

Analisi del fenomeno dell'autodiradamento in piantagioni di pino laricio (*Pinus laricio* Poiret) della Calabria

Matteo Tomaiuolo¹

Accettato il 2 ottobre 2010

Riassunto – L'autodiradamento è un processo naturale che causa la riduzione della densità nei soprassuoli forestali, in seguito alla competizione tra individui per lo spazio e per le risorse naturali. Il fenomeno si verifica progressivamente con l'aumento delle dimensioni degli alberi, secondo una proporzionalità inversa tra densità del popolamento e dimensione degli individui. Lo studio di tali dinamiche è importante sia nella ricerca forestale, sia nella gestione selvicolturale dei soprassuoli, in quanto consente di confrontare le densità reali dei soprassuoli con valori di densità teorica stimati mediante modelli statistico-matematici. Scopo del presente lavoro è quello di approfondire le conoscenze sul fenomeno della mortalità naturale in soprassuoli di origine artificiale non diradati di pino laricio della Calabria; sono state calibrate e confrontate 4 differenti equazioni proposte da altrettanti Autori, in grado di descrivere il fenomeno dell'autodiradamento, applicando sia tecniche di regressione lineare, sia non lineare. Le analisi statistiche hanno dimostrato che l'equazione proposta da Tang *et al.* (1994) pur mostrando un'oggettiva incertezza dovuta ad un intervallo di confidenza relativamente ampio, è risultata quella che meglio di altre formalizza la relazione tra densità e diametro medio dei soprassuoli oggetto di studio, e può quindi essere utilmente impiegata nella gestione selvicolturale degli stessi. L'entità con cui avviene l'autodiradamento dipende dalla stadio fisiologico, ed è descrivibile da una curva che presenta una traiettoria con la concavità rivolta verso il basso. Ulteriori approfondimenti serviranno per definire le modalità applicative, in termine di entità, intensità ed epoca degli interventi intercalari.

Parole chiave: *Pino laricio, soprassuoli artificiali, autodiradamento, relazione densità-diametro, Indici di densità dei popolamenti.*

Abstract – Analysis of self-thinning in Calabrian pine plantations (*Pinus laricio* Poiret) in Calabria (southern Italy). Self-thinning is the natural process whereby numbers of trees per unit area decrease as average tree size increases over time. It is a process intrinsic to all forest and plant communities whose composition and structure are influenced by competition for growing space. Stands follow a relatively predictable course of density-dependent tree mortality as numbers of trees per unit area decrease with increasing average tree size. It is generally assumed that the combined effects of crown expansion and tree mortality are compensatory so that canopy closure is always maintained. In forest management, knowledge of self-thinning point and information about tree density showing a sharp increase of natural mortality is useful to determine the optimal thinning regimes at stand level. Yoda's self-thinning line and Reineke's stand density index are useful and widely used in plantation growth models to predict natural mortality and in process-based models; calibrating these relationships is anyway difficult. Self-thinning and size-density relationships in unthinned even-aged Calabrian pine stands in Calabria (Southern Italy) were studied. Four different diameter-density equations were fitted and compared: the Reineke's model (1933), the modification of this model proposed by Zeide (1995), the self-thinning model developed by Tang *et al.* (1994), the self-thinning frontier adjusted by Vanclay & Sands (2009). Data from ninety untreated or control permanent plots in experimental areas located in artificial stands were used. Reineke's equation for fully stocked stands relates the number of trees of a stand with their square mean diameter. Zeide proposed a modification to Reineke's equation considering that the slope would not be constant, but changing with age. The self-thinning model developed by Tang *et al.* relates the number of trees with the square mean diameter, and assumes that in a unthinned stand, which has not reached the maximum density, the self-thinning rate increases with stand density index. The model proposed by Vanclay & Sands can be solved analytically and yields equations for the stocking and the stand basal area as an explicit function of stem diameter. It predicts that self-thinning may be regulated by the maximum basal area. Linear regressions were fitted using the REG procedure of SAS for Reineke's and Zeide's models. For the non-linear regression the Gauss-Newton algorithm from NLIN procedure was performed. Akaike's information criterion, as a measure of the goodness of fit of the four estimated statistical models, was applied. The slope obtained by Reineke's model (-1.580) is not significantly different from the constant value of -1.605 at the 95% confidence level. When height was included in the relationships between number of trees and diameter (modification proposed by Zeide) the adjusted correlation coefficient increased and the squared mean error decreased. The stand density index calculated from Reineke's straight line previously fitted (1283 trees·ha⁻¹) is lower than the value obtained from the Tang's model (1919 trees·ha⁻¹) but these values are not statistically different. The stand self-thinning model proposed by Tang *et al.*, although showing an objective uncertainty due to a relatively wide confidence interval, describes better than other models the relationships between stand density and average diameter in unthinned even-aged Calabrian pine stands in Calabria (Southern Italy).

Key words: *Calabrian pine, artificial stands, self-thinning, diameter-density relationship, Stand Density Index.*

F.D.C.: 228.1: 174.7: Pinus nigra sp. laricio: (450.78)

Premessa

La mortalità che si verifica in qualsiasi soprassuolo forestale è la risultante dei fenomeni di competizione

tra individui che occupano lo stesso spazio, e che in un dato momento del loro ciclo vitale interagiscono a causa della contemporanea richiesta di risorse limitate, indipendentemente dall'origine (naturale o

¹ CRA-SAM Unità di Ricerca per la Selvicoltura in Ambiente Mediterraneo, Cosenza. matteo.tomaiuolo@entecra.it

artificiale) e dalla composizione (pura o mista) del popolamento. L'insorgenza, l'intensità e l'entità della competizione svolge un ruolo fondamentale sulla densità e sulla struttura dei soprassuoli forestali (MOHLER *et al.* 1978; LAASENAHO e KOIVUNIEMI 1990; LONSDALE 1990; SHAINSKY e RADOSEVICH 1992; NEWTON e JOLLIFFE 1998). Tale fenomeno, comunemente definito autodiradamento, si verifica progressivamente con l'aumento delle dimensioni degli alberi, in funzione della capacità portante dell'ecosistema; in sostanza si determina un numero limite di individui di una certa dimensione che possono coesistere sulla stessa area, secondo una proporzionalità inversa tra densità del popolamento e dimensione (o massa media) degli individui arborei di un soprassuolo forestale (CURTIS 1970; WHITE 1981; LONG 1985).

