

ANALISI MULTILIVELLO DELLA DIVERSITÀ STRUTTURALE DI UNA FAGGETA CON CARATTERI DI VETUSTÀ

L'analisi della diversità strutturale dei soprassuoli forestali è utilizzata come base conoscitiva per la gestione degli ecosistemi forestali. Le caratteristiche strutturali sono generalmente indagate tramite l'acquisizione di dati osservati in campo. D'altro canto, il telerilevamento ad alta risoluzione (VHR) consente oggi di acquisire immagini multispettrali caratterizzate da un elevato contenuto geometrico e le tecniche di segmentazione object oriented recentemente sviluppate sono particolarmente efficienti nel valorizzarlo. In questa ottica, il presente lavoro utilizza la segmentazione di un'immagine multispettrale ad alta risoluzione QuickBird come base per quantificare alcuni aspetti della diversità strutturale di una faggeta dell'alto Lazio con caratteri di vetustà. Lavorando su tre differenti scale vengono analizzati i rapporti spaziali, di mescolanza e di dominanza dimensionale tra singoli alberi, applicando un sistema di indici basato sulle relazioni tra soggetti vicini. L'algoritmo della differenza assoluta e il test di Kolmogorov-Smirnov sono utilizzati per evidenziare le differenze tra le distribuzioni diametriche ai tre livelli di scala. Nelle condizioni esaminate l'eterogeneità spettrale e geometrica quantificata su immagini multispettrali VHR è risultata di efficace supporto per la caratterizzazione della diversità strutturale orizzontale del soprassuolo arboreo.

Parole chiave: segmentazione multirisoluzione; immagine QuickBird; indici strutturali basati sui singoli alberi; distribuzione diametrica; buche; *Fagus sylvatica*; Lazio.

Key words: multiresolution segmentation; QuickBird imagery; tree-based structural indices; diameter distribution; gaps; beech; Italy.

1. INTRODUZIONE

L'analisi della diversità strutturale di soprassuoli forestali ne considera le principali caratteristiche in termini di composizione specifica, distribuzione orizzontale ed età dei fusti arborei, geometria, ampiezza e distribuzione verticale delle chiome, necromassa a terra e in piedi. L'osservazione di queste com-

(*) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente Forestale e delle sue Risorse (DISAFRI), Università della Tuscia, Via San Camillo de Lellis, 01100 Viterbo; alamo.sisfor@unitus.it; piermaria.corona@unitus.it.

ponenti avviene generalmente a scala assestamentale, mediante rilievi di campo che quantificano ciascun attributo strutturale considerato.

Di recente, per l'osservazione di attributi forestali e delle componenti della diversità strutturale si è cominciato a utilizzare anche immagini satellitari ad alta risoluzione (*VHR - Very High Resolution*). A esempio, READ *et al.* (2003) hanno utilizzato immagini IKONOS con risoluzione di 1 m nel pancromatico e 4 m nel multispettrale per studiare la struttura forestale, le dinamiche e l'impatto dei tagli nella foresta tropicale amazzonica; KAYITAKIRE *et al.* (2006) hanno utilizzato un'immagine pancromatica IKONOS per stimare l'età, l'altezza dominante, la densità e l'area basimetrica di un soprassuolo coetaneo di abete rosso.

L'utilità delle immagini satellitari ad alta risoluzione nel rilevamento delle risorse forestali consiste nella possibilità di ottenere dati quantitativi e qualitativi sufficientemente affidabili su ampie superfici, con il dettaglio geometrico richiesto per la gestione forestale (CHIRICI e CORONA, 2006). Tra le tecniche sperimentate per valorizzare il contenuto informativo di questo tipo di immagini emerge, in particolare, la segmentazione multirisoluzione (BENZ *et al.*, 2004): esempi applicativi a supporto della gestione forestale sono riportati da CHIRICI *et al.* (2003), CHIRICI e CORONA (2006), LAMONACA (2006).

Il presente lavoro, partendo dalla segmentazione di un'immagine multispettrale ad alta risoluzione *QuickBird*, analizza, a varie scale di lavoro, la diversità strutturale di una faggeta con caratteri di vetustà, ubicata nell'alto Lazio. Gli attributi considerati sono: distribuzione degli alberi nello spazio orizzontale; mescolanza dendrologica; variabilità dimensionale tra gli alberi; interruzioni nella copertura arborea. L'obiettivo è di verificare se, nelle condizioni esaminate, l'eterogeneità spettrale e geometrica misurata su immagini multispettrali *VHR* possa essere di diretto supporto per quantificare la diversità strutturale orizzontale del soprassuolo arboreo.

2. AREA SPERIMENTALE

La sperimentazione è stata condotta in un popolamento di faggio di superficie pari a circa 58 ha, situato sulla parte sommitale del Monte Cimino, in provincia di Viterbo. L'area è di proprietà del Comune di Soriano nel Cimino e ricade nel SIC/ZPS IT6010022 «Monte Cimino – versante Nord».

Recenti studi assegnano la faggeta del Monte Cimino alla sottozona calda del *Fagetum* (PIOVESAN *et al.*, 2005). La faggeta è posta all'interno di un'area caratterizzata da termotipi più umidi rispetto al territorio circostante (SCOPPOLA e CAPORALI, 1996) ed è inquadrata nel *Polysticho-Fagetum acerosum pseudoplatani* (SCOPPOLA e CAPORALI, 1998): insieme al faggio (*Fagus*

sylvatica L.) si ritrovano sporadicamente soprattutto acero di monte (*Acer pseudoplatanus* L.), acero opalo (*Acer obtusatum* W. et K.), castagno (*Castanea sativa* Miller) e sambuco (*Sambucus nigra* L.).

La faggeta del Monte Cimino, pur non potendo essere considerata in senso stretto un popolamento vetusto, ne presenta tuttavia molte caratteristiche (DI FILIPPO *et al.*, 2004; LAMONACA, 2005; ROCCATO, 2005). Le ultime utilizzazioni forestali risalgono al secondo dopoguerra, tra il 1947 e il 1949, con l'asportazione di circa 1400 alberi (LO MONACO, 1984). Attualmente il soprassuolo si trova nella fase di *understory reinitiation* (*sensu* OLIVER e LARSON, 1996), in cui la volta dominante viene progressivamente sostituita da giovani coorti in via di affermazione, che si originano a seguito di fenomeni di disturbo causati da eventi climatici di particolare intensità (PIOVESAN, 1997; DI FILIPPO *et al.*, 2004): da decenni questo tipo di eventi è l'unico rilevante fattore di disturbo della faggeta.

L'area sperimentale oggetto del presente studio, ubicata all'interno della faggeta, è di forma quadrata, con lato pari a 320 m ($S = 10,24$ ha): dalla vetta del Monte Cimino (1053 m s.l.m.) scende fino a una quota di circa 980 m s.l.m., con esposizione prevalente verso NNE.

