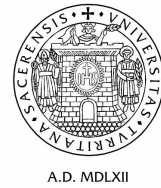




UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SASSARI



FACOLTÀ DI AGRARIA

DIPARTIMENTO DI ECONOMIA E SISTEMI ARBOREI

**DOTTORATO DI RICERCA IN "AGROMETEOROLOGIA ED
ECOFISIOLOGIA DEI SISTEMI AGRARI E FORESTALI"**

XX ciclo

**STRUMENTI DENDROMETRICO-INVENTARIALI PER LA STIMA
DELLA FITOMASSA EPIGEA NELLA LECCETA MEDITERRANEA**

Dottorando: Dr. Maurizio Laconi

Coordinatore: Prof. Piero Deidda

Docente guida: Prof. Donatella Spano

Docente guida: Dr. Pierpaolo Duce

ANNO ACCADEMICO 2007/2008

*a tutte le persone che con il loro
contributo mi hanno aiutato
a realizzare questo lavoro*

ABSTRACT

The Kyoto Protocol highlights the importance of forests in carbon dioxide sequestration: in this context, the IPCC has outlined a methodology for estimating the "carbon budget" of the forest, based on techniques commonly used in forest inventories. This work presents the results of a study carried out in Sardinia, with the aim of identifying appropriate instruments for the assessment of the Mediterranean holm oak forests contribution to the fixed carbon stock. The review of the methodologies currently available for the estimation of the aboveground biomass of Mediterranean forests evidenced that the knowledge on carbon budget estimation for this kind of ecosystem is rather limited. The research performed, in collaboration with the Sardinia regional Sustainable Development Service project ForEnCarb.UniSS.it, is based on the collection of experimental data related to the Mediterranean holm oak forest of Seneghe, (central Sardinia). Applying a stratified sampling design, 47 trees have been selected among the larger stems in the forest (larger than 17.5 cm dbh), and various (traditional and innovative) dendrometric measurements have conducted. The dataset was used to compare and verify the allometric equation models developed for southern Italy stands. Since the comparison gave unsatisfactory results, and the obtained dendrometric models were limited, a direct determination of the aboveground biomass was performed. This work provides new tools for the quantification of holm oak aboveground biomass based on statistical data analysis and suggests non-conventional approaches in forest mensuration.

RIASSUNTO

Il Protocollo di Kyoto (UNFCCC, 1997) riconosce alle foreste, per la loro capacità di assorbire anidride carbonica, un ruolo rilevante nelle strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici. In questo contesto l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) indica una metodologia di stima del bilancio di carbonio degli ecosistemi forestali basata sulla sottrazione delle perdite di biomassa (utilizzazioni forestali, incendi) dall'incremento della stessa in un dato periodo di tempo. Le stime si basano sulle tecniche impiegate dagli inventari forestali, concepiti e progettati per valutare le provvigioni legnose; il calcolo della biomassa totale si ottiene trasformando il volume dei fusti in peso e, attraverso fattori di conversione, in CO₂.

Il presente lavoro riporta i risultati di uno studio effettuato in Sardegna con lo scopo di individuare strumenti di stima del contributo della lecceta mediterranea allo stock di carbonio fissato.

Una accurata ricerca bibliografica ha permesso di fare il punto sullo stato dell'arte circa i metodi di stima della fitomassa arborea per le formazioni forestali della regione mediterranea, la quale è indicata come una delle aree critiche del globo negli scenari dei futuri cambiamenti climatici. Da questa indagine è emerso che le conoscenze sul bilancio di carbonio e le indagini quantitative sulla fitomassa arborea delle foreste mediterranee sono piuttosto limitate.

A questo proposito, il presente lavoro ha previsto la raccolta di dati sperimentali, relativi ad una lecceta mediterranea individuata nel comune di Seneghe (OR), un'area della Sardegna centro-occidentale, realizzata in collaborazione con il progetto di ricerca *ForEnCarb*. Sono stati individuati 47 *Alberi Modello*, si è proceduto al loro abbattimento, alla misura della fitomassa arborea epigea delle varie componenti e al rilievo di una serie di variabili dendrometriche.

Con questo set di dati è stato effettuato un confronto e una verifica dell'utilizzabilità dei modelli di stima del volume legnoso o della fitomassa arborea sviluppati per la tipologia arborea oggetto di studio in Italia meridionale. Valutato insoddisfacente l'esito del confronto e consapevoli delle limitate potenzialità di generare un modello di elevata accuratezza, dovute all'esiguo numero di alberi modello disponibili, è stata eseguita una determinazione diretta di un modello di stima del volume legnoso e della fitomassa

arborea, basato sulle variabili diametro ad 1.30 m e altezza ipsometrica, utilizzando le metodiche tradizionali, fondate su analisi di regressione. Infine, il lavoro ha previsto la ricerca di nuovi strumenti per la quantificazione della fitomassa arborea epigea della lecceta basati su metodologie di analisi dati poco note (*partizione ricorsiva*) e su coefficienti non convenzionali per la stima diretta.

INDICE

ABSTRACT.....	3
RIASSUNTO	4
INDICE	6
PREMESSA.....	8
1. INTRODUZIONE	11
1.1 La vegetazione mediterranea	11
1.1.1. La lecceta mediterranea	13
1.1.2. La macchia mediterranea	17
1.2 Le foreste nel ciclo del carbonio.....	19
1.2.1 Ciclo del carbonio e <i>global warming</i>	19
1.2.2 Ruolo delle foreste nella mitigazione dei gas serra	22
1.3 Dinamiche del carbonio nei sistemi forestali mediterranei.....	28
1.4 Report sui gas serra.....	32
1.4.1 Il Protocollo di Kyoto	32
1.4.2 Applicazione del PK in Italia.....	37
1.4.3 Good Practice Guidance for LULUCF	41
1.4.4 Contesto regionale in cui si inserisce la ricerca	48
1.5 Stato dell'arte sui metodi di stima del carbonio delle foreste.....	50
1.5.1 Approccio a livello di ecosistema	50
1.5.2 Metodiche di stima per le singole componenti dell'ecosistema	58
Biomassa epigea	58
Biomassa ipogea	59
Necromassa.....	62
Lettiera	62
Suoli	64
1.5.3 Metodi dendrometrico-inventariali	66
Dalle tavole stereometriche ai modelli di previsione della fitomassa.....	66
Equazioni di stima della fitomassa e BEF	71
1.5.4 Sintesi letteratura sulla stima del C della "foresta mediterranea"	81
2. OBIETTIVI.....	90
3. MATERIALI E METODI	92
3.1 Descrizione dell'area di studio.....	92
3.2 Criteri d'individuazione degli alberi modello –disegno campionario	98
3.3 Raccolta dei campioni e misurazioni	103
3.4 Strumenti di elaborazione dati	107
4. RISULTATI: elaborazioni ed analisi dei dati.....	108
4.1.1 Analisi della variabilità dell'umidità dei campioni.....	109
4.1.2 Analisi del peso secco e della ripartizione della fitomassa.....	113
4.1.3 Calcolo del volume legnoso.....	114
4.2 Analisi esplorativa set dati definitivo	116

4.2.1 Variabili dendrometriche essenziali.....	116
4.2.2 Variabili dendrometriche non convenzionali.....	119
4.2.3 Variabili ecologiche (in senso lato)	121
4.2.4 Variabili dendrometriche utili per cubatura	123
4.3 Valutazione utilizzo strumenti di cubatura esistenti	127
4.3.1 Confronto con modelli di previsione della fitomassa	127
4.3.2 Confronto con modelli di previsione del volume	134
4.4 Stima diretta di fitomassa e volume.....	140
4.4.1 Sviluppo di equazioni di previsione della fitomassa e del volume.....	140
4.4.2 Coefficienti tradizionali per la stima diretta	147
4.4.3 Riflessioni intorno al classico procedimento adottato in dendrometria per la stima del volume dei fusti arborei.....	148
4.4.4 Coefficienti non convenzionali per la stima diretta	152
4.4.5 Strumenti poco noti per la stima diretta: “la partizione ricorsiva”	155
4.5 Analisi dei costi delle operazioni di raccolta dati	162
5. CONCLUSIONI	164
BIBLIOGRAFIA	169
ALLEGATI.....	186
APPENDICE	194

PREMESSA

La tutela del clima globale del pianeta è un argomento di stretta attualità. Una delle sfide ecologiche più importanti del nuovo millennio è rappresentata dal controllo delle emissioni dei gas considerati responsabili della modifica dell'effetto serra in atmosfera. A questo riguardo, un ruolo fondamentale riveste la conoscenza e la gestione del carbonio e dei cicli energetici naturali e antropici ad esso collegati (IPCC, 2001).

Con l'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto (UNFCCC, 1997) ogni Paese, nell'adempiere agli impegni di riduzione delle emissioni di gas serra, elaborerà politiche e misure idonee, tuttavia, al di là della reale efficacia del piano di riduzione delle emissioni, l'effetto più rilevante dell'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto (PK) è quello di rilanciare la cooperazione internazionale per la tutela del clima globale del pianeta.

La regione mediterranea è ritenuta una delle aree critiche del globo negli scenari dei futuri cambiamenti globali a causa di una serie di caratteristiche (climatiche, geopedologiche, di uso antropico del territorio) che la rendono, tra l'altro, potenzialmente sensibile al fenomeno della desertificazione¹ (Corona, 2005).

Nonostante quanto esposto, le conoscenze sul bilancio del carbonio dei sistemi forestali di tipo mediterraneo sono piuttosto limitate (Tirone et al., 2003; Marino et al., 2005; Tognetti e Marchetti, 2006).

La stima accurata del volume e della fitomassa arborea è indispensabile per rispondere ad una serie di necessità imposte dal mondo della ricerca e dalla società quali: sviluppo di una gestione sostenibile delle risorse forestali; studi di natura ecologica sui flussi di energia e materia dell'ecosistema; informazioni in relazione all'uso potenziale della biomassa come sorgente di energia rinnovabile; sviluppo degli "inventari forestali e del carbonio per Kyoto", a livello nazionale, regionale, distrettuale, aziendale.

In dettaglio il PK riconosce una notevole importanza alla capacità di sottrarre carbonio atmosferico da parte delle foreste e quindi alla necessità di un monitoraggio, di una

¹ *United Nations Convention to Combat draught and/or Desertification (UNCCD)* definisce la desertificazione come: "degradazione delle terre in aree aride, semi-aride e secche sub-umide dovuta a vari fattori, inclusi i cambiamenti climatici e le attività umane" (UNCCD, 1994)

protezione e di un ampliamento delle capacità di fissare C negli stock forestali, in quanto variazioni negli stessi influenzano variazioni di CO₂ atmosferica.

Lo stock di carbonio biotico terrestre e le sue variazioni risultano di difficile misura (IPCC 2003) e le stime presenti attualmente sono inficiate da errori rilevanti (Clark et al., 2001, Jenkins et al., 2003).

La realizzazione di stime sugli stock di carbonio forestali e la comprensione delle dinamiche del carbonio a livello di ecosistema, possono essere migliorate applicando le conoscenze esistenti sulle relazioni allometriche degli alberi che sono espresse sotto forma di equazioni (modelli) per il calcolo della biomassa o del volume (Jenkins et al., 2003; Zianis e Mencuccini, 2004; Lehtonen et al., 2004).

Sulla base di queste premesse il percorso di ricerca ha preso avvio con l'individuazione dei tipi forestali mediterranei più rilevanti (da un punto di vista della superficie interessata e della biomassa contenuta), seguito da un'approfondita analisi bibliografica che ha permesso di valutare lo stato dell'arte riguardo le metodiche di stima del carbonio contenuto nella fitomassa arborea. In conseguenza dell'analisi dei dati disponibili in letteratura sulle metodologie di stima comunemente utilizzate, è emersa una significativa carenza di informazioni specifiche per le formazioni forestali mediterranee; ciò è dovuto al ridotto interesse economico per le tipologie di boschi mediterranei e all'elevato costo per realizzare indagini di campo finalizzate alla ricerca scientifica di base.

Prese in esame queste considerazioni e valutata positivamente l'opportunità di collaborazione con un progetto di ricerca (ForEnCarb, descritto in seguito, Scotti et al., 2008) si è optato per limitare l'esame alla sola tipologia arborea "lecceta".

In breve, l'obiettivo del progetto di ricerca si è concretizzato nella valutazione e nello sviluppo di strumenti di stima del contributo della "lecceta mediterranea" allo stock di carbonio fissato quale mezzo che, indirettamente, agevoli la contabilizzazione regionale degli assorbimenti di CO₂ da parte delle tipologie forestali mediterranee. Questa metodica di stima risulta coerente con il rapporto *Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry* (GPG-LU-LUCF) redatto dal Gruppo Intergovernativo sui Cambiamenti del Clima (IPCC, 2003), unico documento ufficiale sulle regole di contabilizzazione.

La ricerca di metodiche di stima della capacità fissativa degli ecosistemi mediterranei può fornire un utile supporto operativo alla pianificazione e gestione del territorio.

Si sottolinea che le azioni riguardanti la gestione delle risorse forestali esistenti o la creazione di nuove foreste non sono un mezzo permanente per abbattere l'incremento di CO₂ nell'atmosfera, ma sono uno strumento che consente di acquisire del tempo indispensabile per cambiare gli attuali sistemi energetici. L'uso di fonti energetiche alternative, tra cui la fitomassa forestale, rappresenta il vero obiettivo della "protezione del clima".

1. INTRODUZIONE

1.1 *La vegetazione mediterranea*

Nel mondo esistono cinque regioni geografiche caratterizzate da un clima e una vegetazione cosiddetti di tipo “mediterraneo”. La principale di queste regioni si trova propriamente nel bacino del Mare Mediterraneo, le altre sono localizzate in California, nel Cile, in Sud Africa ed in Australia sud-occidentale. Il clima mediterraneo è interpretato come un regime di transizione fra i climi temperati e quelli tropicali-aridi. Esso è caratterizzato da un andamento bistagionale composto da una stagione caldo-arida alla quale si alterna una stagione freddo-umida (Arrigoni, 1968). Le piogge sono concentrate in inverno e possiedono un’alta variabilità in termini di precipitazioni annue; il periodo di aridità estiva ha una lunghezza variabile. In generale, le estati sono calde e gli inverni da miti a freddi, con assenza delle escursioni termiche tipiche dei climi continentali. Gelate e precipitazioni nevose sono rare ed in generale si esauriscono in pochi giorni.

Una caratteristica importante da sottolineare del clima mediterraneo, che influenza fortemente lo sviluppo della vegetazione, è l’infedeltà delle precipitazioni (che si accentua da nord verso sud). Le siccità eccezionali possono addirittura far mancare un intero ciclo di piogge invernali (Arrigoni, 1968). In questo caso le specie legnose reagiscono con un debole getto primaverile e con una riduzione dell’apparato fogliare. Inoltre, nelle zone meridionali si accentua il fenomeno della concentrazione delle precipitazioni in piogge torrenziali copiosissime che provocano gravi erosioni e disastri e che, con il loro secolare ripetersi, hanno modellato i corsi d’acqua nel caratteristico aspetto delle fiumare con ampio letto ciottoloso e ghiaioso (Bernetti, 1995).

Nelle regioni mediterranee la vegetazione risulta eterogenea, costituita prevalentemente da foreste sempreverdi e caratterizzata dalla massiccia presenza di formazioni arbustive di specie sempreverdi a foglia coriacea (sclerofille) (Piotto e Di Noi, 2001).

La foresta sempreverde mediterranea è formata da uno strato arboreo normalmente monospecifico, da uno strato arbustivo e da liane. Lo strato erbaceo è pressoché assente perché arriva pochissima luce al suolo. La più tipica ed evoluta delle formazioni

fisionomie diversissime in cui l'impatto antropico contribuisce sia a determinarne il degrado che a favorirne la grande ricchezza floristica e faunistica (Camarda, 2007).

Questa formazione, nelle sue molteplici forme, deve essere considerata a pieno titolo una formazione forestale in grado di assolvere a tutte le funzioni, comprese ovviamente quelle antierosive (apporto di sostanza organica al suolo, ripristino della copertura nel post incendio, etc.) (Aru, 1997).

La foresta mediterranea è composta da una serie di tipi fisionomici distinti; tra questi si descrivono brevemente la lecceta e la macchia in quanto ritenuti di maggior rilevanza (in termini di superfici e di interconnessione tra le due fisionomie) per l'obiettivo dello studio portato avanti in questa sede.

1.1.1. La lecceta mediterranea

I boschi di leccio, in gran parte dell'area occidentale del Mediterraneo, costituiscono lo stadio di maggiore evoluzione della vegetazione forestale. Si tratta di un popolamento di sclerofille dominato dal leccio, in cui compaiono poche altre specie arboree o arbustive, come l'acero minore (*Acer monspessulanum*), l'orniello (*Fraxinus ornus*), il corbezzolo (*Arbutus unedo*), la fillirea (*Phyllirea* spp.), il viburno (*Viburnum tinus*), il lentisco (Camarda, 2007).

La lecceta crea delle formazioni chiuse, dense, con poche specie nel sottobosco. Le foreste di leccio nella loro struttura originaria sono quasi del tutto scomparse, si possono ancora trovare in limitate aree calcaree difficilmente accessibili della Sardegna centrale, dove permangono allo stadio climacico (Camarda e Valsecchi, 1982; Camarda, 2007).

La foresta sempreverde si estende lungo la fascia costiera sin oltre i 1000 metri di quota. Il leccio costituisce formazioni di estremo interesse per l'estensione e l'elevato grado di antropizzazione che ne ha profondamente mutato la fisionomia. Fin dagli inizi dell'epoca storica, l'assetto naturale di questi popolamenti è stato infatti alterato, da una parte ad opera della secolare azione di disboscamento a favore della pastorizia e dell'agricoltura e, dall'altra, dall'utilizzo intensivo per la produzione di legna da ardere e carbone (Amorini et al., 1996).

In generale, lungo tutto l'areale mediterraneo della lecceta, alla forte pressione antropica (sovrapascolamento, incendi, tagli eccessivi, confronta Delogu et al., 1998) si unisce la

presenza di una serie di fattori fisici predisponenti (aridità, siccità, erosività delle piogge, morfologia, orografia, suoli altamente erodibili) che hanno ampliato i processi di degrado a carico del patrimonio boschivo al punto da esporre questi territori al rischio di fenomeni di desertificazione (Corona, 2007a; Corona, 2005).

Riguardo l'attualità degli aspetti gestionali dei boschi di leccio dell'Italia meridionale e insulare, si osserva che questi generalmente vengono destinati alla produzione legnosa, intesa come uso combustibile della legna. Recentemente la richiesta di questa da parte del mercato ha subito un notevole incremento a causa dell'aumento dei costi dei prodotti petroliferi e della migliorata efficienza degli apparati di combustione, per cui si è sviluppato un nuovo interesse economico verso la gestione produttiva dei querceti. La forma di governo più utilizzata per il raggiungimento di tali scopi è il ceduo, con un allungamento (fino a 30-40 anni) dei turni rispetto al passato (Del Favero, 2008).

Il governo a fustaia non risulta particolarmente efficiente per la produzione di legna ma ben si adatta ad una gestione silvo-pastorale del bosco, ampiamente diffusa nelle aree mediterranee.

In particolare, in Sardegna i boschi a prevalenza di leccio risultano essere principalmente di proprietà pubblica e spesso soggetti ad "uso civico"; questo tipo di gestione normalmente non viene adeguatamente disciplinato causando un depauperamento della risorsa bosco di proprietà collettiva (D'Angelo et al., 1999).

Da un punto di vista selvicolturale, i soprassuoli sardi a dominanza di leccio comprendono diversi tipi fisionomico-strutturali; fra questi sono prevalenti i cedui variamente matricinati o composti, in evoluzione naturale per sospensione del taglio periodico. Parte di questi popolamenti sono stati avviati ad altofusto, seguendo la tecnica della matricinatura intensiva accompagnata da diradamenti, per lo più, di tipo basso o selettivi di tipo misto (Amorini et al., 1996).

In Sardegna, secondo le stime di superficie relative all'Inventario Nazionale Foreste e Carbonio (INFC, 2007a), i popolamenti a prevalenza di leccio coprono una superficie di oltre 247 335 (ES 3.5%) e sono ripartiti secondo l'estensione delle sottocategorie forestali in (Tabella 2):

Sottocategorie forestali	Superficie (ha)	ES (%)
Lecceta termofila costiera	129 830	5.1
Bosco misto di leccio e orniello	61 930	7.6
Lecceta rupicola	10 448	18.8
Boscaglia di leccio	19 019	13.9
Leccete non classificate per sottocategoria	26 109	11.9
Totale leccete	247 335	3.5

Tabella 2 – Estensione delle sottocategorie forestali dei Boschi alti di Leccio (tab. 1.22, INFC 2007a)

Per la descrizione delle sottocategorie forestali si rimanda al Box 1 estratto dalla “Guida alla classificazione della vegetazione forestale” preparata in sede di progettazione dell’inventario forestale nazionale dall’autore Pignatti (INFC, 2003).

Al bosco di leccio spesso partecipa o si sostituisce la sughera (*Quercus suber*). Le sugherete si trovano soprattutto nel settore occidentale del Mediterraneo. La sughereta è una formazione tipicamente aperta, sia per il carattere eliofilo della specie, sia per il portamento della chioma, e sia per il fatto che si tratta, in tutti i casi, di un popolamento di origine antropica fortemente utilizzato per l’estrazione del sughero, per la legna da ardere e per il pascolo. Trattandosi di un bosco di origine secondaria, in condizioni di maggior naturalità nel corso dei processi evolutivi, tende a formare boschi misti con le altre querce, mentre il sottobosco è tipicamente formato dalle specie della macchia mediterranea. L’utilizzo della sughereta richiede costanti cure selvicolturali che ne determinano la struttura e la composizione floristica (Camarda, 2007). L’interesse economico della sughereta ne ha favorito l’estensione lungo il bacino del Mediterraneo, soprattutto in Portogallo, Spagna, Marocco, Tunisia, Sardegna.

15. LECCETE	
Bosco sempreverde con dominanza di <i>Quercus ilex</i> (leccio), per lo più puro, oppure anche in consorzio misto con altre specie, ma in generale queste hanno individui di dimensioni ridotte ed il leccio rimane dominante nello strato superiore.	
CORINE Biotopes: costiera 45.312 – con orniello 45.318-319	
Ecologia Il leccio è una specie termofila, ma che ha anche l'esigenza di una certa disponibilità idrica; è adattato alla vita in ambiente mediterraneo, cioè in condizioni di grande aridità estiva ed in estate si trova in fase di riposo vegetativo, tuttavia una certa riserva d'acqua nel suolo risulta necessaria. Resiste alle gelate ed alla neve (quando si tratti di eventi sporadici), quindi può presentarsi anche all'interno: la sua area corrisponde circa a quella della coltivazione dell'ulivo. Dopo la ceduzione è in grado di riprendere però in generale più lentamente di altre sempreverdi; si mantiene anche dopo l'incendio.	
Questa lecceta si sviluppa generalmente lungo le coste e nelle stazioni più calde ed aride ed è composta esclusivamente da specie sempreverdi: il leccio nello strato arboreo e tra gli arbusti ancora corbezzolo, lentisco, mirto, fillirea; abbondanti le specie lianose come <i>Smilax</i> , <i>Asparagus acutifolius</i> , <i>Rubia peregrina</i> , <i>Rosa sempervirens</i> , <i>Clematis flammula</i> . Si sviluppa su suoli poco profondi, spesso acidificati e con scarsa fertilità; tollera bene la ceduzione e l'incendio. Livello altimetrico – 0 -200 m Distribuzione- coste della Liguria, regioni tirreniche e ioniche, sull'Adriatico non risale oltre il Gargano; diffusa nelle Isole grandi e minori.	<i>Lecceta termofila costiera</i>
All'interno, in ambiente collinare di passaggio al bosco caducifoglio di roverella, su suoli relativamente profondi ed unificati in superficie. Specie diagnostiche: caducifoglie soprattutto <i>Fraxinus ornus</i> e <i>Ostrya carpinifolia</i> . Livello altimetrico – 0 -800 m, nelle Isole fino a 1200 m e più Distribuzione- Liguria, penisola ed isole, superfici isolate anche nel Triestino, nella fascia prealpina fino alla zona dei laghi e lungo la costa adriatica.	<i>Bosco misto di leccio e orniello</i>
Come le precedenti, ma in stazioni rupestri difficilmente accessibili, generalmente con esposizione meridionale. Livello altimetrico – 200 -1200 m Distribuzione- Italia Centrale e Meridionale	<i>Lecceta rupicola</i>
Aspetto della macchia, che si forma dopo incendi oppure ripetute ceduzioni ed è costituita da leccio con portamento arbustivo, può venire convertita in alto fusto, però spesso questo procedimento richiede tempi lunghi. Livello altimetrico – 0 -600 m Distribuzione- Liguria, penisola ed isole	<i>Boscaglia di leccio</i>
Problemi di identificazione È possibile stabilire un passaggio più o meno continuo dalla lecceta pura (del tipo costiero) alla lecceta che ospita un certo contingente di caducifoglie (orniello, carpino nero), a veri e propri ostrieti con leccio oppure boschi di roverella con leccio. In questi casi bisogna assegnare la categoria forestale sulla base della specie prevalente: si potrà dunque avere una lecceta ricca di ostra che, a poca distanza, se cambiano le condizioni ecologiche, potrà essere sostituita da un ostrieto ricco di leccio. La giusta valutazione della specie prevalente viene facilitata dal diverso colore del fogliame di leccio (sempreverde con foglie verde-scure) e delle specie caducifoglie, più chiare.	

Box 1 – Descrizione sottocategorie forestali della lecceta (INFC, 2003)

1.1.2. La macchia mediterranea

Il termine macchia mediterranea indica, generalmente, una tipologia di vegetazione con prevalenza di specie arbustive sclerofilliche sempreverdi, tuttavia diversi Autori si sono cimentati in definizioni finalizzate al chiarimento dei termini che indicano le varie tipologie di vegetazione mediterranea e della macchia (Bernetti, 1998; Camarda e Valsecchi, 1982).

Secondo Camarda e Valsecchi (1982), la macchia è una formazione vegetale costituita da alberi con portamento arbustivo e soprattutto da arbusti sclerofillici sempreverdi; presenta, inoltre, struttura complessa e composizione floristica variabile. In base all'altezza degli individui e al grado di copertura del suolo, è stata proposta una suddivisione su base strutturale-fisionomica in: macchia foresta (>4 metri), macchia alta (2-3 metri), macchia bassa (<2 metri). In Sardegna la macchia è caratterizzata prevalentemente da lentisco, mirto, olivastro, carrubo, corbezzolo, eriche, filliree, ginepri, calicotome, ginestre, euforbie, palma nana, cisti. Su zone degradate o su substrato roccioso la macchia cambia fisionomia e composizione floristica e si identifica con il nome di gariga, caratterizzata da specie suffruticose, spinose, aromatiche e xerofile. Bernetti (1998) identifica la foresta mediterranea col bosco di alto fusto di leccio oppure col bosco misto di leccio e sughera, mentre per macchia mediterranea intende una tipologia vegetale che comprende una vasta categoria di arbusteti o di boschi di statura inferiore. In condizioni di estremo degrado del suolo e per effetto del clima locale avverso, la macchia non può svilupparsi oltre una certa altezza ed è composta da specie frugali o resistenti (*macchia primaria*). In generale, con il termine *macchia secondaria* si identifica il residuo della degradazione di foreste o il risultato dell'invasione di pascoli o di seminativi abbandonati. Bernetti (1998) ritiene importante distinguere una gerarchia evolutiva per le macchie: (1) macchie con sufficiente presenza di leccio; (2) macchie con arbusti-alberelli sclerofillici (filliree, lentisco, mirto); (3) macchie a specie pioniere o pirofite (eriche, ginestre, cisti, rosmarino).

Queste incertezze sulla definizione di macchia si riflettono sulla stima delle superfici interessate, per le quali le informazioni risultano ancora insufficienti e non sempre congruenti. I risultati dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi di Carbonio (INFC, 2007a), indicano che la Sardegna possiede una superficie forestale di interesse

inventariale di 1 213 250 ha, circa il 50 % dell'intera superficie regionale. I *boschi* costituiscono il 48.1% e le *altre terre boscate* il 51.9 %; quest'ultima categoria inventariale comprende gli *arbusteti* (522 804 ha ES 2.1%) i quali vengono ulteriormente distinti in *arbusteti di clima temperato* (7 452 ES 22.3 %) e *macchia e arbusti mediterranei* (515 352 ES 2.2%).

Dal punto di vista ecologico il principale fattore stazionale condizionante la distribuzione di questa formazione forestale è la disponibilità idrica (Sirca et al., 2001). Per quanto riguarda gli aspetti termici, negli ambienti in cui è presente la macchia, non si registrano temperature medie annue o del mese più caldo significativamente differenti da quelle riscontrate nelle stazioni in cui vegetano i querceti (Pignatti, 1998). Le specie della macchia anche in condizioni termiche estreme e di elevato stress idrico attuano strategie di resistenza che denotano significativi livelli di attività fisiologica (Spano e Duce, 2004).

Per quanto riguarda gli aspetti colturali, la macchia a causa dei limiti stazionali che rallentano la crescita, ha uno scarso interesse produttivo legnoso in termini quantitativi; soprattutto in Sardegna, viene comunemente utilizzata come pascolo per animali domestici (Del Favero, 2008).

Recentemente a seguito della mutata sensibilità della società alle tematiche ambientali si è rivalutato il ruolo e la tutela della macchia. Dal punto di vista gestionale si propone la sua conservazione piuttosto che la trasformazione (Agnoletti e Scotti, 2004); riguardo la lotta ai fenomeni di desertificazione si suggerisce la sua salvaguardia e la ricostituzione dove non è più presente (Corona, 2005); non ultima si evidenzia l'importanza della macchia nella lotta ai cambiamenti climatici in quanto formazione forestale mediterranea coinvolta in possibili modificazioni funzionali di varia natura (Scarascia Mugnozza et al., 2001; Duce et al., 2002; Tirone et al., 2003; De Angelis et al., 2003).

1.2 Le foreste nel ciclo del carbonio

1.2.1 Ciclo del carbonio e *global warming*

Il carbonio circola attraverso gli oceani, la biosfera terrestre e l'atmosfera. Gli ecosistemi terrestri, dopo quelli marini, costituiscono un'importante porzione del ciclo globale del carbonio e possono fungere da assorbitori (*sink*) o da sorgenti (*source*) di anidride carbonica a seconda delle condizioni naturali e della gestione antropica (Pettenella e Piazzì, 2006).

Se, da una parte, alla crescita degli alberi e dei vegetali in genere, corrisponde una cattura di CO₂ dall'atmosfera, dall'altra, le attività umane, quali l'utilizzo di combustibili fossili e la deforestazione, causano un aumento della concentrazione di anidride carbonica (CO₂) in atmosfera (Grace, 2004). L'accumulo di circa 6,7 miliardi di tonnellate (GT) di carbonio l'anno nell'atmosfera è ritenuto la principale causa dell'effetto serra e dei cambiamenti climatici (Ciccarese e Pettenella, 2005).