Lo studio del fenomeno, e la sua trasposizione in forma allometrica, è efficacemente utilizzato per descrivere la struttura dei popolamenti e prevederne l'evoluzione. L'indice di densità del soprassuolo (*Stand Density Index*) proposto da REINEKE (1933) e la linea di autodiradamento (*-3/2 power rule*) proposto da YODA *et al.* (1963), ad esempio, sono quelle più note.

L'equazione empirica proposta da REINEKE (*op. cit.*) è basata sullo studio del coefficiente angolare β della retta di autodiradamento. Tale parametro rappresenta, in un grafico in scala bilogarithmica, la pendenza della retta nel caso di boschi puri, coetanei, non disturbati da azioni perturbatrici di varia natura, e secondo l'Autore assume un valore costante pari a -1.605. Studi successivi hanno invece dimostrato che tale coefficiente dipende dall'autoecologia della specie, e può assumere valori compresi tra -1.54 e -2.33 (DEL RIO *et al.* 2001); pertanto la retta di autodiradamento è caratterizzata da coefficienti specie-specifici che devono essere di volta in volta determinati (ZEIDE 1987; OSAWA e SUGITA 1989; PUETTMANN *et al.* 1993; DEL RIO *et al. op. cit.*; PRETZSCH e BIBER 2005).

L'equazione esponenziale proposta da YODA *et al.* (*op. cit.*) è concettualmente simile a quella di REINEKE, ed è basata sul valore costante dell'esponente, pari a -3/2. Studi condotti per verificare la costanza dell'esponente hanno dimostrato che esso può variare dal valore proposto (WHITE e HARPER 1970; MOHLER *et al. op. cit.*; WELLER 1987a, 1987b, 1990; ZEIDE *op. cit.*; OSAWA e SUGITA 1989; OSAWA e ALLEN 1993; OSAWA 1995; XUE *et al.* 1999). Le differenze riscontrate sarebbero imputabili al temperamento delle specie e alla fertilità stazionale (WELLER *op. cit.*; ZEIDE *op. cit.*). Pertanto,

l'esponente della retta di autodiradamento non è necessariamente specie-specifico, ma deve essere considerato sito-specifico (OSAWA *op. cit.*; ZEIDE *op. cit.*). In merito alla necessità di rapportare il numero di individui di un soprassuolo con una espressione delle loro dimensioni medie, ZEIDE (*op. cit.*) conferma la validità del diametro quadratico medio (come suggerito da REINEKE) al posto del volume o della biomassa media (equazione di YODA), in quanto il primo evidenzia maggiormente le variazioni di densità essendo strettamente correlato con la larghezza della chioma. D'altro canto, il diametro quadratico medio può essere determinato con più accuratezza e facilità rispetto al valore medio di volume o di biomassa, ed è quindi la variabile dimensionale preferibile per ragioni pratiche. Sulla base di tale considerazione ZEIDE (*op. cit.*) afferma che il fenomeno dell'autodiradamento è esprimibile da una curva concava verso il basso, piuttosto che da una linea retta, in cui sono distinguibili tre differenti stadi fisiologici: (i) fase giovanile, fino alla chiusura delle chiome, in cui il tasso di autodiradamento è più basso di quello previsto dalla retta di massima densità; (ii) stadio adulto, in cui la curva di autodiradamento segue asintoticamente la retta teorica; (iii) stadio di vecchiaia, in cui l'andamento della traiettoria di autodiradamento è situata sotto la retta di massima densità. Per descrivere la traiettoria di tale curva ZEIDE (*op. cit.*) ha proposto una modifica dell'equazione di REINEKE.

Altri Autori hanno invece proposto differenti traiettorie, almeno per quanto concerne lo stadio di invecchiamento del soprassuolo, in cui la curva assume andamento asintotico alla retta teorica di massima densità (SMITH e HANN 1984; PUETTMANN *et al. op. cit.*; TANG *et al.* 1994). Secondo queste concezioni, la traiettoria della curva di autodiradamento esprime il limite superiore di tutte le possibili combinazioni tra dimensioni diametriche e densità, e corrisponde al momento in cui la concorrenza individuale è fortissima, ossia quando il soprassuolo occupa totalmente tutto lo spazio disponibile.

Il fenomeno dell'autodiradamento in soprassuoli a densità non eccessiva (*understocked*) è più complesso di quanto non si verifichi in popolamenti a densità colma (*fully-stocked*), in quanto l'indice di densità del soprassuolo, che misura il grado della concorrenza, cambia con l'età man mano che aumenta il diametro quadratico medio (WHITE *op. cit.*); conseguentemente, cambia anche il tasso di autodiradamento (TANG *et al.*

op. cit.). Quest'ultimo Autore ha pertanto elaborato e proposto un modello in grado di descrivere il fenomeno dell'autodiradamento in soprassuoli coetanei che potesse adattarsi sia a quelli eccessivamente densi, sia a quella meno densi. La conoscenza e la definizione del fenomeno è fondamentale per determinare il regime ottimale degli interventi intercalari (PUETTMANN *et al. op. cit.*; JACK e LONG 1996; LONG *et al.* 2004). Occorre però osservare che, dal punto di vista pratico ed applicativo, la procedura di calibrazione dell'indice di densità relativa di un dato popolamento resta ancora incerta (ZHANG *et al.* 2005; VANDERSCHAAF e BURKHART 2007); quanto sopra è dovuto alla fase di soggettività da cui dipende la definizione del campione considerato *fully-stocked*, soggettività che deve necessariamente essere ridotta, in quanto il rapporto dimensioni-densità occupa un ruolo centrale sia nella ricerca forestale, sia nella gestione selvicolturale dei soprassuoli (VANCLAY e SANDS 2009). A partire da questa considerazione, tali Autori hanno proposto un modello basato sul presupposto, derivato da numerose osservazioni sperimentali, che la pendenza della curva densità-diametro può essere stimata con una equazione di tipo esponenziale in funzione dell'area basimetrica corrente del soprassuolo.

