

ROBERTO SCOTTI*

Proiezione a 10 anni del valore di un impianto: la modellistica dendroauxometrica

I. PREMESSE: LA DOMANDA ALLA QUALE IL LAVORO CERCA DI RISPONDERE

La coltivazione della douglasia in Toscana rappresenta una delle principali espressioni della selvicoltura di impianto nella regione. Per la descrizione del contesto si rimanda al contributo di la Marca (quivi). La coltivazione, proposta con obiettivi produttivi piuttosto definiti, ha conosciuto una fase di sviluppo sostenuto limitata a un arco di tempo relativamente breve. Quegli obiettivi non hanno trovato riscontro al tempo previsto per la raccolta e le coltivazioni sono state reindirizzate verso assortimenti di maggiore pregio. Al presente ci si domanda “quale vantaggio si potrebbe ottenere lasciando crescere gli impianti esistenti ancora per 10 anni?”.

Per una valutazione più semplice e focalizzata, si è preso in considerazione, come assortimento di pregio, il “toppo da sega” con diametro minimo in testa di 25 cm. In questo modo la domanda risulta più specifica: “di quanto aumenterà la quota della massa complessiva (e la massa stessa) valorizzabile come assortimento di pregio?”

Per rispondere a tale interrogativo offrendo valutazioni quantitative di comprovata affidabilità occorrerebbe disporre dei risultati delle elaborazioni di specifici studi realizzati in precedenza e progressivamente aggiornati. In mancanza di tali risultati occorrerebbe quantomeno realizzare una campagna di rilevamenti a questo fine disegnati e procedere alla elaborazione delle informazioni raccolte. In realtà non era praticabile neanche questa alternativa.

Si è quindi proceduto ad affrontare la “domanda di ricerca”, con l’obiettivo di indicare principalmente andamenti e ordini di grandezza dei fenomeni

* *NuoroForestrySchool, Dip. Agraria, Università di Sassari*

considerati, senza pretendere di produrre valutazioni quantitativamente affidabili nel dettaglio. In realtà, il senso e la motivazione del lavoro è di carattere più generale. Illustrando il percorso di elaborazione e i risultati ottenibili dallo sviluppo di un modello dendroauxometrico, ci si propone di fare conoscere meglio l'ambito disciplinare, di evidenziare quanto poco sia stato praticato, localmente, negli ultimi decenni e di mostrare quanto sarebbe utile riprendere le ricerche in questo campo.

2. DENDROAUXOLOGIA: UN AMBITO DISCIPLINARE DA SVILUPPARE

Come accennato, la risposta alla domanda posta si sviluppa in un ambito disciplinare che, nel contesto nazionale, non ha avuto grande supporto. Nel contesto internazionale tale ambito è tipicamente indicato con l'espressione "forest growth and yield" ed è oggetto di studi estesi e dettagliati, oltre che di specifici insegnamenti nell'ambito della formazione universitaria di base e avanzata. Un rilevante esempio di una sintesi recente è offerto dal lavoro di Pretzsch (2009), che espone la problematica affrontandone la complessità e la prossimità con ambiti di studio quali l'ecofisiologia o la simulazione matematica.

In particolare, per rispondere al problema posto, sono necessarie competenze in merito a due aspetti specifici, quasi del tutto trascurati nello sviluppo delle conoscenze a livello nazionale:

- la capacità di valutare la forma del fusto al fine di stimare la quota parte del volume assegnabile all'assortimento ricercato,
- la capacità di valutare come si modificheranno, in media, nei prossimi 10 anni, le caratteristiche principali dei popolamenti, in particolare le distribuzioni diametriche e le curve ipsometriche.

Da qualche decennio, nei contesti in cui la produzione legnosa è economicamente valorizzata, il procedimento di stima della forma dei fusti arborei è imperniato sulla modellizzazione del 'profilo del fusto', sulla calibrazione di una funzione che stima il diametro che il fusto presenta a una qualsiasi altezza, e, contemporaneamente, a che altezza il fusto presenta un dato diametro. In inglese la funzione è detta 'taper function' (funzione di rastremazione, Kozak et al., 1969), in italiano è di solito indicata come 'funzione di profilo' (Scrinzi et al., 1979).

Gli studi sull'accrescimento del volume complessivo, per quanto riguarda la douglasia in Italia, vedono ancora come riferimento cardine la tavola alsometrica pubblicata da Cantiani (1965). L'approccio di allora non con-

sente, in realtà, di produrre proiezioni di un certo dettaglio. In particolare non consente di sviluppare proiezioni relativamente alla modificazione della distribuzione diametrica. Oggi l'approccio a questo tipo di studi è fondato su presupposti concettuali e tecnici diversi ma rimane ineludibile il lavoro di base che sta a monte delle elaborazioni: la capacità e la possibilità di installare e mantenere attivi per decenni adeguati protocolli sperimentali, l'osservazione sistematica, attenta, dettagliata ed estesa della realtà forestale. Purtroppo gli studi successivi cui si accennerà in seguito, con i quali si è cominciato a utilizzare metodi e tecniche di maggiore efficacia descrittiva e analitica, non sono stati sviluppati al punto da produrre una sintesi operativa.

3. MATERIALI E METODI

3.1 *La base di dati e conoscenze disponibili*

Per conseguire uno sviluppo quantitativamente affidabile, il lavoro che ci siamo proposti di realizzare avrebbe richiesto, come accennato, tempi ed energie decisamente superiori a quelle disponibili. La decisione di procedere comunque, per quanto comportasse la disponibilità ad accettare approssimazioni eventualmente piuttosto grossolane, è stata motivata principalmente da una intenzione di comunicazione. Si vuole fare presente che, in ambito nazionale, la ricerca in dendroauxologia è molto carente, con impatti negativi di rilievo nella pianificazione e gestione forestale: le conoscenze e i dati disponibili non consentono nemmeno, ad esempio, di rispondere con la dovuta confidenza al quesito che questo lavoro discute.

Si è deciso di procedere solo dopo aver verificato che la base di conoscenze e di rilievi disponibile, per quanto frammentaria, consentisse di produrre quantomeno una prima approssimazione del risultato ricercato. I principali elementi di tale base sono elencati in box 1 e vengono nel seguito brevemente commentati.

In realtà, fino a qualche decennio fa, qualche opportunità di produrre pubblicazioni nell'ambito della dendroauxologia c'è stata, da circa 20 anni invece si osserva una grande carenza per quanto riguarda gli investimenti nella ricerca in questo campo, in Italia.

Con il dottorato Scotti (1988) ha sviluppato un modello matematico di simulazione della risposta incrementale delle pinete di domestico a fronte di diradamenti di diverso tipo e grado (Cantiani e Scotti, 1988). L'allora "Istituto di assestamento e tecnologia forestale, IATF-UniFI.it" contribuì

- Studi di modellistica dendro-auxometrica (1988, pino domestico; 1995, douglasia, 1999 '*Influence of silviculture on branching and taper*')
- Inquadramento della fertilità (Maetzke et al., 1994)
- Il software *TapeR*, package di R per le 'funzioni di profilo' (stima dell'altezza da terra a cui si trova un dato diametro e del volume sottostante - Kublin et al., 2013)
- Rilievi del prof. La Marca
 - 32 parcelle (UC), in impianti di 40-50 anni, condizioni gestionali reali
 - Rilievi relativi all'incremento diametrico in 5 parcelle
 - Ripetizione di rilievi diametro-altezza su 7 parcelle
 - 109 profili di fusti di douglasia (*d130* di 20-50 cm ed *htot* di 20-40 m)

Box 1 *Quadro di sintesi delle conoscenze e dei rilievi utilizzati nel lavoro*

al progetto di ricerca europeo "Forest planning and management tools (PL 920715)" (Nepveu, 1995) producendo un modello di simulazione dell'accrescimento di piantagioni di douglasia (Scotti et al., 1995). Il modello si propone di quantificare l'effetto congiunto di fattori stazionali, densità di impianto, livello di concorrenza corrente e di eventuali diradamenti recenti, sull'accrescimento in area basimetrica dei fusti delle diverse classi diametriche presenti. Con un successivo lavoro di dottorato l'indagine è stata approfondita cercando di quantificare gli effetti di tali fattori anche sulla forma dei fusti, sulla distribuzione e caratterizzazione dei nodi (Scotti, 1999).