Questo fenomeno si manifesta con un aumento della temperatura globale (*global warming*) stimato, nel corso del XX secolo (Prentice et al., 2001), in circa 0.75°C, ma anche con una maggior severità e frequenza degli eventi meteorici estremi, con lo scioglimento delle calotte polari e con l'alterazione di ecosistemi vegetali (Ciccarese, 2005).

La concentrazione in atmosfera dei gas responsabili dell'effetto serra, in particolare di anidride carbonica (CO₂), è in continuo aumento. Dall'inizio dell'era industriale ad oggi la concentrazione di CO₂ in atmosfera è passata da 280 a 370 parti per milione in volume (Ciccarese, 2005). Uno studio più dettagliato osserva che nell'ultimo decennio 1990-2000 la concentrazione di questo gas è passata da 352 ppm a 367 ppm; la stima, per lo stesso intervallo di tempo, ipotizzando di eliminare il ruolo di "assorbitori" degli ecosistemi terrestri e degli oceani, è pari a 382 ppm (IPCC, 2001). Circa metà del carbonio viene sottratto dagli ecosistemi terrestri e la maggior parte di questo è fissato nelle foreste (White et al., 2000; IPCC, 2001).

A livello planetario esistono numerose stime sulle quantità di CO₂ che compongono le diverse voci del bilancio di carbonio, ma queste sono scarsamente confrontabili (a causa della diversa natura dei modelli sulle quali sono basate ed alla mancanza di elementi per

valutarne l'accuratezza) e spesso sono in contraddizione tra loro in termini di cifre. Allo scopo di inquadrare il contesto generale, si riporta di seguito (Tabella 2) la sintesi presentata da Valentini (2004), ottenuta elaborando numerose osservazioni sperimentali avvenute negli anni novanta.

Emissioni	Gt C / anno
Combustione combustibili fossili	6,4
Deforestazione (incluso ricrescita)	1,7
Totale emissioni	8,1
Assorbimenti	
Atmosfera (incremento di CO ₂)	3,2
Oceani	2,3
Totale assorbimenti	5,6
Assorbimento mancante	2,5

Tabella 3- Bilancio del carbonio a livello globale (Valentini, 2004)

Dalla lettura della tabella si evince che ogni anno vengono introdotte in atmosfera circa 8.1 Gt di carbonio, mentre gli oceani sono in grado di assorbirne circa 2.3 Gt. Tuttavia, sulla base delle misurazioni di concentrazione si è valutato che nell'atmosfera terrestre entrano soltanto 3.2 Gt di carbonio ogni anno. Vi sono quindi 2.5 Gt/anno di carbonio che risultano non spiegate dalle osservazioni e dalle stime dei flussi. Da questa considerazione nasce il cosiddetto *carbon sink mancante* (assorbitore di carbonio), ovvero quel fattore che sembra contrastare l'aumento di concentrazione di diossido di carbonio nell'atmosfera, rallentando le possibili conseguenze dell'amplificazione dell'effetto serra sul clima. Dopo una serie di ipotesi sul possibile ruolo degli oceani, si è oggi arrivati alla conclusione che le foreste del Pianeta non sono in equilibrio, ovvero assorbono più carbonio dall'atmosfera di quanto ne rilascino.

Il carbonio assorbito dai produttori va a costituire le riserve di C della biomassa e della sostanza organica del suolo dei sistemi terrestri, prima di essere nuovamente rilasciato in atmosfera dalla respirazione autotrofa ed eterotrofa di queste riserve, o per incendi, o per essere asportato a scopi commerciali (Figura 1).

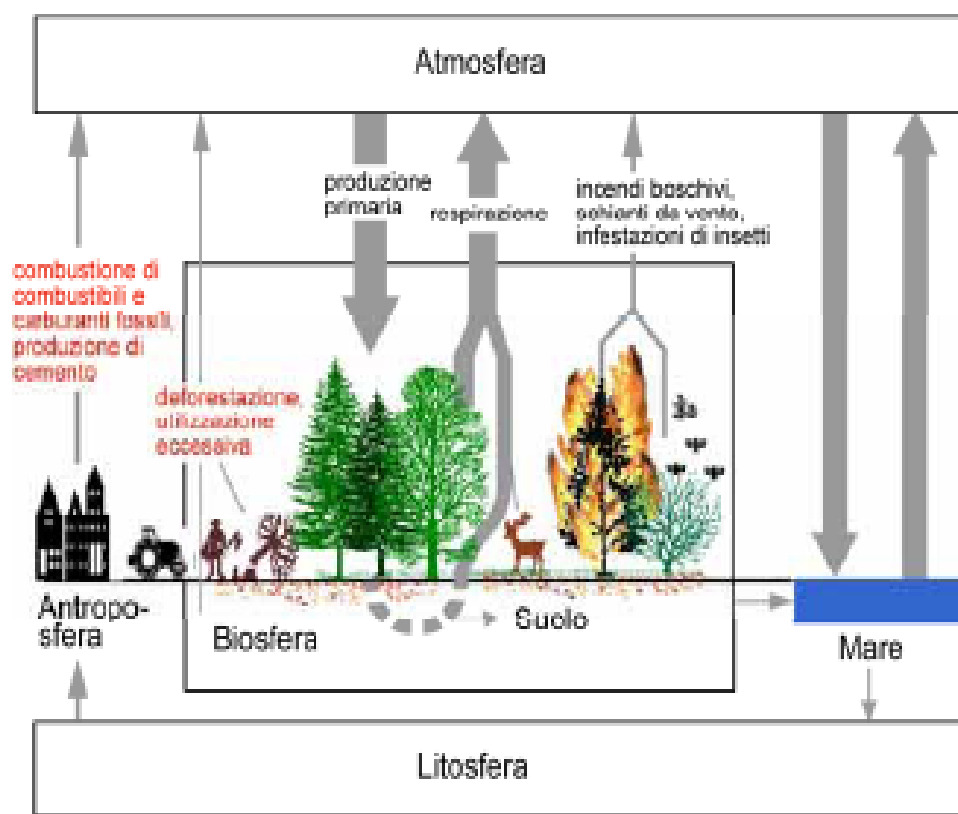


Figura 1 Schema sulla circolazione globale del carbonio

Esiste un intervallo di tempo dal momento in cui il C viene “sequestrato” all’atmosfera a quando vi ritorna; la lunghezza di questo intervallo è, evidentemente, funzione del tempo di permanenza della riserva in cui il C si è localizzato. Questo può essere di giorni, anni o secoli, a seconda che si tratti di un residuo zuccherino essudato dalle radici, della lettiera di foglie e piccoli rami, della biomassa legnosa o della frazione “recalcitrante” della sostanza organica del suolo. Ne consegue che solo lo stoccaggio del C in comparti con un tempo di resistenza che sia di almeno 50-100 anni (residui legnosi e sostanza organica del suolo) può rappresentare una risposta significativa all’incremento di CO₂ in atmosfera.

L’insieme di queste valutazioni hanno portato oggi a considerare le foreste un elemento importante di mitigazione dell’effetto serra.

1.2.2 Ruolo delle foreste nella mitigazione dei gas serra

Secondo il *Global Forest Resources Assessment 2005* (FRA, 2005 www.fao.org/forestry/fra2005) le foreste coprono una superficie, stimata al 2005, pari a 3952 milioni di ettari, circa il 30% della superficie mondiale. Le foreste rivestono un ruolo molto importante sulla chimica e fisica dell'atmosfera e sull'effetto serra, sia perché stivano grandi quantità di carbonio nella biomassa e nei suoli, sia perché assorbono grandi masse di carbonio dall'atmosfera attraverso la fotosintesi (Brown et al., 1996; Ciccarese et al., 2005). Si stima che le foreste mondiali fissino complessivamente 283 Gt di carbonio nella sola biomassa. Rossi (2006), citando dati FRA (2005), afferma che il carbonio stoccato nell'ecosistema forestale (biomassa forestale, legno morto, lettiera e suolo forestale) sia circa il 50% in più di quello presente in atmosfera.

Le foreste sono fonte di carbonio atmosferico (*carbon source*) quando la respirazione e l'ossidazione totale delle piante, del suolo e del materiale organico eccedono la produttività primaria netta (vedi Box 2). Questo succede per esempio quando sono oggetto di "fenomeni di disturbo" quali tagli, incendi, fitopatologie ecc. Viceversa, esse agiscono come *carbon sink* (bilancio netto positivo tra CO₂ assorbita ed emessa in atmosfera), quando ricrescono dopo una delle fasi di perturbazione citate (Ciccarese, 2005).

In particolare, riguardo l'incendio alcuni autori (Ciccarese e Pettenella, 1999) affermano che l'incendio di un ettaro di bosco comporta un immediato rilascio di buona parte (circa 80%) del carbonio contenuto nella vegetazione e un successivo lento rilascio di parte di quello contenuto nel suolo.

Il Box 2 descrive, in termini più precisi, quello che può essere rappresentato come il rapporto sistema foresta-legno nel ciclo globale del carbonio. Questo contributo, tratto da una pubblicazione di Colpi e Hellring (2008), inquadra in modo semplice e chiaro la relazione tra le foreste ed bilancio del carbonio all'interno dell'asestamento forestale, ossia della pianificazione della gestione sostenibile delle risorse forestali.

Il bosco deve essere inteso come un ecosistema sede di produzione primaria e secondaria, che costituisce un giacimento di C ossia esercita un azione di "**C-ritenzione boschiva**"

Ai fini della crescita dei vegetali, è determinante la disponibilità di assimilati attribuibili alla produzione primaria netta (**PPN**), vale a dire la produzione primaria lorda dell'individuo (**PPL**) - primo prodotto della fotosintesi - decurtata delle perdite per respirazione autotrofa (**Ra**). Nell'albero la PPN viene destinata prevalentemente alla costruzione di nuove cellule e di sostanze di riserva, e i tessuti formati nel contesto della PPN possono essere distinti in permanenti (o di accumulazione) oppure temporanei (o di abscissione).

I primi, che si identificano con legno e corteccia di fusto, rami e radici, danno luogo alla «crescita» dell'albero (o del bosco) e all'incremento delle sue frazioni di dendromassa (cormometrica, blastometrica e radicale). Con la loro continua accumulazione negli alberi essi formano e alimentano lo stock di alberi vivi (**Av**), che si identifica con il comparto produttivo del bosco.

I secondi (foglie, rametti, organi riproduttivi, radichette) vengono perduti prima o poi dalla pianta e vanno a formare la cosiddetta «lettiera dedicata». Quest'ultima, aumentata della «lettiera secondaria» o «grossolana», formata da porzioni di alberi vivi che cadono a terra e da alberi interi che muoiono in piedi o vengono sradicati, costituisce il materiale di entrata nello stock «Necromassa + Lettiera + Suolo» (**NLS**), che costituisce il comparto di decomposizione (o di riciclaggio) del bosco.

L'insieme degli stock Av e NLS forma lo stock boschivo (**B**).

La produzione ecosistemica netta (**PEN**) risulta dalla sottrazione alla PPN della respirazione che avviene ai livelli successivi delle catene alimentari (respirazione eterotrofa, **Re**), che in gran parte in bosco sono catene di detrito.

La formazione dello stock di C che sta alla base della C-ritenzione boschiva è il risultato dell'assommarsi nel tempo delle successive produzioni ecosistemiche nette (PEN), decurtate delle sottrazioni per prelievo commerciale, colturale e accidentale e delle perdite per incendio.

Per il bosco coltivato, ai due stock Av e NLS si aggiunge poi lo stock dei prodotti (P, ossia la dendromassa mercantile ricavata dall'utilizzazione di alberi) infatti, ogni prodotto legnoso in qualsiasi forma di elaborazione è anch'esso un pacchetto di C prelevato dall'atmosfera (**C-ritenzione extraboschiva**).

L'insieme dello stock boschivo ed extraboschivo dà luogo allo stock del sistema Bosco + Extrabosco (**BE**), a volte definito anche come «sistema foresta-legno»

Ciascuno dei comparti considerati, sia quello di produzione (Av) che quelli di decomposizione (NLS e P), lo stock di carbonio è soggetto a variazioni quantitative (**ΔC-stock** o «carbon stock change»), sia positive che negative.

Se, come è indispensabile fare in relazione all'effetto serra, gli input e gli output di C vengono riferiti al C-stock dell'atmosfera, risultano fondamentali i concetti di condizione di **sink** (sottrazione di C dall'atmosfera) e di condizione di **source** (immissione di C nell'atmosfera).

Per quanto riguarda il bilancio di carbonio nella **foresta vergine** ossia in un bosco non disturbato antropicamente, le due condizioni carbonico-atmosferiche di sink o di source si alternano nel tempo: sink nella fase di accumulo di biomassa e di sostanza organica al suolo, source in quella successiva di decadenza e di ricambio generazionale, quando la demolizione della sostanza organica nel comparto NLS supera la produzione di questa nel comparto Av. Qui, pur considerando le inevitabili perturbazioni naturali localizzate (incendi, schianti, fitopatologie devastanti, ecc.), la fissazione di C nella fotosintesi viene approssimativamente equilibrata da uguali emissioni di C nella respirazione degli autotrofi e degli eterotrofi. A livello di insieme, la produzione ecosistemica netta (PEN) è dunque tendenzialmente nulla (steady state pulsante), mentre la produzione primaria netta (PPN) può anche essere elevata; infatti, gli effetti di processo (anabolici e catabolici) che si verificano lungo la catena del flusso del C attraverso l'ecosistema si equilibrano tra loro. Tipicamente questo si può osservare nelle ampie aree ancora indisturbate della taiga siberiana e nord-americana.

Nei **boschi coltivati** l'analisi del bilancio di carbonio necessita di sviluppare alcune considerazioni. In questo tipo di boschi rispetto ai boschi non gestiti non si perviene alle fasi di sviluppo del bosco in cui la mortalità eguaglia o eccede, in termini di dendromassa epigea, l'incremento. Infatti l'utilizzazione del bosco (o della singola pianta) precede solitamente questo momento, e coincide piuttosto con il raggiungimento di una maturità economica.

Il prelievo di legno dal bosco crea il C-stock dei prodotti; quindi una certa quota del legno traslocato può essere adibita a surrogazione energetica (Se) oppure a sostituzione di materiale (Sm), evitando (Se) o riducendo (Sm) consumi di combustibili. Una differenza rispetto alle foreste vergini è costituita dal fatto che con la gestione, le utilizzazioni, i trasporti e le lavorazioni C extra-sistemico di provenienza fossile viene importato dalla litosfera ed emesso in atmosfera come C «nuovo» e clima-alterante. In sintesi, considerando che la selvicoltura mantiene relativamente bassa l'età dei soprassuoli e che i suoi interventi liberano continuamente biospazio da rioccupare, nel bosco gestito la eventuale condizione di source delle particelle in rinnovazione (porzioni di bosco dove sono stato eseguito il prelievo legnoso) riduce solo relativamente l'insieme delle condizioni di sink delle restanti particelle o meglio del restante superficie del bosco.

Box 2 – Sistema Foresta-Legno nel ciclo globale del carbonio (Colpi e Hellrig, 2008)

Concretamente, gli ecosistemi forestali possono essere strumenti per mitigare l'effetto delle emissioni di gas-serra attraverso:

- interventi antropici attivi di conservazione delle foreste esistenti (riduzione della deforestazione e della degradazione delle foreste);

- espansione della superficie forestale permanente (assorbimenti determinati da nuove piantagioni su terreni destinati ad altro uso del suolo e crescita delle foreste indotta dall'ordinaria gestione forestale);
- costituzione di piantagioni di arboricoltura da legno a carattere temporaneo.

Le utilizzazioni forestali sottraggono all'ecosistema bosco biomasse legnose che possono rilasciare il carbonio in esse contenuto in tempi brevi (biomassa combustibile in sostituzione di fonti fossili), ovvero accumularlo in tempi medio lunghi (manufatti di legno o in genere come materiale sostitutivo dei prodotti a base "sintetica") (Ponti 1999).

In letteratura sono presenti numerosi contributi che cercano di stimare quantitativamente gli effetti degli ecosistemi forestali sul bilancio globale del carbonio; si tratta di ricerche di natura eterogenea che raggiungono delle stime in molti casi contrastanti tra loro. A titolo di esempio vengono citati alcuni di questi studi, per ogni eventuale chiarimento si rimanda alla fonte originale.

Un contributo dell'IPCC (2000) mostra che la quantità di carbonio potenzialmente fissabile dalle attività forestali su scala globale varia da 60 a 87 miliardi di tonnellate nei prossimi 50 anni, una quantità che corrisponde al 12-25% delle emissioni globali legate alla combustione delle fonti fossili d'energia (previste per lo stesso periodo secondo uno scenario *business as usual*, cioè lasciando le cose inalterate).

Secondo Prentice (et al., 2001) gli ecosistemi terrestri "confiscano" ogni anno all'atmosfera una quantità di C compresa tra 0.5 e 1.5 miliardi di tonnellate.

A livello europeo, si stima che la vegetazione assorba il 7-12 % delle emissioni antropogeniche di CO₂ (Janssens et al., 2003).

Altri autori affermano che, teoricamente, senza deforestazione il *sink* annuale di C forestale sarebbe pari a 2.3 ± 1.3 miliardi di tonnellate di C, una massa considerevole su cui pesa anche l'effetto positivo dell'aumentata concentrazione della CO₂ e della deposizione di azoto (soprattutto nelle fasce boreali e temperate del pianeta) sulla produttività delle piante. L'uomo è in grado di alterare profondamente il ruolo delle foreste nel ciclo globale del carbonio, agendo per esempio sulla dimensione degli *stock* forestali. La degradazione e la distruzione delle foreste (quasi sempre di origine antropica) registrate nel decennio passato (16 milioni di ettari l'anno) hanno causato un

flusso significativo di C verso l'atmosfera: 1.6 ± 0.8 miliardi di tonnellate, pari a quasi il 25% delle emissioni totali di C di natura antropica (Ciccarese, 2005).

Infine, un recente studio (Ciais et al., 2008), utilizzando dati provenienti dagli Inventari Forestali relativi all'arco temporale 1950-2000, ha evidenziato che le foreste di 17 Paesi Europei stanno accumulando Carbonio. Tale accumulo ammonterebbe a 2.3 Pg C e rappresenterebbe circa il 10% delle emissioni di CO₂ accumulate tra il 1950 e il 2007.

Le foreste del nostro Paese, come quelle di molti Paesi industrializzati, possono contribuire a mitigare l'effetto serra sia perché, essendo state sovra-utilizzate nel recente passato, presentano oggi livelli provvisori molto al di sotto del *climax* e quindi in un processo di espansione dello *stock* di biomassa e di *carbon sink*, sia in virtù delle nuove piantagioni forestali che si stanno realizzando in questo ultimo decennio, grazie agli incentivi finanziari messi a disposizione dall'Unione Europea, volti a ridurre le superfici agricole a produzioni eccedentarie (Ciccarese et al., 2003).

Da questa breve rassegna emerge chiaramente l'esigenza di approfondire le conoscenze riguardanti il ciclo del carbonio attraverso la quantificazione della CO₂ immagazzinata nelle foreste e scambiata con l'atmosfera. Tuttavia, la determinazione del carbonio sottratto dalle foreste risulta difficoltosa e può essere eseguita solo con un significativo livello di errore (Grace, 2004); inoltre, emergono differenze nelle stime, dovute ai metodi utilizzati per la valutazione (Houghton, 2003).

Per quanto riguarda il rapporto tra biomassa forestale epigea e ciclo globale del carbonio, Houghton (2005) afferma che il flusso netto di carbonio tra ecosistemi terrestri e atmosfera è dominato da due fattori: cambiamenti di uso del suolo che riguardano le superfici forestali e variazioni della densità di biomassa per unità di superficie forestale, dovute alla gestione antropica o alla ricrescita naturale. Questo genere di fattori sono normalmente ben documentati nei "Paesi occidentali", in quanto ricavabili dai periodici inventari forestali nazionali ma sono molto incerti per quanto riguarda le regioni tropicali.

In genere, la stima del *carbon budget* della fitomassa arborea è ottenuta attraverso metodiche di "tipo inventariale" finalizzate, in prima analisi, alla quantificazione dei volumi di legname commerciale (FAO, 2001).

Tuttavia, dall'esame effettuato da Lehtonen (2005) si può in sintesi affermare che altri componenti del budget di carbonio dell'ecosistema forestale, come la respirazione eterotrofa, i tagli, gli altri disturbi (incendi, patologie, ecc.), i processi del suolo, la produzione di lettiera, complicano e aumentano l'incertezza della stima del budget di carbonio complessivo.

Sia il carbonio stoccato nei diversi comparti dell'ecosistema che quello scambiato con l'atmosfera sono influenzati dal clima e dalle differenze fisiologiche della vegetazione, dall'età delle piante, dalla comunità eterotrofa del suolo e dagli effetti dei diversi eventi di disturbo (incendi e pratiche selvicolturali). Questo tipo di informazioni possono avere un ruolo importante nella scelta delle pratiche selvicolturali nell'ottica di un'ottimizzazione del "sequestro" di carbonio dall'atmosfera. In particolare, la stima del volume legnoso e della biomassa arborea può avere un ruolo importante per la pianificazione sostenibile dell'utilizzo delle risorse forestali; inoltre, è stato riconosciuto il ruolo potenzialmente rilevante della biomassa come fonte di energia, essendo le superfici forestali una delle più importanti sorgenti di energia rinnovabile (Hall, 1997). A livello mondiale, le biomasse costituiscono la quarta fonte di energia, dopo il carbone, il petrolio ed il gas naturale, contribuendo al 14% del fabbisogno energetico del pianeta (Parikka, 2004).

A livello nazionale, quanto appena esposto è stato confermato da un'accurata indagine sull'offerta e la domanda di combustibili legnosi, sviluppata su base geografica da Drigo et al. (2007).

1.3 Dinamiche del carbonio nei sistemi forestali mediterranei

Se potessimo seguire l'evoluzione di un popolamento forestale dalla sua comparsa fino al culmine della maturità strutturale, ovvero fino a quando non si evidenziano più sensibili variazioni strutturali, constateremo che il suo accrescimento in numero di individui e in biomassa può essere descritto da una curva ad andamento sigmoideo (curva logistica) (Figura 2). Tale curva può essere suddivisa in tre porzioni cui corrispondono diverse fasi evolutive:

- porzione iniziale: la curva si sviluppa in modo tendenzialmente esponenziale; gli individui che compongono la popolazione dimostrano di essere in grado di riprodursi e/o di accrescersi ponderalmente, come se nell'ambiente non agisse alcun fattore limitante;
- intorno del punto di flesso: termina la crescita esponenziale, cominciano ad esprimere effetti rilevabili fattori ecologici, biotici o abiotici, che limitano lo sviluppo rispetto a quanto si osserverebbe in forza dei soli fattori genetici. Si attivano, quindi, alcuni fattori ambientali limitanti;
- porzione finale: gli accrescimenti si riducono, i fattori limitanti esplicano massimamente la propria funzione e mantengono la popolazione a valori di effettivo equilibrio con le condizioni ambientali (Susmel, 1988).

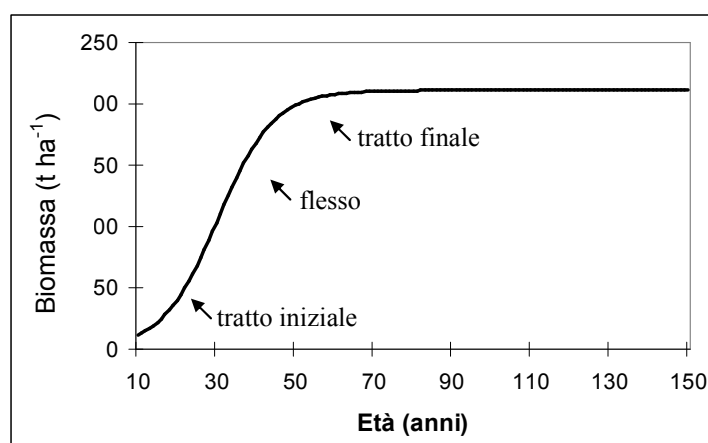


Figura 2: curva logistica relativa ad una fustaia quercina. Fonte Anderle et al., 2002.

Un esempio di espressione analitica della curva di accrescimento logistico è la seguente:

$$V(t) = \frac{K}{1 + \left(\frac{K - M_0}{M_0} \right) e^{-rt}}$$

in cui $V(t)$ è il volume ad ettaro di biomassa presente in bosco all'anno t , mentre K , M_0 ed r costituiscono parametri di crescita, tipici per ciascuna curva:

- **K** è la capacità portante dell'ecosistema, misurata in volume ad ettaro; rappresenta il valore limite per il quale l'accrescimento dV/dt è uguale a zero, ossia quando la popolazione raggiunge il punto di equilibrio con i fattori ambientali;
- **M_0** è l'intercetta sull'asse V , ossia la provvigione esistente all'anno zero;
- **r** è il tasso intrinseco di accrescimento, “la differenza tra il tasso con cui sono prodotti nuovi individui per individuo ed il tasso con cui gli individui esistenti muoiono per individuo” (Anderle et al., 2002).

La curva logistica, rappresentativa dell'accrescimento di popolamenti forestali coetanei, conservando la forma di una “esse allungata”, mostra tuttavia differenze in relazione alla tipologia vegetazionale, alla specie, alle condizioni climatiche e del suolo e all'entità e tipologia dei disturbi, in termini di ampiezza della curva e di posizionamento dei suoi punti caratteristici.

Tale relazione funzionale ha trovato e trova applicazione nella descrizione del comportamento di diverse tipologie vegetazionali arboree (latifoglie sempreverdi e a foglia caduca, conifere) e arbustive (macchia mediterranea).

La quantità di biomassa, espressa in differenti modalità (quantità di carbonio, di CO_2 , di s.s. ecc.) presente in un determinato momento, costituisce lo *stock*, ovvero il materiale accumulato nelle diverse componenti (biomassa epigea, ipogea e carbonio contenuto nel suolo).

La quantità di biomassa accumulata nell'unità di tempo costituisce l'incremento. Se la variazione nel tempo degli *stock* di un dato sito ha valore positivo, il sito stesso funge da *sink* di carbonio; viceversa, se un sito presenta decrementi della biomassa, diminuzione nel tempo degli *stock*, esso costituisce un emettitore netto di C verso l'atmosfera ed è detto *source*.

I popolamenti vegetali semi naturali, come ad esempio gran parte dei boschi e delle popolazioni a macchia, svolgono funzione di *sink* dalle fasi iniziali di formazione fino al

raggiungimento di una soglia (saturazione, K) al di sopra della quale le perdite di carbonio, dovute a vari fattori (respirazione, morte delle piante, fattori di disturbo, ecc.) bilanciano il carbonio fissato.

In termini generali le variazioni di C-stock di un ecosistema, includendo biomassa e suolo, possono evolvere a partire da una condizione iniziale (A) secondo uno dei seguenti scenari (Figura 3):

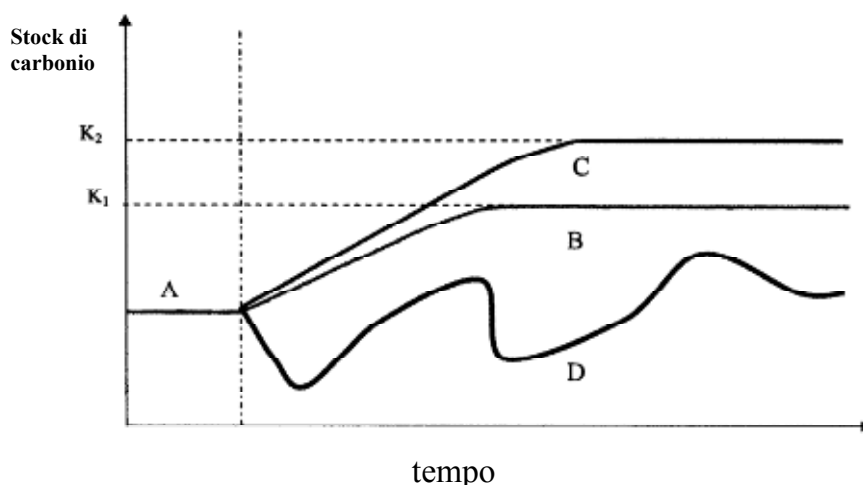


Figura 3: dinamica di assorbimento del carbonio in differenti scenari evolutivi (da Zanchi et al., 2005 modificato)

scenario B, descrive l'aumento del contenuto di carbonio durante una successione che avanza verso uno stato di equilibrio K_1 (rappresentato, ad esempio, da una fase climax di tipo arbustivo);

scenario C, descrive una successione che può essere indirizzata potenzialmente alla formazione di una foresta (fase climax di tipo forestale), stato di equilibrio K_2 .

scenario D, indica come una serie di fattori di disturbo che agiscono sull'ecosistema possa causare l'alternanza di fasi di accumulo o di rilascio di C.

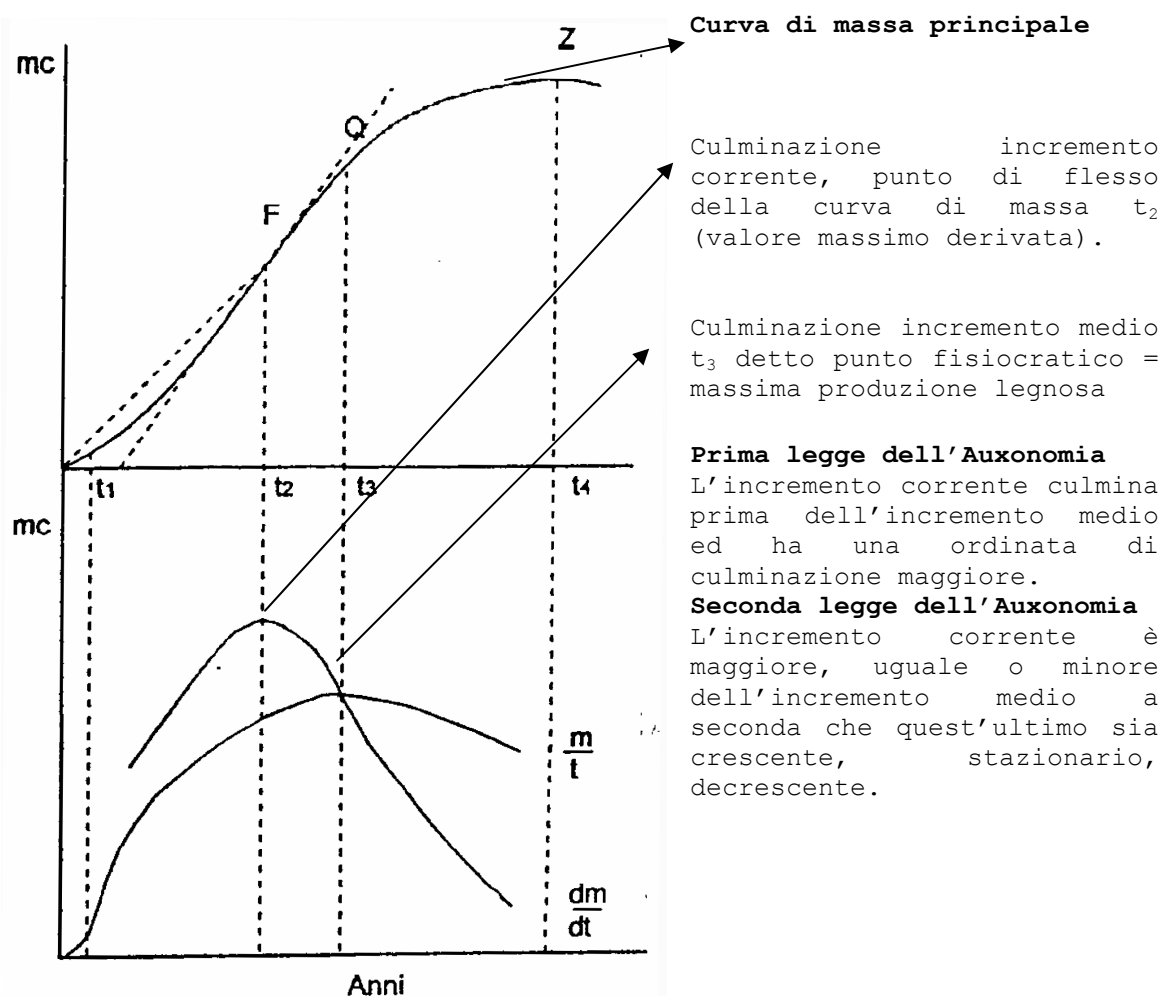
Il Box 3 introduce alcuni classici concetti con cui la dendro-auxonomia studia e caratterizza la curva di sviluppo della massa degli alberi di popolamenti coetanei.