Approcci simili, almeno in parte, sono rappresentati dal "fattore distanziale" (HART 1928; BECKING 1953) e dal concetto di "area basimetrica massimale" di ASSMANN (1970).

Il fattore distanziale (normalmente indicato con $s\%$) presenta alcuni inconvenienti che potrebbero portare ad errori grossolani, soprattutto nel caso di soprassuoli in cui la disposizione spaziale degli individui arborei è irregolare, o comunque non facilmente riconducibile ad un sesto geometrico ben definito; inoltre, in popolamenti non omogenei per quanto concerne la fertilità stazionale, piccole variazioni nell'altezza dominante comportano notevoli variazioni dell' $s\%$.

ASSMANN (*op. cit.*) identifica l'area basimetrica massimale di un popolamento forestale con il valore raggiunto, alle diverse età, da soprassuoli mai diradati, in cui la riduzione della densità si è verificata solo per effetto dell'autodiradamento. Secondo quanto affermato da STERBA (1987) e più recentemente da SKOVSGAARD e VANCLAY (2007), l'area basimetrica massimale di un popolamento coetaneo può essere espressa in funzione della sua altezza dominante. La stima dei parametri dell'equazione richiede, però, la disponibilità di numerosi dati rilevati sia in inventari

forestali su ampie superfici, sia in aree sperimentali sottoposte a monitoraggio di lungo periodo (CORONA e NOCENTINI 2009).

Gli studi sui valori di densità relativa dei popolamenti forestali sono particolarmente abbondanti nella letteratura scientifica nordamericana, in quanto diffusamente utilizzati nella programmazione degli interventi di gestione selvicolturale. Per contro, le ricerche inerenti ambiti e specie forestali europee sono relativamente recenti (BACHOFEN e ZINGG 2001; BRASSEL e LISCHKE 2001; DEL RIO *et al. op. cit.*). In Italia l'unica applicazione è dovuta a VACCHIANO *et al.* (2005) che hanno determinato il valore dell'indice di densità di REINEKE in popolamenti di abete bianco del Piemonte meridionale.

Scopo del presente lavoro è quello di approfondire le conoscenze sul fenomeno della mortalità naturale in soprassuoli di origine artificiale non diradati di pino laricio della Calabria; l'osservazione e la codificazione del fenomeno mediante una equazione allometrica riveste notevole importanza dal punto di vista applicativo in quanto:

- i. consente di definire un idoneo piano di interventi culturali, in funzione delle finalità che si intendono perseguire con gli impianti;
- ii. permette di valutare, nel tempo e nello spazio, gli effetti degli interventi stessi sui processi evolutivi che si innescano nelle biocenosi forestali.

Per individuare la traiettoria delle curve di autodiradamento sono stati confrontati i modelli proposti da REINEKE (*op. cit.*), ZEIDE (1995), TANG *et al.* (*op. cit.*), VANCLAY e SANDS (*op. cit.*).

Materiali e metodi

Dati

Lo studio è stato condotto in piantagioni di pino laricio realizzate sull'altopiano della Sila, in Calabria (Figura 1), dove è possibile riscontrare situazioni ecologiche (suolo, clima, esposizione, pendenza) e selvicolturali differenti. I rimboschimenti erano generalmente eseguiti previa lavorazione del suolo a gradoni, realizzati lungo le curve di livello; le densità iniziali teoriche variavano da 2500 a 3300 piante ad ettaro. I primi studi sulle pinete di laricio (AVOLIO e CIANCIO 1979) hanno dimostrato che a 15-20 anni dagli impianti le densità erano ancora eccessive, e gli effetti dell'autodiradamento erano manifestati dalla presenza



Fig. 1 – Localizzazione dell'area di studio in Calabria.
Map of the study area in Calabria (Southern Italy).

di numerose piante morte in piedi o deperienti.

L'indagine è stata condotta in 90 aree di saggio permanenti, di ampiezza variabile da 1000 a 2000 m² sottoposte da oltre 30 anni a rilievi periodici in numero (da 3 a 8-9) e intervallo (da 1 a 7-8 anni) variabili. Le principali caratteristiche delle aree campionate sono riassunte nella Tabella 1. In ogni area è stato rilevato il diametro di tutte le piante, lo stato vegetativo (vive o morte) e l'altezza di almeno 30 alberi rappresentativi delle classi diametriche presenti. Le 90 aree sperimentali sono state realizzate in rimboschimenti in cui, al momento del primo rilievo, non era mai stato eseguito alcun diradamento, poiché era assolutamente necessario avere la certezza che i soprassuoli analizzati fossero *fully-stocked* in termini di densità. Il set di dati disponibili è stato suddiviso, in maniera casuale, in due parti: il 70% circa è stato utilizzato per la calibrazione dei 4 modelli, mentre il rimanente 30% è stato impiegato nella successiva fase di validazione.