3. MATERIALI E METODI

In data 29 settembre 2004 è stata acquisita un'immagine satellitare multi-spettrale *QuickBird* (risoluzione pari a 2,8 m) dell'area sperimentale, su una superficie complessiva di oltre 45 km², ortorettificata e coregistrata sulle ortofoto digitali a colori del progetto IT2000 (risoluzione nominale pari a 1 m).

3.1 Segmentazione multirisoluzione

Una porzione dell'immagine, di superficie pari a circa 125 ha e comprendente interamente la faggeta del Monte Cimino, è stata sottoposta a processo di segmentazione multirisoluzione (BAATZ *et al.*, 2003; CHIRICI *et al.*, 2003).

Il processo di segmentazione, partendo da ciascun singolo pixel, li fonde per creare poligoni che, a loro volta, nei passi successivi, possono essere fusi per creare poligoni di dimensione maggiore. La fusione di poligoni adiacenti è basata su criteri di omogeneità geometrica e spettrale del poligono ottenuto dalla fusione. Il criterio di fusione è calibrato tramite un cosiddetto fattore di scala: piccoli valori di questo fattore determinano una segmentazione finale caratterizzata da poligoni piccoli mentre la dimensione dei poligoni cresce al crescere di questo fattore. La segmentazione è un processo *object oriented* perché la fusione tra poligoni adiacenti dipende dalle loro caratteristiche e dalle caratteristiche del poligono ottenuto dalla fusione

(BAATZ e SCHÄPE, 2000): l'operatore influisce sul processo scegliendo il fattore di scala e definendo l'importanza relativa dell'eterogeneità spettrale rispetto all'eterogeneità geometrica. Variando il fattore di scala è possibile ottenere differenti livelli di segmentazione, geometricamente consistenti tra loro e gerarchicamente interrelati (BAATZ *et al.*, 2003).

Nel presente studio sono stati realizzati tre livelli di segmentazione, utilizzando i parametri indicati in Figura 1: gli oggetti ottenuti per ciascun livello, rappresentati in ambito GIS come poligoni vettoriali, sono al loro interno spettralmente e geometricamente omogenei con riferimento al corrispondente fattore di scala.

3.2 *Diversità strutturale*

All'interno dell'area sperimentale è stato rilevato il diametro a petto d'uomo di tutti gli alberi (con soglia minima pari a 2,5 cm) e un campione rappresentativo di altezze dendrometriche. Per ogni albero censito è stata rilevata la posizione del fusto tramite rilievo GPS con precisione submetrica e correzione differenziale. In questo modo ogni albero è stato assegnato univocamente a uno dei poligoni individuati tramite segmentazione. L'insieme di alberi appartenenti allo stesso poligono è di seguito definito come «sottopopolamento arboreo».

Per ogni sottopopolamento arboreo di ciascun livello di segmentazione è stata elaborata la distribuzione delle frequenze per classi diametriche. Su circa il 10% degli alberi presenti, stratificati per classi di dimensione diametrica, sono stati misurati i raggi della chioma nella direzione dei quattro punti cardinali; i raggi della chioma sono stati utilizzati per la costruzione delle sezioni orizzontali e dei profili verticali (vd. § 4.1), assegnando a ogni albero campionato un'area di insidenza circolare con raggio pari alla media dei quattro raggi misurati. Un sistema di indici basato sulle relazioni tra alberi vicini (CORONA *et al.*, 2005) ha permesso di quantificare vari aspetti della diversità strutturale di ciascun sottopopolamento arboreo. In particolare, il sistema è composto dai tre indici riportati in Tabella 1, che descrivono aspetti peculiari della diversità strutturale:

- l'indice *UAI* (*Uniform Angle Index*) descrive la distribuzione locale dei fusti arborei nello spazio orizzontale, evidenziando una distribuzione di tipo regolare per valori pari a 0, una distribuzione a gruppi per valori pari a 1, o di tipo casuale per valori pari a 0,5;
- l'indice *SM* (*Species Mingling*) indica se esistono gruppi omogenei di specie arboree (bassi valori dell'indice) o se le specie sono mescolate tra loro per pedali (alti valori dell'indice);
- l'indice *DBHDM* (*DBH Dominance Modified*) quantifica il grado di dominanza dimensionale dell'albero di riferimento rispetto agli alberi circostanti.

Livello di segmentazione	Fattore di scala	Eterogeneità spettrale	Compattezza	Numero di poligoni	Superficie media dei poligoni [m ²]	CV superficie poligoni [%]
III	50	0,4	0,845	11	9309	51
II	25	0,4	0,9	62	1652	89
I	15	0,4	0,9	179	572	74

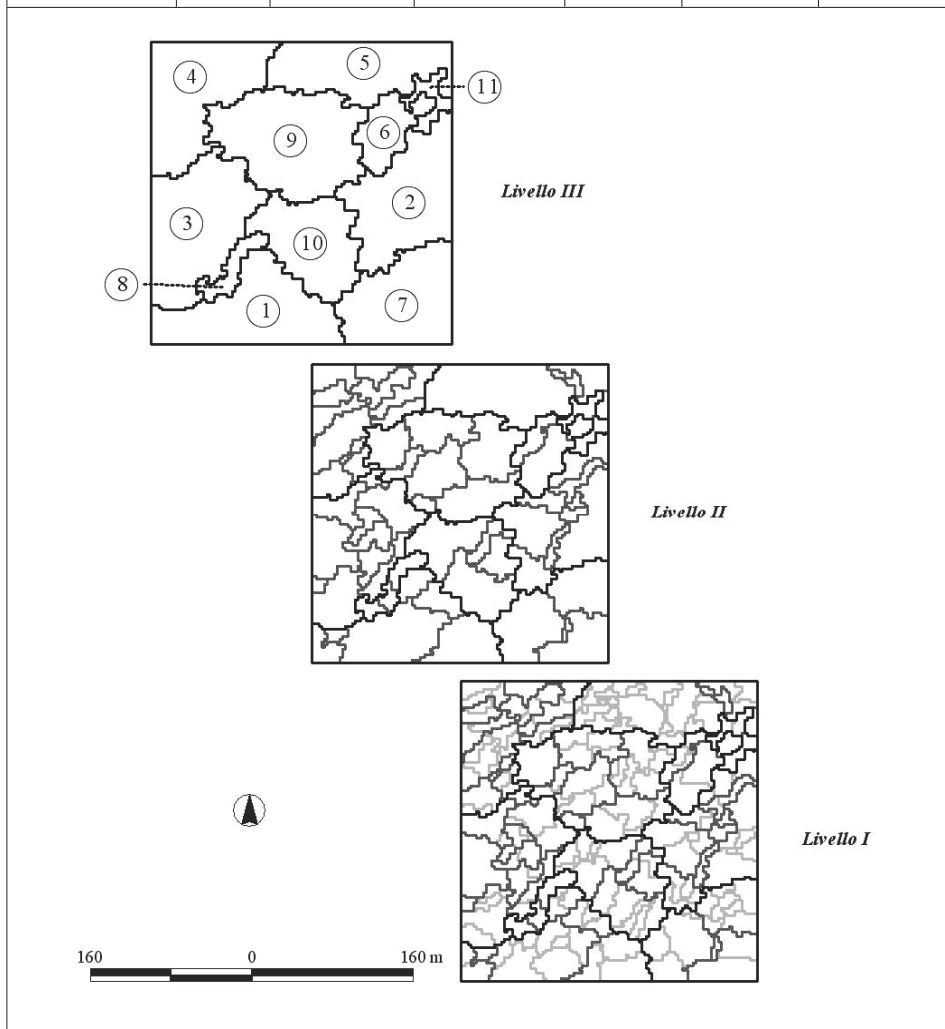


Figura 1 – Parametri della segmentazione multirisoluzione dell'immagine *QuickBird* e, in basso, i tre livelli di segmentazione ottenuti (in corrispondenza del livello III è riportato il codice identificativo di ciascun sottopopolamento arboreo).