L'accrescimento del volume nei singoli alberi o nei popolamenti segue le leggi dell'auxonomia.

La **curva di massa principale** esprime le variazioni di volume in un popolamento coetaneo; viene costruita eliminando discontinuità e/o oscillazioni di breve periodo (annuali, stagionali, ecc.) e, nel caso di popolamenti soggetti a tagli intercalari, interpolando i volumi post-diradamento.

È detto **incremento medio (I)** il rapporto tra la massa ed il tempo impiegato per generarla, questo valore esprime l'accrescimento medio della massa della pianta o del popolamento dalla sua nascita al momento della sua misura. Esso viene quindi espresso dalla seguente espressione: $I = m/t$

È detto **incremento corrente (J)** la differenza tra la massa al tempo t e quella al tempo $t-1$. Esso quindi esprime la massa prodotta da un albero o da un popolamento in un anno: $J = m_t - m_{t-1}$



Box 3 – Approfondimenti di dendroauxometria (elaborazioni di spunti da Colpi e De Mas, 1992)

1.4 Report sui gas serra

1.4.1 Il Protocollo di Kyoto

L'importanza della biosfera terrestre come componente fondamentale del bilancio globale di carbonio e l'inclusione della sua funzione di carbon sink nei *greenhouse gas (GHG) inventories* è stata riconosciuta a Rio de Janeiro nel 1992 dall'UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change).

La Convenzione ONU sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC, 1992) può essere considerata come la prima risposta della comunità internazionale alla sfida dei cambiamenti climatici. Questo atto sancisce l'importanza di interventi governativi su questo tema, ponendo come proprio obiettivo primario la stabilizzazione delle concentrazioni di gas serra in atmosfera ad un livello tale da prevenire interferenze antropiche che possano minacciare il sistema climatico.

La convenzione riconosce ai Paesi una responsabilità differenziata: i Paesi industrializzati, essendo i maggiori responsabili della produzione di gas ad effetto serra, devono prendersi carico di maggiori sforzi nella determinazione di strategie di contenimento e riduzione (Pettenella e Zanchi, 2006).

Il progredire della UNFCCC è garantito attraverso la Conferenza delle Parti (COP – *Conference of the Parties*), un organo formato dai rappresentanti di tutti i Paesi firmatari che si riunisce ad intervalli di un anno per promuovere, controllare l'applicazione e definire nuovi impegni. Il susseguirsi delle varie COP ha fino ad oggi definito gli strumenti e le regole di attuazione della UNFCCC.

Il provvedimento più significativo è stato adottato alla COP3 a Kyoto nel 1997 dove venne approvato il Protocollo di Kyoto (PK). L'accordo ha introdotto un impegno concreto e vincolante: ridurre tra il 2008 e il 2012 le emissioni globali dei gas serra del 5,2% rispetto a quelle del 1990 (Primo Periodo di Impegno – *First Commitment Period*). Tale riduzione è ripartita in maniera diversa: per i Paesi dell'Unione Europea, nel loro insieme, è fissata all' 8%, per l'Italia è pari al 6,5%; nessun tipo di riduzione è previsto per i Paesi in via di sviluppo.

Il PK è diventato operativo agli inizi del 2005 a seguito della ratifica, nell'ottobre 2004, della Federazione Russa, che ha permesso di raggiungere il quorum di Stati e di quantità di emissioni, nonostante Paesi come gli USA si rifiutino di aderire. A questo proposito è auspicabile che Paesi emergenti come Cina e India, con notevoli e crescenti emissioni, assumano anch'essi impegni di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra. I Paesi industrializzati sono tenuti a dar corso a politiche ed azioni "ammesse" dal protocollo per raggiungere gli impegni di riduzione. Il cosiddetto Allegato I del PK comprende appunto gli Stati che hanno assunto impegni in tal senso e debbono obbligatoriamente contabilizzare i bilanci tra assorbimenti ed emissioni di carbonio (Ciccarese e Pettenella, 2005).

Tra le misure possibili, per rispettare gli impegni di riduzione, oltre quelle, ovvie, nei settori dell'energia e del trasporto (maggior efficienza energetica, potenziamento dello sfruttamento di fonti rinnovabili), sono contabilizzabili diverse attività che incidono sulle modalità di gestione del territorio (Ciccarese, 2005).

In concreto, riguardo il settore agro-forestale sono previste azioni che interessano l'uso del suolo (inteso come modalità di utilizzo e gestione dei territori) e la selvicoltura (per il Protocollo: *Land-Use, Land Use Change and Forestry –LULUCF*) volte a conservare o a migliorare la funzione di assorbimento negli ecosistemi terrestri.

Le specifiche attività LULUCF, che possono essere realizzate per contribuire a raggiungere gli impegni di riduzione delle emissioni clima-alteranti, sono indicate negli articoli 3.3, 3.4, 6 e 12 del PK e nelle decisioni maturate nel corso del lungo processo negoziale (COP). Tali attività per essere ammissibili devono essere state realizzate dopo il 1990 ed essere intenzionali (prodotte da interventi antropici volontari- *human induced*).

L'articolo 3 al comma 3° prevede siano contabilizzate le attività (valutate in termini di quantità di carbonio atmosferico fissato) derivanti dalla *reforestation, afforestation deforestation*.

L'articolo 3 al comma 4° indica le "attività addizionali" a quelle previste dal 3.3 quali: *forest management, revegetation, cropland management, grazing land management*. La Tabella 4 riporta la definizione esatta dei termini sopra citati e di alcuni altri ritenuti

termini chiave per rendere operative le attività in campo agricolo e forestale del Protocollo di Kyoto, secondo quanto previsto dagli articoli 3.3 e 3.4.

Esistono delle quote nazionali massime di carbonio “confiscabili” con le attività di gestione forestale. Ogni paese può liberamente includere nei propri bilanci una o più delle quattro attività previste dall’articolo 3.4 e, conseguentemente, contabilizzarne le variazioni degli stock di carbonio ad esse legate (Ciccarese e Pettenella, 2005). Va precisato che per le suddette attività è previsto l’uso di diverse metodologie di contabilizzazione: *net-net accounting* per la rivegetazione, la gestione dei suoli agrari e dei pascoli e il *gross-net accounting*² per la gestione forestale (Ciccarese et al., 2006).

La COP 7 tenutasi a Marrakesh nel 2001, ha fornito alcune precisazioni riguardo termini fondamentali; per foresta è intesa una superficie minima di 0.05-1.0 ettari con copertura minima del 10-30% e un’altezza minima di 2-5 metri. Inoltre, è stata chiarita la distinzione tra *afforestation e deforestation* (che riguarda il periodo di tempo in cui il suolo non è stato precedentemente occupato da foresta): *afforestation* si riferisce ad una piantagione eseguita su un suolo “non forestato” per almeno 50 anni prima dell’intervento.

² Il *net-net accounting* confronta le variazioni degli *stock* di carbonio avvenute nel corso del periodo d’impegno con quelle dell’anno di riferimento; il *gross-net accounting* considera esclusivamente variazioni di *stock* di carbonio dovute alle differenze tra emissioni e prelievi all’interno di un periodo d’impiego, senza che queste siano confrontate con le variazioni di stock nell’anno di riferimento (Ciccarese e Pettenella, 2005)

Terminologia relativa al settore forestale nel Protocollo di Kyoto

- (a) **Forest** è un'area con dimensioni minime di 0,05-1,0 ettari, con un tasso di copertura arborea di almeno 10- 30%, con piante in grado di raggiungere, a maturità e in situ, un'altezza minima di 2,5 m. Un paese può scegliere, sia per le dimensioni minime sia per il tasso di copertura, il limite minimo all'interno del range.
- (b) **Afforestation** è la conversione in foresta, per azione antropica, di un'area che non risulta classificata come foresta da almeno 50 anni; l'afforestazione può essere realizzata per mezzo di piantagione, semina e/o un intervento antropico di sostegno all'affermazione delle modalità naturali di propagazione.
- (c) **Reforestation** è la conversione realizzata attraverso piantagione semina e/o azione antropica di sostegno all'affermazione di modalità naturali di propagazione su terreni già in precedenza forestale, ma che sono stati adibiti ad altri usi.
- (d) **Deforestation** è la conversione per azione antropica di un'area forestale in non forestale.
- (e) **Revegetation** è un'azione antropica volta ad aumentare gli stock di carbonio in un sito, mediante la realizzazione di una copertura vegetale su un'area minima di 0,05 ettari, che non rientri nelle definizioni di "afforestazione e riforestazione".
- (f) **Forest management** è un complesso di pratiche per la conduzione e l'uso sostenibile di una foresta, finalizzate al conseguimento di rilevanti funzioni ecologiche (quali la tutela della diversità biologica), economiche e sociali.
- (g) **Cropland management** è un complesso di pratiche su territori su cui sono effettuate coltivazioni agrarie e su terreni messi a riposo o temporaneamente non adoperati per produzioni agricole.
- (h) **Grazing land management** è un complesso di pratiche su terreni utilizzati per l'allevamento del bestiame, volti a modificare la quantità e il tipo di vegetazione e il bestiame allevato.
-

Tabella 4: terminologia relativa al settore forestale nel Protocollo di Kyoto, dalla COP 7 dell'UNFCCC tenutasi a Marrakesh nel 2001 (Cicarese et al., 2003)

Le attività LULUCF possono essere realizzate anche all'esterno del territorio nazionale attraverso progetti che seguono le regole dei cosiddetti "meccanismi flessibili":

1. il Meccanismo di Sviluppo Pulito -*Clean Development Mechanism* (CDM) consente ai Paesi industrializzati (compresi nel cosiddetto Allegato 1) e ad economia in transizione di realizzare progetti nei Paesi in via di sviluppo, che producano benefici ambientali in termini di riduzione delle emissioni di gas-serra e di sviluppo economico e sociale dei Paesi ospiti e nello stesso tempo generino crediti di emissione per i Paesi che promuovono gli interventi (art.12);
2. l'Attuazione Congiunta -*Joint Implementation* (JI) consente ai Paesi industrializzati e ad economia di transizione di realizzare progetti per la riduzione delle emissioni di gas-serra in un altro Paese dello stesso gruppo e di utilizzare i crediti derivanti, congiuntamente con il Paese ospite (art. 6);
3. Commercio Internazionale delle Emissioni -*International Emissions Trading* (ET) consente lo scambio di crediti di emissione tra Paesi industrializzati e ad economia in transizione: un Paese che abbia conseguito una diminuzione delle

proprie emissioni di gas serra superiore al proprio obiettivo può così cedere (ricorrendo all'ET) tali "crediti" a un Paese che, al contrario, non sia stato in grado di rispettare i propri impegni di riduzione delle emissioni di gas-serra (art.17) (Ciccarese et al., 2006).

Esistono differenze sostanziali tra le attività LULUCF e le misure per ridurre le emissioni di gas-serra in altri settori: il problema della "saturazione" e quello della "non permanenza". La saturazione avviene con il raggiungimento del massimo biologico di carbonio sequestrabile da una foresta o da un suolo agricolo. Essa è quindi condizionata sia dalla limitata disponibilità di terreni, sia dalla quantità di carbonio che può essere immagazzinato per unità di superficie (Ciccarese e Pettenella, 2005). La non permanenza deriva dall'osservazione che il carbonio immagazzinato nella biosfera può essere potenzialmente reversibile, infatti può ritornare in atmosfera a causa degli incendi, della degradazione delle foreste, dei tagli ecc. (Marland et al., 2001)

Nel corso della Conferenza di Milano (COP-9) è stato presentato il rapporto *Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry* (GPG-LU-LUCF, - IPCC, 2003) redatto dal Gruppo Intergovernativo sui Cambiamenti del Clima (IPCC). Tale rapporto descrive un complesso sistema di calcolo delle emissioni e assorbimenti dei gas ad effetto serra definendo le metodologie che i Paesi devono seguire per la contabilizzazione, per quanto riguarda le categorie di uso del suolo considerate e le superfici interessate dalle attività previste dal Protocollo di Kyoto (artt. 3.3, 3.4, 6 e 12). A tutt'oggi questo rapporto fornisce le uniche *indicazioni ufficiali* riguardo alle metodologie di stima, non essendo stata messa a punto per l'Italia alcuna normativa di dettaglio o atto di indirizzo al quale dovranno conformarsi le operazioni di stima del carbonio fissato, in relazione agli interventi previsti nei successivi capitoli del Protocollo di Kyoto.

1.4.2 Applicazione del PK in Italia

Nell'assicurare il rispetto degli impegni assunti con la ratifica del Protocollo (formalmente in vigore dal 16 Febbraio 2005) i Paesi sono chiamati a rendicontare gli stock di carbonio (bilanci tra assorbimenti ed emissioni dei gas serra) accumulati nelle foreste e nelle piantagioni forestali (nel complesso per tutte le attività relative agli articoli 3.3 e 3.4 del PK) e di aggiornarli periodicamente.

A riguardo l'Italia³ ha elaborato il "Piano nazionale per la riduzione delle emissioni di gas responsabili dell'effetto serra 2003-2010" (Delibera CIPE n. 123 del 19 Dicembre 2002) che prevedeva, tra le altre cose, la realizzazione di un nuovo Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio ed una serie di azioni finalizzate a realizzare il "potenziale massimo nazionale di assorbimento di carbonio" (Tabella 5). Tra queste era prevista la realizzazione del "Registro nazionale dei serbatoi di carbonio agro-forestali" la cui funzione primaria avrebbe dovuto essere la certificazione delle quantità di carbonio sequestrate nei serbatoi (*stock*) dei sistemi agro-forestali italiani.

Assorbimento previsto per ogni articolo	(Mt CO2 eq.)
Art 3.4 Forest Management	4.1
Art 3.4 Terre agricole, pascoli, rivegetazione	0.1
Art 3.3 Riforestazione naturale	3.0
Art 3.3 Afforestazione e Riforestazione (vecchi impianti)	1.0
Art 3.3 Afforestazione e riforestazione (nuovi impianti)	1.0
Art 3.3 Afforestazione e riforestazione (nuovi impianti) su aree soggette a dissesto idrogeologico (legge n. 183/1989)	1.0
Totale	10,2

Tabella 5: Potenziale nazionale massimo di assorbimento di carbonio. Fonte delibera CIPE n. 123 del 19 dicembre 2002

Dall'analisi dei dati sopra riportati Ciccarese (2005) commenta che l'Italia ha affidato al settore agricolo-forestale un importante impegno di contenimento delle emissioni; in particolare dei 10,2 Mt di CO₂ eq. di riduzione complessiva prevista, il 40,2% (pari a 4.1 Mt CO₂ eq.) è assegnato alle misure di gestione delle foreste già esistenti sul territorio nazionale al 1990. Un ulteriore 58,9% (pari a 6 Mt di CO₂ eq.) del potenziale di assorbimento totale dovrebbe provenire dalle misure di cui all'art. 3.3 (afforestazione

³ L'Italia ha ratificato il Protocollo di Kyoto con la legge n. 10 del 1 giugno 2002

e riforestazione). A completare gli interventi si assegna lo 0,9% alla gestione dei prati, dei pascoli, dei suoli agricoli e della “rivegetazione” .

In sintesi, la strategia prevista dal piano prevedeva la conservazione delle risorse forestali esistenti, una loro gestione appropriata in modo che il *carbon sink* sia ottimizzato e la promozione di interventi, tra i quali la costituzione di nuove foreste (afforestazione e riforestazione) che dovevano contribuire alla sicurezza idrogeologica del territorio e all’aumento del volume di biomassa disponibile per la produzione di energia rinnovabile.

Il tentativo di applicazione dei propositi sopra esposti si è scontrato con una serie di problemi di carattere operativo.

Ad esempio, riguardo la gestione forestale l’Italia era detentrica di una “quota crediti di carbonio” (assegnata in sede negoziale nel 2001) pari a 0.18 MtC/anno, tale da non consentire il raggiungimento degli obiettivi previsti dal piano.

Per risolvere questo problema dall’estate 2005 al maggio 2006 si è svolto un delicato processo negoziale che, tenendo conto delle argomentazioni prodotte dall’Italia, ha determinato la revisione di questo valore numerico. Il tetto potenziale dei crediti di carbonio utilizzabili dal nostro Paese è così passato da 0.18 MtC/anno a 2.78 MtC/anno (Lumicini, 2006) .

Ancora, un elemento chiave delle attività forestali che prevedono, ad esempio, nuove piantagioni (Art. 3.3 del PK), è la stima degli *stock* di carbonio e delle loro variazioni con un livello di precisione sufficientemente accurato. I progetti di questo tipo devono necessariamente certificare il carbonio assorbito attraverso una metodologia a corredo del progetto stesso, volta, tra le altre cose, a valutare la migliore performance *investimento/assorbimento di carbonio*.

In principio era previsto un meccanismo di certificazione che prevedeva di attribuire un valore remunerabile (*ReMoval Units, RMU*) all’*assorbimento certificabile* di carbonio realizzato attraverso le attività di cui agli Articoli 3.3 e 3.4 del PK (Tedeschi e Lumicini 2006). Inoltre nel caso in cui, a livello nazionale, fosse derivato da queste attività un assorbimento netto di gas serra, il Paese poteva iscrivere (inserendoli nel proprio registro nazionale) una quantità equivalente di crediti di carbonio (*ReMoval Units, RMU*) (Lumicini A. et al., 2006).

A tutt'oggi, riguardo quanto sopra descritto, si deve segnalare la mancata operatività di un sistema di certificazione e scambio di crediti provenienti dalle attività indicate (art. 3.3 e 3.4). In parte ciò è dovuto al fatto che il meccanismo flessibile *Emissions Trading* (ET) è stato implementato nell'Unione Europea (UE) con la creazione dell'*Emission Trading Scheme* (ETS); questo consiste in un mercato dove le imprese, che utilizzano grosse quantità di energia, devono rispettare obblighi di emissione annualmente definiti. Per rispettare tali obblighi possono acquistare crediti di emissione disponibili sul mercato. Attualmente nell'ETS non possono essere venduti crediti di emissione provenienti da attività nel settore agricolo e forestale realizzate in Europa (Ciccarese e Pettenella, 2008).

Al “mercato ufficiale”, appena descritto, si è affiancato un “mercato degli interventi volontari”. Quest'ultimo consente la realizzazione di interventi di carattere volontario, da parte di investitori pubblici e privati, caratterizzati da una più ampia flessibilità e una maggiore gamma di tipologie d'azione (esempio progetti forestali per la riduzione della desertificazione e del degrado delle foreste); ciò in virtù del fatto di non essere necessariamente soggetti alle limitazioni e alle regole imposte dal PK. I progetti di compensazione, realizzati attraverso la mediazione di agenzie di servizio, prevedono la certificazione dei crediti di carbonio ottenibili da questi interventi volontari VER (*Verified Emission Reductions*). Una tonnellata di emissioni di CO₂ equivalente ridotta genera un VER (Ciccarese e Pettenella, 2008).

Infine, ogni Paese che partecipa alla Convenzione sui Cambiamenti Climatici, oltre a fornire annualmente l'inventario nazionale delle emissioni dei gas serra secondo i formati richiesti (conformi alle linee guida IPCC, 2006), deve dichiarare, in uno specifico documento (*National Inventory Report*), le metodologie di stima utilizzate e le giustificazioni degli andamenti osservati. A garantire questa funzione, in Italia, è l'APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici) su incarico del Ministero dell'Ambiente; in particolare, il rapporto “*Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2005. National Inventory Report 2007*” descrive la comunicazione annuale italiana dell'inventario delle emissioni dei gas serra dal 1990 al 2005 (APAT, 2007).

Questo rapporto contiene una serie storica dei dati di emissione relativa al periodo compreso tra il 1990 e il 2005 dalla quale si evidenzia che le emissioni nazionali totali

dei sei gas serra, espresse in CO₂ equivalente, sono aumentate del 12.1% nel 2005 rispetto all'anno di riferimento (1990), a fronte di un impegno nazionale di riduzione del 6.5% entro il periodo 2008-2012.

Sempre l'“*Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2005. National Inventory Report 2007*” indica che la categoria di uso/copertura del suolo Foresta è responsabile dell'81% dell'assorbimento totale di CO₂ rispetto alle attività considerate dal LULUCF; in particolare, l'assorbimento dovuto alla componente biomassa viva (*living biomass*) è pari al 47%, quello relativo alla sostanza organica morta ed al suolo è rispettivamente pari al 9% e al 45% (Tabella 6).

<i>Forest land</i>	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
<i>- living biomass</i>	36	44	43	39	44	45	46	44	44	45	44	46	47	45	47	47
<i>- dead organic matter</i>	9	8	9	9	9	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9
<i>- soils</i>	55	48	49	52	48	47	46	47	47	46	47	45	44	46	45	45

Tabella 6 contributo percentuale dei *carbon pool* per la categoria foreste (APAT, 2007)

Questo rapporto è stato sviluppato utilizzando i dati di volume legnoso e delle superfici forestali provenienti dall'Inventario Forestale Nazionale (principalmente i dati presenti nell'Inventario del 1985 combinati con i risultati preliminari dell'Inventario nazionale in corso di realizzazione), analizzati attraverso un modello sviluppato e di recente implementato, assumendo la denominazione di For-est (Federici et al., 2008), che consente la stima dell'evoluzione nel tempo dei *pool* di carbonio relativi alle foreste italiane.

Questa sezione si conclude segnalando che nonostante l'Italia sia in evidente ritardo rispetto agli obiettivi che si è impegnata a conseguire firmando il Protocollo di Kyoto nel Documento di Programmazione Economica-Finanziaria (Dpef) per gli anni 2009-2013, deliberato dal Consiglio dei Ministri il 18 Giugno 2008, non c'è alcun riferimento alle risorse necessarie per fronteggiare i mutamenti climatici e in particolare non si menzionano fondi o strategie da destinare alla riduzione delle emissioni di CO₂ e alla mitigazione dei cambiamenti del clima.

1.4.3 Good Practice Guidance for LULUCF

Questo documento prevede l'individuazione di sei principali Categorie d'Uso/Copertura del Suolo (foreste, suoli agricoli, prati e pascoli, zone umide, insediamenti antropici, altre terre) (Milne e Pateh Jallow, 2003) per ognuna delle quali è indicata una specifica metodologia di stima delle variazioni di carbonio (Nabuurs et al., 2003; Schlamadinger et al., 2003; Brown e Masera, 2003). Inoltre introduce tre livelli gerarchici di metodologie, *Tiers*, a cui corrispondono diversi livelli di precisione nelle stime. Riguardo la scelta del *Tier*, ogni Paese utilizza quello che offre la migliore accuratezza nella stima e quindi è caratterizzato da una complessità metodologica superiore rispetto agli altri. Ogni Stato ha a disposizione i dati e le informazioni relativi alla superficie e ai parametri dendrometrici ed ecologici; esiste la possibilità di utilizzare semplici equazioni, basate sull'uso di dati riferiti a livello di nazione, oppure modelli e altri strumenti di valutazione degli stock derivati da indagini stazionali specifiche o da ricerche ed esperimenti in grado di integrare due o più metodi indicati nel rapporto (Ciccarese et al., 2006).

Il GPG-LULUCF contiene numerosi *decision trees*, “alberi di decisione”, formati da una serie di diagrammi di flusso che descrivono passo a passo e con ordine le scelte che bisogna compiere per sviluppare una stima del carbonio nelle varie componenti, in accordo con la guida stessa. Lund (2006) a riguardo ha messo in evidenza l'assenza nella guida di uno specifico *decision tree* dedicato alla identificazione e classificazione delle terre secondo le categorie d'uso/copertura proposte.

Il rapporto IPCC (2003) individua due metodi per la stima della variazione degli stock di carbonio della biomassa:

1. *Default method*, un metodo che giunge ai bilanci di carbonio sottraendo le perdite di biomassa (prelievi di legname, perdite dovute a fattori antropici e naturali, quali incendi, uragani, ecc.) all'incremento della stessa in un anno di riferimento;
2. *Stock change method*, un metodo che prevede due stime della biomassa totale relativa ad una superficie realizzate ad un intervallo di tempo noto ed il

calcolo della differenza tra le stesse, la quale, divisa per il numero di anni tra i due inventari offre la variazione dello stock di carbonio.

Riguardo le attività LULUCF, la stima degli *stock* di carbonio e dei loro cambiamenti deve essere effettuata con un livello di precisione sufficientemente alto; nel dettaglio questo aspetto è ampiamente trattato nel capitolo 5 della GPG LULUCF (Paciornik e Rypdal, 2003).

La guida IPCC considera validi ai fini della contabilizzazione soltanto i quantitativi di carbonio fissati o rimossi dalle “foreste gestite”. Con il termine gestione forestale si intende “*il processo di pianificazione e implementazione delle pratiche per la gestione delle risorse naturali e per un uso della foresta mirato all’adempimento delle funzioni rilevanti di tipo ecologico, economico, sociale della foresta stessa... . Una foresta gestita è una foresta sottoposta a gestione forestale*” (IPCC, 2003).

Questa definizione implica che le foreste gestite siano soggette a periodici o continui interventi umani che includono un’ampia gamma di pratiche di gestione, dalla produzione di legname commerciale fino alla gestione delle risorse naturali con propositi non commerciali.

Le metodologie di stima sono organizzate secondo grandi *pool* o comparti dell’ecosistema descritti nel capitolo 3 del GPG LULUCF (Nabuurs et al., 2003) e sintetizzati nella Tabella 7.

DEFINIZIONI DEI POOL TERRESTRI DI CARBONIO		
Pool		Descrizione
Biomassa viva <i>(Living Biomass LB)</i>	Epigea <i>Above-ground biomass</i>	Tutta la biomassa epigea; include fusti, ceppi, rami, corteccia, semi, foglie (espressa in tonnellate di peso secco).
	Ipogea <i>Below-ground biomass</i>	Include tutta la biomassa viva delle radici. Le radici sottili di diametro inferiore ai 2 mm sono spesso escluse perché non possono essere distinte empiricamente dalla materia organica dei suoli o della lettiera.
Materia organica morta (necromassa) <i>(Dead Organic Mater DOM)</i>	Legno morto <i>Dead wood</i>	Include tutta la biomassa legnosa non vivente, non contenuta nella lettiera, sia alberi in piedi che legno sul terreno o nel suolo. Il legno morto include il legno indecomposto sulla superficie, le radici morte, i ceppi di diametro maggiore o uguale a 20 cm (o altri diametri specifici per alcune nazioni).
	Lettingiera <i>Litter</i>	Include tutta la biomassa non vivente con un diametro minore a un valore minimo fissato dal paese (per esempio 10 cm), indecomposta, o in vario stato di decomposizione sul suolo. Le radici sottili (o di diametro inferiore al limite per la biomassa ipogea) sono incluse nella lettiera laddove non possono essere distinte in modo empirico.
Suoli <i>(Soils)</i>	Materia organica del suolo <i>Soil organic matter</i>	Include il carbonio organico nei suoli minerali e organici, fino ad una specifica profondità. Le radici sottili vive (o inferiori al diametro minimo per la biomassa ipogea) sono incluse nella materia organica del suolo, nel caso in cui non sia possibile distinguerle in modo empirico.

Tabella 7: definizione dei pool terrestri di carbonio. Fonte cap. 3 della guida GPG LULUCF

L'assunzione di base è che il carbonio rimosso dal legno o da altra biomassa forestale sia completamente ossidato nell'anno della rimozione stessa e che il flusso di CO₂ da e verso l'atmosfera sia assunto uguale alle variazioni negli stock di carbonio nella biomassa esistente e nei suoli.

La categoria di uso del suolo "Foresta", è distinta in due tipologie:

- *forest land remaining forest land*, "foreste che permangono tali nel tempo"
- *land converted to forest land*, "conversioni di altri usi del suolo a foresta".

Per foresta si intende un popolamento forestale presente da almeno 20 anni. Le aree che sono state convertite da un altro uso a foresta vengono considerate come una categoria in transizione, per un intervallo temporale stabilito, fino a quando cioè la dinamica del carbonio risente del precedente uso del suolo.

A titolo di esempio e al fine di mostrare la complessità della metodologia indicata nella guida, si propongono le equazioni che portano alla stima delle emissioni annuali o delle rimozioni di carbonio da una “foresta che permane tale nel tempo” (FF) (Tabella 8).

EQUATION 3.2.1	
ANNUAL EMISSIONS OR REMOVALS FROM FOREST LAND REMAINING FOREST LAND	
$\Delta C_{FF} = (\Delta C_{FF_{LB}} + \Delta C_{FF_{DOM}} + \Delta C_{FF_{Soils}})$	
ΔC_{FF} = annual change in carbon stocks from forest land remaining forest land, tonnes C yr ⁻¹	Variazione annuale nello stock di carbonio nelle FF, (ton C / anno)
$\Delta C_{FF_{LB}}$ = annual change in carbon stocks in living biomass (includes above- and belowground biomass) in forest land remaining forest land; tonnes C yr ⁻¹	Variazione annua nello stock della biomassa viva (epigea ed ipogea) espressa in t/anno
$\Delta C_{FF_{DOM}}$ = annual change in carbon stocks in dead organic matter (includes dead wood and litter) in forest land remaining forest land; tonnes C yr ⁻¹	Variazione annua nello stock della materia organica morta (include le necromassa legnosa e la lettiera)
$\Delta C_{FF_{Soils}}$ = annual change in carbon stocks in soils in forest land remaining forest land; tonnes C yr ⁻¹	Variazione annuale nello stock del carbonio immagazzinato nella come sostanza organica del suolo
To convert tonnes C to Gg CO ₂ , multiply the value by 44/12 and 10 ⁻³ .	
Per convertire le tonnellate di carbonio in Gg di CO ₂ , si moltiplichi il valore per 44/12 e 10 ⁻³ .	