In effetti il modello prodotto per il progetto europeo ha costituito il presupposto di base per lo sviluppo di questo lavoro. Le conoscenze che quel modello mette operativamente a disposizione sono state verificate, complementate e integrate con altri strumenti e rilievi più recenti.

Nel procedere alla stima dell'accrescimento degli alberi è generalmente necessario tenere in considerazione le differenze di potenzialità che le diverse stazioni presentano. In auxometria forestale, particolarmente in riferimento alla selvicoltura di impianto, l'inquadramento della fertilità è realizzato sulla base di una analisi, tipicamente su larga scala, dello sviluppo dell'"altezza dominante" in funzione dell'età. Al tempo dello sviluppo del modello di simulazione dell'accrescimento era stato da poco pubblicato (Maetzke e Nocentini, 1994) l'inquadramento, espresso in forma di semplice funzione algebrica, che aggiornava, sotto questo profilo, ed estendeva il lavoro guida prodotto da Cantiani (1965). Questo inquadramento ha quindi rappresentato il riferimento base utilizzato nello sviluppo di quel modello. In realtà, anche in relazione al tema 'inquadramento della fertilità' sarebbe necessario procedere a verifiche e probabilmente ad aggiornamenti del quadro sulla base delle os-

servazioni relative agli ultimi decenni (vedi, in questo volume, la Marca).

Il lavoro di Scotti del 1995 si limita alla simulazione dell'accrescimento in area basimetrica. Per produrre una valutazione relativa alla massa dell'assortimento 'da sega' è necessario disporre di stime del volume legnoso appositamente calibrate. Sulla base di esperienze recenti sviluppate su altre specie (Scotti et al., 2015) si è adottato anche in questo lavoro l'approccio alla formulazione della funzione di profilo proposto da Kublin et al. (2013) operativamente implementato nel pacchetto software per l'ambiente statistico "R", denominato TapeR (Kublin et al., 2015). Il procedimento produce una interpolazione "B-spline" (interpolazione polinomiale a tratti) in un contesto di "analisi a effetti misti", atto a separare l'influenza della correlazione interna alle osservazioni derivate da uno stesso fusto dal pattern che il complesso di fusti delinea.

Oltre che dai dati di conoscenza consolidata nelle pubblicazioni citate, il lavoro è stato reso possibile grazie alla diponibilità di una serie di rilievi che, per motivazioni diverse, il prof. La Marca ha continuato a effettuare proseguendo idealmente (e in qualche caso fattivamente) le indagini alla base dei lavori di modellistica prodotti 20 anni fa.

In particolare, per lo sviluppo delle funzioni di profilo, sono stati utilizzati rilievi relativi a 109 fusti di douglasia (con d_{130} di 20-50 cm e h_{tot} di 20-40 m). I soggetti rilevati afferiscono a un'area limitata e presentano quindi variabilità contenuta in termini di età, storia selvicolturale, fertilità e concorrenza locale.

Data la distribuzione diametrica di un popolamento, per procedere alla stima del volume complessivo (e della sua ripartizione in assortimenti) tramite le funzioni di profilo è necessario definire la curva ipsometrica (stabilire almeno un valore di altezza medio per ciascuna classe diametrica). Volendo confrontare la situazione produttiva attuale con quella attesa fra dieci anni è inoltre necessario ipotizzare come tali curve si modificano nel tempo. L'inquadramento della fertilità costituisce, a questo proposito, un riferimento che è necessario, per coerenza interna, considerare. La base dati disponibile per estendere la stima oltre al valore dell'altezza dominante, nell'approssimazione adottata, è limitata a 7 parcelle in cui i rilievi diametro-altezza sono stati ripetuti almeno una volta.

Il modello di simulazione dell'accrescimento procede stimando prima l'incremento di area basimetrica complessivo, espressione sintetica delle condizioni del popolamento (fertilità, età, selvicoltura, etc.), e successivamente valutando come si modifica la distribuzione diametrica a causa della ineguale distribuzione di tale incremento tra le classi presenti. La mortalità, in queste condizioni, è ininfluenza.

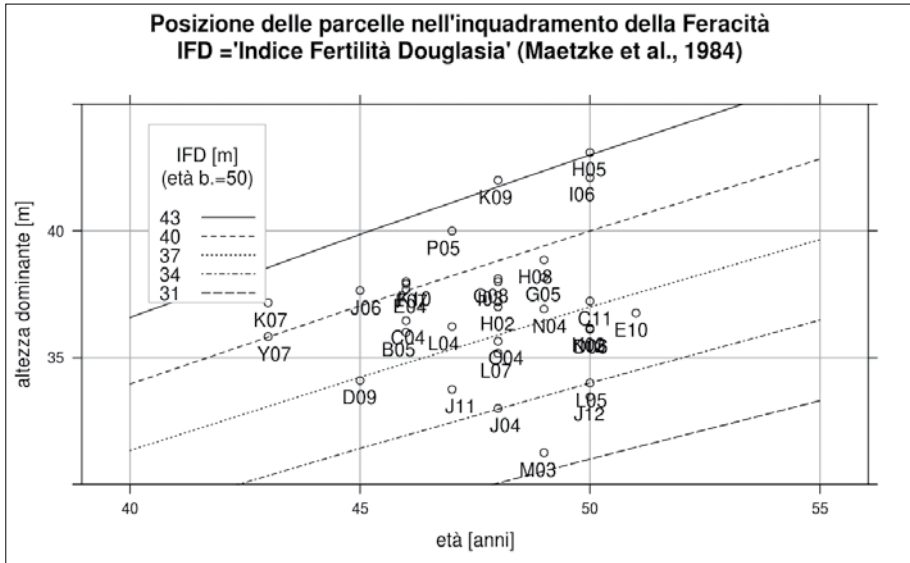
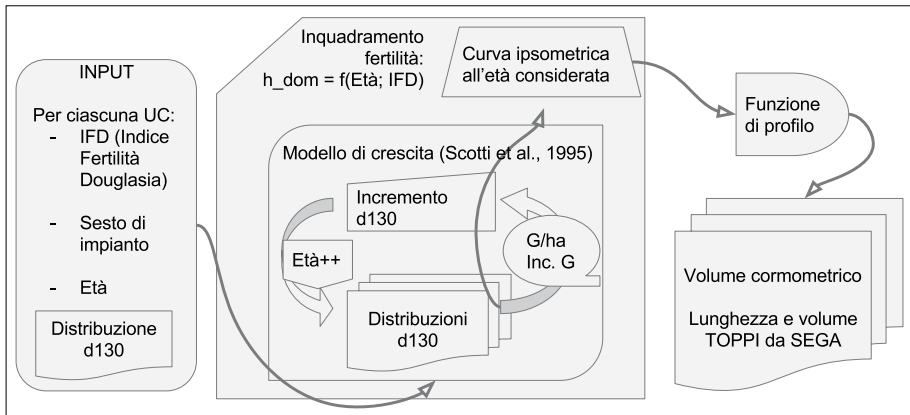


Fig. 1 *Caratterizzazione, dal punto di vista della fertilità, delle parcelle considerate*



Box 2 *Struttura del modello di stima e proiezione dei volumi per singola Unità Campionaria (UC)*

Le funzioni del modello destinate alla stima della distribuzione dell'incremento, avendo carattere squisitamente empirico ed essendo state calibrate su popolamenti analoghi ma con almeno 20 inverni in meno, sono risultate inadatte nelle applicazioni alle età attuali. Le 5 parcelle per le quali si disponeva di rilievi sulla relazione tra incremento diametrico e diametro hanno

permesso di effettuare una preliminare verifica e hanno chiaramente indicato tale inadeguatezza ma hanno costituito una base troppo limitata per la ricallibratura di funzioni originali. Si è quindi proceduto con semplici ipotesi sostitutive, basate su queste osservazioni.