– *Multiresolution parameters adopted for the segmentation of the multispectral QuickBird image. Below, the obtained polygons (substands) are reported.*

Tabella 1 – Algoritmi di calcolo degli indici strutturali considerati.
– Calculation algorithm of the tested neighbourhood-based structural indices.

Indice	Formula	Valori rilevati
Indice di distribuzione spaziale	$UAI_i = \frac{1}{4} \cdot \sum_{j=1}^4 z_j$	$z_j = \begin{cases} 1, \alpha_j < 72^\circ \\ 0, \alpha_j \geq 72^\circ \end{cases}$
Indice di mescolanza dendrologica	$SM_i = \frac{1}{4} \cdot \sum_{j=1}^4 z_j$	$z_j = \begin{cases} 0, spp_i = spp_j \\ 1, spp_i \neq spp_j \end{cases}$
Indice di dominanza diametrica	$DBHDM_i = \frac{1}{4} \cdot \sum_{j=1}^4 z_j$	$z_j = \begin{cases} 1, (DBH_i - 4) > DBH_j \\ 0, (DBH_i - 4) \leq DBH_j \end{cases}$

dove: i = albero di riferimento; j = albero vicino all' i -esimo albero; α_j = angolo tra l' i -esimo albero e il j -esimo albero vicino; spp = specie; DBH = diametro a 1,3 m da terra.

I suddetti indici sono stati calcolati su tutti gli alberi censiti tramite il software *NBSI (Neighbourhood Based Structural Indices)* v. 1.0 (CALVANI *et al.*, 2005), disponibile online [<http://www.forestlab.net>].

Nell'area sperimentale sono state infine individuate le aperture della volta arborea (buche) tramite classificazione a video dei poligoni sull'immagine *QuickBird* e successiva verifica in campo: sono state considerate buche le aree in cui l'altezza media degli alberi era inferiore a 2/3 dell'altezza media degli alberi circostanti (PEDERSEN e HOWARD, 2004). Per ciascun poligono classificato come buca è stata misurata l'ampiezza sull'immagine telerilevata, e in campo la densità e le specie della «rinnovazione arborea affermata» (alberi con diametro tra 2,5 cm e 17,5 cm, *sensu* AGRIMI *et al.*, 1991). Tramite GIS attorno a ogni poligono classificato come buca è stata delineata e misurata una superficie adiacente all'interno del popolamento circostante (HOSHINO *et al.*, 2003) con profondità pari a 15 m (circa metà dell'altezza media dei fusti nell'area sperimentale), verificando poi in campo la densità e le specie della rinnovazione arborea affermata ivi presente.

3.3 Tecniche multilivello

Le tecniche multilivello applicano agli aspetti strutturali l'informazione gerarchica contenuta nei poligoni ottenuti dalla segmentazione multirisoluzione dell'immagine *QuickBird* (ogni sottopopolamento arboreo di livello inferiore appartiene in maniera univoca a un sottopopolamento arboreo di livello superiore, vd. Figura 1).

Per verificare eventuali differenze strutturali significative tra i sottopopolamenti arborei di pari livello gerarchico appartenenti allo stesso sottopopolamento di livello superiore è stata condotta un'analisi della varianza univariata con test di *Tukey* sui valori ottenuti dal sistema di indici *tree-based*.

Le distribuzioni diametriche di ciascun sottopopolamento arboreo di livello III (superficie media pari a circa 0,9 ha) sono state comparate tra loro e comparate rispetto alla distribuzione diametrica complessiva dell'area sperimentale utilizzando l'algoritmo della differenza assoluta (AGUIRRE *et al.*, 2003):

$$rDD_{XY} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |D_{Xi} - D_{Yi}|$$

dove: D_{Xi} = frequenza relativa della *i-esima* classe diametrica nel sottopopolamento *X*; D_{Yi} = frequenza relativa della *i-esima* classe diametrica nel sottopopolamento *Y*; n = numero di classi diametriche. I valori assunti dall'algoritmo rDD variano da 0, se le distribuzioni sono identiche, a 1 se le distribuzioni hanno frequenze nelle classi diametriche completamente differenti.

Per verificare se le differenze tra le distribuzioni diametriche dei sottopopolamenti arborei di pari livello gerarchico appartenenti allo stesso sottopopolamento arboreo di livello superiore fossero statisticamente significative è stato utilizzato il test di *Kolmogorov-Smirnov* per campioni indipendenti (SYSTAT, 2004).

È stata infine verificata la correlazione tra la rinnovazione affermata di faggio e sambuco e la superficie delle buche e dei margini del popolamento a esse adiacenti.

4. RISULTATI

4.1 Aspetti generali

Nell'area sperimentale sono presenti circa 230 fusti a ettaro, l'area basimetrica è pari a 38,8 m²ha⁻¹, il diametro medio è pari a 46 cm, l'altezza media è di circa 30 m, con una statura (*sensu* LA MARCA, 1999) di oltre 44 m; il diametro massimo misurato è pari a 150 cm.

Nel complesso, la distribuzione del numero di alberi per classe diametrica è di tipo bimodale (Figura 4), con picchi nelle classi diametriche di 5 cm e di 65 cm; sono presenti anche picchi intermedi e nella parte finale della curva di distribuzione: il popolamento forestale presenta una struttura assimilabile al tipo bistratificato (*sensu* AGRIMI *et al.*, 1991).

In Figura 2 sono sinteticamente rappresentati la sezione orizzontale e il profilo verticale di due sottopopolamenti arborei di livello III; nella sezione orizzontale sono evidenziati i perimetri dei sottopopolamenti dei livelli gerarchici inferiori. Il sottopopolamento della Figura 2B presenta caratteri somatici giovanili, mentre per il sottopopolamento della Figura 2A prevalgono i caratteri del soprassuolo evoluto.