Tabella 8: equazione 3.2.1

La stima delle variazioni di carbonio della biomassa $\Delta C_{FF_{LB}}$ può essere eseguita attraverso uno dei due metodi precedentemente indicati (Tabelle 9 e 10).

EQUATION 3.2.2	
ANNUAL CHANGE IN CARBON STOCKS IN LIVING BIOMASS IN FOREST LAND REMAINING FOREST LAND (DEFAULT METHOD)	
$\Delta C_{FF_{LB}} = (\Delta C_{FF_G} - \Delta C_{FF_L})$	
$\Delta C_{FF_{LB}}$ = annual change in carbon stocks in living biomass (includes above- and belowground biomass) in forest land remaining forest land, tonnes C yr ⁻¹	Variazione annua nello stock della biomassa viva (epigea ed ipogea) espressa in t/anno
ΔC_{FF_G} = annual increase in carbon stocks due to biomass growth, tonnes C yr ⁻¹	Incremento annuale dovuto alla crescita della biomassa
ΔC_{FF_L} = annual decrease in carbon stocks due to biomass loss, tonnes C yr ⁻¹	Perdita annuale dovuta alla perdita di biomassa

Tabella 9: equazione 3.2.2 GPG LULUCF

EQUATION 3.2.3	
ANNUAL CHANGE IN CARBON STOCKS IN LIVING BIOMASS IN FOREST LAND REMAINING FOREST LAND (STOCK CHANGE METHOD)	
$\Delta C_{FFLB} = (C_{t_2} - C_{t_1}) / (t_2 - t_1)$ <p style="text-align: center;">and</p> $C = [V \bullet D \bullet BEF_2] \bullet (1 + R) \bullet CF$	
ΔC_{FFLB} = annual change in carbon stocks in living biomass (includes above- and belowground biomass) in forest land remaining forest land, tonnes C yr ⁻¹	Variazione annua nello stock della biomassa viva (epigea ed ipogea) espressa in t/anno
C_{t_2} = total carbon in biomass calculated at time t_2 , tonnes C	Carbonio totale della biomassa calcolato al tempo T2, in tonnellate di C
C_{t_1} = total carbon in biomass calculated at time t_1 , tonnes C	Carbonio totale della biomassa calcolato al tempo T3, in tonnellate di C
V = merchantable volume, m ³ ha ⁻¹	Volume commerciale
D = basic wood density, tonnes d.m. m ³ merchantable volume	Densità basale del legno
BEF_2 = biomass expansion factor for conversion of merchantable volume to aboveground tree biomass, dimensionless.	Coefficiente per la conversione del volume commerciale in biomassa arborea epigea
R = root-to-shoot ratio, dimensionless	Coefficiente radici-chioma (rapporto tra biomassa ipogea e biomassa epigea)
CF = carbon fraction of dry matter (default = 0.5), tonnes C (tonne d.m.) ⁻¹	Frazione di carbonio della biomassa secca (default 0.5)

Tabella 10 - Equazione 3.2.3 GPG LULUCF

Seguono una serie di altre equazioni per completare il calcolo del ΔC_{FFLB} e degli altri termini ΔC_{FFDOM} e ΔC_{FFSoil} .

Per quanto riguarda la determinazione degli *stock* di carbonio della biomassa epigea, la metodologia esposta prevede che i volumi di legname (e i relativi incrementi, ottenuti solitamente dai dati di un Inventario Forestale) siano trasformati in peso attraverso l'uso della densità basale (*basic wood density*) del legno della singola specie. Per determinare l'ammontare della biomassa totale (che comprende tutte le componenti della parte epigea ed ipogea di una pianta), il valore ottenuto viene moltiplicato per una serie di fattori di conversione (BEF, fattore di espansione della biomassa; RS, rapporto biomassa ipogea su epigea); infine si trasforma tale valore in carbonio (circa il 50% del peso secco della biomassa) e in CO₂ (moltiplicando il valore del carbonio per 3.666) (Ciccarese, 2005).

In alcuni casi (nuove piantagioni, incendi, interventi colturali che prevedano l'eliminazione di porzioni di biomassa, interventi di fertilizzazione) risulta necessario prevedere anche la stima di "gas serra non-CO₂". In merito alla definizione di gas serra e alla loro fonte di origine si distinguono (Tabella 11):

<i>Gas serra</i>	<i>Origine</i>
CO ₂	biomassa viva, necromassa, suolo
N ₂ O	incendi, mineralizzazione della sostanza organica del suolo, fertilizzazioni azotate, coltivazione di suoli organici
CH ₄	incendi

Tabella 11 - Gas ad effetto serra considerati dal GPG LULUCF

Attualmente le attività LULUCF possono essere suddivise in due grandi categorie:

- la riforestazione/afforestazione e la deforestazione, ossia le attività di cambiamento di uso delle terre (art. 3.3);
- la gestione forestale, la gestione delle terre agricole, la gestione delle terre di pascolo e la rivegetazione, ossia le attività di uso delle terre (art. 3.4).

La prima categoria è formata dalle attività obbligatorie per ognuna delle quali ogni Paese deve provvedere a stime delle superfici (*activity data*) e delle variazioni degli stock di carbonio organico nei cinque *carbon pool* previsti dal rapporto (biomassa epigea, biomassa ipogea, necromassa, lettiera, sostanza organica nel suolo), nonché delle emissioni di metano e di ossido di diazoto. La logica della loro obbligatorietà risiede nel fatto che ad ogni variazione d'uso delle terre 'da o verso' foresta corrisponde, di regola, una variazione permanente negli *stock* di carbonio.

Al contrario, le attività appartenenti alla seconda categoria non risultano necessariamente in una variazione permanente degli *stock* di carbonio e, per tale ragione, possono essere incluse su base volontaria (Mollicone e Federici, 2005). Pertanto i Paesi si trovano di fronte alla possibilità di adottare una definizione di *forest management* conforme a quanto previsto dalla guida GPG LULUCF, la quale prevede a riguardo due approcci:

- *Broad Approach*, che non richiede l'esecuzione di specifiche pratiche su ciascun sito, ma la sola identificazione delle aree soggette ad un generico sistema di pratiche colturali;

- *Narrow Approach*, più restrittivo, che considera come soggette a *Forest Management* le sole aree interessate da interventi colturali “intensivi” (Schlamadinger et al., 2003).

Il primo approccio implica l’inventariazione e il monitoraggio degli stock di carbonio e delle sue variazioni su tutte le risorse forestali esistenti al 1990, mentre il secondo propone la scelta di un’interpretazione di gestione forestale che restringa l’ambito territoriale di inventariazione e monitoraggio a una quota ridotta delle foreste esistenti (ad esempio solo quelle dotate di piani di assestamento o solo le foreste interessate da trattamenti selvicolturali finalizzati alla difesa dalle avversità biotiche o abiotiche quali gli incendi) (Ciccarese et al., 2006).

Le attività previste dall’articolo 3.3 si differenziano da quelle relative all’articolo 3.4, infatti per le prime i crediti possono essere contabilizzati *in toto*, mentre quelli generati dalla gestione forestale devono essere ridotti al 15% del totale; questo per eliminare la frazione di carbonio accumulata dalle foreste per effetto di fattori, non “*direct human induced*”, quali l’invecchiamento naturale o la fertilizzazione azotata (Pilli e Anfodillo, 2006; Ciccarese et al., 2003).

1.4.4 Contesto regionale in cui si inserisce la ricerca

L'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio (INFC), come accennato sopra, ha fornito misure sulla massa forestale presente e stime sullo stock di carbonio per le diverse categorie inventariali. Attualmente (2008) è in fase di completamento l'ultima serie di rilievi finalizzata alla stima del carbonio contenuto nel suolo. Tali categorie riprendono uno standard internazionale di classificazione delle tipologie di copertura del suolo, FAO-FRA2000 (FAO, 2001) adattato alla realtà italiana da Pignatti (INFC, 2003).

Come richiamato, i risultati dell'INFC (INFC, 2007a) attribuiscono alla Sardegna 1 213 250 ettari di superficie forestale totale che la collocano al primo posto tra le regioni italiane; al secondo posto risulta la regione Toscana con 1 151 539 ettari di superficie forestale totali. In dettaglio, il 48.1 % di tale superficie è attribuita alla *macrocategoria inventariale bosco*⁴ e il 51.9 % alla *macrocategoria inventariale altre terre boscate* (Tabella 12).

Dalla analisi delle superfici delle categorie inventariali principali relative alla Sardegna, si osserva che la superficie forestale è composta dalle tipiche formazioni a macchia mediterranea (circa 520 mila ettari), da boschi di sempreverdi (leccio circa 250 mila ettari e sughera con circa 140 mila ettari), da specie decidue mediterranee (principalmente roverella con 80 mila ettari circa, localizzati nelle aree interne). A queste si aggiungono le piantagioni forestali per produzione di legno o carta diffuse sul territorio in modo irregolare (complessivamente circa 25 mila ettari) (Tabella 13).

La considerazione del contesto globale e nazionale mette in evidenza quanto la pianificazione e gestione del territorio e del patrimonio forestale della Sardegna può incidere sul bilancio della CO₂ e contribuire al raggiungimento dei traguardi nazionali di riduzione delle emissioni fissati dal PK.

⁴ Definizioni FAO-FRA2000 –*Forest Resources Assessment*- adottate per INFC:

Bosco, territorio con copertura arborea maggiore del 10% su un'estensione maggiore di 0,5 ha e larghezza minima di 20 metri. Gli alberi devono raggiungere un'altezza minima di 5 m a maturità in situ;

Altre Terre Boscate, estensione maggiore di 0,5 ha e larghezza minima di 20 metri; territorio con copertura arborea del 5-10% di alberi in grado di raggiungere un'altezza minima di 5 m a maturità in situ, oppure territorio con una copertura maggiore di 10% costituita da alberi che non raggiungono un'altezza di 5 m a maturità in situ o da arbusti e cespugli.

Pianificazione e gestione necessitano ovviamente di metodi, tecniche e strumenti efficaci (affidabili e precisi, sintonizzati alla realtà locale) ed efficienti per effettuare, tramite la ciclica ripetizione dei rilevamenti, il monitoraggio dell'evoluzione dei sistemi territoriali in cui si opera. In realtà, a livello regionale, si osservano importanti carenze sotto questo profilo. Il lavoro di ricerca svolto si propone come contributo al superamento di queste carenze.

Distretto territoriale	Bosco		Altre terre boscate		Superficie forestale totale		Superficie territoriale (ha)
	superficie (ha)	ES (%)	superficie (ha)	ES (%)	superficie (ha)	ES (%)	
Piemonte	970 594	1.1	89 522	7.2	940 116	1.0	2 539 983
Valle d'Aosta	98 439	3.1	7 499	21.4	105 928	2.7	328 322
Lombardia	606 045	1.4	59 657	8.2	665 703	1.2	2 388 285
Alto Adige	336 699	1.6	35 485	9.9	372 174	1.3	739 997
Trentino	375 402	1.4	32 129	10.3	407 531	1.1	620 690
Veneto	397 899	1.7	48 997	8.3	446 896	1.4	1 839 122
Friuli V.G.	323 832	1.7	33 392	9.9	357 224	1.3	785 648
Liguria	339 107	1.5	36 027	9.5	375 134	1.1	542 024
Emilia Romagna	563 263	1.4	45 555	8.5	608 818	1.2	2 212 309
Toscana	1 015 728	1.0	135 811	4.9	1 151 539	0.7	2 299 018
Umbria	371 574	1.4	18 681	13.4	390 255	1.2	845 604
Marche	291 394	1.8	16 652	12.8	308 076	1.6	969 405
Lazio	543 894	1.4	81 974	7.3	605 869	1.2	1 720 769
Abruzzo	391 492	1.5	47 099	7.6	438 590	1.3	1 079 512
Molise	132 562	2.9	16 079	14.2	148 641	2.3	443 785
Campania	384 395	1.9	80 879	7.3	445 274	1.5	1 359 025
Puglia	145 899	3.4	33 151	10.0	179 040	2.6	1 936 580
Basilicata	293 095	2.4	93 329	5.6	356 426	1.5	999 401
Calabria	465 151	1.8	144 781	4.6	612 931	1.1	1 508 055
Sicilia	256 303	2.7	81 868	6.2	338 171	1.9	2 570 282
Sardegna	583 472	2.0	629 778	1.8	1 213 250	0.8	2 408 989
Italia	8 759 200	0.4	1 708 333	1.3	10 467 533	0.3	30 132 845

Tabella 12 – Estensione delle macrocategorie inventariali Bosco e Altre terre boscate, secondo FRA2000 (INFC, 2007a)

Categorie inventariali	Superficie (ha)	ES (%)
Leccete	247 335	3.5
Sugherete	139 489	4.9
Boschi a roverella	79 435	6.7
Castagneti	2 239	40.8
Totale arbusteti	522 804	2.1

Tabella 13 – Estensione delle categorie forestali (INFC, 2007a)

1.5 Stato dell'arte sui metodi di stima del carbonio delle foreste

1.5.1 Approccio a livello di ecosistema.

Lo studio sull'apporto dell'ecosistema foreste al bilancio del carbonio può essere condotto mediante l'utilizzo di vari metodi che consentono di stimare lo *stock* di carbonio fissato o la capacità di assorbimento (*sink*) dell'ecosistema stesso.

Le principali metodiche sono: la correlazione turbolenta (*eddy covariance*), il telerilevamento (*remote sensing*), l'approccio basato sugli inventari forestali (*forest inventory-based approach*) (Houghton, 2003; Grace, 2004; Lindner et al., 2004). Sono infine stati proposti una serie di modelli semi-empirici che, utilizzando e combinando misure e stime ottenute con gli strumenti citati, cercano di simulare il ciclo e la fissazione di carbonio a livello dell'ecosistema forestale. Comune a tutti gli approcci è la ricerca di metodologie che offrano risultati accurati, rapidi ed economicamente sostenibili.

L'*eddy covariance* (correlazione turbolenta) è una tecnica micrometeorologica che mette in relazione la direzione del moto delle particelle di aria (*eddies*) al di sopra di una superficie vegetale e la massa di gas trasportati in questo moto. In sostanza consente di misurare i flussi di massa (CO₂ e H₂O) ed energia che una superficie vegetale scambia con l'atmosfera. Questa metodica permette l'esatta quantificazione della capacità di assorbimento (*sink*) attraverso il calcolo della "sottrazione" effettiva di carbonio di un ecosistema nel suo complesso, la cosiddetta Produttività Ecosistemica Netta, NEP, ossia l'assimilazione di CO₂ in una data unità temporale al netto delle emissioni (Borghetti et al., 2001). Lo scambio è il risultato di due flussi opposti: quello dovuto alla fotosintesi delle piante e quello generato dai processi respiratori degli organismi autotrofi ed eterotrofi. Viene realizzata attraverso le misure ad elevata frequenza (10 Hz) della componente verticale della velocità del vento e degli scalari (vapore acqueo, temperatura, CO₂, ecc). Il flusso di carbonio viene misurato in micromoli di carbonio per metro quadro e per secondo ($\mu\text{mol C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). A livello strumentale prevede l'utilizzo di un anemometro sonico tridimensionale e di un analizzatore di gas all'infrarosso di tipo aperto (IRGA) per determinare i flussi di CO₂, vapore acqueo,

calore sensibile e quantità di moto (Baldocchi et al., 1988; Baldocchi, 2003). Questa strumentazione viene assemblata sulle cosiddette *torri eddy covariance*. Una rassegna sulle problematiche strumentali e sulla rappresentatività spaziale dei dati è offerta da Aubinet et al. (2000).

Il principale vantaggio di questo metodo consiste nella quantificazione diretta dello scambio netto attraverso misure precise e realizzate ad alta frequenza. Tra gli svantaggi si riportano problemi di incertezza riguardo la superficie alla quale si riferisce la misura, difficoltà nella determinazione dei flussi nelle ore notturne e il fatto che offre misure sito-specifiche (Lehtonen, 2005). Un ulteriore limite di questo tipo di approccio è la scarsa diffusione delle stazioni di misura del bilancio del carbonio, in quanto l'impianto e la gestione delle torri risulta piuttosto complesso e costoso e non consente di abbracciare tutte le "tipologie forestali" presenti; di conseguenza l'utilizzo delle torri è maggiormente utile a scopi di calibrazione o validazione di altre metodologie. Gli svantaggi sono in parte evitati dallo sviluppo di una nuova metodica, basata sull'utilizzo di strumenti di misura montati su piattaforme aeree, che consentono di ottenere misure di flusso relative ad aree eterogenee dal punto di vista della copertura vegetale e della morfologia (Gioli e Miglietta, 2007).

Un esempio di applicazione dell'*eddy covariance* finalizzata alla quantificazione a livello regionale del ruolo degli ecosistemi forestali come pozzi (*sink*) di assorbimento delle emissioni di anidride carbonica, è il Progetto Osservatorio Kyoto della regione Toscana (<http://www.osservatoriokyoto.it/progetto.php>). In questo (vedi Box 4) è stata messa a punto una metodica che si serve di misure puntuali, integrate da misure su area più vasta (realizzate con piattaforma aerea); tale metodica consente l'estensione delle stime a scala regionale attraverso l'elaborazione dei risultati ottenuti mediante misure dirette, utilizzando un modello bio-geochimico (BGC) capace di stimare i flussi di carbonio degli ecosistemi forestali. Il modello BIOME-BGC, sviluppato all'università del Montana, è capace di stimare il flusso di carbonio, azoto e acqua all'interno di ogni ecosistema terrestre (White et al., 2000).



Area da pochi m² a qualche ettaro

Le torri di misurazione dei flussi di CO₂ permettono di ottenere i valori dello scambio netto a livello di ecosistema. I dati sono registrati ogni mezz'ora per tutto l'anno e sono riferiti ad una porzione di territorio di dimensioni limitate (da 5000 a 10000 m²).



Area di decine di km²

Grazie all'impiego del velivolo Sky Arrow ERA (*Environmental Research Aircraft*) la misura dei flussi di CO₂ viene fatta su una scala territoriale di decine di chilometri.



Scala regionale

La scala regionale è assicurata dall'uso di un modello di simulazione BIOME BGC calibrato e validato sulla regione Toscana ed alimentato da dati meteorologici.

Box 4 - Calcolo dei *sink* a livello regionale secondo il Progetto Osservatorio Kyoto

La tecnica dell'*eddy covariance* è stata riconosciuta dalla “VII Conference of the Parties to UNFCCC (COP7)” del 2001 come una metodologia di monitoraggio e misura diretta dei flussi di carbonio. Questo metodo di misurazione è attualmente utilizzato in numerose reti internazionali quali Fluxnet, e altre (si veda a riguardo Valentini et al., 1999) e nazionali Carboitaly. In particolare nell'ambito di Carboitaly vengono effettuate misure di *eddy covariance* su 24 siti distribuiti sul territorio nazionale su differenti usi del suolo dei quali 12 su bosco e 4 su macchia mediterranea (Papale, 2006) .

Il telerilevamento, *remote sensing* (nell'accezione ampia del termine) può essere utilizzato in varie metodologie di stima. Le tradizionali riprese aereofotografiche e le immagini da satellite ad alta definizione (risoluzione geometrica < 5 m) trovano largo impiego nelle tecniche per valutare l'estensione geografica e la variazione nel tempo della copertura forestale.

In generale, esiste una serie di tecniche basate su sistemi di telerilevamento passivi o attivi (radar) che consentono di stimare la biomassa in base alle caratteristiche della radiazione elettromagnetica che viene misurata dagli strumenti.

I sistemi passivi sono composti da sensori che utilizzano una sorgente di radiazione esterna quale il sole; tipicamente registrano immagini multi-spettrali che consentono di acquisire informazioni a diverse lunghezze d'onda (misure di riflettanza) relative alle coperture vegetali. La vegetazione manifesta comportamenti spettrali specifici a diverse lunghezze d'onda producendo una cosiddetta "firma spettrale" propria. Tipicamente, combinazioni algebriche di misure di riflettanza (indici di vegetazione) in due o più canali spettrali nell'infrarosso vicino (IR) e nel rosso (R), forniscono informazioni sulla quantità di biomassa presente (es. NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*) (Gomasca, 1997).

Questi strumenti generalmente consentono di avere una buona stima della biomassa per popolamenti forestali relativamente omogenei o per giovani piantagioni (Ripple et al., 1991).

I sistemi attivi (RADAR, *Radio Detection And Ranging*) utilizzano il principio di emissione e successiva registrazione di onde con lunghezza d'onda compresa tra 0.1 cm e 1 m (microonde); sono strumenti capaci di rilevare la superficie terrestre anche in presenza di nubi, che risultano di ostacolo per l'utilizzo dei sensori passivi.

Attualmente è in corso di sperimentazione una tecnica basata su sistema laser (da piattaforma aerea) chiamata LiDAR che consente di avere una misura accurata dell'ampiezza e profondità delle chiome; questo permette di sviluppare modelli più precisi per giungere alla stima del carbonio contenuto nella fitomassa forestale epigea (Heurich, 2008; Barilotti et al., 2005; Patenaude et al., 2004; Drake et al., 2002).

Le misure effettuate attraverso il telerilevamento, inoltre, possono essere impiegate per lo sviluppo di modelli che quantifichino la produzione primaria netta delle foreste (NPP) (Nemani et al., 2003; Borghetti et al., 2001).

Il vantaggio dell'impiego di immagini riprese da strumenti posti su aerei o su satelliti è quello di consentire una visione sinottica del territorio (può coprire ampie superfici con un metodo di misura uniforme), altrimenti non ottenibile con tecniche tradizionali.

Tra gli svantaggi principali si ricorda che questa tecnica realizza una misura di tipo indiretto del carbonio e che non consente di quantificare il sottobosco e la biomassa ipogea. Questo metodo richiede indagini a terra per calibrare i valori di riflettanza delle immagini con i valori reali di biomassa e/o NPP; in particolare, per prevedere la biomassa in funzione delle variabili registrate è necessario avere a disposizione i dati relativi alla “*verità a terra*” che provengono dalle misure delle dimensioni dei singoli alberi o da equazioni empiriche per la stima della biomassa (Zianis et al., 2005). Di recente, le immagini telerilevate sono state utilizzate per valutare il volume e la biomassa di singole piante forestali (Montes et al., 2000).

Un'ampia rassegna delle tecniche basate sul remote sensing di stima delle risorse forestali è descritta nel testo di Chirici e Corona (2006).

L'approccio basato sulle “metodiche inventariali” (*forest inventory-based approach*) per la stima del carbonio fissato nelle foreste è comunemente utilizzato negli Inventari Forestali Nazionali (IFN) e nelle indagini territoriali basate su reti di campionamento della copertura forestale realizzate a scala regionale o di comprensorio. Storicamente i primi sistemi di rilevamento campionario delle risorse forestali furono messi a punto in Centro Europa già dalla fine del 1800, per ridurre il costo dei rilievi tassatori condotti in forma di censimento. All'inizio vennero sviluppati e implementati sistemi inventariali intesi nell'accezione corrente, in Scandinavia e in America settentrionale, basati sull'impiego di metodi di campionamento probabilistico al fine di stimare la consistenza quali-quantitativa del patrimonio forestale. Attualmente, il ricorso a schemi di campionamento probabilistico rappresenta un fondamento imprescindibile dell'inventariazione forestale in tutte le sue varie applicazioni (Corona, 2000).

Le principali variabili in output dei tradizionali inventari forestali sono rappresentate dalle superfici coperte da foreste e dal volume dei fusti, che successivamente può essere convertito in biomassa e carbonio attraverso specifici coefficienti (BEFs -*biomass expansion factors*) (Lehtonen, 2005).

Un notevole vantaggio di quest'approccio di stima della fitomassa arborea è dato dal fatto che utilizza tecniche conosciute e ampiamente sperimentate; inoltre, ogni Paese possiede dati certi e confrontabili provenienti dai periodici IFN. Un limite all'approccio di tipo "inventariale" è costituito dall'elevato costo dei rilievi necessari, per cui, alcuni autori, prospettano un utilizzo consistente delle metodologie alternative già esposte (Brown, 2002).

Dalla analisi delle fonti bibliografiche risultano disponibili anche numerosi **modelli semi-empirici** di bilancio del carbonio che, utilizzando anche le metodiche appena esposte, analizzano, semplificano e simulano il bilancio di carbonio e in particolare la sua fissazione a livello di ecosistema forestale.

Di seguito ne vengono citati alcuni; una parte di questi sono segnalati in un registro, *Register of Ecological Models (REM)* curato dalla University of Kassel (Germany). La creazione di questo database ha come obiettivo rendere disponibili le informazioni sui modelli esistenti per lo studio dell'ecologia e di facilitarne la libera diffusione mettendo a disposizione tra l'altro tutta la documentazione tecnica e consentendo di eseguirne il download (*Server for Ecological Modelling web site*, <http://dino.wiz.uni-kassel.de/ecobas.htm>).

BIOME-BCG Biome model - BioGeochemical Cycles	(Running e Coughlan 1988a e b)
BIOPAK, software for computing plant biomass	(Means et al., 1994)
CAMFor Carbon Accounting Model for Forests	(Richards e Evans, 2000)
CO2FIX a dynamic model of the CO ₂ -fixation in forests,	(Mhoren et al., 1999)
CSEM, Carbon Stock Evaluation Model	(Ciccarese et al., 2000)
EFISCEN, European Forest Information Scenario Model,	(Nabuurs et al., 2000)
FORCARB, forest carbon budget simulation model	(Plantinga e Birdsey, 1993)
GORCAM, Graz/Oak RidgeCarbonAccountingModel	(Schlamadinger e Marland 1996)
GOTILWA, integrated model of water dynamics and forest growth	(Gracia et al., 1999)
TREEDYN3, Forest Simulation Model	(Bossel, 1996)

A titolo di esempio, si descrive brevemente il modello CO₂FIX (a cura dell'*European Forest Institute* e di altri enti, Mhoren et al., 1999), che consente una modellizzazione dei flussi di carbonio tra l'ecosistema e l'atmosfera e tra i componenti stessi dell'ecosistema. Il modello è predisposto, in particolare, per quantificare il carbonio contenuto nell'intero ecosistema forestale e quello temporaneamente fissato nei prodotti legnosi fino al termine del loro ciclo di vita. Lo schema concettuale di CO₂FIX tiene

conto, infatti, (Maserà et al., 2003): della biomassa arborea (nelle sue componenti di fusti, rami, foglie e radici), dei residui di utilizzazione, della lettiera e dell'humus (componenti che racchiude nel comparto "suolo") e dei prodotti finali (considerati in base alla durata del loro ciclo di vita).

Il modello è un cosiddetto "*cohort model*" ossia permette di effettuare stime per gruppi monospecifici o composti da specie diverse, mono o pluristratificati. Il gruppo viene considerato omogeneo come struttura di vegetazione, dinamica di crescita e composizione specifica. Queste "coorti" possono essere formate da gruppi successionali (pioniere, intermedie, climax), da formazioni forestali miste di latifoglie e conifere, da formazioni pluristratificate tipiche dei sistemi agro-forestali.

Gli input necessari per ciascun gruppo funzionale sono: la biomassa iniziale, il tasso di crescita (in funzione dell'età o del diametro), il tasso di mortalità (per senescenza naturale o per intervento antropico), il tipo di interazione tra componenti (competizione, nessuna competizione, effetto di sinergia); inoltre, l'utilizzatore può inserire gli interventi gestionali a carico di ciascuna coorte (es. i tagli). Questo consente di stimare l'influenza dei diversi scenari gestionali sulla dinamica di assorbimento del carbonio. Il modello è stato implementato utilizzando come linguaggio di programmazione C++ (ambiente di programmazione ad oggetti), ed è composto da sei principali moduli (Schelhaas et al., 2004):

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none">1- biomassa (calcola un bilancio annuale tra la crescita e la perdita di biomassa)2- suolo (materia organica decomposta e trasformata in sostanza organica del suolo)3- prodotti legnosi (asportati dal sistema conteggiati in base alla loro destinazione)4- aspetti bioenergetici (benefici dell'utilizzo di massa legnosa in sostituzione di combustibili fossili)5- aspetti finanziari (costi e benefici della gestione)6- modulo di <i>carbon accounting</i>. |
|--|

Attualmente il modello risulta utilizzato e validato in diverse situazioni ecologiche in tutto il mondo (<http://www2.efi.fi/projects/casfor/>).

Un altro modello che merita di essere citato è GOTILWA (Gracia et al., 1999). Si tratta di un modello che è stato implementato per simulare il processo di crescita di una foresta in relazione all'influenza che su questo esercitano una serie di fattori tra i quali il clima, la struttura del popolamento, le tecniche di gestione, le proprietà del suolo e il cambiamento climatico. Sabaté et al. (2002) lo hanno applicato per la stima degli effetti

dei cambiamenti climatici sulla crescita delle specie forestali mediterranee, tra le quali il *Quercus ilex*, (*process-based forest growth model*).

Questo breve e sintetico accenno alle possibili modalità di approccio per la valutazione dell'apporto delle foreste al ciclo del carbonio, introduce ad un'analisi approfondita delle metodologie attualmente più utilizzate per la misura del carbonio fissato nelle singole componenti dell'ecosistema forestale.

1.5.2 Metodiche di stima per le singole componenti dell'ecosistema

L'analisi della letteratura disponibile sull'argomento ha consentito di sintetizzare le tecniche più comuni utilizzate per la determinazione degli *stock* di biomassa e quindi di carbonio nei vari comparti degli ecosistemi forestali (*forest carbon pool*). Questo approccio permette di disporre di informazioni sullo *stock* dei differenti *pool* di carbonio (biomassa del fusto, delle foglie, delle radici, sostanza organica del suolo, ecc.) e sulla loro variazione (*sink/source*) nel tempo; in tal modo dalle informazioni sulle singole componenti è possibile ricostruire l'intero bilancio (Kauppi et al., 1992).

Biomassa epigea

Generalmente, la stima della biomassa epigea si basa su misure di tipo dendrometrico, proprie del cosiddetto approccio "inventariale" appena citato e ampiamente descritto in seguito nel paragrafo 1.5.3. In sintesi, si può affermare che i "metodi inventariali" di stima delle risorse forestali sono i mezzi più pratici per la valutazione del carbonio epigeo della biomassa poiché i dati sono raccolti generalmente su una popolazione individuata in conseguenza di un disegno di campionamento statistico basato spesso su aree di saggio, talvolta permanenti. Su queste aree si effettuano rilievi che consentono la misura di variabili che descrivono il singolo albero (generalmente il diametro misurato ad 1,3 m da terra e l'altezza dell'albero); successivamente si applicano le classiche analisi dendrometriche che consentono di ottenere una stima del volume legnoso e/o della biomassa arborea. In genere tutti i Paesi sviluppati conducono a intervalli temporali regolari inventari nazionali delle loro foreste (UN ECE/FAO, 2000). Questo consente una stima indiretta, su larga scala, della biomassa forestale. I dati inventariali possono essere elaborati e presentati essenzialmente in due modi:

- nel caso in cui sia noto, per ogni singola specie, il volume commerciale del popolamento (considerando un diametro minimo fissato tipicamente in circa 10 centimetri), si utilizzano semplici modelli sviluppati per convertire i volumi in biomassa totale (fusto, rami, foglie, radici). Questo avviene usando i fattori di espansione della biomassa (BEF) (Brown, 1997; Somogyi et al., 2006);
- nel caso in cui i dati riportino i diametri e le altezze relative ai singoli fusti di ogni specie o siano riassunti in tabelle per singolo popolamento (numero di

alberi per unità di superficie per categoria di diametro), possono essere convertiti direttamente in biomassa usando le cosiddette “equazioni allometriche di regressione della biomassa”. Tali equazioni esistono per molte tipologie di foreste, alcune sono specie-specifiche, altre più generiche (Brown, 2002; Lehtonen et al., 2004; Somogyi et al., 2006).