Equazione di REINEKE

La funzione proposta da REINEKE (*op. cit.*) per esprimere la variazione tra il numero di alberi ad ettaro (N) e il diametro medio quadratico (Dg) del soprassuolo,

in scala bilogarithmica, è la seguente:

$$\ln(N) = \alpha - \beta \cdot \ln(Dg) \quad [1]$$

dove α e β rappresentano, rispettivamente, l'intercetta e il coefficiente angolare della retta e sono entrambi indipendenti dall'età o dalla fertilità stazionale. Tale equazione è usata per determinare l'indice di densità del soprassuolo (SDI) che esprime la densità teorica di un popolamento forestale coetaneo corrispondente al diametro quadratico medio di 25 cm; tale formulazione presuppone costante l'intensità della competizione in-

Tab. 1 – Principali caratteristiche delle aree di saggio.
Main statistics of the plots.

Variabile	Min	Mean	Max	Standard deviation
Età (anni)	16	29.54	47	8.62
N (piante-ha ⁻¹)	500	1538.01	3089	605.75
G (m ² -ha ⁻¹)	23.25	56.92	107.55	15.03
V (m ³ -ha ⁻¹)	75.83	433.24	1087.234	190.24
Dg (cm)	13.89	22.68	37.30	4.60
Hm (m)	7.61	15.39	23.93	3.76
Hdom (m)	8.77	17.31	27.72	4.15

terspecifica, per cui lo sviluppo ideale del popolamento risulterà parallelo alla retta di autodiradamento:

$$SDI = N \cdot \frac{Dg}{25}^\beta \quad [2]$$

Equazione di ZEIDE

Per descrivere la traiettoria della curva di massima densità, ZEIDE (*op. cit.*) ha proposto una modifica dell'equazione di REINEKE (*op. cit.*) scaturita dagli studi fatti da LAASENAHO e KOIVUNIEMI (*op. cit.*) i quali hanno evidenziato che la relazione lineare tra diametro medio alla base della chioma e numero di piante, in scala bilogarithmica, è migliore dell'equazione di REINEKE (*op. cit.*). Supponendo che esista, come è logico attendersi: (i) una relazione tra diametro alla base della chioma e diametro a 1,30 da terra, (ii) che il diametro alla base della chioma sia correlato all'altezza d'inserzione della chioma, (iii) che quest'ultima sia proporzionale all'altezza totale dell'albero, ZEIDE (*op. cit.*) perviene ad una nuova relazione tra il numero di piante per unità di superficie (N), il diametro quadratico medio (Dg) e l'altezza media (Hm) del soprassuolo:

$$\ln(N) = \alpha - \beta \cdot \ln(Dg) + \gamma \cdot Hm \cdot \ln(Dg) \quad [3]$$

dove γ è il nuovo parametro che rappresenta la variazione della pendenza.

Equazione di TANG

Il modello di autodiradamento di TANG *et al.* (*op. cit.*) ipotizza un *trend* crescente in funzione della densità, che raggiunge il massimo in corrispondenza di un dato rapporto "dimensione-densità". Tale ipotesi può essere formulata con la seguente equazione:

$$\frac{d \ln(N_t)}{d \ln(Dg_t)} = -\beta \cdot \left(\frac{SDI_t}{S_f} \right)^\gamma \quad [4]$$

dove N_t è il numero di piante ad ettaro all'età t , Dg_t è il corrispondente valore di diametro quadratico medio, SDI_t è l'indice di densità di REINEKE (*op. cit.*) all'istante t , S_f rappresenta il massimo valore dell'indice di densità di REINEKE (*op. cit.*) corrispondente alla massima densità (espressa in piante·ha⁻¹), β rappresenta la pendenza della linea di massima densità, γ è un parametro specie-specifico che esprime il tasso di autodiradamento. Quando un soprassuolo si

trova in condizioni di massima densità, il suo valore SDI è pari a S_f quindi il tasso di autodiradamento diviene costante ed uguale alla pendenza della linea di massima densità. Pertanto, tale modello è applicabile solo in soprassuoli con densità inferiore o uguale a quella massima teorica. Risolvendo l'equazione [4], ed esprimendo l'indice di densità con la [2], si perviene alla seguente espressione funzionale della curva di autodiradamento:

$$N_t = \frac{S_f}{\frac{Dg_t}{25}^{\beta \cdot \gamma} + \delta^{1/\gamma}} \quad [5]$$

dove δ è la costante di integrazione che dipende dai valori iniziali del numero di piante (N_1) e del diametro quadratico medio (Dg_1):

$$\delta = \frac{S_f^\gamma}{N_1} - \frac{Dg_1^{\beta \cdot \gamma}}{25} \quad [5a]$$

I tre parametri (S_f , β e γ) stimabili tramite regressione non lineare, sono specie-specifici.

Equazione di VANCLAY e SANDS

Il modello di autodiradamento recentemente proposto da VANCLAY e SANDS (*op. cit.*) parte dal presupposto, supportato da numerose osservazioni sperimentali, che la pendenza può essere approssimata da una funzione di potenza rispetto all'area basimetrica corrente del soprassuolo:

$$s = \frac{d \ln(N)}{d \ln(d)} = \frac{D}{N} \cdot \frac{dN}{dD} = -2 \cdot \left(\frac{G}{G_x} \right)^n \quad [6]$$

dove n è un esponente da determinare, G è l'area basimetrica del soprassuolo, G_x è l'area basimetrica massima in corrispondenza di una pendenza $s=2$.

L'eq. [6] può essere integrata per fornire il numero di individui $N(Dg)$ in funzione esplicita del diametro quadratico medio (Dg) del soprassuolo:

$$N(Dg) = \frac{N_0}{\left[1 + \left(\frac{n_0 \cdot Dg^2}{G_x} \right)^n \right]^{1/n}} \quad [7]$$

dove N_0 è il numero iniziale di individui e $n_0 = \pi \cdot N / 40000$. In definitiva, VANCLAY e SANDS (*op. cit.*) affermano

che il concetto di area basimetrica massimale può rappresentare una spiegazione pratica ed equilibrata dei fenomeni di mortalità in piantagioni coetanee monospecifiche.