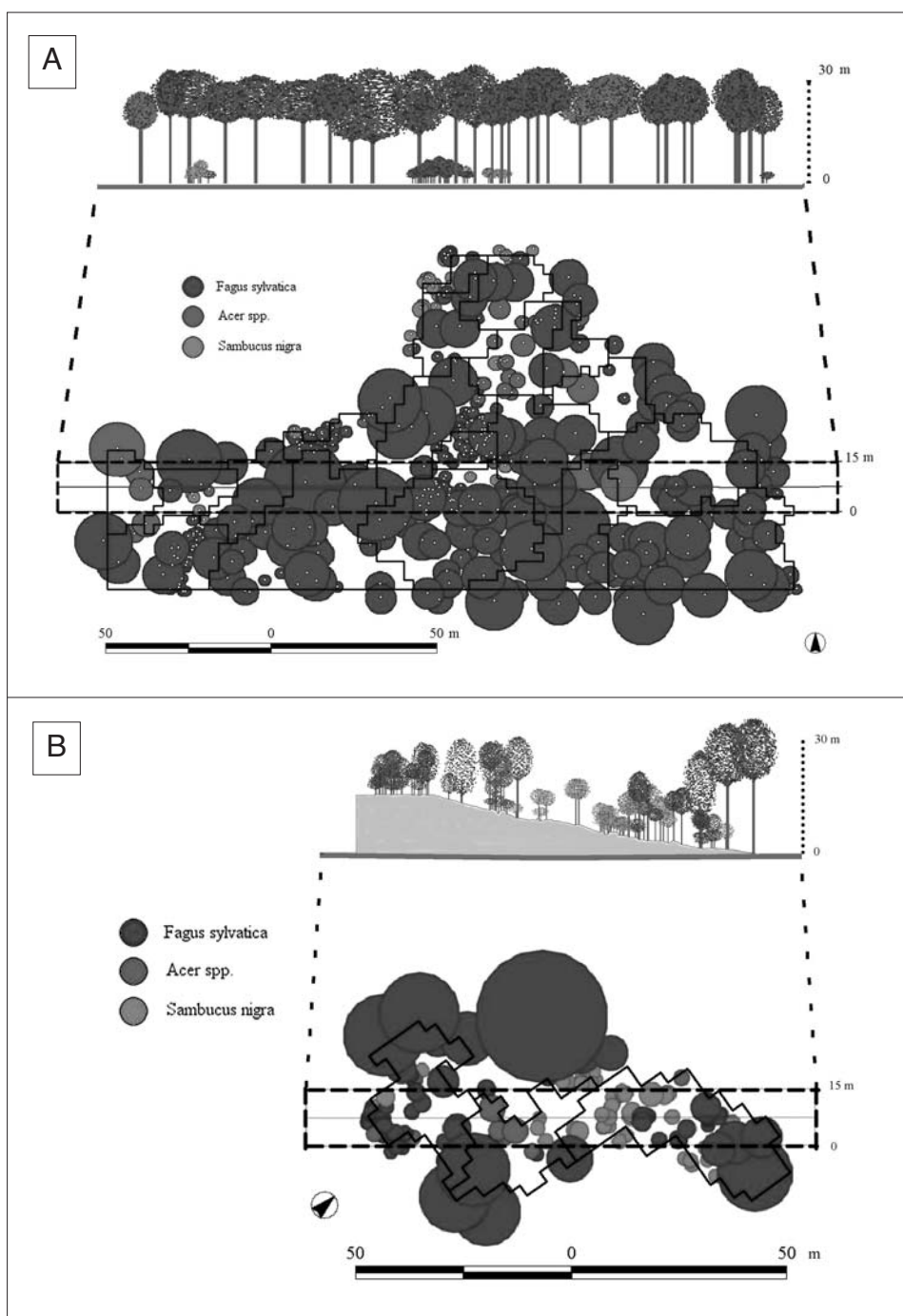


Figura 2 – Schema della sezione orizzontale e del profilo verticale (Fig. 2A: 15 m x 210 m; Fig. 2B: 15 m x 100 m) di due sottopopolamenti arborei di livello III (in A il sottopopolamento 1 e in B il sottopopolamento 8 di cui alla Figura 1); in sezione orizzontale sono evidenziati i perimetri dei sottopopolamenti arborei dei livelli gerarchici inferiori.

– *Transects of two level-III substands (A = substand 1, B = substand 8, codes as in Figure 1); the boundaries of hierarchical sub-levels within each level-III substand are outlined.*

4.2 Analisi multilivello

4.2.1 Indici strutturali tree-based

Al livello gerarchico superiore (livello III) tutti i sottopopolamenti arborei risultano significativamente diversi tra loro ($p \leq 0,05$) per almeno uno degli indici strutturali considerati. Scendendo di livello gerarchico i sottopopolamenti arborei significativamente diversi ($p \leq 0,05$) appartenenti allo stesso poligono di livello gerarchico superiore diminuiscono in termini percentuali: al livello II i sottopopolamenti statisticamente differenti sono pari al 45 % del totale, mentre al livello gerarchico più fine (livello I) sono pari al 20% del totale.

Tutti gli indici contribuiscono alle differenze tra sottopopolamenti arborei nei vari livelli; tuttavia l'indice di mescolanza tra le specie (*SM*) contribuisce maggiormente, soprattutto al livello II e soprattutto in relazione alla presenza di sambuco (28% del numero di fusti totale) e di aceri (3%). In Figura 3 è evidenziata la distribuzione spaziale nell'area sperimentale dei valori medi dell'indice *SM* per i sottopopolamenti arborei di livello I.

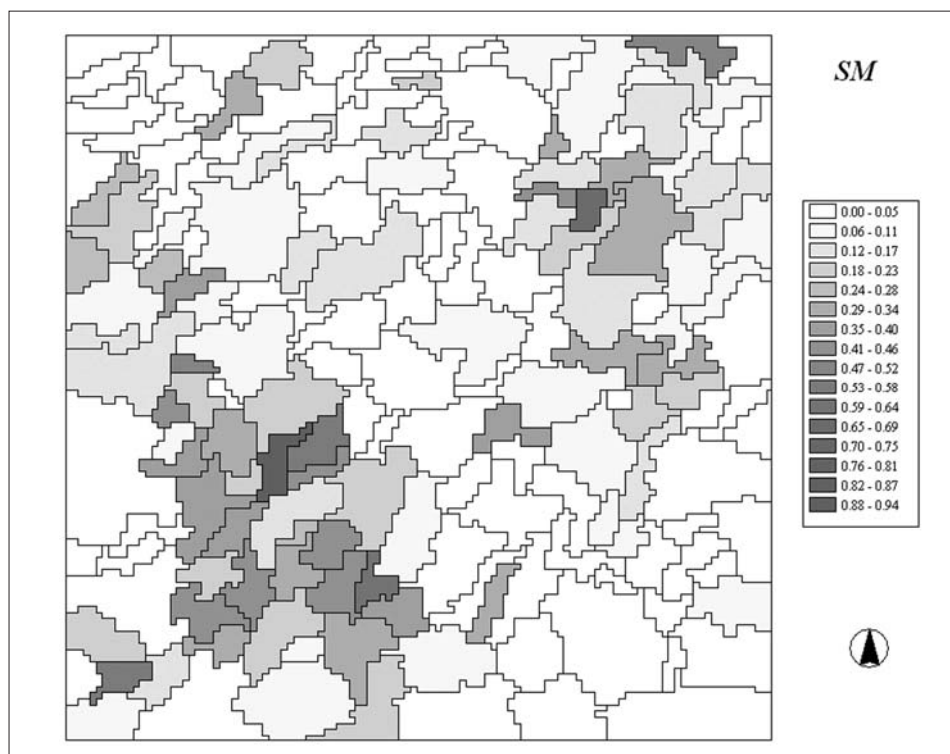


Figura 3 – Valori medi dell'indice (*SM*) nei sottopopolamenti arborei di livello I: al colore più scuro corrisponde una maggiore mescolanza dendrologica.

