy gaps. *Ecology* 69: 1634-1638.
- Canham CD (1995). GLI/C: Software for calculation of light transmission through forest canopies using color fisheye photography. Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, NY. Unpublished manuscript.
- Canham CD, Finzi AC, Pacala SW, Burbank DH (1994). Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees. *Canadian Journal of Forest Research* 24: 337-348.
- Chazdon RL, Field CB (1987). Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerized technique. *Oecologia* 73(4): 525-532.
- 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.
- Clark RN (2005). Film vs. digital. [online] URL: <http://clarkevvision.com/imagedetail/film.vs.digital.summary1.html>.
- Comeau PG (2000). Measuring Light in the Forest. Extension Note 42. BC Ministry of Forests, Victoria, BC.
- Courbaud B, de Coligny F, Cordonnier T (2003). Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope. *Agricultural and Forest Meteorology* 116(1-2): 1-18.
- Donatelli M, Campbell GS (1998). A simple model to estimate global solar radiation. In: Proceedings of the 5th European Society of Agronomy Congress (Zima M, Bartosova M eds), Nitra, Slovak, pp. 133-134.
- Englund SR, O'Brien JJ, Clark DB (2000). Evaluation of digital and film hemispherical photography and spherical densitometry for measuring forest light environments. *Canadian Journal of Forest Research* 30: 1999-2005.
- Evans GC, Coombe DE (1959). Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. *Journal of Ecology* 47: 103-113.
- Frazer GW, Canham CD, Lertzman KP (1999). Gap Light Analyzer (GLA): Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, user's manual and program documentation. Simon Fraser University, Burnaby, BC.
- 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(4): 249-263.
- Frazer GW, Trofymow JA, Lertzman KP (1997). A method for estimating canopy openness, effective leaf area index, and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis techniques. Information Report BC-X-373. Canadian Forest Service, Pacific Forestry Center, Victoria, BC.
- Frazer GW, Trofymow JA, Lertzman KP (2000). Canopy openness and leaf area in chronosequences of coastal temperate rainforests. *Canadian Journal of Forest Research* 30: 239-256.
- Gersonde R, Battles JJ, O'Hara KL (2004). Characterizing the light environment in Sierra Nevada mixed-conifer forests using a spatially explicit light model. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1332-1342.
- Glasbey CA, Horgan GW (1995). Image analysis for the biological sciences. John Wiley, Chichester, NY.
- Gray AN, Spies TA (1996). Gap size, within-gap position and canopy structure effects on conifer seedling establishment. *Journal of Ecology* 84: 635-645.
- Hale SE (2001). Light regime beneath Sitka spruce plantations in northern Britain: preliminary results. *Forest Ecology and Management* 151(1-3): 61-66.
- Hale SE, Edwards C (2002). Comparison of film and digital hemispherical photography across a wide range of canopy densities. *Agricultural and Forest Meteorology* 112(1): 51-56.
- Hardy JP, Melloh R, Koenig G, Marks D, Winstral A (2004). Solar radiation transmission through conifer canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 126: 257-270.
- Herbert TJ (1987). Area projections of fisheye photographic lenses. *Agricultural and Forest Meteorology* 39: 215-223.
- Holst GC (1996). CCD Arrays, Cameras, and Displays. JCD Publishing, Winter Park, FL.
- Inoue A, Yamamoto K, Mizoue N, Kawahara Y (2004a). Calibrating view angle and lens distortion of the Nikon

- fish-eye converter FC-E8. *Journal of Forest Research* 9(2): 177-181.
- Inoue A, Yamamoto K, Mizoue N, Kawahara Y (2004b). Effects of image quality, size and camera type on forest light environment estimates using digital hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 126: 89-97.
- Ishida M (2004). Automatic thresholding for digital hemispherical photography. *Canadian Journal of Forest Research* 34(9): 2208-2216.
- 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: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121(1-2): 19-35.
- Kopp H, Pryor D, Behling H (2002). Digital Hemispherical Imaging System for the Analysis of Light Environments under Forest Canopies. University of Applied Sciences and Arts - Department of Electrical Engineering and Information Technology, Erfurt.
- Kussner R, Mosandl R (2000). Comparison of direct and indirect estimation of leaf area index in mature Norway spruce stands of eastern Germany. *Canadian Journal of Forest Research* 30: 440-447.
- Labs D, Neckel H (1971). The solar constant. *Solar Physics* 19(1): 3-15.
- Leblanc SG, Chen JM (2001). A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 110: 125-139.
- Leblanc SG, Chen JM, Fernandes RA, Deering DW, Conley A (2005). Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 129: 187-207.
- Lieffers VJ, Messier C, Stadt KJ, Gendron F, Comeau PG (1999). Predicting and managing light in the understory of boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 796-811.
- 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.