Analisi statistiche

La stima dei parametri delle equazioni [1] e [3] è stata effettuata mediante regressione lineare, mentre per le equazioni [5] e [7] è stato utilizzato un procedimento di stima non lineare; per le prime due equazioni è stata pertanto utilizzata la *proc REG* di SAS[®], mentre per le altre due equazioni è stata adoperata la *proc NLIN* utilizzando l'algoritmo *Gauss-Newton* (SAS[®] Institute Inc. 2001).

Per poter avere un'idea effettiva della distorsione di stima è stato calcolato il valore medio dei residui (*bias*) sul set di validazione.

Il Criterio Informativo di Akaike (*AIC*) basato sul concetto di entropia dell'informazione, che offre una misura relativa di informazioni perse quando un dato modello è usato per descrivere la realtà (AKAIKE 1973), è stato infine utilizzato per la scelta del miglior modello in grado di definire la traiettoria della curva di massima densità:

$$AIC = n_c \cdot \ln\left(\frac{SSQ_{res}}{n_c}\right) + 2n_p \quad [8]$$

dove n_c è il numero dei dati del campione, SSQ_{res} è la somma dei quadrati dei residui e n_p è il numero di parametri utilizzati nel modello.

Risultati e discussione

I risultati delle analisi statistiche relative all'equazione di REINEKE (*op. cit.*) e a quella di ZEIDE (*op. cit.*) sul campione usato per la calibrazione sono evidenziati nella Tabella 2. Il coefficiente di correlazione corretto è risultato $R^2_{adj}=0.5733$, con un errore qua-

Tab. 2 – Parametri stimati con le equazioni [1] e [3].
Parameters estimated with models [1] and [3].

Model	Parameter	Estimate	St. error	t Value	Pr > t
[1] Reineke, 1933	α	12.24375	0.40208	30.45	<.0001
	β	-1.58027	0.13258	-11.9	<.0001
[3] Zeide, 1995	α	13.94150	0.57017	24.45	<.0001
	β	-2.33008	0.22624	-10.30	<.0001
	γ	0.01251	0.00316	3.96	0.0001

Tab. 3 – Parametri stimati con le equazioni [5] e [7].
Parameters estimated with models [5] and [7].

Model	Parameter	Approx. estim.	Approx. St. er.	Approx. 95% confidence intervals	
[5] Tang et al., 1994	Sf	1919.5	365.4	1194.9	2644.1
	β	2.0903	0.4692	1.1599	3.0208
	γ	1.2888	0.4342	0.4276	2.1500
[7] Vanclay Sands, 2009	Gx	76.5251	3.5082	69.5681	83.4821
	γ	4.9967	0.8949	3.2220	6.7714

dratico medio $MS=0.04516$; il parametro $\beta=-1.580$, che esprime la pendenza della retta di autodiradamento, non risulta quindi significativamente diverso dal valore $\beta=-1.605$ proposto da REINEKE (*op. cit.*) ad un livello di confidenza del 95%. Il corrispondente valore di *SDI* risulterebbe pari a 1283 piante ad ettaro. Nel caso della equazione di ZEIDE (*op. cit.*) il miglioramento dovuto al contributo del parametro *Hm* è evidenziato sia dall'aumento della percentuale di varianza spiegata ($R^2_{adj}=0.6262$), sia dalla riduzione dell'errore quadratico medio ($MS=0.03956$), sia dal fatto che il coefficiente γ è statisticamente significativo.

I risultati delle equazioni non lineari proposte da TANG *et al.* (*op. cit.*) e da VANCLAY e SANDS (*op. cit.*) sono riportati in Tabella 3. Il valore R^2_{adj} stimato con l'eq. [5] è risultato più alto rispetto a quello stimato con l'eq. [7] (rispettivamente 0.9266 e 0.8799); di conseguenza, l'errore quadratico medio dei residui determinato con l'eq. [5] è risultato inferiore rispetto all'eq. [7] (rispettivamente 22419.9 e 36960.5).

Il buon adattamento delle quattro funzioni è evidenziato anche dall'analisi dei residui, effettuato sul set di dati di validazione, che si dispongono in maniera sostanzialmente simmetrica rispetto ai valori attesi della variabile dipendente "*N predicted*" (Figure 2.1-2.4). Sono state inoltre effettuate analisi grafiche dei residui rispetto: i) ai valori osservati; ii) alle variabili indipendenti; tali verifiche hanno consentito di escludere l'esistenza di andamenti sistematici.

In Tabella 4 sono riportati sia i valori del *bias*, sia i valori di *AIC* calcolati con la [8]. Le medie dei residui evidenziano valori confrontabili per 3 delle 4 equazioni poste a confronto (valori compresi tra -29 e -41) mentre il bias riscontrato con l'equazione di VANCLAY e SANDS (*op. cit.*) si discosta sensibilmente dagli altri (-180). Relativamente all'indice *AIC*, il valore più basso è stato determinato con la funzione proposta da TANG *et al.* (*op. cit.*) che evidenzia inoltre una mi-

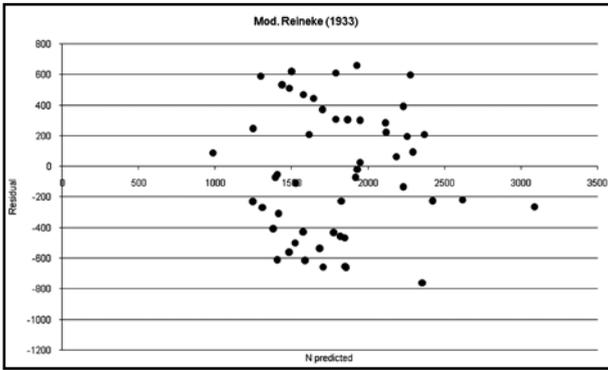


Fig. 2.1 – Dispersione dei residui dell'eq. [1].
Distribution of residuals in eq. [1].