– Mean Species Mingling index (*SM*) of the level-I substands: darker grey tonality corresponds greater species mingling.

4.2.2 Distribuzioni diametriche

In Figura 4 sono riportate le distribuzioni diametriche dei sottopopolamenti arborei di livello III; le differenze assolute tra le loro distribuzioni diametriche, quantificate con l'algoritmo rDD , sono espresse in Tabella 2. Le discrepanze più elevate si verificano tra il sottopopolamento 11 e i sottopopolamenti 7 e 10 ($rDD = 0,84$) e tra il sottopopolamento 9 e il sottopopolamento 11 ($rDD = 0,80$). Le differenze tra la distribuzione diametrica dell'intera area sperimentale e le distribuzioni dei sottopopolamenti di livello III variano tra 0,14 (sottopopolamento 1 e 2) e 0,53 (sottopopolamento 11).

Le differenze tra le distribuzioni diametriche riscontrate con l'algoritmo di discrepanza assoluta (rDD) non sempre sono significative secondo il test di

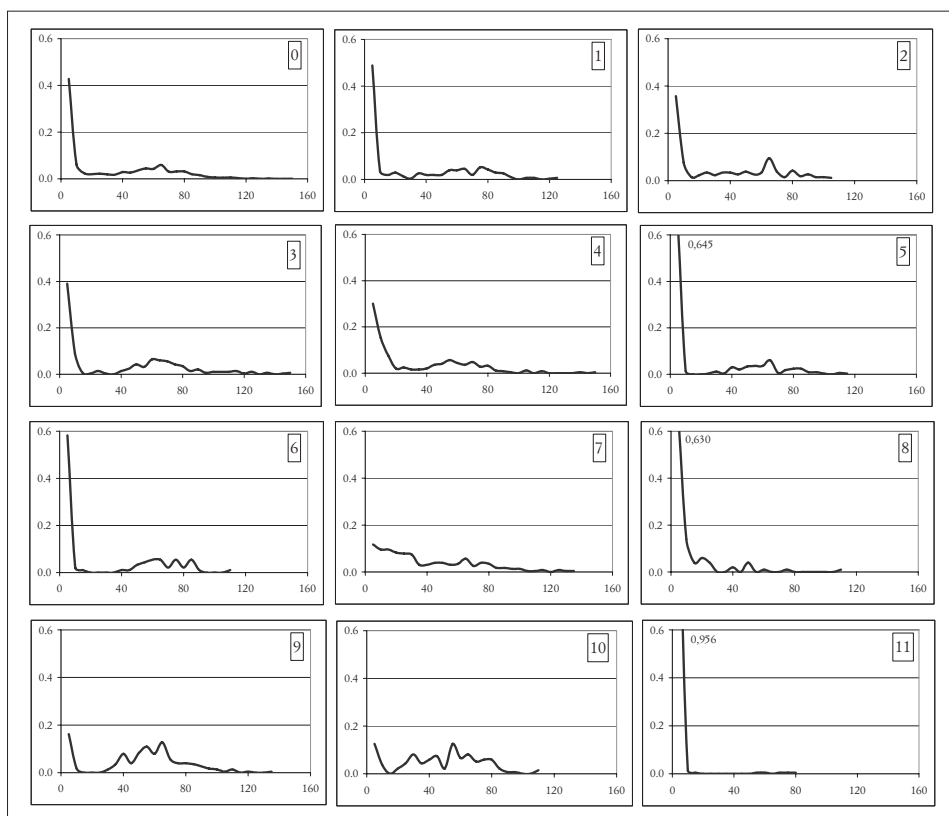


Figura 4 – Distribuzioni diametriche (fusti con diametro $\geq 2,5$ cm) nei sottopopolamenti arborei di livello III. In ascissa sono indicate le classi diametriche (in cm), mentre in ordinata le frequenze relative del numero di alberi. I codici identificativi di ogni sottopopolamento arboreo corrispondono a quelli di cui alla Figura 1; il primo grafico (codice = 0) rappresenta la distribuzione diametrica dell'intera area sperimentale.

– *Dbh distributions of the level-III substands (dbh in cm; on the y-axis the relative frequency of tree number). The first graph (code = 0) shows the overall stand dbh distribution.*

Tabella 2 – Valori dell'algoritmo della differenza assoluta (rDD) della distribuzione diametrica tra i sottopopolamenti arborei di livello III (i codici identificativi di ogni sottopopolamento arboreo corrispondono a quelli di cui alla Figura 1). L'ultima riga riporta i valori di rDD tra le distribuzioni diametriche dei singoli sottopopolamenti arborei e la distribuzione diametrica dell'intera area.

– *Absolute discrepancy (rDD) of the dbb distribution among the level-III substands (substand codes as in Figure 1). The values of the absolute discrepancy between each level-III substand and the whole stand are reported in the last row.*

Sottopopolamento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	0,22	0,21	0,31	0,21	0,17	0,43	0,35	0,43	0,44	0,47
2		-	0,19	0,23	0,32	0,35	0,33	0,42	0,35	0,37	0,60
3			-	0,24	0,30	0,26	0,39	0,41	0,37	0,43	0,57
4				-	0,41	0,39	0,31	0,39	0,42	0,42	0,66
5					-	0,13	0,55	0,27	0,49	0,54	0,32
6						-	0,56	0,31	0,47	0,52	0,37
7							-	0,56	0,42	0,33	0,84
8								-	0,73	0,70	0,34
9									-	0,25	0,80
10										-	0,84
11											-
Intera area sperimentale	0,14	0,14	0,15	0,21	0,23	0,23	0,35	0,36	0,39	0,40	0,53

Kolmogorov-Smirnov (Figura 5). Le distribuzioni diametriche incrociate tra loro che presentano valori di $rDD \geq 0,60$ sono significativamente differenti nell'86% dei casi, le coppie di distribuzioni diametriche con valori di $rDD \geq 0,50$ sono statisticamente differenti nel 69% dei casi, mentre la percentuale scende al 50% per valori di $rDD \geq 0,40$. Nel complesso il test di *Kolmogorov-Smirnov* evidenzia la presenza di due tipologie di distribuzioni diametriche paradigmaticamente rappresentate dai sottopopolamenti arborei 3 e 7 da un lato e dal sottopopolamento 11 dall'altro (Figura 5).