Infine, il punto di forza delle indicazioni quantitative prodotte è costituito da un insieme di qualche decina di parcelle rilevate recentemente per esigenze operative, al fine di caratterizzare la provvigione presente negli impianti di una area relativamente eterogenea. In sostanza il lavoro sviluppa, per singola parcella, una stima della consistenza che ciascuna avrà tra 10 anni, in termini di volume complessivo e di massa dei “toppi da sega”, considerando il set di rilievi rappresentativo del ventaglio di situazioni presenti degli impianti di maggiore importanza in Toscana.

3.2 *La struttura del modello utilizzato*

Il box 2 illustra graficamente le relazioni tra le componenti del modello e il flusso dell’elaborazione che produce.

La cartella centrale include gli aspetti direttamente dipendenti dall’inquadramento della fertilità. A sinistra sono rappresentate le grandezze specificate in ingresso al modello per ciascuna Unità Campionaria (UC), a destra l’output. Tramite la funzione di profilo, a tutte le età di interesse (quella iniziale, quella finale ed eventualmente a età intermedie), per ogni classe diametrica, si registrano: numerosità, volume complessivo e quota parte utilizzabile come “toppo da sega”.

In input la parcella (UC) è caratterizzata dalla distribuzione diametrica osservata all’età attuale e dal valore di altri parametri. Vengono evidenziati in particolare, oltre all’età, il sesto di impianto e l’indice di fertilità per la douglasia (IFD). Questo ultimo è rappresentato dal valore dell’altezza dominante all’età di riferimento (30 anni) valutata, tramite la funzione che definisce l’inquadramento adottato (Maetzke et Al., 1994), in base ad altezza dominante ed età attuale. La funzione di stima dell’incremento complessivo di area basimetrica quantifica anche l’effetto di lungo periodo della densità iniziale determinato dal sesto di impianto. Per questo motivo occorre specificare anche tale valore in ingresso.

Il modello di crescita procede iterativamente. Nota la distribuzione diametrica (e i valori degli altri parametri) a una data età, si calcola l’area basimetrica presente (G) e, tramite la funzione [1] (Zeide, 1989), si stima (G’) l’incremento di area basimetrica complessivo per quell’annata (box 3).

$G' = \gamma * \left(\frac{G}{A}\right) * [\ln(\alpha) - \ln(G)]$ <p>funzione [1]</p> <p>con:</p> $\begin{cases} \ln(\alpha) = \alpha_0 + \alpha_1 * IFD * PD \\ \gamma = \gamma_1 * \left(\frac{1}{IFD}\right) + \gamma_2 * 10^{-6} * N + \gamma_3 * \sqrt{TR_{pct}} \end{cases}$ <p>dove:</p> <p>IFD = site index [m] @ 30 years A = stand age N = number of trees PD = N at plantation TR_{pct} = N% removal by last thinning G = basal area [m²*(ha)⁻¹] G' = basal area increment [m²*(ha*year)⁻¹]</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Coeff.</th> <th>Estimate</th> <th>Std err</th> <th>Prob > T </th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>α_0</td> <td>4.648</td> <td>0.168</td> <td></td> </tr> <tr> <td>α_1</td> <td>0.000</td> <td>0.000</td> <td></td> </tr> <tr> <td>γ_1</td> <td>27.536</td> <td>0.668</td> <td>0.0001</td> </tr> <tr> <td>γ_2</td> <td>-0.074</td> <td>0.012</td> <td>0.0001</td> </tr> <tr> <td>γ_3</td> <td>-0.008</td> <td>0.001</td> <td>0.0001</td> </tr> </tbody> </table>	Coeff.	Estimate	Std err	Prob > T	α_0	4.648	0.168		α_1	0.000	0.000		γ_1	27.536	0.668	0.0001	γ_2	-0.074	0.012	0.0001	γ_3	-0.008	0.001	0.0001
Coeff.	Estimate	Std err	Prob > T																						
α_0	4.648	0.168																							
α_1	0.000	0.000																							
γ_1	27.536	0.668	0.0001																						
γ_2	-0.074	0.012	0.0001																						
γ_3	-0.008	0.001	0.0001																						

Box 3 Funzione di stima dell'incremento di area basimetrica del popolamento (G') (da Scotti, 1995)

<p style="text-align: right;">funzione [2]</p> $inc.d_{130}(i, e) = b_0 + b_1 * d_{130}(i, e)$ <p>con:</p> $\begin{cases} b_1 = 0.017 \\ d_g = \sqrt{\frac{G}{N} * \frac{40000}{\pi}} \\ inc.d_g = \sqrt{\frac{(G+G')}{N} * \frac{40000}{\pi}} - d_g \\ b_0 = inc.d_g - d_g * b_1 \end{cases}$
--

Box 4 Funzione di distribuzione dell'incremento diametrico

Quantificato l'accrescimento complessivo si procede a distribuirlo, come incremento diametrico, tra le classi diametriche presenti. La distribuzione empirica degli incrementi di diametro presenta forme sfumate e molto variabili. La funzione sviluppata nel '95, non è risultata applicabile alle condizioni delle parcelle considerate. Pur conservandone un assunto concettuale molto conservativo (la funzione è vincolata ad assegnare al diametro di area basimetrica media un incremento pari alla media degli incrementi) la funzione è stata riformulata adottando drastiche semplificazioni (box 4, funzione [2]).

A questo punto si incrementa l'età del popolamento di una unità e, nel ciclo di calcolo interno, semplicemente si aggiornano i valori centrali (oltre eventualmente agli estremi) degli intervalli diametrici a cui sono assegnate le singole frequenze (box 5, funzione [3]).

$$\forall \text{ classe } i: d_{130}(i, e+1) = d_{130}(i, e) + inc \cdot d_{130}(i, e) \quad \text{funzione [3]}$$

Box 5 *Aggiornamento dei valori centrali delle classi della distribuzione diametrica*

$$\begin{aligned} & \text{funzione [4]} \\ h(d, e) &= b_0(e) + b_1(e) * \log(d) \\ \text{con:} & \\ \begin{cases} b_1(e) &= -2.4 + 0.44 * e \\ b_0(e) &= h_{dom}(e) - d_{dom}(e) * b_1(e) \end{cases} \end{aligned}$$

Box 6 *Modellizzazione delle curve ipsometriche (e = Età, b1(e) = pendenza)*

È solo ai fini delle stime di volume, quindi per determinate età, che si procede alla redistribuzione delle frequenze su intervalli diametrici di ampiezza costante, quindi alla determinazione della curva ipsometrica per quell'età e poi alla determinazione degli specifici profili per ogni classe, con il calcolo del volume complessivo e di singoli assortimenti.

Il modulo di stima della specifica curva ipsometrica da utilizzare nelle diverse situazioni considerate è stato definito agganciando il ragionamento allo sviluppo dell'altezza dominante, riferimento che, per coerenza interna, occorre rispettare, e sfruttando il limitato insieme di rilievi disponibile (le 7 parcelle in cui i rilievi diametro-altezza sono stati ripetuti almeno una volta), adottando approssimazioni (box 6, funzione [4]).