Biomassa ipogea

Le radici rivestono un'importante ruolo nel ciclo del carbonio in quanto rappresentano un vettore per il trasferimento di una considerevole quantità di questo elemento nel suolo, dove può essere stoccato per periodi relativamente lunghi. Alcune radici possono estendersi a profondità elevata, ma la maggior parte della biomassa radicale totale si trova nei primi 30 cm della superficie del suolo (Jackson et al., 1996). A causa del costo elevato, la quantità di dati disponibili in letteratura sulle misure dirette della biomassa ipogea è molto limitata (Lasserre et al., 2006); inoltre in merito alla stima della biomassa radicale non esistono tecniche standardizzate (Cairns et al., 1997; Kurz et al., 1996).

I metodi diretti prevedono campionamenti del terreno mediante la realizzazione di buche per la misura delle radici fini e medie, e il completo o parziale scavo per la misura delle radici di maggiori dimensioni (Brown, 2002).

I principali metodi per effettuare le misurazioni dirette sono:

- il metodo del carotaggio; prevede l'impiego di tubi cilindrici che rimuovono un volume noto di suolo in un profilo di profondità prestabilita; successivamente dalla carota vengono estratte le radici, infine lavate, esaminate e pesate;
- il campionamento per monoliti di suolo; si attua mediante il taglio del volume di suolo dal quale le radici sono estratte; generalmente il volume del monolito varia tra 1 e 50 dm³. Questo metodo è frequentemente utilizzato per determinazioni quantitative di tutte le radici;
- il metodo dello scavo e messa a nudo degli interi apparati radicali in trincee; permette di estrarre completamente l'intero apparato radicale; operando manualmente si conservano intatte tutte le radici, mentre l'utilizzo di un escavatore richiede particolare precauzioni per evitare danni all'apparato

radicale. L'apparato radicale è successivamente pulito, essiccato e pesato. In sostanza risulta essere il metodo più costoso e dispendioso in termini di tempo ma quello più preciso (Figura 4).



Figura 4 Apparato radicale di roverella (Lasserre et al., 2006)

La scelta del metodo d'indagine dipende essenzialmente dalle condizioni del sito (accessibilità, profondità e tessitura del suolo, pietrosità), dalla precisione richiesta e, soprattutto, da considerazioni di natura economica (Lasserre et al., 2006).

Per quanto riguarda le metodiche indirette, Raich e Nadelhoffer (1989) hanno predisposto una relazione per la stima dell'allocazione di carbonio negli apparati radicali degli ecosistemi forestali, a partire da dati sperimentali disponibili in letteratura sulla respirazione del suolo e sulla lettiera.

Altri metodi indiretti stimano la biomassa ipogea a partire dalla biomassa epigea, sfruttando le relazioni esistenti tra queste componenti (Brown, 2002). La biomassa radicale viene espressa dal rapporto *root/shoot* (R/S).

Basandosi su dati misurati e presenti in letteratura, Santantonio et al. (1977) hanno suggerito che la biomassa radicale possa essere considerata intorno al 20% della biomassa totale aerea; affermano inoltre che la quantità maggiore di biomassa ipogea nelle foreste è contenuta nelle radici grosse - generalmente intese quelle con diametro maggiore di 2 mm. Anche secondo MacDicken (1997), il rapporto tra biomassa ipogea ed epigea è vicino a 0.2, con variabilità dipendente dalla specie. Un database compilato

da Li et al. (2003) contenente numerosi dati (443 riferimenti) per foreste temperate e boreali di conifere e latifoglie, indica un rapporto medio fra biomassa totale ipogea ed epigea di circa 0.26.

Una recente revisione della letteratura in materia, eseguita da Cairns et al. (1997) ha incluso più di 160 studi sulle foreste tropicali, temperate e boreali, prendendo in considerazione sia la biomassa ipogea che quella epigea. Anche in questo studio il R/S medio risulta pari a 0.26, con un range da 0.18 a 0.30. Il R/S non varia significativamente con la latitudine (tropicale, temperata e boreale), la struttura del terreno (fine, media e grossolana), o il tipo dell'albero (angiosperma e gimnosperma). Ulteriori analisi dei dati hanno prodotto un'equazione di regressione significativa tra la densità della biomassa ipogea rispetto alla densità della biomassa epigea (Figura 5)

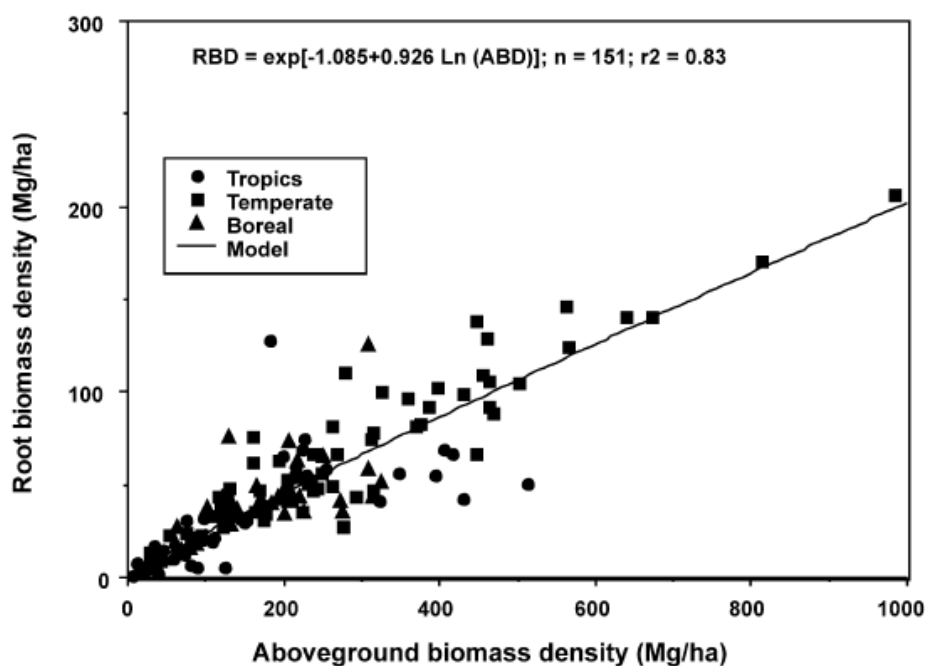


Figura 5 -Relazione tra il volume della biomassa radicale (RBD) e il volume della biomassa epigea (ABD; fonte dati Cairns et al., 1997).

La biomassa ipogea di un popolamento forestale presenta una grande variabilità dovuta a fattori genetici, stazionali, di età, di governo e trattamento selvicolturale applicato. Per i boschi governati a ceduo esistono pochi lavori riguardo lo studio dell'apparato radicale; in genere le radici sono molto sviluppate in quanto rimangono nel suolo per più turni (più cicli agamici) e di conseguenza il rapporto biomassa radicale su biomassa epigea dovrebbe essere più alto rispetto ai boschi di alto fusto (Lasserre et al., 2006).

Hilbert e Candell (1995), partendo dalla considerazione che le tipologie arboree mediterranee hanno necessità di estesi apparati radicali in grado di esplorare notevoli volumi di suolo alla ricerca di umidità, citando 13 studi, affermano che tali tipologie arboree possono avere valori di R/S sensibilmente differenti da quelli delle specie tipiche di ecosistemi temperati; gli stessi autori indicano che mediamente il rapporto R/S può assumere il valore di 0.64 (si veda la Tabella 16).

Necromassa

Si può affermare che non esistono metodi standard nella stima della **necromassa**. In generale le metodiche che consentono di quantificare questa componente sono basate sulla misura del volume, del tasso di decomposizione e della densità del materiale (Brown, 2002).

Generalmente la necromassa è divisa, in relazione alle dimensioni, in grossa e sottile, (limite di diametro tra le due categorie 10 cm) (Harmon e Sexton, 1996). La componente necromassa di grosse dimensioni, comprendente sia quella a terra che quella in piedi, può essere una componente significativa degli ecosistemi forestali, in alcuni casi stimata pari a 10-20% della biomassa epigea in foreste mature (Muller e Liu, 1991); generalmente viene ignorata nel bilancio di carbonio della foresta (Brown, 2002).

La quantità di legno morto non è generalmente correlata con alcun indice della struttura del popolamento (Harmon et al., 1993).

La misurazione della necromassa prevede la suddivisione in varie categorie di decomposizione del materiale e quindi la misura del volume e del peso delle stesse attraverso la raccolta di un significativo numero di campioni (Brown, 2002).

Lettiera

La lettiera è una componente che può essere misurata direttamente utilizzando solitamente delle “trappole”, di dimensioni note e opportunamente distribuite sul terreno, che trattengono tutte le porzioni epigee che cadono al suolo (foglie, frutti, rametti, ecc) (La Marca, 2004).

Tuttavia, la lettiera presenta caratteristiche particolari che costringono a valutare con cura il tipo di materiale che si vuole raccogliere (ramoscelli, foglie, parti riproduttive), la longevità delle foglie (le foglie delle sempreverdi possono persistere per più anni), il tempo e la frequenza prevista per la raccolta della lettiera (Clark et al., 2001).

Un interessante studio svolto di recente (Tognetti e Marchetti, 2006) dimostra quanto può essere importante disporre di misure certe della lettiera caduta al suolo. Questi autori hanno stimato il C ipogeo totale partendo dalla differenza fra i tassi annuali di respirazione del suolo e la lettiera epigea caduta. L'allocazione totale ipogea di C (Pb) è stata stimata usando il contenuto di C della lettiera epigea come predittore (Pa)

$$Pb = 2.09 Pa + 140 (R^2 = 0.38)$$

Uno studio condotto da Rapp et al. (1999) descrive la metodologia di rilievo utilizzata nella misura di questa componente su un ceduo di leccio di 40 anni di età. Il protocollo ha previsto la predisposizione, nel sito di analisi, di 30 trappole di raccolta di 0.25 m² disposte in modo casuale sotto la copertura e vuotate mensilmente per due anni. Successivamente, la lettiera raccolta è stata divisa per componenti (vedi Tabella 17) e si è misurato il peso anidro; le foglie hanno rappresentato il 76% del totale.

Un analogo studio di Leonardi et al. (1992) ha previsto la raccolta ininterrotta per 4 anni della lettiera, registrando un massimo di raccolta tra maggio e giugno ma con una sensibile variazione bi-annuale.

Una nuova metodica di misurazione della lettiera, attualmente in corso di validazione sulle foreste tropicali del Brasile, è stata messa a punto da Marimon-Junior e Hay (2008); questa consiste nell'utilizzo di uno strumento raccoglitore (Figura 6) formato da una serie di pettini di acciaio che vanno letteralmente ad infilzare lo strato di lettiera. Lo strumento consente sia di misurare lo spessore della lettiera che, successivamente all'eliminazione della parte eccedente la superficie dello strumento, di ottenere un campione di dimensioni standard da avviare alle analisi di laboratorio.



Figura 6 - Raccoglitore di lettiera Marimon-Hay (M-H bitter collector)

Suoli

Il carbonio dei suoli costituisce uno tra i comparti più importanti del ciclo del carbonio terrestre (Swift, 2001). I livelli del carbonio nel suolo dipendono dal bilancio tra la cattura di sostanza organica e i processi di decomposizione; questi, a loro volta,

includono processi di respirazione e di ossidazione (Figura 7). Il suolo contiene carbonio nelle seguenti forme: biologicamente attiva (radici e microrganismi), labile (lettiera), recalcitrante organica (lignina e tannini), recalcitrante inorganica (per lo più carbonato di calcio). I suoli forestali presentano un notevole accumulo di carbonio contenuto nella lettiera, nell'humus e nelle radici (Giordano, 2005).

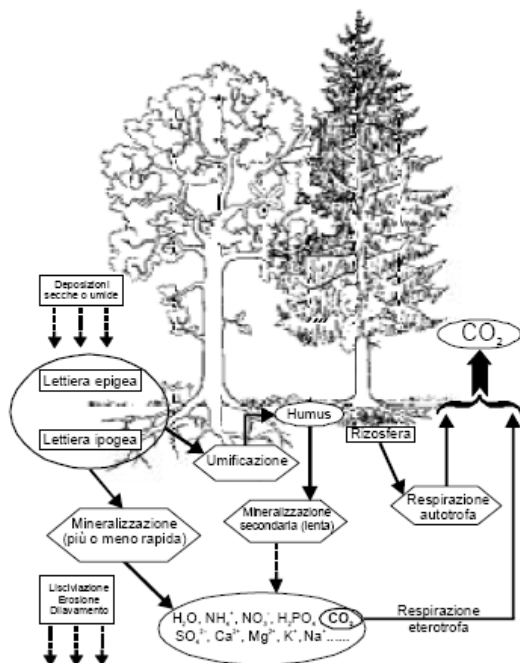


Figura 7- Schema semplificato del ciclo del carbonio nel suolo in un ecosistema forestale (Rodeghiero, 2006).

Per quanto riguarda la valutazione del carbonio nei suoli, è necessario stimare la quantità di carbonio fissato nella sostanza organica, almeno fino alla profondità di 30 cm, procedendo al prelievo di campioni di terreno da avviare a specifiche analisi di laboratorio (Magnani et al., 2005).

La scelta di questa profondità deriva da due tipi di considerazioni: a) a livello globale è stato stimato che negli strati più superficiali del suolo (30 cm) è immagazzinato il 39-70% del carbonio organico (Batjes, 1996); b) gli strati superficiali del suolo sono quelli che maggiormente possono risentire delle perturbazioni antropiche e/o climatiche e dei cambiamenti d'uso (Six et al., 1999; Paul et al., 2002; Sun et al., 2004); inoltre, la sostanza organica presente più in profondità ha tempi di turnover superiori rispetto ai cicli delle colture forestali. Per il calcolo del contenuto di carbonio per unità di superficie (SC; kg C m⁻²) viene comunemente utilizzata la formula seguente (Boone et al., 1999):

$$SC = a b c d \quad \text{dove}$$

a - concentrazione di carbonio nel campione di suolo (kg C kg⁻¹);

b - densità apparente della terra fine (< 2mm; kg m⁻³);

c - volume di un metro quadrato di suolo alla profondità considerata (m³ m⁻²);

d = (1 - (% in volume dei sassi) / 100). In realtà il termine d dovrebbe tenere conto anche del volume delle radici (Rodeghiero, 2006).

Esistono parecchi metodi per analizzare il contenuto di carbonio di un campione di suolo, ciascuno dei quali presenta vantaggi e svantaggi. Vale la pena ricordare che i suoli possono contenere due tipi principali di carbonio: il carbonio organico e il carbonio inorganico (carbonato). Alcuni metodi di analisi consentono di determinare soltanto il carbonio organico (es. Walkley-Black), mentre altri consentono di determinare il carbonio totale (es. combustione a secco). Per questo motivo è molto importante fare attenzione al tipo di analisi a cui è stato sottoposto il suolo quando si fanno confronti tra dati provenienti da inventari diversi (nel tempo o nello spazio). Infatti, se sono state utilizzate tecniche diverse nella determinazione del carbonio, i dati possono non essere direttamente confrontabili (Rodeghiero, 2006).

1.5.3 Metodi dendrometrico-inventariali

Dalle tavole stereometriche ai modelli di previsione della fitomassa

Comunemente il termine biomassa forestale viene utilizzato per indicare la massa del popolamento arboreo. In realtà il termine più appropriato risulta essere fitomassa forestale ma, seguendo le indicazioni di Pignatti (1995), si osserva che negli ecosistemi forestali la biomassa degli animali è decisamente trascurabile rispetto alla fitomassa, per cui si può considerare che la fitomassa e la biomassa coincidano.

Come discusso nei paragrafi precedenti, l'acquisizione di informazioni relative alla biomassa arborea risulta molto onerosa. Questa grandezza non risulta di diretta misurazione ma è necessario far uso di modelli che interpretino le relazioni esistenti tra la biomassa degli alberi e le loro dimensioni; questo comporta la misura in campo, su singoli alberi rappresentativi di un determinato popolamento, di una serie di variabili.

Un esempio di metodica classica adottata per la stima della biomassa epigea forestale è riportato in un lavoro di Cannell (1988) che, nell'intento di riepilogare i dati sperimentali disponibili per 32 specie arboree, riassume una delle formule elementari più conosciute:

$$W_t = F (H * G) D$$

dove W_t è la biomassa legnosa di fusto e rami; F un coefficiente di riduzione (forma); H l'altezza media degli alberi; G l'area basimetrica; D la densità del legno.

In genere i metodi per la misurazione e la stima della massa legnosa di un bosco, basati su misure dendrometriche, si sono sviluppati, nel tempo, seguendo l'interesse predominante che la società dimostrava nei confronti della risorsa bosco.

Esigenze di gestione dei soprassuoli forestali con finalità prevalentemente economiche hanno favorito lo sviluppo di "tavole" che fornissero una misura della massa legnosa ritraibile (commerciabile) (tavole stereometriche o di cubatura) e del suo incremento, oppure di modelli più articolati che mostrassero la dinamica nel tempo del popolamento arboreo coetaneo (tavole alsometriche).

Le tavole di cubatura sono tabelle, comunemente utilizzate, costruite per singole specie, che riportano i probabili valori (in senso statistico) del volume di singole piante in funzione di una o più variabili indipendenti da misurare in bosco. L'impiego di queste

tavole si basa sul *postulato empirico della dendrometria*, secondo cui alberi della stessa specie legnosa, della stessa classe di diametro e altezza e cresciuti in boschi sottoposti a una medesima forma di governo e di trattamento, tendono ordinariamente a una forma tipica caratteristica (Corona, 2007b). Si distinguono:

- *tavole stereometriche a due entrate*; riportano il valore medio atteso del volume della massa legnosa di un albero in funzione del diametro a petto d'uomo e dell'altezza totale del fusto;
- *tavole ad un'entrata*; riportano il valore medio atteso della massa legnosa di un albero in funzione del diametro a petto d'uomo;
- *sistemi di tariffe*; sono insiemi di tavole a una entrata differenziate in funzione delle caratteristiche ipsometriche del soprassuolo forestale da cubare.

La tavola di cubatura a doppia entrata costituisce, ancora oggi, uno strumento ampiamente diffuso per la stima del volume legnoso. A conferma di ciò si segnala la nuova tavola a doppia entrata pubblicata da Nosenzo (2008) che riguarda i cedui di faggio del Piemonte, sviluppata attraverso l'individuazione di un modello stereometrico basato sull'analisi di 1047 alberi modello.

Esistono anche le cosiddette *tavole di cubatura di popolamento* utilizzate per avere una stima della massa legnosa per unità di superficie in modo rapido e a costi ridotti. Si tratta di tabelle che riportano il valore medio atteso del volume (o del peso fresco) della massa legnosa a ettaro in funzione di attributi facilmente rilevabili: altezza media del soprassuolo o altezza dominante e area basimetrica ad ettaro (Corona, 2007b).

In mancanza di tavole, per la cubatura dei singoli soprassuoli forestali, si utilizzano metodi di stima basati sugli "alberi modello", fondati sulla ricerca empirica del volume unitario medio; la massa legnosa di un insieme di alberi si determina con il prodotto tra il volume unitario medio e il numero degli alberi.

Tra questi metodi il più semplice è il *metodo dell'albero modello unico*. L'applicazione prevede varie fasi: cavallettamento del soprassuolo (misura dei diametri a petto d'uomo); misurazione dell'altezza dendrometrica media su un numero sufficiente di fusti arborei con diametro pari o prossimo al diametro medio; determinazione del valore medio del coefficiente di riduzione ordinario ($F =$ rapporto tra il volume reale misurato per sezioni e il volume cilindrometrico del fusto) su 5-6 fusti (detti appunto alberi

modello) di diametro e altezza pari o prossimi a quelli medi e di forma rappresentativa della media degli alberi nel soprassuolo considerato. Il volume (V) della massa legnosa è quindi ottenuto dal prodotto dell'area basimetrica (G) del soprassuolo per la sua altezza media (H_m) e per il coefficiente di riduzione ordinario medio (f), riassunto in formula:

$$V = G * H_m * F$$

Un'altra procedura per la determinazione degli assortimenti commerciali ritraibili da un popolamento arboreo si basa sulle *funzioni di profilo*. Il metodo si fonda sulla stima del profilo del fusto che statisticamente compete alle piante considerate.

Stabilito come varia il diametro alle diverse altezze del fusto, è possibile stimare il numero e i volumi dei topi con determinate dimensioni (diametriche) teoricamente ritraibili (La Marca, 2004). In Finlandia, ad esempio, un'ulteriore evoluzione di questo metodo ha portato alla predisposizione di modelli, sviluppati per singoli fusti, che consentono di avere la previsione degli assortimenti legnosi commerciabili e la massa della chioma (rami e aghi), quest'ultima utilizzabile per produrre biomassa ad uso energetico (Tahvanainen e Forss, 2008).

Le tavole alsometriche (o tavole di produzione) hanno come variabile dipendente il volume per ettaro di un popolamento, mentre come variabile indipendente presentano l'età. Solitamente questo tipo di tavole viene differenziato in base alla classe di fertilità e si riferiscono a popolamenti a densità normale sottoposti ad un regolare regime selvicolturale. Questi strumenti trovano applicazione per avere indicazioni sulla produttività potenziale di una specie in una data località o per avere una stima del volume; in particolare vengono utilizzati per la cubatura dei boschi cedui (La Marca, 2004).

In generale le tavole sono sviluppate elaborando rilievi derivati dall'abbattimento di un limitato numero di campioni (soggettivi) detti "alberi modello", rappresentativi dell'intera popolazione arborea oggetto di rilievo. Lo sviluppo di questi strumenti si basa su considerazioni allometriche basilari: la variazione di massa è significativamente correlata alla variazione del diametro e, per questo motivo, risultano abbastanza precisi.

In letteratura, riguardo al territorio nazionale, si trovano numerose tavole di cubatura che generalmente sono specie-specifiche e valide per la località dove vengono sviluppate: Castellani (1982), Castellani et al. (1984), Regione Emilia Romagna (2000).

Tra queste, la raccolta più completa delle tavole stereometriche costruite in Italia è stata pubblicata da Castellani (1982, *Tavole stereometriche ed alsometriche per i boschi italiani*). Nella sezione Allegati sono riportate le tavole di cubatura sviluppate per la Sardegna.

Le tavole di cubatura nascono come strumenti di stima della massa legnosa ritraibile dall'utilizzazione delle foreste; esse forniscono quindi stime solo per la massa legnosa del fusto (tavole cormometriche) o per quella del fusto e dei rami principali (tavole dendrometriche). La fitomassa presente nelle foglie, nei rami, nelle radici e nei residui dell'utilizzazione non è stata, fino ad ora, oggetto di interesse generalizzato.

Il passaggio da una gestione orientata alla produzione legnosa ad una gestione di tipo multifunzionale e sostenibile (Farrell et al., 2000) ha allargato l'attenzione alla stima della produttività biologica in termini di energia o di sostanza secca (Nocetti et al., 2007). In conseguenza di ciò, anche nel campo della ricerca forestale, si registra un nuovo impulso a cogliere gli aspetti globali della produzione primaria dalle cenosi forestali, considerando tutta la produzione biologica primaria del bosco in luogo della sola produzione legnosa (Marziliano, 2002). L'affermarsi della visione ecosistemica nella gestione forestale ha stimolato l'avvio di numerosi studi sulla produzione di biomassa; questi studi consentono di valutare la massa della materia organica presente nell'ecosistema, che a sua volta è una caratteristica correlata a fattori ecologici, stagionali e del clima, e risulta fondamentale per la gestione degli ecosistemi e dei popolamenti forestali.

L'approntamento di una serie di equazioni di previsione del volume e della biomassa arborea, fornisce un modello di stima da utilizzare sia per indagini di carattere ecologico che selvicolturale (Amorini et al., 1996). Attualmente, conoscere il contenuto di sostanza secca del materiale legnoso proveniente soprattutto da boschi cedui, diventa importante nel mercato, in forte espansione, della biomassa utilizzata per fini energetici; infatti il peso secco è fortemente correlato all'energia ritraibile (Drigo et al., 2007; Hall, 1997).

In letteratura compaiono modelli di stima della fitomassa forestale più vicini ad un approccio ecosistemico; questi consentono di individuare relazioni tra la fitomassa, eventualmente distinta nelle sue singole componenti (fusto, rami e foglie), ed il diametro o l'altezza ipsometrica.

A livello nazionale uno dei primi e più completi studi riguardo lo sviluppo di una relazione allometrica è stato realizzato da Susmel et al. (1976) su una fustaia di leccio del Supramonte di Orgosolo (NU) (vedi sezione Allegati).

Il significato del termine allometria sembra essere stato coniato da J. Huxley nel 1932 ad indicare come la struttura di un organismo cambia al variare della sua dimensione (Anfodillo et al., 2006). Questa definizione comprende, in senso generale, tutte le relazioni tra la struttura dell' organismo (nel nostro caso fitomassa) e le sue dimensioni (es. misura del diametro del fusto).

Dall'analisi della bibliografia si può sintetizzare che fino ad oggi, a livello europeo, sono state sviluppate numerose equazioni allometriche a validità locale (specie-specifiche e sito-specifiche) (Zianis et al., 2005). La metodologia utilizzata per la loro predisposizione risulta analoga all'approccio utilizzato per la costruzione delle tavole di cubatura classiche. La metodologia prevede la selezione, con criteri statistici, e l'abbattimento di un numero adeguato di alberi modello, la misura di una serie di variabili dendrometriche, la selezione di campioni da avviare al laboratorio per le analisi di rito, e una rigorosa procedura statistica di analisi dei dati che permetta, attraverso metodologie di analisi di regressione, la messa a punto di modelli previsionali, che offrano la migliore capacità predittiva, e che consentano, infine, di utilizzare operativamente i risultati ottenuti.

In opposizione all'approccio statistico classico, utilizzato dalla grande maggioranza degli autori, che prevede l'applicazione di relazioni empiriche per lo sviluppo di modelli di cubatura (tavole dendrometriche, allometriche o BEF), si segnala la nascita di una nuova linea di ricerca. A questo proposito, alcuni autori (West et al., 1999a; West et al., 1999b; Enquist, 2002; Enquist e Niklas, 2002; Enquist, 2003; Anfodillo et al., 2006) criticano l'utilizzo di relazioni che abbiano solamente la migliore capacità predittiva da un punto di vista strettamente statistico e propongono lo sviluppo di "*un'allometria funzionale basata su presupposti fisiologici*". Fondamentalmente, gli Autori citati hanno utilizzato le relazioni allometriche (in senso lato) per cercare di dimostrare che gli organismi si sono evoluti sino al raggiungimento di una struttura ottimale (determinata da vincoli biomeccanici, massimizzazione delle superfici di scambio e vincoli idrodinamici), che viene rigenerata e resa costante durante lo sviluppo (ontogenesi),

Questo modello funzionale, noto come *modello WBE* (West et al., 1999a), descrive la struttura delle piante vascolari attraverso relazioni allometriche basate su equazioni di tipo esponenziale i cui fattori di scala risultano essere universali, ossia non specie-specifici e non sito specifici (Enquist e Niklas, 2002).

Sulla base di questi presupposti alcuni autori (Anfodillo et al., 2006; Pilli et al., 2006), hanno proposto un modello allometrico di cubatura basato su una funzione esponenziale ($M=aD^b$, M massa, D diametro, b esponente di scala) in cui gli esponenti di scala utilizzati vengono differenziati in base a fasi ontogenetiche di un popolamento forestale: giovanile, adulta e matura rispettivamente con esponenti di 2.02, 2.67 e 2.51. Questi fattori di scala hanno una validità generale, indipendente dalla specie arborea, e dipendono solamente dalla relazione tra la variazione di h (altezza iposometrica) e la variazione di D (diametro ad 1.30 m)

Equazioni di stima della fitomassa e BEF

Una stima indiretta, su larga scala, dello *stock* di biomassa forestale può essere realizzata servendosi dei dati provenienti dagli Inventari Forestali Nazionali; questi offrono stime di volumi legnosi che possono essere convertite in carbonio essenzialmente in due modi: mediante l'utilizzo di BEF o attraverso equazioni allometriche (Brown, 2002, Lehtonen et al., 2004, Somogyi et al., 2006, Somogyi et al., 2008).

Gli inventari forestali, in ragione del fatto che sono costruiti sulla base di robusti disegni statistici, forniscono, per ampie regioni, stime accurate di volumi arborei; all'opposto, i fattori di espansione o le equazioni di cubatura, in molti casi, sono sviluppati su studi a livello locale e quindi offrono risultati non generalizzabili. Un'altra criticità dovuta all'uso di questi due strumenti consiste nel mancato utilizzo di un protocollo standard che uniformi le procedure impiegate per la loro messa a punto (solo due esempi: definizione delle classi diametriche che distinguono gli assortimenti legnosi, oppure, inclusione nel calcolo della biomassa epigea dei residui delle utilizzazioni). Il lavoro di Somogyi et al. (2006) cerca di uniformare i termini e le definizioni basandosi sull'unico documento internazionale ufficiale ossia il GPG-LULUCF (IPCC, 2003).

Inoltre, in letteratura compaiono numerosi valori di BEF o di equazioni di cubatura, sviluppate su casi di studio specifici, usando un numero di alberi modello esiguo (da meno di dieci a poche centinaia) (Zianis et al., 2005, Somogyi et al., 2006).

BEFs (*biomass expansion factors*)

La determinazione del fattore di espansione della biomassa da impiegare in ogni specifico caso, dipende essenzialmente dal tipo di dati di cui si dispone e dal tipo di espansione e/o conversione che si vuole eseguire.

Nel caso più semplice, se dal volume legnoso commerciabile si vuole conoscere l'equivalente in biomassa (conversione), si utilizza la densità di quel tipo di legname. La densità (espressa in Mg / m⁻³) è definita come

$$\rho = B / V$$

dove B è la biomassa (Mg), V il volume (m³). Il documento GPG-LULUCF consiglia di intendere la densità del legno (*wood density*) come misurata dal rapporto della massa anidra (a zero umidità) sul volume stimato allo stato fresco.