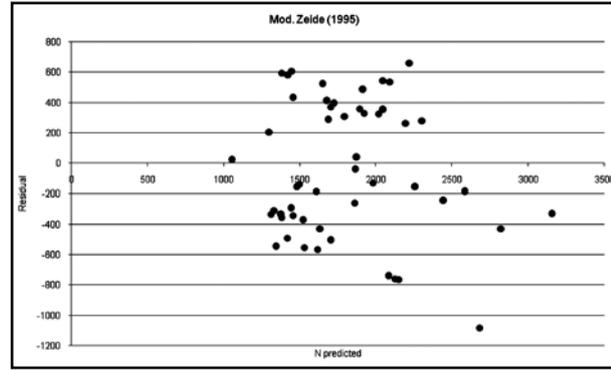


Fig. 2.2 – Dispersione dei residui dell'eq. [3].
Distribution of residuals in eq. [3].

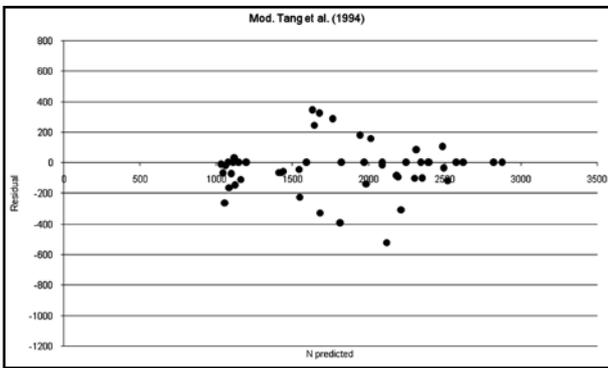


Fig. 2.3 – Dispersione dei residui dell'eq. [5].
Distribution of residuals in eq. [5].

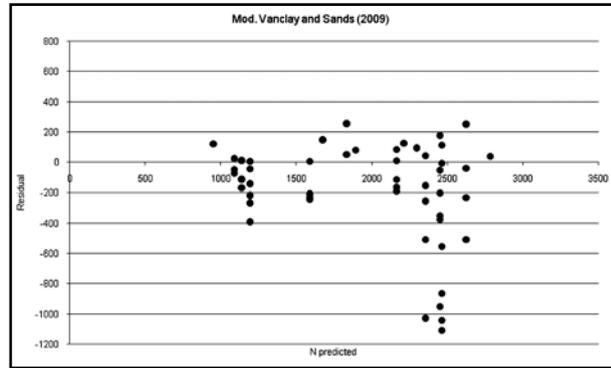


Fig. 2.4 – Dispersione dei residui dell'eq. [7].
Distribution of residuals in eq. [7].

gliore distribuzione complessiva dei residui rispetto al valore atteso.

L'indice di densità *SDI* ottenuto con l'equazione di REINEKE (*op. cit.*) pari a 1283 piante·ha⁻¹ è risultato più basso di quello stimato con l'equazione di TANG (*op. cit.*) (*SDI*=1919 piante·ha⁻¹), ma risulta comunque compreso entro l'intervallo di confidenza di quest'ultimo. Il tasso di autodiradamento β per le piantagioni di pino laricio calabresi, stimato con l'equazione [7] è risultato pari a 2.09; studi analoghi (ZEIDE *op. cit.*; WELLER *op. cit.*; TANG *et al. op. cit.*) indicano che il tasso di autodiradamento di soprassuoli a densità colma mai diradati può variare tra 1.2 e 2.8 in funzione della specie e della fertilità stagionale.

La Figura 3 evidenzia l'evoluzione reale e quella stimata del fenomeno dell'autodiradamento sul *dataset* di validazione; in essa è riportata sia la retta di autodiradamento di cui all'eq. [1], sia la retta di massima densità corrispondente al modello proposto da TANG *et al. (op. cit.)*. Quest'ultima equazione è quindi risultata più idonea per definire la traiettoria delle

curve di autodiradamento nei popolamenti artificiali di pino laricio della Calabria.

Conclusioni

Gli studi sulle dinamiche evolutive dei soprassuoli forestali, ed in particolare sui processi bio-ecologici che comportano variazioni numeriche e strutturali degli stessi, consentono di confrontare le densità reali dei soprassuoli con valori di densità teorica, stimati mediante modelli statistico-matematici. In qualsiasi soprassuolo forestale è facilmente osservabile, dopo la chiusura delle chiome, una diminuzione della densità per effetto della competizione. In definitiva, la densità e la chiusura delle chiome sono un compromesso tra due opposti processi: una crescita laterale di rami e radici, che comporta una riduzione dello spazio disponibile per ogni singolo individuo, e la mortalità di alcuni individui, che comporta una maggiore spazatura. Con l'aumentare dell'età aumenta anche la dimensione degli individui componenti il soprassuolo,

Tab. 4 – Bias e indice AIC di Akaike.
Bias and Akaike's Information Criterion.

Model	Bias	SSQres	n. param.	AIC
Reineke (1933)	-29	8679062.648	2	618.27
Zeide (1995)	-41	9928320.588	3	627.13
Tang et al. (1994)	-35	1335874.151	3	524.84
Vanclay e Sands (2009)-180		7113222.417	2	608.13

conseguentemente aumentano le dimensioni dei vuoti creatisi in seguito alla mortalità di alcune piante, mentre diminuisce la capacità di colmare tali spazi da parte degli alberi vicini.

Nel presente studio sono stati confrontati alcuni modelli allometrici al fine di descrivere ed interpretare il fenomeno dell'autodiradamento in soprassuoli di pino laricio di origine artificiale, realizzati a partire dalla seconda metà del secolo scorso in Calabria.