Come accennato, per la modellizzazione della forma dei fusti si è fatto ricorso al pacchetto software per l'ambiente statistico "R", denominato "TapeR" (Kublin et al., 2015) recentemente utilizzato con successo (Scotti et al, 2015). La consistenza della base di dati disponibile ha permesso di produrre una modellizzazione abbastanza affidabile, espressiva della effettiva evoluzione del profilo dei fusti con l'età, nelle distinte condizioni di crescita.

3.3 *Caratterizzazione delle parcelle forestali considerate*

Le parcelle di douglasia per le quali, nell'ambito del presente studio, si è proceduto alla proiezione a 10 anni per valutare come e quanto si modifica la massa presente e la sua distribuzione in quote di valore molto diverso, sono state rilevate nell'ambito di una valutazione operativa, non sono il frutto di una selezione finalizzata solo alla ricerca. Fra le diverse decine di rilievi disponibili le 32 parcelle considerate sono quelle per le

uc	Age	Hdom	Ifd	Ndoug/ ha	Gdoug/ ha	Gother/ ha	dg_ doug	min_ dbh	max_ dbh
B05	46	36.0	26.0	417.6	41.7	8.0	35.7	11	59
C04	46	36.5	26.4	438.0	44.1	0.0	35.8	17	52
C11	50	37.2	25.3	570.4	60.8	2.7	36.8	15	59
D06	50	36.1	24.5	346.3	37.3	4.2	37.0	15	59
D09	45	34.1	25.0	371.8	52.1	1.8	42.2	25	56
E04	46	37.7	27.3	325.9	43.4	1.2	41.2	19	60
E10	51	36.8	24.6	565.3	51.2	2.3	34.0	0	58
F07	46	37.9	27.5	300.5	40.5	0.4	41.4	24	59
G05	49	38.2	26.4	702.8	71.5	0.0	36.0	17	52
G08	48	38.1	26.8	468.6	50.7	0.2	37.1	16	56
H02	48	37.0	25.9	387.1	45.2	6.1	38.6	15	57
H05	50	43.1	29.6	448.2	63.7	0.0	42.5	21	62
H08	49	38.9	26.9	356.5	57.7	0.3	45.4	27	59
I03	48	38.0	26.7	438.0	51.0	1.9	38.5	14	64
I06	50	42.1	28.8	356.5	46.6	0.0	40.8	18	62
I12	50	36.2	24.5	478.7	51.6	0.3	37.0	18	55
J04	48	33.0	23.0	280.1	34.5	6.2	39.6	21	60
J06	45	37.7	27.8	341.2	40.0	1.4	38.6	24	54
J11	47	33.8	23.9	468.6	51.0	0.0	37.2	17	54
J12	50	33.5	22.6	438.0	47.8	2.1	37.3	10	58
K03	50	36.2	24.5	285.2	42.8	0.0	43.7	15	62
K07	43	37.2	28.4	331.0	45.5	0.0	41.8	31	56
K09	48	42.0	29.7	341.2	62.8	0.1	48.4	17	68
K10	46	38.0	27.6	275.0	39.4	0.0	42.7	24	63
L04	47	36.2	25.8	249.6	36.0	0.9	42.8	29	61
L05	50	34.0	22.9	427.8	49.5	2.1	38.4	25	61
L07	48	35.2	24.6	402.3	49.6	1.0	39.6	20	58
M03	49	31.3	21.3	244.5	24.1	0.2	35.4	25	44
N04	49	36.9	25.5	254.6	42.5	0.0	46.1	28	60
O04	48	35.7	24.9	402.3	45.1	3.5	37.8	17	52
P05	47	40.0	28.6	203.7	36.0	7.1	47.5	22	59
Y07	43	35.8	27.3	641.7	49.0	0.3	31.2	0	49

Tab. 1 Sintesi dei rilievi nelle parcelle considerate per la proiezione

quali è disponibile tutta l'informazione di base: oltre alla distribuzione diametrica, le indicazioni relative a età e altezza dominate (tab. 1).

Si tratta di aree di saggio circolari di 25 m (topografici) di raggio dislocate soggettivamente a rappresentare le diverse situazioni presenti. Gli impianti hanno una comune impronta colturale: sesto iniziale di 2.5m*2.5m (1600 p/ha), diradamento sistematico di una fila su 3 a circa 18 anni e ulteriore riduzione, a carattere selettivo, circa 10 anni dopo, a circa $\frac{2}{3}$ del

numero presente. La eventuale presenza di specie diverse dalla douglasia non è significativa.

Le parcelle presentano età contenute in un intervallo relativamente limitato, esteso meno di 10 anni, da 43 a 51 anni. Il ventaglio di fertilità saggiate, con riferimento all'età base di 50 anni, quella considerata dagli autori dell'inquadramento considerato, è espresso da valori di *site index* che spaziano (in modo non uniformemente distribuito) da 32 m a 43 m coprendo le quattro classi migliori delle cinque che il lavoro originale presenta (fig. 1).

Con riferimento (assolutamente equivalente) a una età base di 30 anni l'intervallo diventa 21m, 30m (tab. 1).

Le densità correnti presentano una ampia variabilità, spaziando da 200 a 700 piante a ettaro, così come i valori di area basimetrica che oscillano da meno di 30 a più di 70 m²/ha.

4. RISULTATI

4.1 *Stima dell'accrescimento diametrico*

Il procedimento prende le mosse dalla stima dell'accrescimento di area basimetrica complessiva del popolamento, determinato tramite la funzione [1]. Sfruttando le 5 parcelle per le quali sono disponibili misure di incremento di area basimetrica (quantificati sulla base di rilievi sulla relazione tra incremento diametrico e diametro), i valori stimati dalla funzione sono stati messi a confronto con quelli osservati. Per quanto il campione disponibile sia piuttosto esiguo, si è comunque proceduto a definire una correzione proporzionale della distorsione osservabile (fig. 2).

L'accrescimento complessivo viene poi ripartito tra le classi diametriche presenti stimando, per ciascuna un incremento di diametro. Per assicurare una fondamentale coerenza tra accrescimento complessivo e l'insieme delle stime di incremento diametrico, la funzione di ripartizione è vincolata ad assegnare al *diametro di area basimetrica media* ($g=G/N_{HA}$) l'incremento diametrico cui consegue un accrescimento areale pari alla *media degli incrementi di area basimetrica* ($g'=G'/N_{HA}$).