- Macfarlane C, Coote M, White DA, Adams MA (2000). Photographic exposure affects indirect estimation of leaf area in plantations of *Eucalyptus globulus* Labill. *Agricultural and Forest Meteorology* 100: 155-168.
- Massey FJ (1951). The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit. *Journal of the American Statistical Association* 46: 68-78.
- Mizunaga H (2000). Prediction of PPFD variance at forest floor in a thinned Japanese cypress plantation. *Forest Ecology and Management* 126(3): 309-319.
- Monsi M, Saeki T (1953). Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany* 14: 22-52.
- Motta R (2002). Old-growth forests and silviculture in the Italian Alps: the case-study of the strict reserve of Paneveggio (TN). *Plant Biosystems* 136: 223-232.
- Motta R, Nola P, Piussi P (2002). Long-term investigations in a strict forest reserve in the eastern Italian Alps: spatio-temporal origin and development in two multi-layered subalpine stands. *Journal of Ecology* 90: 495-507.
- Nicotra AB, Chazdon RL, Iriarte SVB (1999). Spatial heterogeneity of light and woody seedling regeneration in tropical wet forests. *Ecology* 80(6): 1908-1926.
- Nilson T, Ross V (1979). Characterization of the transparency of a forest canopy by fish-eye photographs. In: *Spruce Forest Ecosystem Structure and Ecology* (Frey T ed), Estonian Republican Committee for IBP, Tartu, pp. 117-130.
- Nobis M, Hunziker U (2005). Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection. *Agricultural and Forest Meteorology* 128: 243-250.
- Oliver CD, Larson BC (1996). *Forest stand dynamics*. John Wiley & Sons, New York.
- Papaioannou G, Nikolidakis G, Asimakopoulos D, Retalis D (1996). Photosynthetically active radiation in Athens. *Agricultural and Forest Meteorology* 81(3-4): 287-298.
- Pearcy RW (1989). Radiation and light measurements. In: *Plant Physiological Ecology: Field methods and instrumentation* (Pearcy RW, Ehleringer JR, Mooney HA, Rundel PW eds), Chapman & Hall, London, pp. 95-116.
- Rasband WS (2004). *ImageJ: Image Processing and Analysis in Java*. National Institutes of Health, Bethesda, MD. [online] URL: <http://rsb.info.nih.gov/ij/>
- Rich PM (1988). Video image analysis of hemispherical canopy photography. In: *First Special Workshop on Videography*. (Mausel PW ed), Terre Haute, IN, May 19-20, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 84-95.
- Rich PM (1989). A manual for analysis of hemispherical canopy photography. Report LA-11732-M. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos.
- Rich PM (1990). Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Reviews* 5(1): 13-29.
- Rich PM, Clark DB, Clark DA, Oberbauer SF (1993). Long-term study of solar radiation regimes in a tropical wet forest using quantum sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 65: 107-127.
- Rich PM, Wood J, Vieglais DA, Burek K, Webb N (1998).

- Hemiview's user manual. Delta-T Devices Ltd., Cambridge.
- Rouvinen S, Kuuluvainen T (1997). Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 890-902.
- Roxburgh JR, Kelly D (1995). Uses and limitations of hemispherical photography for estimating forest light environments. *New Zealand Journal of Ecology* 19(2): 213-217.
- Schwalbe E (2005). Geometric modelling and calibration of fisheye lens camera system. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing - Dresden University of Technology, Dresden.
- Smith AP, Hogan KP, Idol JR (1992). Spatial and temporal patterns of light and canopy structure in a lowland tropical moist forest. *Biotropica* 24(4): 503-511.
- Sonohat G, Balandier P, Ruchaud F (2004). Predicting solar radiation transmittance in the understory of even-aged coniferous stands in temperate forests. *Annals of Forest Science* 61: 629-641.
- Stenburg P, 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.
- Steven MD, Unsworth MH (1980). The angular distribution and interception of diffuse solar radiation below overcast skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 106: 57-61.
- Ter Steege H (1996). WINPHOT 5.0: a programme to analyze vegetation indices, light and light quality from hemispherical photographs. Report 95-2. The Tropenbos Foundation, Wageningen.
- Tranquillini W (1979). *Physiological ecology of the Alpine timberline*. Springer Verlag, Berlin.
- Trichon VR, Walter J-MN, Laumonier Y (1998). Identifying spatial patterns in the tropical rain forest structure using hemispherical photographs. *Plant Ecology* 137(2): 227-244.
- Wagner S (1998). Calibration of grey values of hemispherical photographs for image analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* 90(1-2): 103-117.
- Wagner S (2001). Relative radiance measurements and zenith angle dependent segmentation in hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 107: 103-115.
- Zhang Y, Chen JM, Miller JR (2005). Determining Digital Hemispherical Photograph Exposure for Leaf Area Index Estimation. *Agricultural and Forest Meteorology* 133: 182-196.