Al livello gerarchico II le differenze significative tra le distribuzioni diametriche dei sottopopolamenti arborei appartenenti allo stesso poligono di livello superiore sono meno accentuate, interessando nel complesso solo circa metà dei sottopopolamenti arborei. Al livello I le differenze significative tra le distribuzioni diametriche interessano appena l'8% dei sottopopolamenti arborei.

4.2.3 Buche

I poligoni classificati come buche all'interno dell'area sperimentale sono 17. Al livello III è stato individuato un unico intero poligono classificabile come buca, corrispondente a un'area interessata nel 1997 da schianti di grosse piante con effetto «domino» causato dal passaggio di una forte perturbazione (PIOVE-SAN, 1997). Al livello II i poligoni classificati come buche sono 5, mentre i restanti poligoni (circa il 65%) sono stati identificati solo al livello di dettaglio maggiore (livello I).

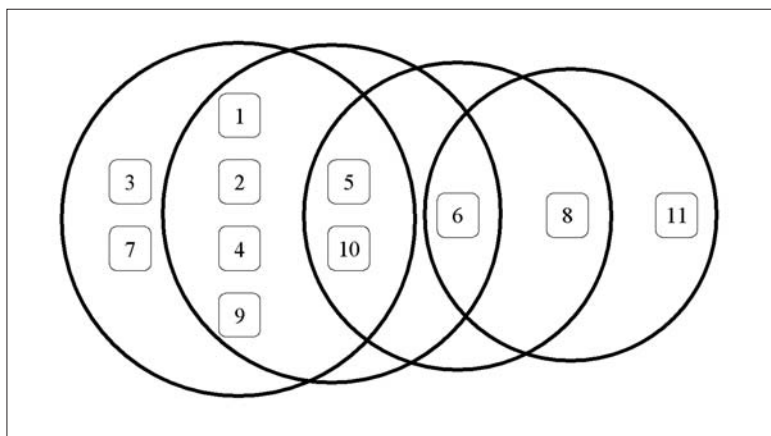


Figura 5 – Rappresentazione grafica delle differenze significative delle distribuzioni diametriche tra i sottopopolamenti arborei di livello III (i codici corrispondono a quelli di cui alla Figura 1), secondo il test *Kolmogorov-Smirnov*. Sottopopolamenti arborei appartenenti allo stesso insieme non sono significativamente differenti ($p = 0,05$).

– Statistically significant differences of dbh distribution among the level-III substands (codes as in Figure 1) according to the Kolmogorov-Smirnov test ($p = 0,05$).

Le dimensioni dei poligoni classificati come buche variano da circa 120 m² fino a circa 1460 m², con valore medio pari a oltre 400 m² (CV = 75%). La rinnovazione affermata all'interno delle buche è caratterizzata in media da circa 400 fusti a ettaro (CV = 104%), l'area basimetrica è pari in media a 1,3 m²ha⁻¹ (CV = 79%), il diametro medio è pari a 6 cm (CV = 53%), l'altezza media è di circa 6 m (CV = 60%).

Generalmente, la rinnovazione affermata di faggio prevale sulle altre specie (sambuco e aceri) nelle buche con superfici comprese tra circa 400 m² e 600 m² e nei margini intorno alla buca compresi tra 1800 m² e 2500 m². Per valori inferiori a questi intervalli, sia nelle buche che nelle superfici adiacenti, il faggio e il sambuco possono essere ambedue prevalenti in modo mutualmente esclusivo; per valori superiori agli intervalli citati predomina esclusivamente la rinnovazione affermata di sambuco (Figura 6).

5. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Nelle condizioni esaminate, la significatività delle differenze dei valori degli indici strutturali tra i sottopopolamenti di pari livello gerarchico appartenenti a un unico poligono di livello gerarchico superiore dimostrano come la segmentazione dell'immagine multispettrale *QuickBird* abbia permesso di individuare insiemi di alberi strutturalmente diversi. Differenze significative

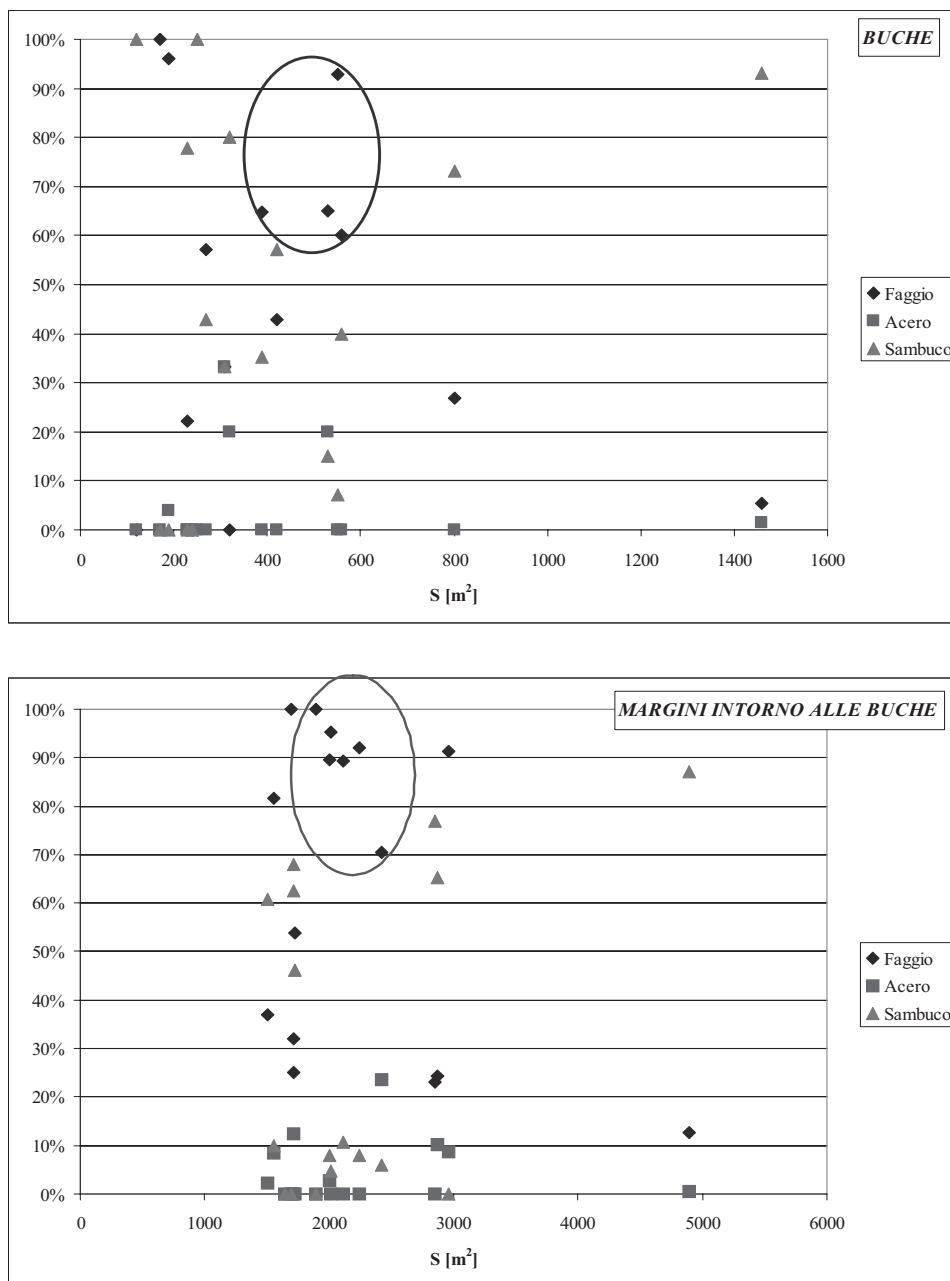


Figura 6 – Ripartizione percentuale delle specie arboree della rinnovazione affermata in funzione dell'ampiezza delle buche e dell'ampiezza dei margini intorno alle buche; sono evidenziate le condizioni in cui prevale la rinnovazione affermata di faggio.