Essendo risultato non applicabile, a queste età, l'approccio alla ripartizione sviluppato in relazione ai rilievi disponibili nel 1995, si è adottato un approccio semplicistico, calibrato utilizzando i dati delle 5 parcelle per le quali si dispone di rilievi sulla relazione tra incremento diametrico e diametro. La funzione di distribuzione è approssimata da una retta. Le pendenze

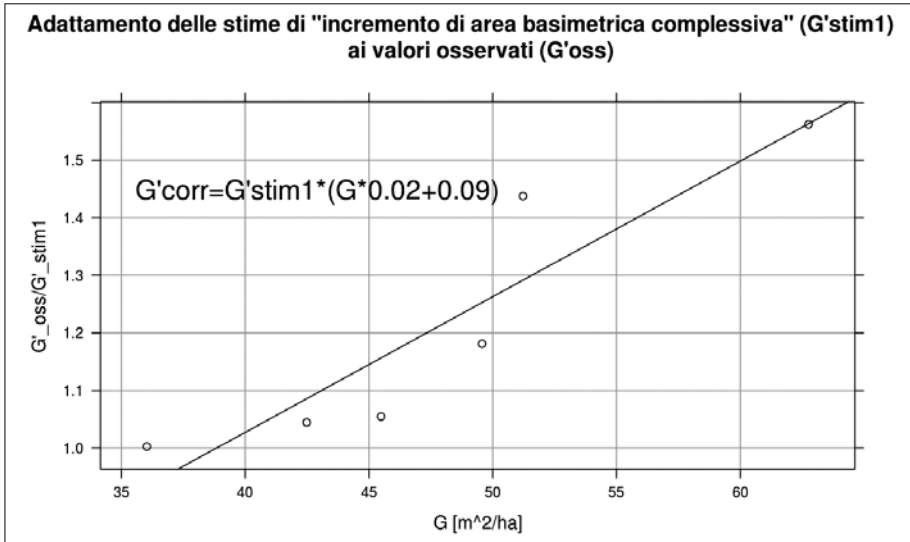


Fig. 2 Verifica e adattamento della stima dell'accrescimento di area basimetrica complessiva (G') prodotto dalla Funzione [1], in base al confronto con valori di accrescimento osservati

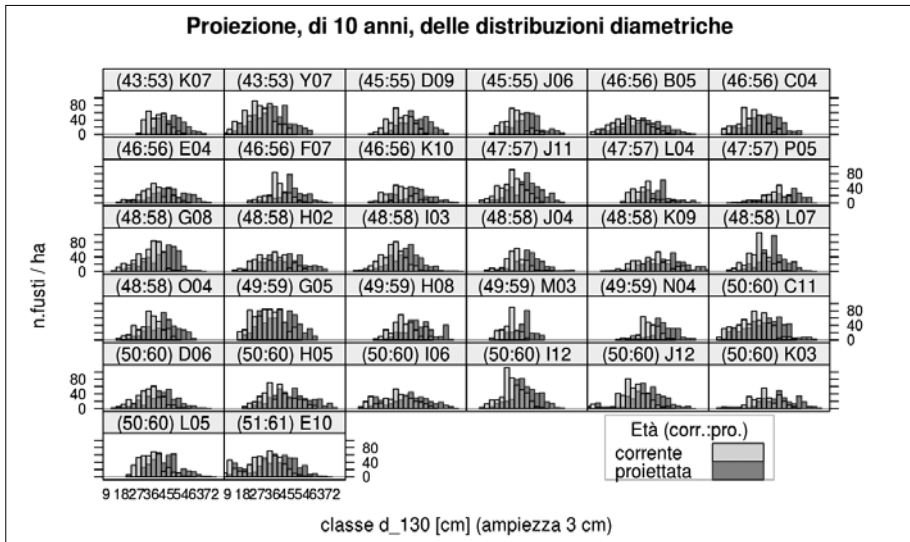


Fig. 3 Proiezione a 10 anni delle distribuzioni diametriche osservate ora nelle UC

delle rette calibrate indipendentemente per ciascuna parcella non presentano differenze significative, di conseguenza si adotta un valore medio costante (pend=0.017). Dato il vincolo di cui sopra la funzione che stima l'incremento diametrico per ciascuna classe diametrica è determinata.

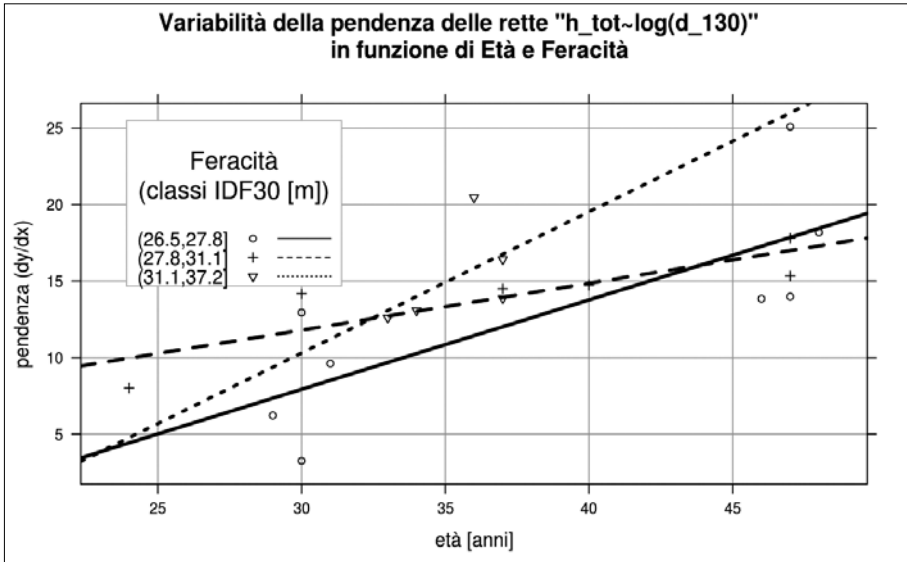


Fig. 4 Studio per la modellizzazione delle relazioni ipsometriche

In figura 3 sono rappresentati i risultati della simulazione per quanto concerne lo sviluppo della distribuzione diametrica.

4.2 Stima altezza, necessità e limiti di un approccio semplificato

La funzione che stima la curva ipsometrica, è stata sviluppata adottando gli assunti e le approssimazioni seguenti.

L'inquadramento della fertilità determina l'altezza dominante corrente, noti il valore dell'indice (IFD o *site index*) e l'età corrente. Si assegna tale valore di altezza al valore diametrico corrispondente all'area basimetrica media tra i fusti "dominanti" (i 100 fusti a ettaro di maggiori dimensioni diametriche).

Si assume come modello per le curve ipsometriche la funzione lineare con trasformazione logaritmica del diametro.

A questo punto rimane solo da determinare la pendenza della curva. In base all'analisi delle 7 parcelle per le quali è disponibile una ripetizione del rilievo delle altezze a distanza di tempo, si è verificato che il modello adottato producesse una compensazione ragionevole e si è proceduto a valutare se le variazioni della pendenza della curva dovessero essere imputate a fattori evidenti. In particolare sono stati considerati i fattori: età e fertilità.

Il grafico in figura 4 illustra la situazione riscontrata. La pendenza aumenta

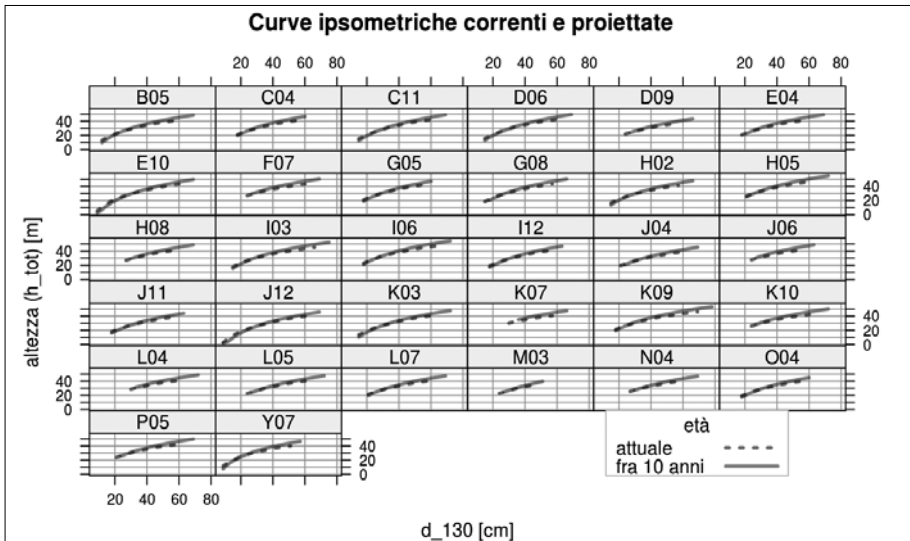


Fig. 5 Curve ipsometriche corrispondenti alle distribuzioni diametriche prodotte (linea tratteggiata = età iniziale, continua = età finale (10 anni dopo))

abbastanza significativamente con l'età mentre l'influenza della fertilità non risulta coerente e significativa. Che la pendenza aumenti con l'età, in realtà, appare in contrasto con un andamento più generale. Di solito si riscontra un appiattimento della curva ipsometrica a seguito dell'invecchiamento. Tuttavia, per ora, attesi i risultati conseguiti (vedi fig. 4), si assume, ai fini della proiezione in oggetto, l'andamento osservato.