L'analisi dei processi che comportano una riduzione della densità, a livello arboreo, riveste notevole importanza pratica ed applicativa, oltre che scientifica, soprattutto nella pianificazione e nell'applicazione dei trattamenti selvicolturali. Tali interventi, come è noto, influiscono sulla quantità di risorse potenzialmente disponibili per la crescita, sulla capacità degli alberi di acquisire tali risorse, sulla distribuzione delle risorse tra le diverse componenti, non solo arboree, dei popolamenti forestali. L'individuazione del trattamento selvicolturale richiede però una scelta prioritaria in merito alle finalità degli impianti. Limitatamente ai rimboschimenti oggetto di studio, è possibile prevedere due possibili scenari, non necessariamente in contrasto tra loro, a cui corrispondono differenti moduli colturali in funzione degli scopi perseguiti.

Una prima ipotesi riguarda l'esaltazione della funzionalità produttiva dei rimboschimenti di laricio, e della capacità di fornire elevati quantitativi di materiale legnoso in tempi relativamente brevi. Tale obiettivo è perseguibile in aree più fertili, situate in zone pianeggianti o nei versanti a lieve pendenza, laddove la presenza di strade e piste forestali consentirebbe un facile accesso ai mezzi meccanici negli interventi di diradamento ed esbosco. In tal caso la gestione dei soprassuoli assumerebbe un carattere più intensivo, a cui corrisponderebbe un algoritmo colturale a maggiore impatto tecnologico.

La seconda ipotesi riguarda invece l'innescò di dinamiche evolutive che favoriscano i processi di rinaturalizzazione, e riguarderebbe le zone meno fertili, a media e forte pendenza, con scarsa viabilità forestale.

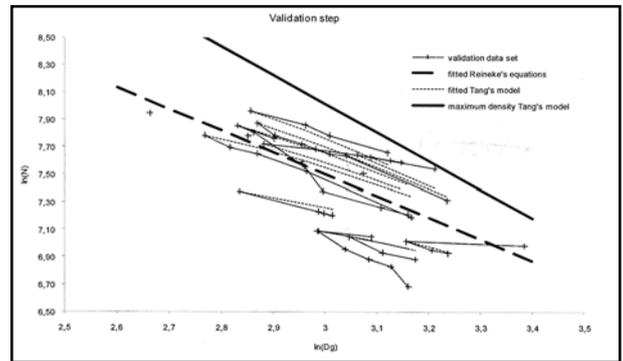


Fig. 3 – Evoluzione reale e stimata del fenomeno dell'autodiradamento.
Actual and estimated evolution of self-thinning process.

Il modulo colturale di riferimento, a basso impatto tecnologico, dovrebbe in tal caso favorire l'aumento della complessità bio-ecologica e strutturale degli impianti, e l'istaurarsi della rinnovazione naturale.

L'equazione proposta da TANG *et al.* (*op. cit.*) pur mostrando un'oggettiva incertezza nella stima dell'indice di densità S_f , evidenziata da un intervallo di confidenza relativamente ampio, è risultata quella che meglio di altre formalizza la relazione funzionale tra variabile dipendente e variabili esplicative. Per utilizzare tale indice a fini applicativi, ad esempio nella parametrizzazione dell'intensità degli interventi intercalari nelle pinete di laricio, sono necessari ulteriori approfondimenti, al fine di ridurre il margine d'incertezza della stima. Per quanto interessanti, i risultati dell'approccio seguito nel presente studio devono quindi ritenersi preliminari; sarà pertanto necessario, nel proseguimento della sperimentazione, eseguire nuovi rilievi, al fine di aumentare la numerosità del campione disponibile. Ulteriori approfondimenti saranno necessari per definire le modalità operative ed applicative, in termine di entità, intensità ed epoca degli interventi intercalari, in funzione degli obiettivi gestionali perseguiti.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è frutto di uno "Stage di formazione all'estero" svolto presso l'Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible in Palencia (Spagna). Desidero pertanto esprimere la mia riconoscenza al CRA, che ha finanziato l'attività formativa, al Direttore del CRA-SAM di Cosenza, Dott. Silvano Avolio, che ha avallato la mia domanda per l'ottenimento della borsa di studio, al Prof. Feli-

pe Bravo ed al personale dell'IUGFS che mi hanno ospitato presso il loro Centro di Ricerca. Un sentito ringraziamento è rivolto, inoltre, a tutto il personale del CRA-SAM di Cosenza, che in oltre 30 anni di attività ha evidenziato diligenza ed impegno nei rilievi di campagna e nell'archiviazione dei dati. Ringrazio infine l'anonimo Revisore, i cui preziosi suggerimenti hanno migliorato la stesura finale del lavoro.