Generalmente si utilizzano modelli semplici sviluppati per convertire e, se necessario, espandere o ridurre i volumi stimati in biomassa totale (fusto, rami, foglie, radici). Concettualmente, il volume legnoso viene convertito in peso secco (tramite la densità) e quindi, attraverso un coefficiente di espansione, si stima la biomassa arborea. Questi due fattori (densità e coefficiente di espansione) possono essere sostituiti da un unico coefficiente come nella relazione seguente (Brown, 1997; Somogyi et al., 2006; Lehtonen et al., 2004):

$$B = V * BEF$$

dove B è la biomassa (la massa complessiva degli alberi allo stato secco espressa in kg o tonnellate), V il volume degli alberi (in metri cubi) e il BEF appropriato risulta essere il fattore di conversione ed espansione perché dotato di unità di misura uguali a quelle della densità.

Il rapporto GPG-LULUCF identifica due differenti tipi di BEF:

BEF₁ = Coefficiente di espansione dell'incremento annuo (riferito al volume) della biomassa epigea, adimensionale

$$G_w = I_v * BEF_1 * D$$

dove G_w è l'incremento annuo di biomassa epigea espresso in tonnellate di sostanza secca $ha^{-1} anno^{-1}$; I_v è l'incremento annuo relativo al volume di legname ($m^3 ha^{-1} anno^{-1}$); D è la densità del legno espressa come tonnellate di sostanza secca su m^3 .

BEF_2 = Coefficiente di espansione per la conversione del volume commerciale in biomassa arborea epigea, adimensionale

$$B = V * BEF_2 * D$$

Nel caso si voglia considerare la biomassa arborea totale (epigea + ipogea) il valore di B deve essere moltiplicato per $(1-R)$, un ulteriore fattore di espansione, dove R è il rapporto *root/shoot*, adimensionale

$$B = [V * BEF_2 * D] * [1+R]$$

Un esempio dei casi più frequenti di espansione o conversione che possono verificarsi nella stima della biomassa è riassunto nella (Figura 8).

In genere, per la stima della biomassa a partire da volumi di legname, si utilizzano BEF di valore costante (IPCC, 2003; FAO, 2001).

Questo approccio può essere ritenuto valido solo in prima approssimazione, infatti risulta essere smentito da una serie di studi di seguito esposti.

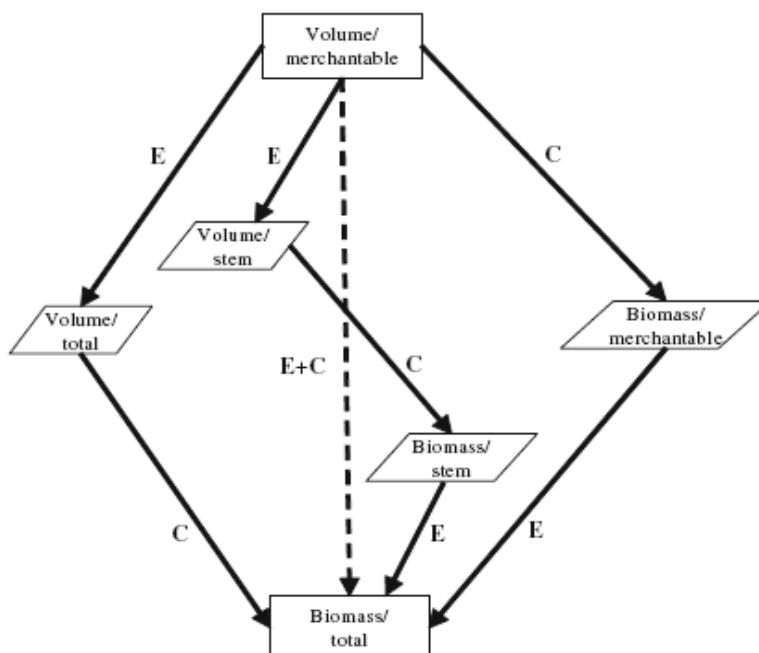


Figura 8 – Modalità di stima della biomassa a partire dal volume commerciale. Definizione termini: E espansione, C conversione. Per *stem* si intende il volume del fusto, sono solitamente esclusi rami e foglie (Somogyi et al., 2006).

L'analisi condotta da Brown (2002) sulla base di dati sperimentali provenienti dalle foreste delle zone tropicali e degli Stati Uniti, evidenzia che il BEF (per convertire ed espandere il volume commerciale in biomassa epigea totale) varia, in modo esponenziale, rispetto al volume legnoso commerciale. La Figura 9 mostra che a bassi valori di volume corrispondono alti valori di BEF e viceversa. A questa regola generale sfugge il genere *Pinus* per il quale il BEF si riduce rapidamente in corrispondenza di volumi legnosi molto bassi e quindi rimane relativamente costante per volumi legnosi via via crescenti.

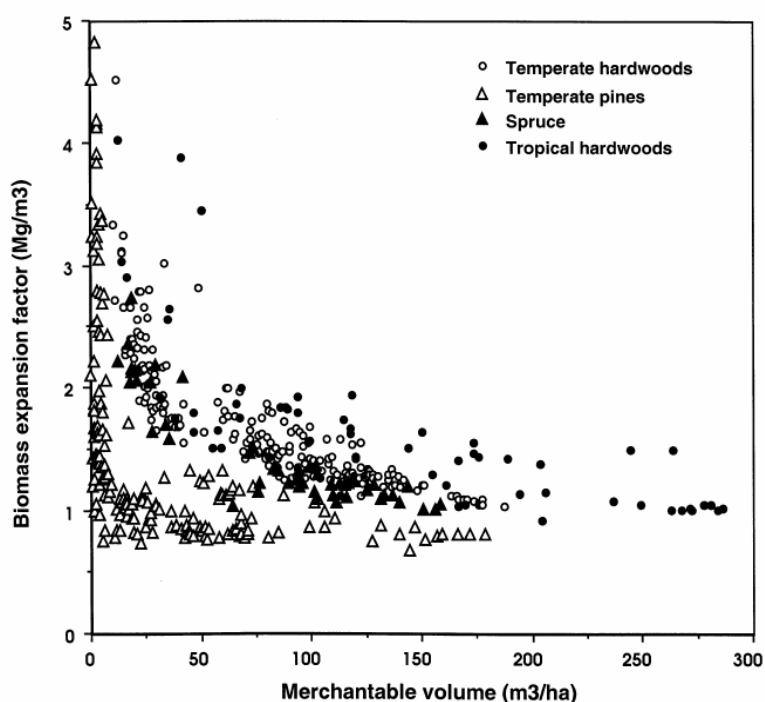


Figura 9 - Rapporto fra i BEF ed il volume commerciale per latifoglie temperate, pini, abeti rossi e latifoglie tropicali (Brown et al., 1989; Brown e Lugo, 1992; Schroeder et al., 1997; Brown et al., 1999).

Un lavoro di specifico interesse, soprattutto perché sviluppato su una regione affine alla Sardegna, è quello di Sabaté et al. (2003). Gli Autori, elaborando i dati dell'*Ecological Forest Inventory of Catalonia* (IEFC), hanno calcolato una serie di fattori di espansione (*Aboveground Biomass Expansion Factor* = ABEF, *Branch Biomass Expansion Factors* = BBEF, *Leaf Biomass Expansion Factors* = LBEF) tali da permettere una stima della fitomassa arborea dei popolamenti forestali. A livello di popolamento, l'ABEF risulta significativamente diverso tra le varie specie ed è influenzato dai diametri medi dei fusti (l'ABEF diminuisce all'aumentare del diametro). Gli stessi Autori affermano che la

densità del legno è la variabile principale per comprendere le differenze di fattori di espansione tra specie, e che il contenuto di carbonio delle varie componenti (foglie, corteccia e legno) mostra una bassa variabilità tra le specie.

Riguardo *Quercus ilex* Sabaté et al. (2003) hanno determinato un valore di ABEF pari a 1.28 Mg m^{-3} (un BBEF di 0.42 Mg m^{-3} e un LBEF di 0.083 Mg m^{-3} considerando una densità del legno di 0.90 Mg m^{-3}). Questi coefficienti sono poi applicati a livello di popolamento: noto il volume legnoso ad ettaro si espande e converte il valore tramite l'ABEF per ottenere il peso della biomassa epigea totale.

$$\text{Volume [m}^3 \text{ ha}^{-1}] \times \text{ABEF [1.28 Mg m}^{-3}] = \text{biomassa epigea totale [Mg ha}^{-1}]$$

Lo schema (Figura 10) tratto da una presentazione, reperita sul web, dei risultati del medesimo inventario forestale (*Aboveground Biomass Expansion Factors and Biomass Equations of forests in Catalonia*, Cost E21 Valencia, Spain 7-8 October, 2002 autori Carles Gracia, Santi Sabaté, Jordi Vayreda e Joanjo Ibàñez) illustra espressamente il modello. Si noti che i valori dei BEF sono leggermente differenti da quelli proposti nella pubblicazione di Sabaté et al. (2003).

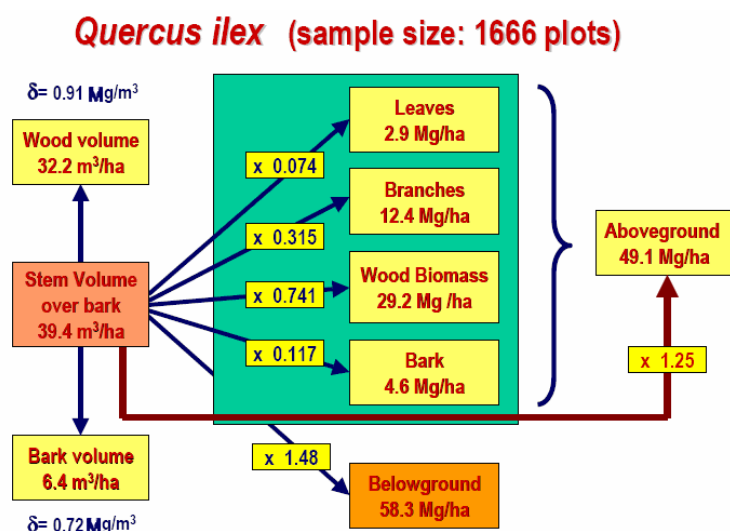


Figura 10 – Modello della stima della biomassa attraverso ABEF

Alcuni autori (Somogyi et al., 2006) riferendosi al caso specifico di un coefficiente per l'espansione del volume commerciale (V_{merch} , dato comunemente stimato negli inventari forestali) in volume legnoso totale del fusto (V_{stem}), adoperano la relazione:

$$V_{\text{stem}} = V_{\text{merch}} * \text{volume expansion factor}$$

Gli stessi Autori, attraverso dati sperimentali raccolti nella Repubblica Ceca, hanno dimostrato che questo tipo di coefficiente risulta essere specie specifico e dipendente dalla dimensione del fusto (diametro misurato ad 1.30 m, *diameter at breast height dbh*) (Figura 11).

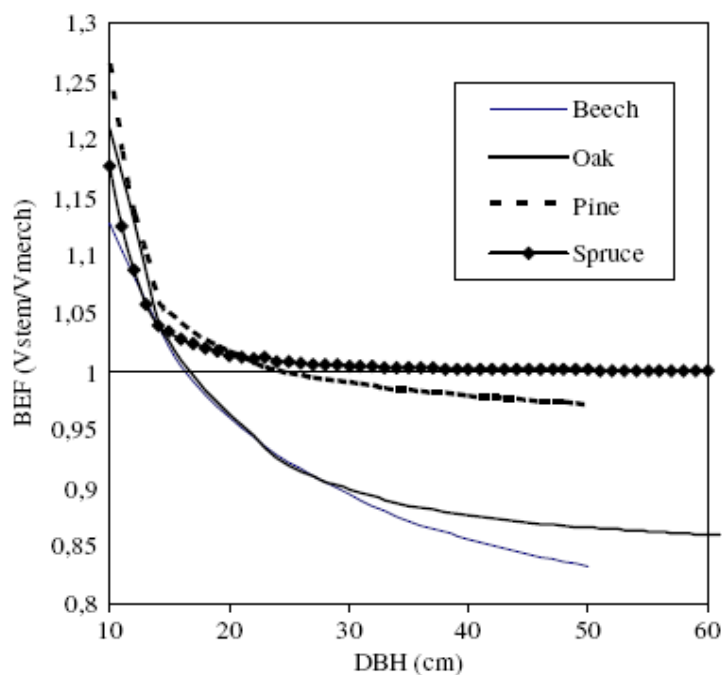


Figura 11- Relazione tra BEF e diametro 130 cm (Somogyi et al., 2006)

Dall'analisi della Figura si nota che, per diametri oltre una data soglia, nel caso delle latifoglie e, sia pure in misura limitata, del pino, il volume commerciale comprende sia la componente legnosa del fusto sia quella dei rami, per cui il volume del fusto risulta inferiore al volume commerciale dando origine ad un coefficiente di espansione inferiore all'unità.

Lehtonen et al. (2004) hanno realizzato, in Finlandia, uno studio nel quale, avvalendosi di equazioni per la stima della biomassa arborea già esistenti, si evidenzia che si ha una notevolmente riduzione del livello di incertezza delle stime se i BEF si sviluppano in funzione delle classi di età del popolamento arboreo cui si riferiscono.

Altri autori (Jalkanen et al., 2005) affermano che, allo scopo di ridurre le incertezze nelle stime, risulta necessario applicare tali coefficienti a popolamenti che si trovino in condizioni simili (fasi di sviluppo e trattamento selvicolturale affini) a quelle delle formazioni dove gli stessi sono stati messi a punto.

Infine, si riporta un esempio tratto dal lavoro di Federici (et al., 2008) dedicato allo sviluppo di un modello di stima delle variazioni dei *carbon stok* nei 5 *pool* forestali: biomassa epigea, biomassa ipogea, sostanza organica morta, suolo e lettiera. Lo schema riportato (Figura 12) illustra come a partire dai dati di volume legnoso (espressi in m³ ad ettaro) e delle superfici si pervenga ad una stima del carbonio fissato (espresso in tonnellate) attraverso l'utilizzo di fattori di conversione o di espansione.

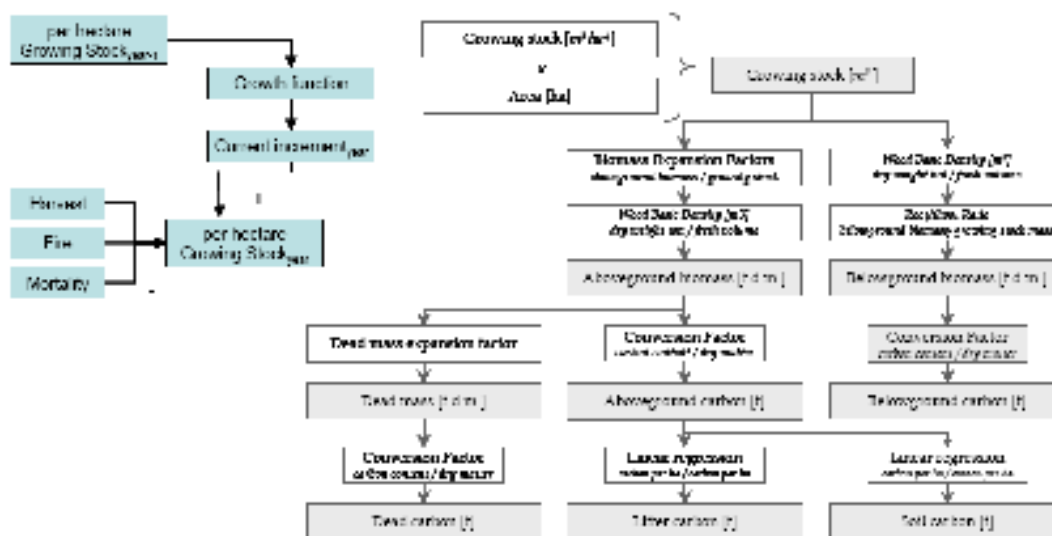


Figura 12 - Model flowchart (schema del modello For-est, Federici et al., 2008)

EQUAZIONI

Attualmente, come discusso nei paragrafi precedenti, si assiste ad un nuovo impulso nella predisposizione di equazioni che facilitino la stima della biomassa arborea. In genere questi strumenti vengono utilizzati nei casi in cui si dispone di dati (provenienti da inventari forestali o da altro tipo di misure dirette), che riportano i diametri e le altezze del popolamento arboreo d'interesse. Tali misure dendrometriche possono essere relative ai singoli fusti (distinti per singola specie) o riassunte sotto forma di tabelle di sintesi per il singolo popolamento (numero di alberi per unità di superficie per categoria di diametro). Questo tipo di relazioni matematiche, meglio identificate come *equazioni allometriche di regressione della biomassa*, forniscono un valore previsto di biomassa in funzione del diametro (DBH) o dell'altezza:

$$B = f (P_1, P_2, \text{ecc})$$

dove B è la biomassa (la massa delle piante allo stato fresco o secco espressa in kg o tonnellate), P₁, P₂ i dati disponibili dei fusti (es. DBH, altezza etc.).

Zianis et al. (2005) hanno raccolto ed analizzato le equazioni esistenti a livello europeo con l'obiettivo di verificare l'esistenza di "possibili convergenze" che consentano di sintetizzare delle funzioni a validità generale. A tale scopo hanno realizzato un database contenente le informazioni esistenti riguardanti numerose specie arboree, dall'analisi del quale emerge che le equazioni di stima della biomassa censite sono 607 e riguardano 39 specie. La maggioranza di queste sono state sviluppate per ambienti del centro nord Europa e riguardano conifere; inoltre, generalmente, sono carenti sia di informazioni riguardo gli errori, sia di stime sul calcolo di eventuali parametri empirici. Le equazioni che si riferiscono alle regioni mediterranee sono complessivamente 82 ed interessano i Paesi del sud Europa (Grecia, Italia, Portogallo, Spagna). Per quanto riguarda l'Italia ci sono 3 referenze: Brandini Tabacchi (1996); Leonardi e Rapp (1982); Susmel et al. (1976).

Un ulteriore esempio sull'attualità della ricerca di funzioni matematiche, a valenza generale, che agevolino la stima della biomassa epigea, si trova nel contributo di Vallet et al. (2006); questi Autori, partendo dai dati provenienti dall'Inventario Forestale Nazionale Francese, hanno sviluppato 6 equazioni specie-specifiche per la stima del volume epigeo totale utilizzando come variabili indipendenti la circonferenza misurata ad 1.3 metri e l'altezza.

Anfodillo et al. (2006), osservando un numero consistente di questo tipo di strumenti di stima della fitomassa arborea, affermano che le equazioni di regressione utilizzate nei modelli hanno coefficienti di determinazione (R²) superiori a 0.9-0.95.

Un modello matematico comunemente utilizzato per lo sviluppo di funzioni per il calcolo della biomassa arborea è espresso in forma di funzione potenza

$$M = a D^b$$

dove M = massa totale (Kg sostanza secca) e D = diametro (cm) a 1.3 m e i parametri a e b, sono detti rispettivamente coefficiente di scala ed esponente di scala.

In molti casi la variabilità di M è largamente spiegata dalla variabilità del diametro (Zianis e Mencuccini, 2004), altre volte entra come seconda variabile indipendente l'altezza, o anche in combinazione con il diametro stesso (Zianis et al., 2005).

I valori di a e b hanno una certa variabilità in relazione alla specie, all'età del popolamento, alle caratteristiche stazionali e climatiche (Zianis e Mencuccini, 2004).

Riprendendo lo studio condotto da Susmel et al. (1975) che ha comportato lo sviluppo di una relazione allometrica su una fustaia irregolare di leccio del Supramonte di Orgosolo (NU), si può constatare che il modello di regressione utilizzato è stato proprio una funzione potenza (si veda la Figura 13a e 13b, Anfodillo et al., 2006); questa scelta risulta essere analoga a quella di altri autori (Niklas, 1994; Zianis e Mencuccini, 2004; Zianis et al., 2005).

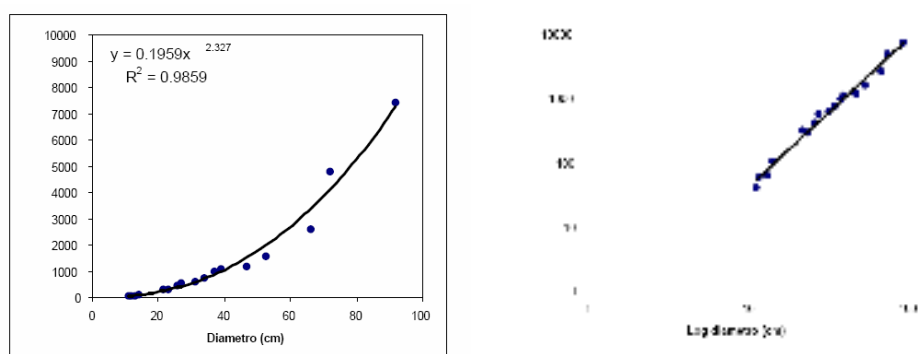


Figura 13 - Relazione tra fitomassa totale e diametro in leccio; a destra Figura 13b - Relazione log-log tra fitomassa totale e diametro in leccio (Susmel et al., 1976). Si nota come la maggiore distanza dalla retta di regressione dalle osservazioni relative ai diametri oltre i 50 cm “scompare” quando si utilizzano scale logaritmiche.

I dati sul quale sono elaborate queste relazioni provengono da campionamenti distruttivi di alberi modello che possiedono un diametro compreso nel range del popolamento oggetto di studio (Zianis e Mencuccini, 2004). Un approccio alternativo al metodo tradizionale per calcolare il valore dell'esponente di scala b , è quello proposto Anfodillo (et al., 2006) basato su principi biomeccanici, sulla struttura e l'ecofisiologia degli alberi, già discusso nei paragrafi precedenti. Zeide (1993), analizzando numerose relazioni allometriche relative a specie arboree, ha messo in evidenza che il valore dell'esponente di scala b risulta compreso tra 2 e 3 nella relazione tra massa totale e diametro.

Recentemente Zianis e Mencuccini (2004), basandosi su centinaia di relazioni allometriche presenti in letteratura, hanno calcolato come più comune un valore dell'esponente pari a 2.36, mentre il fattore di scala risulta dipendente dalla densità del legno.

Dalla ricerca bibliografica emerge che non tutte le relazioni allometriche proposte (o similmente le relazioni delle tavole dendrometriche) sono state prodotte utilizzando funzioni potenza, anzi in Italia risulta diffuso l'utilizzo di funzioni di tipo polinomiale. Un esempio di quest'approccio sono le Tavole Dendrometriche Regionali della Regione Emilia-Romagna (2000), nelle quali vengono utilizzate relazioni empiriche del tipo (Tabacchi 1985):

$$V = b_0 + b_1 * (d^2 h)$$

dove d = diametro e h = altezza della pianta mentre b₀ e b₁ sono coefficienti da stimare con la regressione. Altri casi studio, espressione di questo tipo di relazioni matematiche, vengono riportati nei lavori esposti nella Tabella 14.

<i>Autore</i>	<i>Note</i>
Colleselli (1974)	Larice in Cadore
Hellrigl (1974)	Abete bianco in Toscana
Calamini et al. (1983)	Faggeta, Appennino Pistoiese
Calamini et al. (1989)	Faggeta, Appennino Pistoiese
Menguzzato e Tabacchi (1988)	Pseudotsuga in Calabria
Menguzzato e Tabacchi (1990)	Pino insigne ed eucalipti in Calabria
Menguzzato e Tabacchi (1995)	Douglasia in Calabria
Bezzi et al. (1991)	Ontano napoletano nel Cilento
Brandini e Tabacchi (1996)	Polloni leccio e corbezzolo in Sardegna meridionale
Amorini et al (2000)	Cedui di cerro Toscana
Calamini e Gregori (2001)	Faggeta, Appennino Pistoiese
Ciancio et al. (2002)	Ceduo di leccio
Marziliano P.A. (2002)	Ceduo di leccio
Fabbio et al. (2002)	Ceduo di leccio
Fattorini et al. (2005)	Varie specie forestali del Trentino
Nocetti et al. (2007)	Soprasuoli di cerro in avviamento ad altofusto, Toscana
Nosenzo A. (2008)	Cedui di faggio del Piemonte

Tabella 14 - alcune pubblicazioni sulla valutazione della fitomassa arborea

Secondo il giudizio di alcuni Autori (Anfodillo et al., 2006) questa tipologia di modelli matematici dimostra, in genere, di avere una migliore capacità predittiva rispetto al modello che utilizza una funzione potenza.

In sintesi appare corretto affermare che le equazioni allometriche finora sviluppate sono basate essenzialmente su relazioni empiriche con validità locale (Zianis et al., 2005).

1.5.4 Sintesi letteratura sulla stima del C della “foresta mediterranea”

L’obiettivo iniziale del percorso di ricerca è stato quello di dare un contributo conoscitivo alla stima del carbonio fissato nella vegetazione delle aree a clima mediterraneo, in relazione al ruolo importante che ciò assume nel raggiungimento dell’obiettivo di riduzione nazionale delle emissioni dei gas serra previsti dal PK.

Dopo aver individuato le tipologie forestali di maggior interesse è stata eseguita una valutazione di fattibilità della ricerca, dalla quale sono emersi una serie di problemi di ordine pratico e teorico (in breve di seguito descritti) che hanno fatto sì che ci si concentrasse sulla tipologia arborea “lecceta mediterranea”. I motivi principali di questa scelta sono: la sua importanza come formazione forestale rappresentativa della fase di massima evoluzione della vegetazione mediterranea, l’estensione in termini di superficie, il ruolo che ancora riveste nel contesto territoriale mediterraneo dal punto di vista economico-sociale, la presenza di una sia pur scarsa informazione di natura bibliografica (che è stata di aiuto nel percorso di ricerca), la possibilità di collaborare al progetto ForEnCarb che ha consentito di eseguire i rilievi e la raccolta dati in campo. Tale interazione ha permesso di affrontare i notevoli sforzi organizzativi ed economici necessari per realizzare materialmente le indagini in campo.

Si espongono di seguito alcune delle criticità emerse in fase di ricerca bibliografica riguardanti lo studio del contributo della macchia mediterranea allo stock di carbonio fissato. Essenzialmente si sono registrate difficoltà oggettive nella stima delle superfici classificate come macchia mediterranea (si presentano disomogenee per composizione specifica, per grado di copertura e per dimensione ed età delle piante (Costa e La Mantia, 2005) e difficoltà conseguenti alla scarsa applicabilità delle metodologie utilizzate nel settore forestale per la misura degli *stock* di legname.

Infatti, a differenza delle specie arbustive, i fusti delle specie arboree hanno una forma che può essere considerata tipica a livello di specie. La forma è espressa dal portamento che per le dicotiledoni arboree può essere monopodiale (fusto ben individuabile dalla base alla vetta e ramificazioni inserite sull’asse principale, tipico delle conifere) o simpodiale (fusto ben individuabile solo nella parte bassa, poi si confonde con i rami, tipico della maggioranza delle latifoglie). Sulla base di queste caratteristiche e partendo

dalle misure delle cosiddette variabili dendrometriche più comuni (altezza e diametro dei singoli fusti) sono state sviluppate una serie di formule per la cubatura dei soprassuoli forestali (La Marca, 2004). Nel caso delle formazioni a macchia, essendo composte principalmente da specie a portamento arbustivo, vengono meno le sopracitate tecniche di rilievo della biomassa basate sulle misure dendrometriche.

La misura della biomassa delle formazioni a macchia si può effettuare con la classica *tecnica del raccolto* che consiste nel recidere alla base tutte le specie legnose di una superficie nota. Si rileva in campo per ogni specie il peso fresco, mentre il peso secco delle singole componenti viene determinato mediante essiccazione in stufa (Bianchi et al., 2002). L'applicazione di metodi distruttivi, come quello appena descritto, permette di esprimere la biomassa in termini di sostanza secca; il peso si può mettere in relazione con parametri biometrici o di altro tipo facilmente identificabili (età, volume apparente dell'arbusto, densità spaziale, etc.). Questo approccio spesso si rende necessario per sviluppare metodi di stima non distruttivi della fitomassa epigea di formazioni arbustive mediterranee, basati sul tentativo di sviluppare relazioni allometriche, quali quelli descritti da Montes et al., (2000) e da Usò et al., (1997).

Dall'analisi bibliografica è emerso che anche in America del Nord esistono diversi tentativi di predisporre equazioni allometriche per la stima della biomassa di formazioni arbustive attraverso metodi di campionamento distruttivo per determinare la relazione tra grado di copertura del suolo, altezza e peso secco (Smith e Brand, 1983; Olson e Martin, 1981).

In Italia, di recente, alcuni Autori (Fattorini et al., 2005) hanno realizzato uno studio finalizzato a valutare la correlazione tra fitomassa epigea arbustiva e altezza o densità del popolamento in modo da fornire alcune indicazioni che facciano intuire la fattibilità di modelli di predizione della fitomassa arbustiva mediante l'uso dell'altezza e della densità.

Le analisi sugli anelli di accrescimento delle specie arboree sono normalmente usate nelle regioni temperate per ricostruire l'accrescimento e quindi l'evoluzione delle foreste nel tempo. Purtroppo nelle regioni mediterranee, a causa della grande variabilità spazio-temporale delle condizioni ambientali, gli anelli di accrescimento non sono ben formati e distinguibili; ciò rende di difficile interpretazione i risultati ottenuti da analisi del fusto di tipo dendrocronologico (Cherubini et al., 2003).

L'unica tecnica che consente una misura altamente affidabile, almeno a livello puntuale, della funzione di *sink* di questo tipo di formazione, ovvero della variazione nel tempo dello *stock* complessivo di carbonio, è quella basata sulle misure di tipo micrometeorologico. In particolare, come visto sopra, la tecnica dell'*Eddy Covariance* è stata utilizzata su formazioni a macchia mediterranea da diversi autori costituisce il sistema standard di questo tipo di analisi (Valentini et al., 1991; Spano et al., 2006; Marras et al., 2008).

Di seguito viene presentato un riepilogo commentato dei dati bibliografici di varia natura utili per la predisposizione di stime della fitomassa arborea delle tipologie forestali mediterranee.

Riguardo alla stima della biomassa epigea totale nelle tipologie forestali mediterranee prese in considerazione, esiste in bibliografia una serie, in verità poco numerosa, di dati che provengono da studi eseguiti spesso con obiettivi differenti ed utilizzando metodologie di misura e definizioni eterogenee. In conseguenza di ciò spesso le informazioni risultano prive di stima di incertezza e scarsamente confrontabili tra loro. La Tabella 21 riporta sinteticamente i valori sperimentali di fitomassa contenuti nelle formazioni mediterranee ritenuti utili a descrivere il contesto generale in cui si è svolto il percorso di ricerca.

La Tabella 22, tratta esclusivamente da fonti bibliografiche nazionali, riporta una sintesi dei risultati scientifici ottenuti da diversi Autori per quanto riguarda gli studi condotti sul leccio finalizzati allo sviluppo di equazioni di previsione della biomassa epigea complessiva; si osservi che questa tabella contiene pochissime pubblicazioni riferite alle altre specie quercine e ad aree mediterranee.

Riferendosi sempre alle equazioni di stima della fitomassa, a livello mediterraneo, principalmente in Spagna, esistono diversi studi condotti da vari Autori; tra questi Canadell, in un lavoro dal titolo: *Biomass equations for Quercus ilex L. in the Montseny Massif, Northeastern Spain* (Canadell et al., 1988), utilizza come predittore principale per la stima della biomassa il diametro ma, inserendo nel modello l'altezza e la proiezione della chioma, in termini di raggio, la stima migliora.