– Percentage of tree regeneration units by species vs. gap and expanded gap sizes: ellipses evidence conditions where beech regeneration prevails.

sono state parzialmente riscontrate anche al livello gerarchico più basso (livello I), a testimonianza della possibilità di raggiungere un elevato livello di dettaglio per descrivere singole peculiarità della struttura orizzontale, almeno in boschi simili a quello indagato.

L'eterogeneità riscontrata evidenzia come la faggeta indagata, anche su una superficie relativamente contenuta (circa 10 ha), sia composta da un mosaico di situazioni strutturali (*patch*), dinamico nel tempo e nello spazio. Questo mosaico, favorito dalle aperture nella copertura arborea, consente di mantenere la diversità (GRASSI *et al.*, 2003) e agevolare la rinnovazione naturale del bosco, accompagnandone l'evoluzione verso strutture complesse. In situazioni strutturali eterogenee BAGNARESI *et al.* (2002) e BIANCHI *et al.* (2005) sottolineano le potenzialità della gestione per il monitoraggio e l'agevolazione delle dinamiche in atto. I sottopopolamenti arborei del livello III presentano indici strutturali e distribuzioni diametriche significativamente differenti tra loro: nelle condizioni esaminate possono essere considerati quali unità colturali di riferimento, nell'ottica di una concezione algoritmica degli interventi gestionali propria della selvicoltura sistemica (CIANCIO, 1991; CIANCIO, 1999).

Per quanto riguarda la ripartizione del numero di alberi per classe diametrica, è possibile evidenziare due distinti tipi di sottopopolamenti arborei, caratterizzati l'uno da aspetti somatici prevalentemente giovanili, con un elevato numero di alberi nelle classi diametriche più piccole e scarsa presenza di alberi di dimensione maggiore (a esempio, sottopopolamenti 11 e 8), l'altro caratterizzato da aspetti somatici evoluti, riconducibili a più coorti (a esempio, sottopopolamenti 1, 3 e 7). I sottopopolamenti arborei caratterizzati da aspetti prevalentemente giovanili presentano condizioni strutturali generalmente omogenee al loro interno (Tabella 3), mentre quelli caratterizzati da aspetti più evoluti hanno una differenziazione più accentuata nei livelli gerarchici inferiori, a dimostrazione appunto della presenza di più coorti nel soprassuolo (FRELICH, 2002).

La maggior parte dei poligoni classificati come buche corrispondono a poligoni delineati al livello di segmentazione più basso (livello I) a ulteriore riprova dell'utilità di raggiungere elevati livelli di dettaglio per un'accurata descrizione strutturale di boschi quale quello indagato. La presenza di buche ampie comporta l'affermazione del sambuco a scapito delle altre specie, mentre la rinnovazione affermata di faggio prevale quando le buche hanno una superficie pari a circa 500 m², nel qual caso il faggio tende a prevalere anche nelle aree adiacenti sotto copertura, confermando che le condizioni migliori per l'insediamento della rinnovazione di faggio sono caratterizzate da luce diffusa (BERNETTI, 1995). La competitività del sambuco in condizioni di maggiore illuminazione è destinata a terminare con il processo di chiusura delle buche da parte del soprassuolo principale.

Tabella 3 – Comparazione degli aspetti strutturali tra i sottopopolamenti arborei di livello III. Sono segnalate con riferimento ai due livelli gerarchici inferiori (livello II, livello I) all'interno di ciascun sottopopolamento di livello III: eventuali differenze significative per gli indici strutturali UAI, SM, DBHDM; eventuali differenze significative tra le distribuzioni diametriche secondo il test di Kolmogorov-Smirnov (K-S); presenza di buche.

– *Comparison of the structural attributes of the level-III substands. Referred to hierarchical sub-levels within each level-III substand, the statistically significant differences of UAI, SM, DBHDM indices and of dbh distributions and the eventual presence of gaps are reported.*

Sottopopolamento	Livello II					Livello I				
	UAI	SM	DBHDM	K-S	buche	UAI	SM	DBHDM	K-S	buche
1		x		x	x	x	x	x	x	x
2		x	x	x					x	x
3	x	x		x	x		x			x
4				x						x
5				x		x			x	x
6			x			x				x
7			x	x	x	x			x	x
8		x			x					
9				x		x	x		x	
10		x					x			
11										

In conclusione, nelle condizioni esaminate l'eterogeneità geometrica e spettrale quantificata tramite segmentazione multirisoluzione di immagini ottenute da un sensore satellitare ottico ad alta risoluzione, quale il *QuickBird*, ha permesso di identificare in maniera efficace, oggettiva e replicabile sottopopolamenti arborei strutturalmente differenziati, a diverse scale di dettaglio. La procedura proposta consente di cartografare speditamente i sottopopolamenti, creando mappe di sintesi di vari aspetti della diversità strutturale orizzontale e di delimitare con accuratezza le interruzioni nella copertura arborea, con un processo oggettivo e più rapido rispetto ai metodi convenzionali.

RINGRAZIAMENTI

Lavoro parzialmente svolto nell'ambito del progetto Ri.Selv.Italia, finanziato dal Ministero delle Politiche Agricole e Forestali (sottoprogetto 4.1.4, U.O. DISAFRI - Università degli Studi della Tuscia, Responsabile: P. Corona). Per il supporto nei rilievi si ringraziano A. Tedesco, S. Bollati, M. Plutino, G. Clementi.

SUMMARY

Testing multilevel analysis of structural diversity in a *Fagus sylvatica* stand with old-growth characteristics

The analysis of forest structure is a valuable support tool for forest management. Usually, it is investigated through data acquired by field survey. Multispectral remote sensing is now able to provide information from very high resolution satellite sensors and the object oriented segmentation techniques are particularly efficient to exploit such data. In this work the segmentation of a *QuickBird* image (spatial resolution = 2,8 m) is used to quantify some aspects of the structural diversity of a *Fagus sylvatica* stand with old-growth characteristics, located in central Italy (northern Latium). We used three different scale levels to analyze the spatial relationships, the species mingling and the size dominance among single trees, by applying a set of neighbourhood-based indexes. Differences among the dbh distributions were highlighted by the absolute discrepancy algorithm and the *Kolmogorov-Smirnov* test, at each examined scale level. The association between natural regeneration and gap and extended gap sizes was also analyzed. In the examined conditions, the spectral and geometric heterogeneity quantified by very high resolution multispectral *QuickBird* imagery proved to be an effective support tool for the characterization of forest stand structural diversity.