Il box 6 presenta la struttura della funzione che definisce le curve ipsometriche. Il modello è lineare con il logaritmo del diametro come predittore. La pendenza della retta ($b_1(e)$) è determinata in funzione dell'età (i coefficienti derivano dalla regressione generale sui dati in figura 4 con *pendenza - Età*). La retta è vincolata a passare per il punto di coordinate $\{d_{dom}(e); h_{dom}(e)\}$ con, $d_{dom}(e)$, diametro dominante all'età e , determinato dall'analisi della distribuzione diametrica e $h_{dom}(e)$, altezza dominante all'età e , derivata dall'inquadramento della fertilità.

La figura 5 espone i risultati conseguiti utilizzando la funzione sviluppata nelle parcelle considerate. Si percepisce principalmente l'estensione della curva più alta, quella relativa all'età finale, oltre il limite destro di quella più bassa, relativa all'età iniziale. Tale estensione corrispondente a quanto si è estesa verso destra la distribuzione diametrica. Solo in alcuni casi si apprezza il fatto che la curva finale, essendo più pendente, per costruzione, rispetto a quella iniziale, nella porzione sinistra rimane più bassa. In realtà tale evenienza non rappresenta necessariamente una incongruenza o, peggio, un errore. Non si

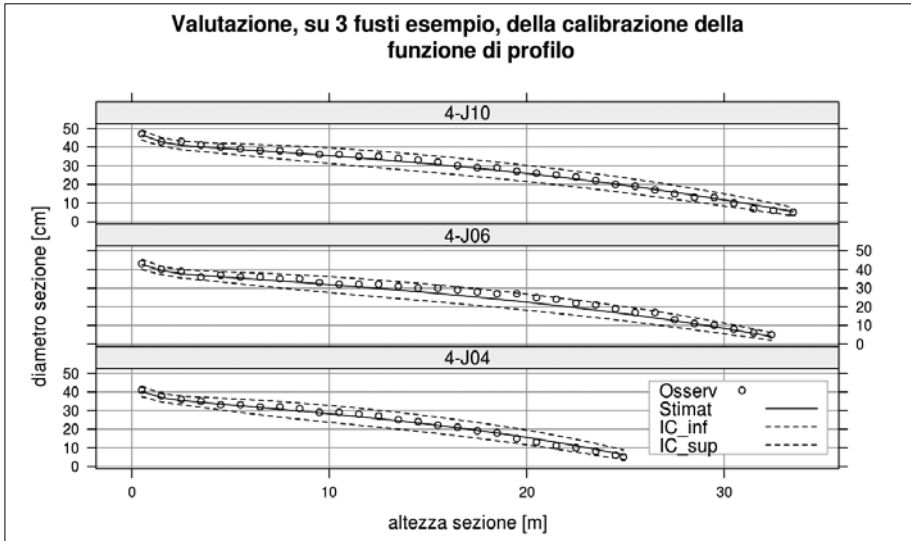


Fig. 6 Funzione di profilo. Tre fusti utilizzati per la calibrazione del modello, a confronto con la stima e l'intervallo di confidenza della stima

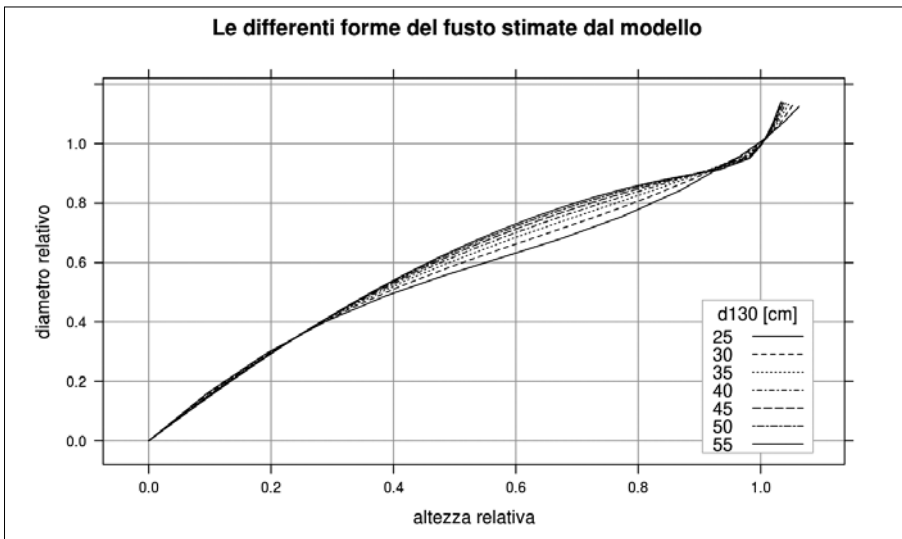


Fig. 7 Funzione di profilo. Adattando, secondo un progressione media, l'altezza del fusto al diametro considerato, il grafico mostra come si modifica il "profilo relativo" (determinato assegnando coordinate (0,0) ed (1,1) rispettivamente all'apice ed al diametro ad 1.3 m)

tratta infatti alberi che crescendo, riducono la loro altezza. Si tratta invece di alberi piccoli e bassi i quali, crescendo in condizioni nettamente dominate,

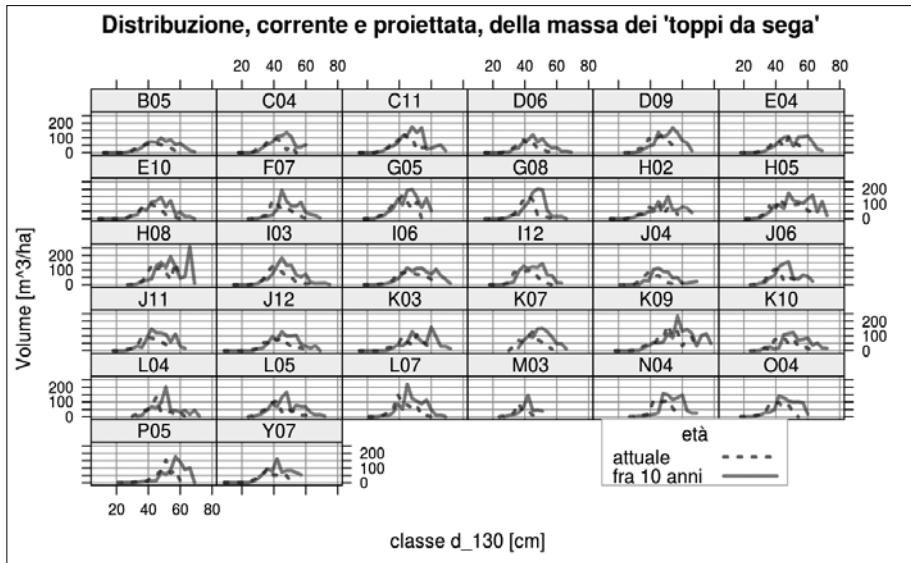


Fig. 8 Il dettaglio dei risultati della proiezione sulla crescita delle parcelle considerate (linea tratteggiata = età attuale, linea continua = proiezione)

acquistano diametro ma, nello sviluppo in altezza, non raggiungono i valori a cui erano arrivati i fusti che avevano raggiunto quel diametro 10 anni prima.