Come esposto nei paragrafi precedenti, solitamente la stima della fitomassa dei popolamenti forestali relativa a vaste superfici, viene eseguita utilizzando fattori che consentono la conversione dei volumi commerciali in valore di peso fresco o secco. In

molti casi tali fattori rappresentano la media di valori ottenuti da citazioni bibliografiche e sono utilizzati senza considerare la composizione specifica del popolamento, la distribuzione in classi diametriche o la tipologia di volume commerciale (Fattorini et al., 2005). Di conseguenza la valutazione e l'accuratezza delle stime risultano complesse. A questo riguardo si evidenzia una scarsa reperibilità di coefficienti utilizzati per la stima della biomassa delle formazioni forestali mediterranee (BEF, R/S, etc.) i quali sono oltretutto caratterizzati da una notevole eterogeneità nelle informazioni fornite.

In questo contesto generale di carenza di informazioni specifiche una fonte di riferimento può essere considerata il rapporto GPG-LULUCF. Nella Tabella 15 sono riportati i valori relativi al volume, alla biomassa e ai BEF (LULUCF) attribuibili alle tipologie forestali italiane.

	Unità misura	Valore	Tabella
Volume legnoso medio epigeo	m ³ ha ⁻¹	145	3A.1.4
Biomassa epigea	t ss ha ⁻¹	74	3A.1.4
G _w incremento annuale medio di biomassa epigea	t ss /ha anno ⁻¹	4 (0,5-8)	3A.1.5
R rapporto R/S (Quercus)	adimensionale	0,35 (0,2-1,16)	3A.1.8
D = densità (Quercus)	t ss /m ³	0,58	3A.1.9-1
BEF ₁ (sopra scorza)	adimensionale	1,2 (1,1-1,3)	3A.1.10
BEF ₂ (sopra scorza)	adimensionale	1,4 (1,15-3,2)	3A.1.10

Tabella 15 - Fonte: GPG-LULUCF

Gli sforzi della comunità scientifica sono indirizzati a cercare di uniformare soprattutto le definizioni di questi coefficienti. A tale proposito esiste un database, realizzato in seno al progetto CARBOINVENT, che propone una raccolta di fattori allometrici di biomassa e carbonio (*allometric biomass and carbon (abc) factors database*) secondo le definizioni utilizzate nel GPG-LULUCF.

La Tabella 16 presenta il risultato della *query* di esempio eseguita sul database utilizzando come criterio la selezione di tutti i BEF2 relativi al genere *Quercus* in Italia. La fonte dei dati specifici è il progetto Riselvitalia realizzato dall'ISAFSA, indicato in bibliografia come (Federici, 2004).

ID	Factor Type	Factor value	Country	PROPOSED APPLICATION OF THE FACTOR			BOTANICAL INFORMATION				Data Sources
				Age Range	Diameter Range	Other	Aggreg. class 1	Aggreg. class 2	Genus / Species	Name as in reference	
174	BEF2	1.45	Italy				broadleaf	deciduous	Quercus cerris	turkey oak	Riselvitalia - ISAF - 2004
175	BEF2	1.42	Italy				broadleaf		Quercus	other oaks	Riselvitalia - ISAF - 2004
190	BEF2	1.39	Italy				broadleaf		Quercus	other oaks	Riselvitalia - ISAF - 2004
191	BEF2	1.23	Italy				broadleaf	deciduous	Quercus cerris	turkey oak	Riselvitalia - ISAF - 2004
192	BEF2	1.45	Italy				broadleaf	evergreen	Quercus ilex	evergreen oaks	Riselvitalia - ISAF - 2004

Tabella 16 - Valori del coefficiente BEF2 relativi a specie quercine in Italia. Fonte: http://ghgdata.jrc.it/carboinvent/cidb_bioctrans_abcf.cfm

Lo stesso database è stato ulteriormente implementato nel progetto di ricerca del JRC (Joint Research Centre of European Commission) finalizzato ad armonizzare e sviluppare le metodologie di stima e di monitoraggio delle emissioni/rimozioni GHG per il settore agricolo-forestale europeo; questo lavoro ha previsto lo sviluppo di un sito web (http://afoludata.jrc.it/data_fs_cf) dove è possibile consultare ed eventualmente implementare il database (Somogyi et al., 2008).

La mancanza di valori affidabili di queste costanti rende altamente incerto l'utilizzo delle tavole di cubatura esistenti in Italia per molte specie arboree, per giungere ad una stima, seppur approssimativa, della fitomassa presente in un determinato popolamento forestale.

Il citato studio organico, condotto da Sabaté et al. (2003) utilizzando i dati dell'inventario forestale della Catalogna, ha prodotto i risultati esposti in Tabella 17, si osserva che in questo caso i valori dei BEF sono espressi con l'unità di misura.

Specie	ABEF Mg m ⁻³	BBEF Mg m ⁻³	LBEF Mg m ⁻³	D. legno Mg m ⁻³	D. corteccia Mg m ⁻³	Contenuto C % ss
<i>Quercus ilex</i>	1,28	0,42	0,083	0,90	0,72	
<i>Quercus suber</i>				0,83	0,24	47,20
<i>Arbutus unedo</i>				0,82	0,55	
<i>Pinus pinaster</i>	0,55	0,15	0,046	0,52	0,31	51,10

Tabella 17 - Valori medi dei fattori di espansione per la biomassa epigea (ABEF), la biomassa dei rami (BBEF), e la biomassa fogliare (LBEF) a livello di popolamento (Sabaté et al., 2003).

La quantità di carbonio fissato nella biomassa legnosa, intesa naturalmente come sostanza secca, si stima solitamente pari al 50% della biomassa stessa, pertanto per effettuare la conversione da fitomassa arborea a carbonio è sufficiente moltiplicare il valore per un fattore di conversione pari 0.5. Questo viene confermato da diversi Autori

(Nabuurs et al., 2003; IPCC 2003; Tirone et al., 2003), mentre Costa e La Mantia (2005) propongono la seguente uguaglianza:

$$1 \text{ g sostanza secca} = 0,5 \text{ g di C} = 1,5 \text{ g di CO}_2$$

La biomassa radicale viene espressa comunemente dal rapporto *root/shoot* (R/S), il quale risulta fondamentale per il calcolo della biomassa complessiva dei popolamenti forestali. I dati disponibili in letteratura riguardanti il *root/shoot* (R/S) per la tipologia forestale oggetto di studio sono sintetizzati in Tabella 18.

Autori	Località	Specie	Root/Shoot
Gratani et al 1980	Italia	Q.ilex, A.unedo, E. arborea	0.67
Gratani et al 1980	Italia	Q.ilex, A.unedo, E. arborea	0.45
Hilbert e Candell, 1995 (in)	Spagna	Quercus ilex	0.39
Hilbert e Candell, 1995 (in)	Spagna	Quercus ilex ceduo	1.40
Hilbert e Candell, 1995 (in)	Francia	Gariga (Q. coccifera)	1.95
Hilbert e Candell, 1995 (in)	Francia	Gariga (Q. coccifera)	4.81
Lledò et al. 1992, (in)	Spagna	Quercus ilex	0.42
Lledò et al. 1992, (in)	Spagna	Quercus ilex ceduo	0.85
Federici S.(2004, Riselvitalia)	Italia	Quercus ilex ceduo	1.00
CarboeuropeIP Project (2005)	Francia	Quercus ilex ceduo	1.05
Hilbert e Candell, 1995 (in)	Valore medio	Tipologie forestali medit.	0.64±0.38
Hilbert e Candell, 1995 (in)	Valore medio	Tipologie arbustive medit.	2.0±0.5

Tabella 18 - Root/shoot relativi a tipologie forestali mediterranee

Un altro dato che risulta di difficile reperibilità ma allo stesso tempo indispensabile per avere una stima del carbonio fissato in (e, annualmente, da) un ecosistema forestale, è quello della lettiera, intesa come foglie, ramoscelli e organi riproduttivi caduti al suolo. A riguardo del *Quercus ilex* si citano i seguenti lavori (Tabella 19):

Autore	Località	L	W	RO	R	T
<i>Rapp et al. 1999</i>	Puechabon (Francia)	2430	545	440	95	3510
<i>Leonardi et al. 1992</i>	Etna (Italia)	2040	340	750		3130
<i>Amorini et al. 1996</i>	Foresta di Pula (Italia)	3200	1300			4500

Tabella 19 - Lettiera (*litter fall*) *Quercus ilex* (L componente fogliare; W componente legnosa; RO organi riproduttivi; R altri residui; T lettiera totale) [kg ha⁻¹ anno⁻¹]

Un ulteriore contributo informativo proviene dall'analisi dei dati definitivi dell'INFC 2005 riassunti nella Tabella 20. Qui vengono riportate le statistiche (medie a livello nazionale) derivate dall'elaborazione dei dati relativi alla terza fase dell'INFC per la componente viva del soprassuolo e per la necromassa legnosa, riferite alle categorie forestali leccio, sughera, roverella.

	Unità misura	Leccio	Sughera	Roverella
Numero alberi per unità di superficie	n ha ⁻¹	1868.6	557.7	452.5
Area basimetrica	m ²	14.2	12.2	9.7
Volume fusto e rami grossi	m ³ ha ⁻¹	62.8	48.7	48.7
Incremento corrente di volume	m ³ ha ⁻¹	2.0	1.3	1.3
Fitomassa viva fusto e rami grossi	Mg ha ⁻¹	45.2	36.5	30.8
Fitomassa della ramaglia	Mg ha ⁻¹	14.5	10.4	9.2
Fitomassa della ceppaia	Mg ha ⁻¹	1.0	0.8	0.7
Fitomassa arborea epigea	Mg ha ⁻¹	60.8	47.7	40.8
Volume necromassa totale	m ³ ha ⁻¹	1.8	1.0	1.3

Tabella 20 – Sintesi delle statistiche relative ad alcune categorie forestali (INFC, 2007b)

Autore/fonte	Località	Tipologia di vegetazione	Anni	H. popolam. medio	D	densità	Biomassa epigea			Biomassa ipogea			Biomassa arborea					
							fusti/ha	t ss	foglie	fusto	t ss	foglie	totale	totale	t/ha s.s.	totale	t/ha s.s.	totale
Amorini et al., 1996	Sardegna (Italia)	Quercus ilex ceduo + corbezzolo	45	13.7	8.9	8036	204.2	7.3	211.5									
Bianchi et al., 2002	Sardegna (Italia)	A. unedo, E. arborea, Ph. latifolia	2															20.00
Bianchi et al., 2002	Sardegna (Italia)	E. arborea, G. corsica, Cistus spp	3-4															25.00
Bianchi et al., 2002	Sardegna (Italia)	A. unedo, E. arborea, R. ulmifolius	15	4-5														120.00
CarboeuropelP Project, 2005	Puechabon (Francia)	Quercus ilex ceduo	56	5.5		7150	107	6	113	118.71								231.71
Gratani et al., 1980	Caspelporziano (Italia)	A.unedo, E. arborea					40.09	4.16	44.25	28.1								72.35
Gratani et al., 1980	Caspelporziano (Italia)	Q.ilex, A.unedo, E. arborea					77.82	6.05	83.87	37.6								121.47
Hilbert e Candell, 1995 (in)	Spagna	Quercus ilex	60-90	9-12				6.11	160.9	63								223.90
Hilbert e Candell, 1995 (in)	Spagna	Quercus ilex ceduo	25	6-8				4.98	79.1	108								187.10
Hilbert e Candell, 1995 (in)	Francia	Gariga (Q. coccifera)	17	1				4.00	23.55	46								69.55
Hilbert e Candell, 1995 (in)	Francia	Gariga (Q. coccifera)	36	2,2				3.89	14.96	72								86.96
Leonardi et al., 1992	M.te Minardo (Italia)	Quercus ilex ceduo	31				142.1	8	150.1									
Lledò et al., 1992	Prades (Spagna)	Quercus + Arbutus, Phillyrea	40			4577	105.66	6.66	112.32									
Montes et al., A. 2000	Azzaden (Marocco)	Juniperus thurifera		3.7		19-78		2.45	49									
Ogaya et al., 2003	Prades Mountains (Spagna)	Q.ilex, Ph. Latifolia, A. unedo		8-10	5.66	13466			142.3									
Ogaya et al., 2003	Prades Mountains (Spagna)	Q. ilex, Ph. latifolia		3-4	4.26	19766			87.97									
Peressotti et al., 1999	Sardegna (Italia)	J. phoenicea, P lentiscus	30	2					10.1									
Rapp et al., 1999	Puechabon (Francia)	Quercus ilex ceduo	40	4.7	7	3850	66.5	4.9	71.4									
Sabaté et al., 2003	Catalonia (Spagna)	Quercus spp.							59.5									
Sirca et al., (com. pers.)	Sardegna (Italia)	J. phoenicea, P lentiscus	35	1					16.6	8.3								
Susmel et al., 1976	Sardegna, Montes	Quercus (fustaia disetanea)		17	35	393	332	7.4	339.4									
Tirone et al., 2003	Caspelporziano (Italia)	Quercus. + Pistacia, Erica (fustaia irr)	54	12.5	16	1232	95.6	7.86	103.67									

Tabella 21- Sintesi dati bibliografici relativi alla fitomassa di formazioni forestali mediterranee

Autore	Località	Range di diametro e altezza				n	R ²	equazione	a	b	c	d	Note
		D [cm]	H [m]	D	H								
Marziliano P.A. 2002	Italia (FG)	5-22	8.6	100	0.98	$y = a + b \cdot x^2$	-2.1176	0.3939				Ceduo di leccio tav. un'entrata	
Brandini e Tabacchi 1996	Sardegna	4.5-26.1	6-16	94	0.952	$y = a + b x^2 - z$	-0.6165	0.03582				Polloni di leccio e corbezzolo. Sardegna meridionale	
Fabbio et al., 2002	Calabria	2.5-13	3.7-11	88	0.946	$y = a + b x^2 - z$	0.4675	0.050144				Ceduo di leccio	
Marziliano P.A. 2002	Italia (FG)	5-22	8.6	100	0.98	$y = a + b x^2 + c x^2$	1.3857	0.0194	0.1901			Ceduo di leccio tav. doppia entrata	
Ciancio et al., 2002	Calabria	3-21	7.3	88	0.967	$y = a + b x^2 + c x^2$	-0.40447	0.02708	0.19215			Ceduo di leccio	
Susmel et al., 1976	Sardegna	20-90		18	0.927	$y = a + b x + c x^2 + d x^3$	-0.8315	1.2091	0.0538	0.0775		Fustaia irregolare di leccio Sardegna centrale	
Susmel et al., 1976	Sardegna	20-90		18		$y = a \cdot x^b$	0.2381	2.2689				Fustaia irregolare di leccio Sardegna centrale	
Leonardi e Rapp 1982	Sicilia	5-20		12		$y = a \cdot x^b$	0.2179	2.0513				Ceduo di leccio	

Tabella 22 - Sintesi dei modelli perequativi sviluppati su *Quercus ilex* in Italia [y= peso epigeo totale; x= diametro a 1.30 m; z= altezza]

2. OBIETTIVI

L'obiettivo generale del progetto di ricerca ha riguardato la valutazione e lo sviluppo di strumenti dendrometrico-inventariali di stima della fitomassa arborea epigea. L'analisi condotta ha consentito di ampliare le conoscenze scientifiche sul contributo della "lecceta mediterranea" allo stock di carbonio fissato.

La lecceta rappresenta, in ambito mediterraneo, la formazione forestale arborea maggiormente diffusa, rivestendo una grande importanza dal punto di vista paesaggistico, di protezione dal dissesto idrogeologico e soprattutto di natura socio-economica. Espressione di tutto ciò è la necessità, ancora oggi di grande attualità, di pianificare l'utilizzo sostenibile della risorsa forestale, all'interno della quale la lecceta riveste un'importanza non marginale nell'economia di molti paesi della Sardegna. In questo contesto si inserisce la fase di raccolta dei dati sperimentali, che è stata realizzata in collaborazione con il progetto pilota regionale ForEnCarb (Scotti et al., 2008), finalizzato alla realizzazione di strumenti di gestione forestale sostenibile per la comunità locale di Seneghe (OR).

La realizzazione di un'attenta analisi bibliografica ha permesso, preliminarmente, di verificare che le conoscenze sul bilancio del carbonio e le indagini quantitative sulla fitomassa delle formazioni forestali mediterranee sono piuttosto limitate. Questa carenza informativa di base ha stimolato una riflessione sulla metodica di rilievo.

Un protocollo di rilievo, finalizzato a rispondere alle necessità di indagini di tipo inventariale o alle consuete stime forestali, prevede la misura di un numero limitato di variabili dendrometriche tali da consentire la quantificazione del volume legnoso.

Quest'approccio non è stato giudicato sufficiente per venire incontro alle finalità di ricerca espresse in premessa. Il protocollo messo a punto dal progetto ForEnCarb è stato ampliato attraverso l'inserimento di misure su una serie di variabili dendrometriche definibili "non convenzionali", per consuetudine, non previste nei rilievi dendrometrici.

L'obiettivo di questo approfondimento di indagine è stato quello di avere a disposizione un numero di informazioni tale da consentire la caratterizzazione del singolo fusto arboreo. Questo in virtù del fatto che il popolamento forestale oggetto di studio possiede, dal punto di vista dendrometrico e selvicolturale, una significativa

eterogeneità tale da renderlo distante dai concetti di “bosco normale” sul quale molte metodologie gestionali e strumenti di stima sono stati, nel tempo, sviluppati.

Sulla base di quanto esposto gli obiettivi specifici del lavoro possono essere così riassunti:

- valutare la possibilità di utilizzo degli strumenti di cubatura esistenti per la stima della fitomassa epigea della lecceta;
- sviluppare e valutare strumenti di stima attraverso l'utilizzo delle metodiche tradizionali, quali le equazioni di previsione della fitomassa;
- migliorare le metodiche convenzionali di stima adattandole alle peculiarità della struttura del popolamento oggetto di studio;
- consapevoli della eterogeneità del popolamento, verificare il contributo delle variabili “non consuetudinarie” al miglioramento delle stime.

3. MATERIALI E METODI

3.1 Descrizione dell'area di studio

Lo studio, nella sua componente sperimentale, è stato concentrato nella regione “*su Monte*” comune di Seneghe, Sardegna centro-occidentale. Il territorio del Comune di Seneghe, afferisce alla provincia di Oristano. L'agro si estende sul versante sud del Montiferru a quote comprese tra gli 800 m del medio versante del monte *Urtigu* e i 100 m della piana del Campidano di Oristano. Il centro cittadino è posto a circa 300 m s. l. m. Il territorio ha un'estensione di oltre 57 km². In base all'ultimo censimento (ISTAT, 2001) la comunità dei seneghesi residenti è composta da circa 700 nuclei familiari per un totale di circa 2000 abitanti. Al termine *su Monte* si trovano riferimenti già nella “Carta de Logu” (codice di leggi promulgato nella seconda metà del Trecento da Eleonora d'Arborea e rimasto in vigore sino al 1827) la quale documenta gli usi collettivi già al tempo dei Giudicati indicando con il termine di “*Monte*” le aree occupate dai boschi e spesso ancora oggi, gravate dagli usi civici di legnatico e di pascolamento.

Per quanto riguarda l'inquadramento climatico, la fonte dei dati termo pluviometrici è lo Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna (SISS) dell'Ente Autonomo del Flumendosa (RAS, 1998) e dal Genio Civile di Cagliari.

Il territorio di Seneghe è caratterizzato da clima mediterraneo bi-stagionale con precipitazioni distribuite prevalentemente nei mesi autunnali ed invernali; i valori minimi si registrano nei mesi estivi in concomitanza con i massimi termici.

Le temperature estive e le minime invernali sono fortemente mitigate dalla vicinanza del mare. Sulla base dei dati termometrici il territorio di *su Monte* (altimetricamente compreso interamente oltre i 550 m s.l.m.) si iscrive nella fascia climatica di tipo temperato sublitoraneo: temperature medie annue tra 10° e 14.4°C, mese più freddo tra 4° e 5,9°C, tre soli mesi con temperatura media superiore a 20°C ed escursione termica tra 16° e 19°C.

La piovosità media oscilla intorno a 760 mm annui per l'intera provincia di Oristano, ma la distribuzione delle piogge sul territorio è condizionata dall'andamento morfo-

altimetrico. In corrispondenza dei rilievi, nelle parti più elevate del Montiferru, si possono toccare estremi di piovosità media di 1200 mm/anno.

Il Monte di Seneghe presenta due versanti principali: quello di Funtanas e Cuguzzu esposto a Ovest verso il mare e dunque aperto al maestrale e ai venti umidi e l'altro di Sos Paris e Cadennaghe esposto prevalentemente a Sud.

A causa dell'assenza di una stazione termometrica nel territorio di Seneghe, sono stati utilizzati come riferimento i dati forniti dalle stazioni meteorologiche più vicine: Cuglieri (479 m s.l.m. ed esposta a nord) e Santulussurgiu (577 m s.l.m. ed esposta a sud). I dati termopluviometrici sono sintetizzati nella Tabella 23.

I fattori orografici determinano una differenziazione del clima dando luogo, data la variabilità spaziale che presentano, a microclimi in grado di influenzare gli accrescimenti della foresta e di favorire la diffusione di alcune specie vegetali rispetto ad altre. Pur non disponendo di valutazioni quantitative, per completare il quadro climatico e delle disponibilità di acqua per la vegetazione, è necessario considerare gli apporti consistenti dovuti all'umidità atmosferica. I venti, a *su Monte*, spirano con velocità medie relativamente costanti, prevalentemente dal quadrante nord-occidentale e quindi carichi dell'umidità del mare.

Dal punto di vista fitoclimatico il territorio di *su Monte* ricade prevalentemente fascia del *Lauretum freddo, il tipo con siccità estiva*.

In base alle informazioni raccolte, lo studio vegetazionale di Fenu (2004) ha inquadrato il territorio, con riferimento alla classificazione bioclimatica di Rivas-Martinez, nel "*macroclima mediterraneo, termotipo mesomediterraneo inferiore-medio, ombrotipo subumido inferiore-umido inferiore, con spiccata oceanicità (atlanticità)*". Per le caratteristiche del substrato lito-pedologico, lo ha classificato come "*vulcanico effusivo con suolo tipicamente neutrosulcalino mai carbonatico*".

Per quanto riguarda gli aspetti geo-pedologici e orografici, il territorio del Monte di Seneghe si colloca nella parte alta del versante meridionale del Montiferru e si estende a sud nelle valli formate dall'erosione del basamento più antico. Il Montiferru è il maggiore apparato vulcanico dell'isola e raggiunge la massima altezza con il monte *Urtigu* (1050 m); la natura geologica ha avuto notevoli riflessi sulla morfologia della montagna che, nel dettaglio, appare molto aspra e movimentata da dirupi e scarpate.

	Cuglieri (484 m s.l.m.)	Santulussurgiu (557 m s.l.m.)	Seneghe (300 m s.l.m.)
TEMPERATURE			
Temperatura media annua, in C°	14.9	14.5	ND
Temperatura media mese più caldo, in C°	23.4	23.6	ND
Temperatura media mese più freddo, in C°	7.8	7.3	ND
PRECIPITAZIONI			
quantità di pioggia media annua in mm.	792.2	1138	891
numero giorni piovosi	80	82	82
precipitaz. media invernale in mm (Dic–Gen–Feb)	102.2	161	125,7
precipitaz. media primaverile in mm (Mar–Apr–Mag)	64.8	88.4	70.6
precipitaz. media estiva in mm (Giu–Lug–Ago)	10.5	28	10.7
precipitaz. media autunnale in mm (Set–Ott–Nov)	86.7	115.5	90
media precipitaz. del mese più piovoso in mm (Dic)	123.3	188.1	148.5
media precipitaz. del mese meno piovoso in mm (Lug)	4.8	5.6	4.5

Tabella 23 - Sintesi dati termopluviometrici (ND, non disponibili)

Le notizie contenute nel Piano di Assestamento dei boschi di *su Monte*, comune di Seneghe (OR) (Scotti et al., 2008) consentono di riassumere brevemente la storia selvicolturale del popolamento, comune tra l'altro a quella di molte realtà della Sardegna interna.

In base all'analisi degli usi passati, effettuata con ricerche negli archivi e in base allo studio delle età dei fusti modello rilevati, è possibile suddividere la storia selvicolturale recente in periodi che hanno contribuito in modo diverso a disegnare la conformazione attuale della foresta.

- Il periodo precedente al 1833 (*periodo antico*) è privo di notizie e riferimenti certi circa la struttura del bosco; sulla base di diverse fonti relative alla seconda metà del diciannovesimo secolo si può affermare che la superficie boscata esistente a Seneghe era stimata in 710 ettari (Beccu, 2000).
- Nel periodo compreso tra il 1940 ed il 1960 è possibile identificare la *fase dei carbonai*; durante questo periodo i boschi del Monte vennero utilizzati più o meno intensamente per la produzione di carbone. È ipotizzabile che ampie zone siano state di fatto rinnovate per ceduzione; i segni evidenti si possono ritrovare nella numerosità delle aie carbonili (mediamente 1 per ettaro) visibili ancora oggi.
- Successivamente si identifica la *fase delle utilizzazioni marginali* compresa tra il 1960-1980, nella quale si abbandona la selvicoltura produttiva applicata dai

carbonai e si passa ad un prelievo marginale con un effetto paragonabile a quello di un diradamento dei cedui, senza innescare la fase di rinnovazione dei boschi. Dopo i tagli dei carbonai il bosco appariva “molto fitto” (ampi tratti di ceduo giovane) e i primi tagli erano probabilmente assimilabili a dei diradamenti del ceduo con rilasci di almeno 3 o 4 polloni per ceppaia e/o taglio di grosse matricine. A quell’epoca il livello di meccanizzazione era scarso e l’esercizio del diritto di legnatico impegnava un numero di persone limitato dando luogo ad un prelievo molto contenuto.

- Infine si individua *l’epoca del legnatico intensivo* (1980-2002) in cui nell’arco di vent’anni sono state percorse dalle utilizzazioni quasi tutte le foreste produttive di *su Monte*. I prelievi effettuati in questa fase hanno approfittato sia dell’accumulo di massa realizzato nei 30 anni trascorsi dai tagli dei carbonai, che degli effetti colturali conseguenti agli interventi della fase di utilizzazione marginale. Questo tipo di utilizzazioni hanno consentito di soddisfare le richieste di legna anche consistenti pur evitando con cura di avviare un governo a ceduo e quindi la rinnovazione del bosco. Infatti la tipologia di tagli effettuati non si può configurare esplicitamente come un intervento di conversione all’altofusto: il prelievo non è infatti stato guidato da questo criterio ma piuttosto dalla volontà di soddisfare le richieste di legna. L’intensità dell’intervento ha invece rispettato tale criterio, il rilascio era sufficiente a limitare molto significativamente lo sviluppo dei polloni che si generavano in conseguenza del taglio. Le strutture boschive risultanti, se pure molto confuse, sono innegabilmente apprezzabili sotto diversi profili: per la loro complessità, per la provvigione e per la capacità protettiva.

Il quadro storico degli interventi selvicolturali susseguitisi nell’area di studio ha dato origine ad una tipologia forestale relativamente disomogenea. L’età dei soprassuoli dai quali provengono gli alberi modello, è stata determinata attraverso un’accurata analisi del fusto (conta degli anelli delle sezioni radiali prelevate alla base) e risulta essere compresa tra 46 e 130 anni. Questo descrive una irregolarità temporale nella rinnovazione dovuta all’alternarsi di disturbi a carico del bosco quali tagli di utilizzazione o incendi che hanno interessato le località di *su Monte*. Nella carta della

distribuzione delle età degli alberi modello queste sono state classificate a seconda della fase storica di appartenenza (Figura 14).

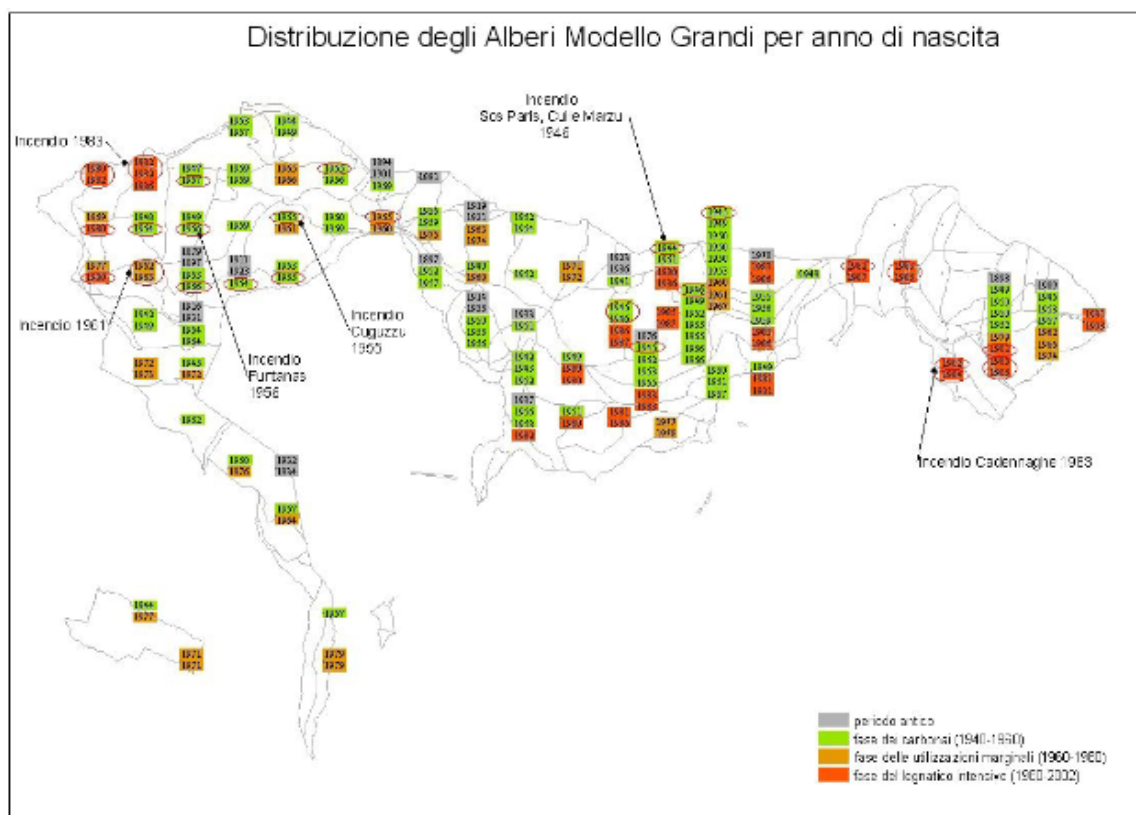


Figura 14 - Risultati dell'analisi degli alberi modello grandi ($d_{130} > 17.5$ cm)

In prima approssimazione si può descrivere la struttura dei popolamenti di leccio di *su Monte* come segue: localmente le strutture risultano essere para-coetanee e assumono fisionomia di fustaia monoplana derivata da un taglio, che può essere assimilato ad un avviamento del ceduo all'altofusto. I fusti rilasciati mantengono un'accentuata filatura e cercano di posizionarsi sul piano dominante. Una variante di questa struttura si ha quando esiste un piano dominato formato dalle ceppaie accestite originatosi dal taglio a raso di molte ceppaie senza intaccare la concorrenza del piano dominante.