BIBLIOGRAFIA

- AGRIMI M., CIANCIO O., PORTOGHESI L., POZZOLI R., 1991 – *I querceti di cerro e farnetto di macchia grande di Manziana: struttura, trattamento e gestione*. Cellulosa e Carta, 5: 25-49.
- AGUIRRE O., HUI G., VON GADOW K., JIMENEZ J., 2003 – *An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables*. Forest Ecology and Management, 183: 137-145.
- BAATZ M., SCHÄPE A., 2000 – *Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation*. In: Strobl, Blascke, Greisebener (eds), Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XI. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 1999. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, Germany.
- BAATZ M., BENZ U., DEGHANI S., HEYNEN M., HOLTJE A., HOFMANN P., LINGENFELDER I., MIMLER M., SOHLBACH M., WEBER M., WILLHAUCK G., 2003 – *eCognition user guide 3*. Definiens Imaging GmbH, Munchen, Germany.
- BAGNARESI U., GIANNINI R., GRASSI G., MINOTTA G., PAFFETTI D., PINI PRATO E., PROIETTI PLACIDI A.M., 2002 – *Stand structure and biodiversity in mixed, uneven-aged coniferous forests in the eastern Alps*. Forestry, 75 (4): 357-364.
- BENZ U.C., HOFMANN P., WILLHAUCK G., LINGENFELDER I., HEYNEN M., 2004 – *Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 58: 239-258.
- BERNETTI G., 1995 – *Selvicoltura speciale*. UTET, Torino.

- BIANCHI L., PACI M., TASSINARI F., 2005 – *Dinamiche strutturali nelle abetine delle Foreste Casentinesi*. Sherwood, 114: 13-17.
- CALVANI P., CORONA P., LAMONACA A., 2005 – *Quantificazione della diversità strutturale in soprassuoli forestali*. EM Linea Ecologica, 5: 6-9.
- CHIRICI G., CORONA P., TRAVAGLINI D., 2003 – *Sperimentazione di tecniche di classificazione object-oriented di immagini QuickBird a fini forestali*. L'Italia Forestale e Montana, 58 (4): 231-250.
- CHIRICI G., CORONA P., 2006 – *Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione per il rilevamento delle risorse forestali*. Aracne Editrice, Roma.
- CIANCIO O., 1991 – *La gestione dei querceti di Macchia Grande di Manziana: la teoria del sistema modulare*. Cellulosa e Carta, 1: 31-34.
- CIANCIO O., 1999 – *I moduli colturali nella gestione dei boschi*. In: Ciancio O. (a cura di), Nuove frontiere nella gestione forestale. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, pp. 15-28.
- CORONA P., CALVANI P., FERRARI B., LAMONACA A., PORTOGHESI L., PLUTINO M., 2005 – *Sperimentazione di un sistema integrato di indici per il monitoraggio della diversità strutturale in soprassuoli forestali*. L'Italia Forestale e Montana, 60 (4): 447-462.
- DI FILIPPO A., PIOVESAN G., SCHIRONE B., 2004 – *Le foreste vetuste: criteri per l'identificazione e la gestione*. In: Ecologia. Atti del XIV Congresso Nazionale della Società Italiana di Ecologia (Siena, 4-6 ottobre 2004), pp. 1-7. [online] URL: <http://www.xivcongresso.societaitalianaecologia.org/>
- FRELICH L.E., 2002 – *Forest dynamics and disturbance regimes. Studies from temperate evergreen-deciduous forests*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- GRASSI G., MINOTTA G., GIANNINI R., BAGNARESI U., 2003 – *The structural dynamics of managed uneven-aged conifer stands in the Italian eastern Alps*. Forest Ecology and Management, 185: 225-237.
- HOSHINO D., NISHIMURA N., YAMAMOTO S., 2003 – *Effects of canopy conditions on the regeneration of major tree species in an old-growth Chamaecyparis obtusa forest in central Japan*. Forest Ecology and Management, 175: 141-152.
- KAYITAKIRE F., HAMEL C., DEFOURNY P., 2006 – *Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-2 imagery*. Remote Sensing of Environment, 102: 390-401.
- LA MARCA O., 1999 – *Elementi di dendrometria*. Patron Editore, Bologna.
- LAMONACA A., 2005 - *Sperimentazione di tecniche per l'analisi multilivello della diversità strutturale di soprassuoli forestali*. Tesi di dottorato di ricerca, Università degli Studi della Tuscia, Viterbo.
- LAMONACA A., 2006 – *Utilizzo di immagini QuickBird per il monitoraggio annuale della superficie forestale*. L'Italia Forestale e Montana, 61 (2): 119-132.
- LO MONACO A., 1984 – *Un po' di storia sulla Faggeta del Monte Cimino (Viterbo)*. Monti e Boschi, 3: 38-40.
- OLIVER C.D., LARSON B.C., 1996 – *Forest stand dynamics. Update edition*. John Wiley and Sons, New York, USA.

- PEDERSEN B.S., HOWARD J.L., 2004 – *The influence of canopy gaps on overstory tree and forest growth rates in a mature mixed-age, mixed-species forest*. Forest Ecology and Management, 196: 351-366.
- PIOVESAN G., 1997 – *Analisi di problemi assestamentali nella foresta montana dell'Appennino centrale*. Tesi di dottorato di ricerca, Università degli Studi della Tuscia, Viterbo.
- PIOVESAN G., BIONDI F., BERNABEI M., DI FILIPPO A., SCHIRONE B., 2005 – *Spatial and altitudinal bioclimatic zones of the Italian Peninsula identified from a beech (Fagus sylvatica L.) tree-ring network*. Acta Oecologica, 27: 197-210.
- READ J.M., CLARK D.B., VENTICINQUE E.M., MOREIRAS M.P., 2003 – *Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests*. Journal of Applied Ecology, 40: 592-600.
- ROCCATO P., 2005 – *La faggeta del Monte Cimino: analisi del dinamismo strutturale*. Tesi di laurea, DAF, Facoltà di Agraria, Università della Tuscia, a.a. 2004/2005, Viterbo.
- SCOPPOLA A., CAPORALI C., 1996 – *I boschi caducifogli mesofili con faggio della Provincia di Viterbo: aggiornamento sulla distribuzione*. Annali Accademia Italiana Scienze Forestali, XLV: 167-188.
- SCOPPOLA A., CAPORALI C., 1998 – *Mesophilous woods with Fagus sylvatica L. of northern Latium (Tyrrhenian Central Italy): synecology and syntaxonomy*. Plant Biosystems, 132 (2): 151-168.
- SYSTAT, 2004 – *Systat 11. Statistics II*. Systat Software Inc., Richmond, CA, USA.