Bibliografia citata

- AKAIKE H. 1973 - *Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. Second International Symposium on Information Theory.* PETROV B.N. and CSAKI F. eds., Akademiai Kiado, Budapest.
- ASSMANN E. 1970 - *Principles of forest yield study.* New York: Pergamon Press, 506 p.
- AVOLIO S., CIANCIO O. 1979 - *Prove di diradamento e tavola di cubatura per pinete artificiali di pino laricio nella Presila di Cosenza.* Ann. Ist. Sper. Selv., Arezzo, X: 25-78.
- BACHOFEN H., ZINGG A. 2001 - *Effectiveness of structures improvement thinning on stand structure in subalpine Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) stands.* For. Ecol. Manag. 145: 137-149.
- BECKING J.H. 1953 - *Einige Gesichtspunkte fuer Durchfuehrung von vergleichenden Durchforstungsversuchen in gleichaltrigen Bestanden.* Proceedings, XI IUFRO World Congress, Roma: 580-582.
- BRASSEL P., LISCHKE H. 2001 - *Swiss national forest inventory: methods and models of the second assessment.* Swiss Federal Research Institute WSL, Birmensdorf.
- CORONA P., NOCENTINI S. 2009 - *Un metodo per la quantificazione su basi parametriche dell'intensità di diradamento. L'Italia Forestale e Montana, 64 (6): 351-358.*
- CURTIS R.O. 1970 - *Stand density measures: an interpretation.* For. Sci. 16 (4), 403-414.
- DEL RIO M., MONTERO G., BRAVO F. 2001 - *Analysis of diameter-density relationships and self-thinning in non-thinned even-aged Scots pine stands.* For. Ecol. Manag. 142: 79-87.
- HART H.M.J., 1928. - *Stem density and thinning: a pilot experiment to determine the best spacing and thinning method of teak.* Proefsta. Boschwesen, Batavia, Meded 21.
- JACK S.B., LONG J.N. 1996 - *Linkages between silviculture and ecology: an analysis of density management diagrams.* For. Ecol. Manag. 86: 205-220.
- LAASENAHO J., KOIVUNIEMI J. 1990 - *Dependence of some stand characteristics on stand density.* Tree Physiology, 7: 183-187.
- LONG J.N. 1985 - *A practical approach to density management.* For. Chronicle 61: 23-27.
- LONG J.N., DEANB T.J., ROBERTS S.D. 2004 - *Linkages between silviculture and ecology: examination of several important conceptual models.* For. Ecol. Manag. 200: 249-261.
- LONSDALE W.M. 1990 - *The self-thinning rule: dead or alive?* Ecology 71 (4): 1373-1388.
- MOHELER C.L., MARKS P.L., SPRUGEL D.G. 1978 - *Stand structure and allometry of trees during self-thinning of pure stands.* Journal of Ecology, 66: 599-614.
- NEWTON P.F., JOLLIFFE P.A. 1998 - *Assessing processes of intraspecific competition within spatially heterogeneous black spruce stands.* Can. J. For. Res., 28: 259-275.
- OSAWA A. 1995 - *Inverse relationship of crown fractal dimension to self-thinning exponent of tree populations: A hypothesis.* Can. J. For. Res. 25: 1608-1617.
- OSAWA A., ALLEN R.B. 1993 - *Allometric theory explains self-thinning relationship of mountain beech and red pine.* Ecology 74:1020-1032
- OSAWA A., SUGITA S. 1989 - *The self-thinning rule: another interpretation of Weller's results.* Ecology, 70: 279-283.
- PRETZSCH H., BIBER P. 2005 - *A Re-Evaluation of Reineke's Rule and Stand Density Index.* For. Sci., 51 (4): 304-320.
- PUETTMANN K.J., HANN D.W., HIBBS D.E. 1993 - *Evaluation of the Size-Density Relationships for Pure Red Alder and Douglas-Fir Stands.* For. Sci. 39 (1): 2-27.
- REINEKE L.H. 1933 - *Perfecting a stand-density index for even-aged forests.* J. Agr. Res. 46: 627-638.
- SAS INSTITUTE INC. 2001 - *SAS/STAT User's Guide, Release 8.2,* Cary, NC, USA.
- SHAINSKY L.J., RADOSEVICH S.R. 1992 - *Mechanisms of competition between Douglas-Fir and Red Alder seedlings.* Ecology, 73: 30-45.
- SKOVSGAARD J.P., VANCLAY J.K. 2007 - *Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands.* Forestry, 81: 13-31.
- SMITH N.J., HANN D.W. 1984 - *A new analytical model based on the -3/2 power rule of self-thinning.* Can. J. For. Res. 14: 605-609.
- STERBA H. 1987 - *Estimating potential density from thinning experiment and inventory data.* Forest Science, 33: 1022-1034.
- TANG S., MENG C.H., WANG Y.H. 1994 - *A growth and self-thinning model for pure even-aged stands: theory and applications.* For. Ecol. Manag. 70: 67-73.
- VACCHIANO G., LINGUA E., MOTTA R. 2005 - *Valutazione dello Stand Density Index in popolamenti di Abete bianco (*Abies alba* Mill.) nel Piemonte meridionale.* It. For. Mont. 60 (3): 269-286.
- VANCLAY J.K., SANDS P.J., 2009 - *Calibrating the self-thinning frontier.* For. Ecol. Manag. 259 (1): 81-85.
- VANDERSCHAAP C.L., BURKHART H.E. 2007 - *Comparison of methods to estimate Reineke's maximum size-density relationship.* For. Sci. 53: 435-442.
- WELLER D.E. 1987a - *Self-thinning exponent correlated with allometric measures of plant geometry.* Ecology. 68 (4): 813-821.
- WELLER D.E. 1987b - *A reevaluation of the -3/2 power rule of plant self-thinning.* Ecological Monographs, 57 (1): 23-43.
- WELLER D.E. 1990. *Will the real self-thinning rule please stand up? A reply to Osawa and Sugita.* Ecology 71: 1204-1207

- WHITE J., HARPER J.L. 1970 - *Correlated changes in plant size and number in plant populations*. J. Ecol. 58: 467-485.
- WHITE J. 1981 - *The allometric interpretation of the self-thinning rule*. Jour. Theor. Biol., 89 (3): 475-500.
- XUE L., OGAWA K., HAGIHARA A., LIANG S., BAI J. 1999 - *Self-thinning exponents based on the allometric model in Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) and Prince Rupprecht's larch (*Larix principisrupprechtii* Mayr) stands*. For. Ecol. Manag. 117: 87-93
- YODA K., KIRA T., OGAWA H., HOZUMI K. 1963 - *Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions*. Journ. Biol. Osaka City University, 14: 107-129.
- ZEIDE B. 1987 - *Analysis of the 3/2 power law of self-thinning*. For. Sci., 33: 517-537.
- ZEIDE B. 1995 - *A relationship between size of trees and their number*. For. Ecol. Manag. 72: 265-272.
- ZHANG L., BI H., GOVE J.H., HEATH L.S. 2005 - *A comparison of alternative methods for estimating the self-thinning boundary line*. Canad. Journ. of For. Res. 35: 1507-1514.