4.3 Funzione di profilo, stima volume assortimento "da sega"

La modellizzazione della forma dei fusti è stata sviluppata sfruttando il pacchetto software per l'ambiente statistico "R", denominato "TapeR" (Kublin et al., 2015) e l'esperienza recentemente acquisita sul tema (Scotti et al., 2015). La figura 6 espone un esempio dei grafici di verifica esaminati. I profili osservati (cerchietti), dei tre fusti modello presi ad esempio, sono discretamente interpolati dalla curva centrale, prodotta dal modello utilizzando solo i valori di d_{130} e h_{tot} del fusto considerato. Il procedimento stima anche la confidenza del profilo generato. I valori osservati risultano ben contenuti nei limiti di confidenza segnalati nel grafico dalle linee tratteggiate.

La figura 7 è stata generata per illustrare come e quanto si modifica la forma del fusto, determinata tramite il modello, al variare dei parametri chiave: diametro a petto d'uomo (d_{130}) e altezza totale (h_{tot}). I diametri osservati sono principalmente compresi tra 25 cm e 55 cm. Per una valutazione semplice, a ogni valore di diametro si è assegnata una altezza crescente in base alla

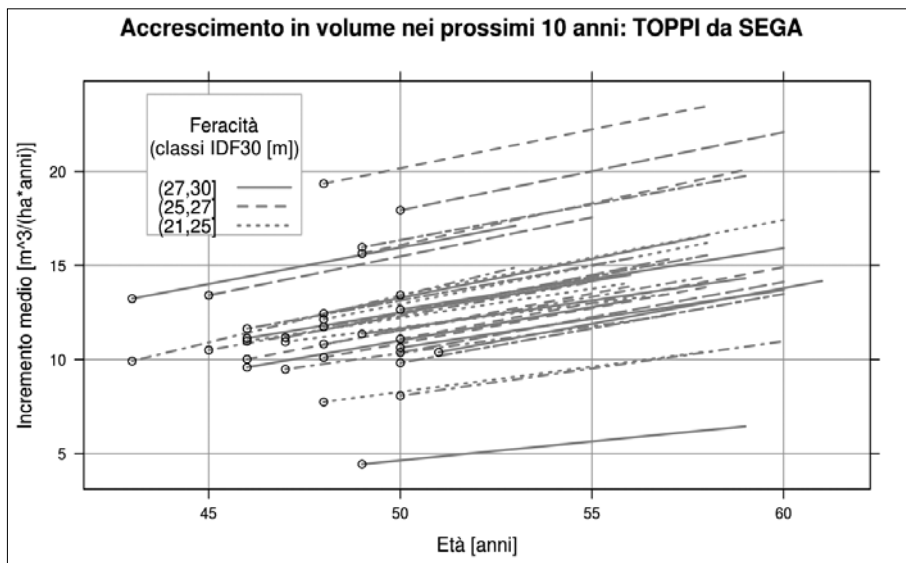


Fig. 9 Sintesi: stima all'attualità e proiezione della massa lorda complessiva dell'assortimento "toppo da sega" (25cm in punta) classificando le parcelle in base alla fertilità

progressione media osservata. Il grafico evidenzia quanto, al crescere delle dimensioni, nella porzione inferiore del fusto, si riduce la rastremazione ovvero la porzione di maggiore interesse diventa più 'cilindrica', in pratica "portare il toppe al tondo" comporta minori scarti.

4.4 Variazioni, nelle parcelle forestali considerate, della ripartizione del volume legnoso in assortimenti, nell'arco dei prossimi 10 anni

Le proiezioni che il modello produce sono espone nelle figure 8 e 9, rispettivamente con maggiore dettaglio e in modo più sintetico. Entrambe i grafici si riferiscono alla quota parte della massa complessiva destinabile all'assortimento di maggiore valore. Ovviamente, si potrebbero produrre grafici analoghi sia per la massa complessiva che per assortimenti diversamente definiti.

Il grafico in figura 8 evidenzia il dettaglio della distribuzione delle masse in funzione dei diametri e consente di apprezzare e valutare le relazioni tra struttura e produzione.

I segmenti di retta in figura 9 semplicemente congiungono il valore di massa stimato all'attualità con il corrispondente valore proiettato. La classificazione in base alla fertilità di ciascuna parcella (definita cercando di ottenere

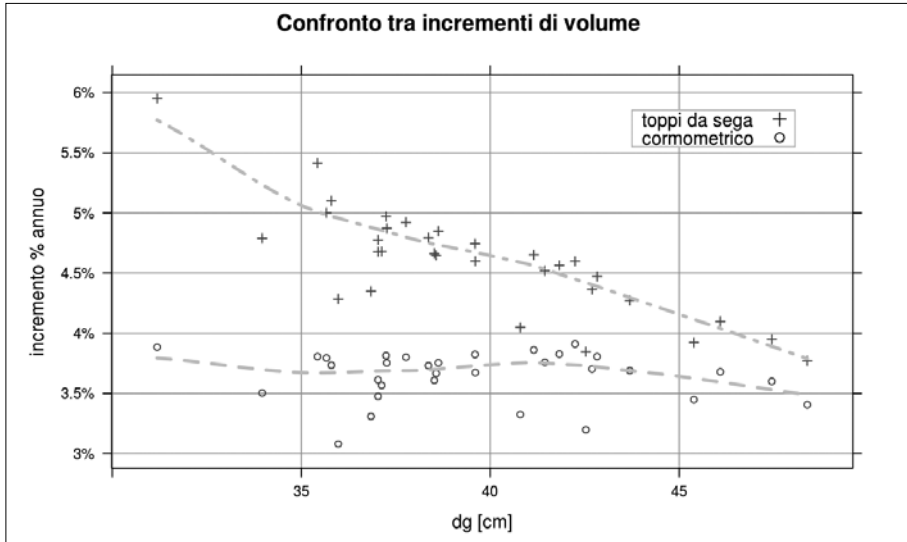


Fig. 10 *Variazione dei tassi di accrescimento stimati per il prossimo decennio in funzione del diametro di area basimetrica media*

una equiripartizione delle parcelle tra le classi) evidenzia una scarsa influenza di questo fattore sulle produzioni osservabili e prevedibili.

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

A evidenziare le relazioni tra struttura e produzione, il grafico in figura 10 mette a confronto la variazione dell'incremento percentuale di massa in funzione del diametro di area basimetrica media del popolamento, distinguendo tra volume cormometrico e massa dell'assortimento di valore considerato. L'innalzamento del diametro medio è uno degli effetti caratteristici di diradamenti a carattere selettivo, oltre che conseguenza di densità di impianto limitate. Mentre per la massa pregiata i tassi risultano decrescenti con il diametro, non si osservano invece variazioni significative per il volume cormometrico. Da questo punto di vista quindi, la convenienza a lasciare crescere ancora i popolamenti appare maggiore nelle situazioni a diametro medio relativamente minore.

In generale, comunque, indipendentemente dall'età attuale dei popolamenti, mentre il volume cormometrico aumenterà di meno del 5% all'anno, il volume dei "toppi da sega" si accrescerà, nei prossimi 10 anni, di più del 6% all'anno (fig. 11).

Il modello dendroauxometrico sviluppato è presentato in questo lavoro

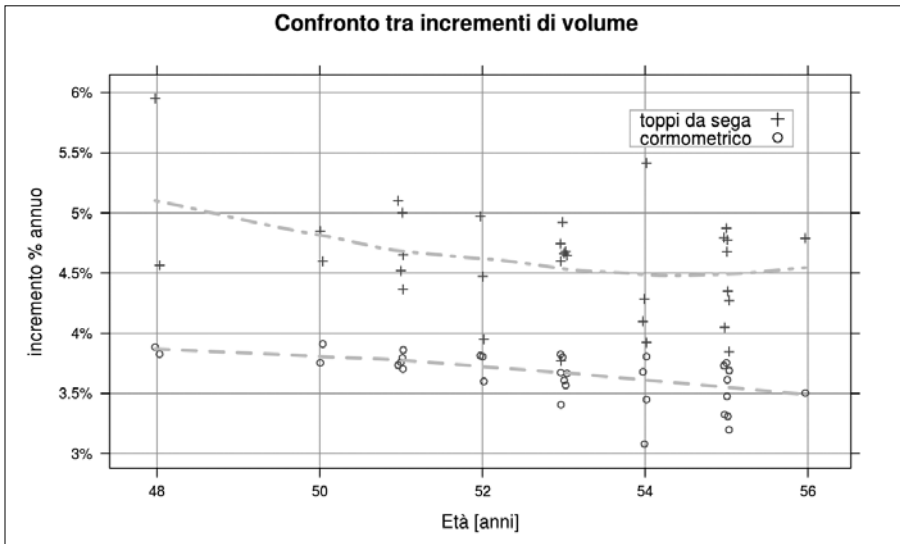


Fig. 11 *Distribuzione dei tassi di accrescimento stimati per il prossimo decennio in funzione dell'età attuale del popolamento*

principalmente ai fini di un più generale commento teso a evidenziare la necessità di dedicare maggiore attenzione e sostegno allo sviluppo degli studi e delle ricerche in questo campo, tenendo conto del fatto che si tratta di investimenti che devono considerare il lungo periodo.

La struttura di base e alcune componenti fondamentali del modello presentano solidità sufficiente a conferire al lavoro nel suo complesso, nonostante le approssimazioni cui si è dovuto ricorrere per mancanza di ricerche specifiche, un minimo di affidabilità. L'andamento generale e i rapporti tra le grandezze considerate dovrebbero rappresentare correttamente la realtà mentre non è possibile pretendere, in queste condizioni, precisione e accuratezza dei valori quantitativi.

Sistematizzare, condividere e dare continuità ai rilievi in dispositivi sperimentali di misura dello sviluppo, dell'accrescimento e della produzione di impianti e boschi è fondamentale per avere qualche riferimento con cui orientare le scelte di oggi, pensando al domani.

RIASSUNTO

Nell'attuale contingenza della coltivazione delle douglasia, in particolare in Toscana, sono molti gli impianti potenzialmente utilizzabili e potrebbe essere di interesse valutare l'eventuale convenienza a posporre di una decina di anni l'esecuzione dell'intervento. Nel proporre una

tentativo di risposta di prima approssimazione, il lavoro evidenzia la forte carenza della ricerca nazionale in dendro-auxologia e chiede che si provveda a creare le condizioni affinché il lavoro sperimentale e di elaborazione teorica in questo campo possa essere riattivato.

ABSTRACT

Given the results of different experimental trials, some decades ago, relatively important investments have been undertaken planting Douglas fir in Italy and particularly in Tuscany. Many plantations are now potentially harvestable. It could be of interest to evaluate the advantages of postponing tree fellings for yet another decade. Developing a first approximation answer to this evaluation, the work highlights the serious shortage of national forest growth & yield research and asks that steps be taken to create the conditions for the reactivation of experimental and theoretical work in this field in Italy.

RIFERIMENTI

- CANTIANI M. (1965): *Tavola alsometrica della Pseudotsuga douglasii in Toscana*, «Ricerche sperimentali di dendrometria e auxometria», Ist. Assesamento Forestale dell'Università di Firenze, fasc. IV, pp. 32-73.
- CANTIANI M.G., SCOTTI R. (1988): *Le fustaie di pino domestico del litorale tirrenico: studi sulla dinamica di accrescimento in funzione di alcune ipotesi selvicolturali alternative*, «Annali dell'Istituto Sperimentale per l'Assesamento Forestale e per l'Alpicoltura», vol. XI, Trento, 1988. pp. 1-54.
- KOZAK A., MUNRO D.D., SMITH J.H.G. (1969): *Taper functions and their application in forest inventory*, «Forest Chronicle», 45, 4, pp. 278-283.
- KUBLIN E., BREIDENBACH J. (2015): *TapeR: Flexible tree taper curves based on Semiparametric Mixed Models*, R package version 033.3.
- KUBLIN E., BREIDENBACH J., KAENDLER G. (2013): *A flexible stem taper and volume prediction method based on mixed-effects B-spline regression*, «European J For Res», 132, pp. 983-997.
- MAETZKE F., NOCENTINI S. (1994): *L'accrescimento in altezza dominante e la stima della fertilità in popolamenti di douglasia*, «Italia Forestale e Montana», vol. XLIX, fasc. n. 6, pp. 582-594. ISSN: 0021-2776.
- NEPVEU G. (a cura di) (1995): *EEC AIR Project "Forest Planning and Management Tools (PL 920715): Final Condensed Report of the Work Performed Between November 1st, 1992 and October 31, 1995*, publication Equipe de Recherches sur la Qualité des Bois, INRA, Nancy. (<https://books.google.it/books?id=vaPAPgAACAAJ>)
- SCOTTI R., CORONA P., LA MARCA O., MARZILLIANO P., TARCHIANI N., TOMAIUOLO M. (1995): *Growth model for Italian Douglas fir plantations, in Recent advances in forest mensuration and growth and yield research. Proceedings from 3 sessions of Subject Group S4.01 'Mensuration, Growth and Yield' at the 20th World Congress of IUFRO, held in Tampere, Finland, 6-12 August 1995*, a cura di J.P. Skovsgaard, H. E. Burkhart, Hørsholm, Denmark, Ministry of Environment and Energy, Danish Forest and Landscape Research Institute.

- SCOTTI R. (1988): *Modello alsometrico per le pinete litoranee di Pinus pinea*, «Annali dell'Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura», vol. XI, Trento, pp. 55-142.
- SCOTTI R., MURA M., PIREDDA I., CAMPUS S., LOVREGLIO R. (2015): *Gestione forestale sostenibile in Sardegna: dal legno al legname, le funzioni di profilo*, in *Atti del II Congresso Internazionale di Selvicoltura. Progettare il futuro per il settore forestale*, Firenze, 26-29 novembre 2014, Firenze: Accademia Italiana di Scienze Forestali, vol. 2, pp. 1056-1061. ISBN 978-88-87553-21-5. <http://dx.doi.org/10.4129/2cis-rs-ges>
- SCOTTI R. (1999): *Modelling the influence of silviculture on branching and taper functions in Italian Douglas-fir plantations*, in *Proceedings of the 3rd Workshop IUFRO WP S5.01-04, Connection Between Forest Resources and Wood Quality: Modelling Approaches and Simulation Software, September 5-12, 1999, La Londe Les Maures, France*, a cura di G. Nepveu, International Union of Forest Research Organizations, Vienna. pp. 72-82. Pubblicato da: INRA Nancy, Publication year: 1999 (644 p.), Series title: Publication Equipe de Recherches sur la Qualité des Bois (1999/2).
- SCRINZI G., TABACCHI G. (1979): *Interpretazione matematica del fenomeno formale dell'abete rosso (Picea abies Karst) del Centro-Cadore*, «Annali dell'Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura», 7, pp. 147-186.
- ZEIDE B. (1989): *Accuracy of equations describing diameter growth*, «Canadian Journal of Forest Research», 19 (10), pp. 1283-1286.