In questo contesto il progetto ForEnCarb (Box 5) sviluppa un'analisi territoriale, relativa a tutto l'agro comunale, finalizzata a fornire dati oggettivi su cui inquadrare e sviluppare valutazioni e proposte di pianificazione (Scotti, 2007). Gli aspetti analizzati sono molteplici tra questi la caratterizzazione della struttura del paesaggio e delle sue dinamiche di trasformazione, la distribuzione territoriale della produttività annuale di fitomasse tecnicamente disponibili come risorse energetiche, etc.

Oggi, il più rilevante problema gestionale risulta essere individuabile nel *legnatico*, che interessa direttamente, a cadenza biennale, 500-600 famiglie causando una domanda crescente di legna da ardere. La necessità di uno strumento di pianificazione e gestione del bosco teso a favorire l'unione di molteplici aspetti di carattere economico, ambientale e sociale in un unico obiettivo di sviluppo sostenibile è indispensabile.

Il progetto ForEnCarb -*Foresta, Energia e Carbonio*-, progetto pilota della RAS/Servizio Sviluppo Sostenibile per la pianificazione forestale partecipata, di cui è responsabile scientifico il Prof. Roberto Scotti, si prefigge di contribuire concretamente allo “sviluppo sostenibile” producendo in Sardegna, per e con i cittadini di Seneghe (OR), strumenti “partecipati” di pianificazione territoriale forestale. Il progetto si articola in tre strutture principali (macroazioni) che interagiscono tra loro: la prima macroazione concerne le attività di partecipazione, la seconda coordina le attività relative alla pianificazione forestale di indirizzo per l'intero territorio comunale mentre la terza è dedicata alla redazione del Piano di Assestamento Forestale (PdA) di “*su Monte*”, il bosco soggetto ad usi civici. Il PdA prevede la suddivisione del Monte in unità gestionali fisicamente delimitate ed evidenziate fornendo la base per indagini approfondite su tutti gli aspetti che la gestione forestale deve considerare: lo stato attuale del bosco, il suo inquadramento e la sua valorizzazione sotto il profilo ecologico, l'evidenziazione di singoli problemi in relazione alla gamma di funzioni da esplicitare, da quelle produttive a quelle protettive (<http://forencarb.uniss.it/index.html>)

Box 5 – Sintesi del progetto ForEnCarb

3.2 Criteri d'individuazione degli alberi modello –disegno campionario

La fase di raccolta dei dati sperimentali è stata eseguita nel periodo compreso tra ottobre 2006 e gennaio 2007, in occasione dei rilievi dendrometrici previsti nell'ambito del progetto ForEnCarb di cui è responsabile il Prof. Roberto Scotti, finalizzati alla realizzazione del piano di gestione del complesso forestale, di circa 860 ettari, soggetto ad usi civici da parte della comunità di Seneghe (OR).

Il presente contributo si è inserito all'interno di questo progetto durante la realizzazione di una fase operativa avanzata dell'inventario dendrometrico della foresta, che prevedeva di completare il campionamento dei fusti procedendo all'abbattimento e alla misura di un adeguato numero di Alberi Modello Grandi (AMG). I fusti sono stati individuati tra quelli con diametro ad 1.30 m superiore a 17.5 cm. Nello specifico sono state rilevate misure su 47 alberi modello grandi (AMG) di leccio. Per quanto materialmente possibile si è cercato di selezionare i campioni su base probabilistica nel quadro di un campionamento casuale stratificato.

Date le finalità dell'indagine, estese ben oltre la sola quantificazione della fitomassa complessiva, verso l'indagine sulle relazioni tra struttura e massa delle diverse componenti, si è optato per schemi a probabilità costante (piuttosto che variabile) al fine di garantire uniformità di copertura del range esplorato. Disponendo dell'enumerazione completa dei fusti ricadenti nelle Unità di Campionamento rilevate nelle fasi di lavoro precedenti, si è proceduto al dimensionamento del campione di AMG e, successivamente, alla selezione ed individuazione dei fusti da abbattere e misurare accuratamente stabilendo obiettivi di lavoro molto dettagliati. Quale ipotesi di base, l'insieme dei fusti già misurati, con $d_{130} > 17.5$ cm, è stato considerato come popolazione di riferimento, "target" dell'indagine. La Tabella 24 sintetizza le principali caratteristiche di tale popolazione.

Classe d ₁₃₀	Specie				Totale
	leccio	roverella	sughera	altre (*)	
15	1				1
20	497	13	112	9	631
25	334	4	85	6	429
30	172	4	43	2	221
35	97	2	15		114
40	42	1	9		52
45	32		7		39
50	9		9		18
55	11		2		13
60	9		1		10
65	4		3		7
70	2				2
75	2				2
Totale	1212	24	286	17	1539

(*): agrifoglio, alaterno, biancospino, ciliegio, corbezzolo, eucaliptus, noce

Tabella 24 - Distribuzione diametrica e per specie dei fusti grandi (d₁₃₀ > 17.5 cm) nelle UdC

Trascurando le specie meno rappresentate ed accorpando le classi diametriche meno numerose in modo da avere almeno 10 elementi per cella si è ipotizzata, inizialmente, una intensità di campionamento media del 10%. In realtà, alla fine, il campione analizzato è stato di circa un terzo dell'ipotesi iniziale (Tabella 25).

SubP	STRATO						campioni				
	specie	d130 min	d130 max	numero fusti misurati	media d130sc	devSt d130sc	teorici iniziali numero	analizzati numero	media d130sc	media età	
L1	L	17,5	22,5	436	19,9	1,4	44	13	19,85	50,46	
L2	L	22,5	27,5	264	24,8	1,4	26	8	26	59,38	
L3	L	27,5	32,5	151	29,8	1,4	15	10	29,9	67,8	
L4	L	32,5	37,5	91	34,6	1,5	9	7	34,86	66,43	
L5	L	37,5	42,5	40	39,9	1,4	4	3	39	95,33	
L6	L	42,5	47,5	32	44,8	1,5	3	3	45	112,33	
L7	L	47,5	57,5	19	52,7	2,6	2	2	55,5	108,5	
L8	L	57,5	77,5	16	64,2	5,9	2	1	69	130	
R1	R	17,5	22,5	13	19,7	1,7	2				
R2	R	22,5	42,5	11	29,5	5,3	2				
S1	S	17,5	22,5	106	20	1,4	11				
S2	S	22,5	27,5	84	24,8	1,4	8				
S3	S	27,5	32,5	39	30	1,5	4				
S4	S	32,5	37,5	12	33,7	0,9	2				
S5	S	37,5	47,5	15	41,7	2,8	2				
S6	S	47,5	67,5	13	52,5	5	2				
<i>totali</i>							138	47			

Tabella 25 - Campione teorico e distribuzione rilievi effettuati

Si è operato al fine di preservare per quanto possibile la rappresentatività di tale piccolo campione, distribuendolo in tutti gli strati individuati, diversificando quindi sensibilmente le intensità di campionamento in ciascuno strato.

Mettere operativamente in pratica la selezione casuale ipotizzata presenta due problemi principali:

- a. ritrovare, in bosco, il fusto corrispondente all'identificativo temporaneamente assegnatogli al momento del rilievo delle UdC è teoricamente possibile (il rilievo offre diversi elementi per riuscirci) ma è decisamente gravoso;
- b. l'ipotesi teorica contempla la dispersione su tutto il bosco dei fusti da analizzare e comporta quindi eccessivo aggravio dei tempi di spostamento.

Al fine di conciliare obiettivi e risorse l'impianto teorico è stato reso praticabile integrando elementi di campionamento soggettivo (non probabilistico, "model based"). Definiti per estrazione casuale i campioni teorici, i rilievi sono stati concentrati sulle UdC contenenti più campioni o campioni difficilmente sostituibili (Tabella 25) e, nelle immediate vicinanze di queste UdC si è proceduto (su basi soggettive) all'individuazione di campioni sostitutivi di quelli più isolati (Tabella 26) o eventualmente non reperiti.

<i>subP</i>	<i>n_UdC_camp</i>	<i>n_UdC_universo</i>	<i>n_UdC_sost</i>	<i>n_Fusti_universo</i>	<i>n_camp</i>
R1	1	2	1	13	2
R2	1	3	2	11	2
S6	2	4	2	13	2

Tabella 26 - Celle (strati) a minore diffusione –sottoinsiemi presenti in poche UdC

Si evidenzia (Tabella 26) quante UdC sono considerate nella selezione del campione di AMG, quale è il numero complessivo di UdC in cui il sottoinsieme è stato rilevato e, quindi, quante UdC possono teoricamente essere considerate nella ricerca di sostituti dei campioni teorici.

La Tabella 27 indica la distribuzione schematica del numero di campioni (AMG) selezionati in ciascuna UdC. In Figura 15 è mostrata la visualizzazione delle unità di campionamento su ortofoto.

ri	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	14	1	1	1	1	1	20	21	22
g	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3		5	6	7	8	9			
F																						
G			1	1	3		2	2														
H		3	3	1	2		2	2	2	1									2			
K			1	1				1	1	2	4	4	4	9	3		7		8	3(1)	1	
L			2						4	2	3	3	2	2	3					5(2)	7(2)	4(2)
M										3	1	4	3	3(1)	1				1		2(1)	
P										2												
Q				2	2																	
R					1																	
T																						
V																						

Tabella 27 - Mappa orientativa per organizzare il rilievo degli “alberi modello grandi”. (Tra parentesi è evidenziato il numero di sottoinsiemi a minore diffusione eventualmente presenti in tali UdC)

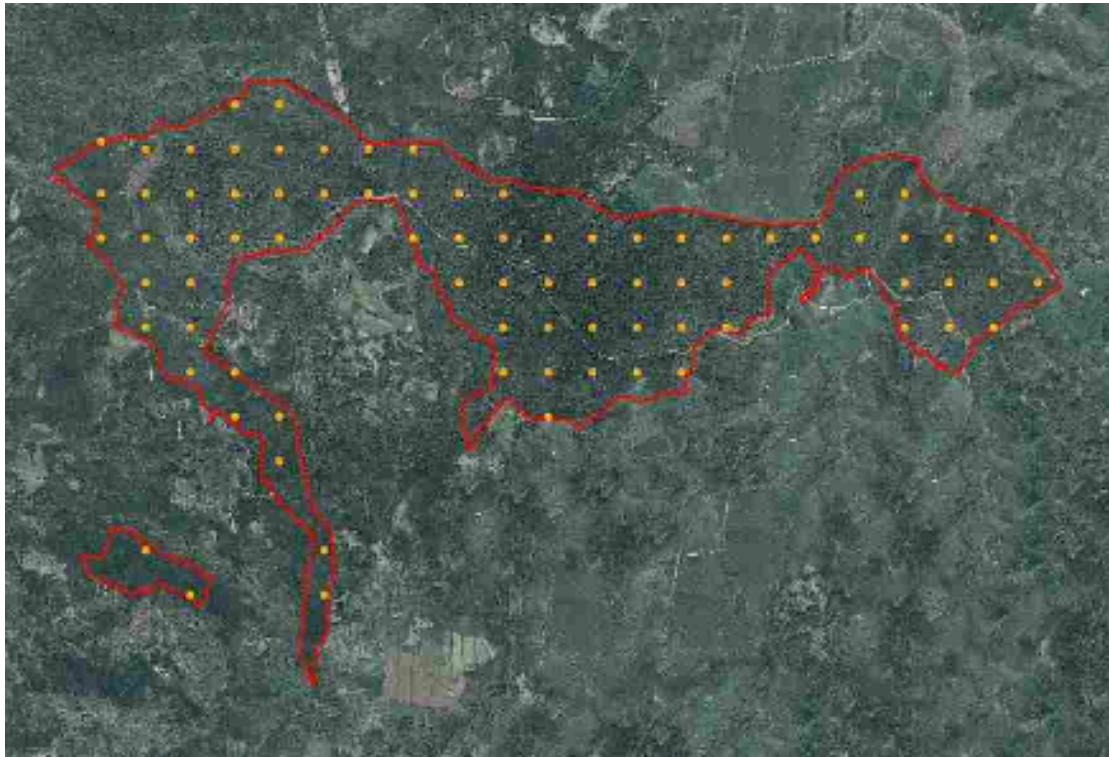


Figura 15- Visualizzazione delle unità di campionamento su ortofoto

In conclusione, gli alberi modello sono stati selezionati dall'intera popolazione, con uno schema probabilistico. Il campione di AMG include i dendrotipi e le classi dimensionali presenti nella struttura del soprassuolo. La Tabella 28 riassume le statistiche descrittive relative ai 47 alberi modello.

Parametro	Simbolo	Unità	Min	Media	Max - 1	Max
Diametro	d 1.30	[cm]	18.00	30.66	56.00	69.00
Altezza	h	[m]	6.50	11.12	16.80	16.80
Età	età	[anni]	46.00	69.02	127.00	130.00
Volume fusto	V _f	[dm ³]	75.16	446.62	1713.70	2151.13
Volume rami	V _r	[dm ³]	12.39	405.60	1931.17	4943.30
Volume dendrometrico	V	[dm ³]	95.66	852.21	3644.88	7094.43
Peso secco fusto	W ₁	[kg]	61.32	305.52	1059.13	1145.22
Peso secco rami	W ₂	[kg]	8.98	265.43	1193.53	2631.72
Peso secco fascina	W ₃	[kg]	23.10	138.60	458.88	679.51
Peso secco residui	W ₄	[kg]	15.26	79.26	204.66	391.69
Peso secco totale epigeo	W _{s tot}	[kg]	126.65	788.81	2895.68	4848.14
Peso fresco totale epigeo	W _{f tot}	[kg]	214.00	1312.44	4781.50	8019.00

Tabella 28 - Statistiche relative ai 47 AMG

Compatibilmente con le esigenze logistiche emerse in fase di raccolta dati in campo, (ricerca di un compromesso tra la necessità di realizzare una accurata descrizione dei componenti della fitomassa, la necessità di ridurre gli sforzi nelle misurazioni e l'attenersi alle consuetudini locali per quanto riguarda l'allestimento dei prodotti commerciali) le procedure di misura utilizzate sono simili al protocollo messo a punto da Fattorini et al. (2005) nel progetto EFOMI.

Il progetto EFOMI (*Ecological Valuation in Alpine Forest Ecosystems by Integrated Monitoring*), tra i vari obiettivi, ha previsto la costruzione e la valutazione di modelli di predizione della fitomassa per determinate specie o gruppi di specie e la messa a punto di una metodologia standard per questo tipo di indagini.

3.3 Raccolta dei campioni e misurazioni

Il protocollo di rilievo comporta, preliminarmente, l'individuazione dell'area di campionamento in cui prelevare lo specifico albero modello selezionato dal campionamento e quindi l'identificazione del soggetto stesso. Prima dell'abbattimento è necessario effettuare rilievi e misure sull'albero in piedi e sul suo intorno. Sull'albero abbattuto, si procede infine alla determinazione di una serie di variabili di tipo quantitativo e qualitativo ed alla stima di altri caratteri con metodiche non distruttive. Le informazioni ottenute vengono registrate nell'apposita scheda di campagna (Figura 16) e successivamente archiviate in un database, con il supporto delle specifiche definite nel protocollo (Box 6).

Rispetto alla versione iniziale del protocollo, dato il supporto materiale fornito al rilievo, è stato possibile procedere ad una più accurata misurazione dei fusti: inizialmente era prevista la misura della circonferenza del fusto solo a metà della lunghezza complessiva, in effetti il rilievo è stato ripetuto, come da consuetudine, a distanze progressive di 1m a partire dalla sezione di abbattimento. Riguardo all'assortimento residui, si è proceduto alla misura del peso fresco complessivo ed al prelievo di campioni rappresentativi sia della componente legnosa (ramuli) sia di quella fogliare.

In definitiva, il rilievo della fitomassa di ciascun campione (albero modello) è stato effettuato distinguendola nei seguenti assortimenti:

- **fusto**, comprendente il solo tronco (svettato a 5 cm);
- **rami**, contenente i rami con diametro fino a 5 cm di diametro;
- **fascine**, comprendente il cimale e la ramaglia minuta di diametro inferiore a 5 cm, effettivamente allestita per effettuare il rilievo (conteggio e pesatura complessiva);
- **residui**, comprendente la fitomassa rimanente (rametti contorti, pezzi che sfuggono alla fascina, etc.), incluse le foglie.

La fitomassa allo stato fresco deriva quindi dalla misura diretta della totalità degli assortimenti sopra descritti mentre, per la stima del peso secco, da ciascun assortimento (fusto, rami, fascina, residui) è stato prelevato un campione, conservato in contenitore a

tenuta stagna, che è stato analizzato, quanto prima possibile, in laboratorio. La Tabella 29 espone le quantità complessive di fitomassa misurata per assortimento.

	fusto	rami	fascina	residui	totale epigeo
Fitomassa fresca pesata in campo	23184.0	20141.5	11278.5	7080.5	61684.5
Campioni avviati al laboratorio	83.5	19.8	28.9	7.3	139.5

Tabella 29 - Fitomassa pesata allo stato fresco e campioni avviati al laboratorio per singolo assortimento [kg]

Rilievi da effettuare sull'ALBERO IN PIEDI

- i. **Specie**
- ii. **Diam 1,30**: diametro a 1,30m (1 sola misura con spalle a monte)
- iii. **Conformazione al piede**, barrare la casella: -condiviso se il fusto campione è collegato alla ceppaia con altri fusti di diam 1,30>3cm ed è quindi inequivocabilmente di origine agamica, -tracce se sono presenti segni di una passata ceduzione, -senza se si presume abbia un'origine gamica.
- iv. **Condizione fitosanitaria**, barrare la casella: buona o sofferente
- v. **H_Tot (ipso)**: altezza totale misurata con ipsometro
- vi. **H_inserz_ramo_MAX**: altezza di inserzione del primo ramo di grosse dimensioni che identifica l'inizio della chioma e interrompe la forma assimilabile a tronco di cono del fusto principale.
- vii. **Diam_fusto_sotto_inserz**: è il diametro del fusto preso sotto l'inserzione del ramo precedentemente individuato
- viii. **Diam_ramo_MAX**: è il diametro del ramo suddetto preso a circa 10- 20 cm dalla sua base
- ix. Indicare se sotto 1,30m il fusto è singolo o biforcuto.

Rilievo dei dati dell'INTORNO

- i. **Indice Winkelmass** - (UAI, Uniform Angle Index) in bosco dovrà essere misurato l'azimut dei 4 alberi più vicini (con diametro a 1,30m > 3cm) e verrà indicato se ciascuno di essi è un concorrente o meno rispetto al fusto di riferimento (considerando: la distanza, le dimensioni e il contatto delle chiome).
- ii. **Stima a vista** del volume presunto (in metri steri ed in quintali) dell'albero scelto e del numero di fascine che si potranno ottenere.

Operazioni sull'ALBERO ABBATTUTO

- i. Sramare il fusto principale e svettarlo, come stabilito, a 5 cm
- ii. Misurare e annotare la lunghezza del fusto svettato
- iii. Misurare e annotare la lunghezza del cimale
- iv. Marcare la sezione a metà lunghezza del fusto svettato
- v. Tagliare la rotella alla base e marcarla con l'ID del fusto campione [SubP-n]= [ID_AMG]
- vi. Tagliare la rotella a 1,30m, marcarla con l'ID del fusto
- vii. Tagliare la rotella a metà lunghezza, marcarla con l'ID del fusto e poi sigillarla in busta chiusa
- viii. Prelevare e sigillare un campione di ramo rappresentativo
- ix. Prelevare e sigillare un campione rappresentativo di una fascina
- i. Misurazione del peso del campione
- ii. Tenere distinti gli assortimenti e pesarli distintamente.
- iii. Depezzare e accatastare il materiale di diametro superiore alla soglia di cm 5 secondo la consuetudine del luogo.
- iv. Realizzazione della catasta e misurazione del volume sterico
- v. Misura/stima dei vuoti della catasta mediante specifico strumento

Box 6 - Descrizione delle variabili e della modalità di misura (ForEnCarb)

3.4 Strumenti di elaborazione dati

Per la realizzazione dell'analisi statistica non si è fatto ricorso ad alcuno dei software specializzati che sono in commercio (esempio SAS, MINITAB, ecc). Questa scelta è stata determinata sia dal fatto che questi sono programmi alquanto costosi, ed il loro uso è consentito solo su licenza da parte del produttore, sia perché si è deciso di adottare un *programma libero (open source)*. Lo strumento individuato per l'analisi è il *software R*. Questo nuovo *package*, che si sta sempre più diffondendo tra gli statistici e tra coloro che fanno analisi dei dati, costituisce una valida alternativa ai software sopraccitati.

R è un ambiente statistico scaricabile gratuitamente da Internet sul sito di *The R Project for Statistical Computing* il cui indirizzo Internet è <http://www.r-project.org>; oltre il programma base si possono scaricare anche una serie di moduli aggiuntivi e un'ampia manualistica. Esso è il frutto del lavoro collettivo svolto da un gruppo, sempre più folto, di ricercatori in campo statistico ed informatico a livello mondiale.

R più che un software statistico può essere meglio definito come un ambiente, costituito da una varietà di strumenti, orientato alla gestione, all'analisi dei dati e alla produzione di grafici. R quindi è disponibile gratuitamente sotto i vincoli della GPL (*General Public License*), chiunque può accedere al codice sorgente, modificarlo, migliorarlo, integrarlo e mettere a disposizione della comunità scientifica il proprio lavoro nella logica e nella filosofia del *software opensource*.

Questa scelta di carattere etico ed economico non ha escluso l'utilizzo di altri software che per la loro diffusione risultano indispensabili per condividere e facilitare gli scambi di informazioni; in particolare ci si è appoggiati sulla suite di Microsoft Office ed i software che la compongono, Excel (il programma di foglio elettronico che è diventato lo standard *de facto* della categoria di questo tipo di programmi), e Access (per la gestione del database relazionale).

4. RISULTATI: elaborazioni ed analisi dei dati

La ricerca ha prodotto una sequenza di risultati, costruendo progressivamente la base di analisi. La prima fase riguarda le elaborazioni dei rilievi campionari di livello superiore e delle misurazioni di base necessarie a sviluppare la tabella estesa, la seconda sfrutta, in diversi modi, tale tabella. In sintesi, vengono nel seguito esposti i risultati relativi ai seguenti punti: analisi della variabilità dell'umidità dei campioni, calcolo del peso secco e ripartizione della fitomassa complessiva nelle varie componenti, calcolo del volume legnoso. Il set dati è stato sottoposto ad una serie di analisi esplorative per verificare l'eterogeneità del campione (47 alberi modello grandi) e la presenza di relazioni significative tra le variabili dendrometriche misurate. In una seconda fase, il data set definitivo è stato utilizzato per la validazione degli strumenti di cubatura esistenti ricavati dall'analisi dei dati bibliografici; successivamente, gli stessi dati hanno permesso di predisporre una stima diretta della fitomassa e del volume. Tale obiettivo è stato raggiunto mediante la messa a punto di equazioni di previsione della fitomassa arborea e del volume e l'utilizzo di coefficienti tradizionali. Infine, allo scopo di fornire stime di maggior accuratezza, sono stati realizzati strumenti innovativi per la stima diretta basati sia su analisi statistiche che sull'utilizzo di variabili dendrometriche "non convenzionali".

4.1.1 Analisi della variabilità dell'umidità dei campioni

L'elaborazione dei dati raccolti in campo ha preso avvio dall'analisi della variabilità dell'umidità dei campioni finalizzata alla determinazione del peso secco dei vari assortimenti. La Tabella 30 riassume le misure effettuate sulle singole tipologie di materiale e i dati ottenuti dalla loro combinazione.

	fusto	rami	fascina		residui	
Peso fresco totale	▲	▲	▲		▲	
Peso fresco campioni					ramuli	foglie
	▲	▲	▲		▲	▲
Peso secco campioni			legno	foglie		
	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Peso secco dei 4 assortimenti	▲	▲	▲		▲	
Peso secco delle componenti	fusto	rami	rametti	foglie	ramuli	foglie

Tabella 30 - Sintesi delle misure effettuate sulle tipologie di materiali

Il termine *assortimento* si riferisce alla porzione di fitomassa arborea epigea derivata dall'utilizzazione eseguita secondo le consuetudini locali allestita a formare le distinte categorie commerciali di legna, mentre il termine *componenti* individua il materiale legnoso omogeneo per caratteristiche morfologiche. I campioni di fitomassa prelevati per la stima dell'umidità sono stati chiusi in sacchetti a tenuta stagna e avviati nel più breve tempo possibile al laboratorio. Il peso secco è stato determinato essiccando i campioni in stufa ventilata a 105° C fino al raggiungimento della condizione di peso costante, ciò ha permesso di calcolare il rapporto ponderale (peso secco/peso fresco) necessario per la stima della massa anidra totale delle diverse componenti e dei singoli assortimenti di ciascun albero modello. La Tabella 31 mostra una sintesi delle principali statistiche descrittive dei rapporti ponderali calcolati per l'insieme degli assortimenti e delle componenti prese in considerazione.

	(1) fusto	(2) rami	r_ramuli	r_foglie	(3) fascina	(4) residui
Media	0.620363	0.618386	0.5364	0.5105	0.577571	0.526109
Errore standard	0.002734	0.00304	0.0027	0.0039	0.003991	0.002693
Mediana	0.615178	0.618139	0.5386	0.5139	0.576895	0.523848
Deviazione standard	0.018542	0.020616	0.0186	0.0266	0.026169	0.018268
Minimo	0.588265	0.57473	0.5004	0.4306	0.518842	0.482151
Massimo	0.665096	0.663805	0.5800	0.5673	0.636477	0.557604
Conteggio	46	46	46	46	43	46

Tabella 31 - Rapporti ponderali: sintesi statistiche

Successivamente è stata eseguita un'analisi grafica esplorativa (Figura 17) dei rapporti ponderali (rsf) dei 4 assortimenti (1 indica il fusto, 2 i rami, 3 la fascina e 4 i residui); non si evidenziano valori fuori range ma soprattutto l'assortimento fusto non appare chiaramente distinta dall'assortimento rami.

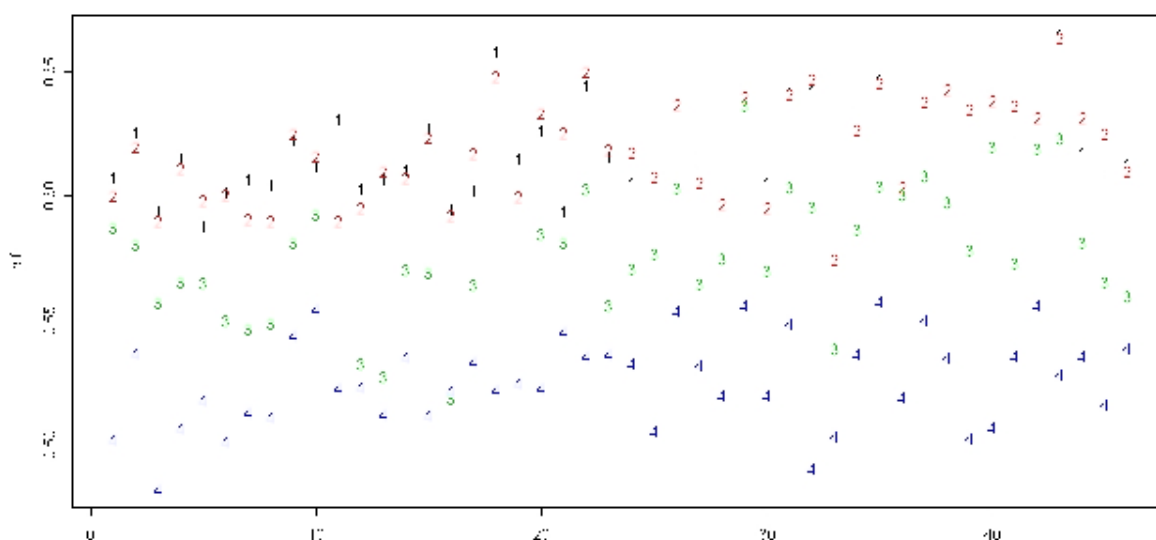


Figura 17- Rapporti ponderali relativi agli assortimenti

Il Box 7 (vedi Appendice) riassume le elaborazioni statistiche eseguite per il calcolo dei rapporti ponderali per la componente rami e fusto, la Figura 18 ne riporta la regressione.

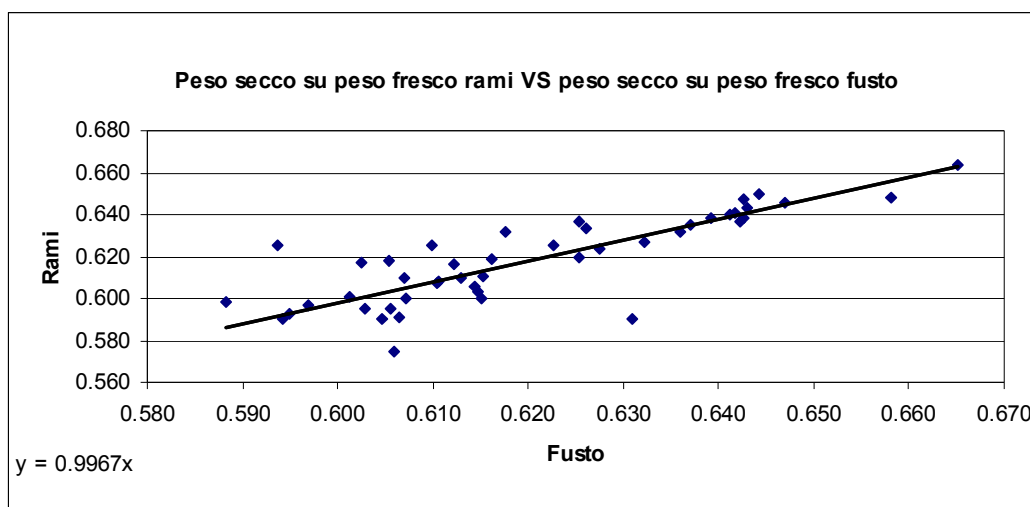


Figura 18- Relazione tra rapporto peso secco su peso fresco per i rami e per il fusto

Per verificare ulteriormente questa ipotesi si è proceduto a studiare la correlazione esistente tra il rapporto ponderale del fusto e dei rami ed una serie di variabili misurate in campo o elaborate con la metodica descritta di nei paragrafi successivi.

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>	<i>I</i>	<i>L</i>	<i>M</i>
<i>A</i> r_fusto	1										
<i>B</i> r_rami	0.829	1									
<i>C</i> d_130	0.312	0.418	1								
<i>D</i> h_tot_ipsomet.	0.332	0.444	0.760	1							
<i>E</i> Età	0.417	0.521	0.850	0.672	1						
<i>F</i> PF_epigeo_tot	0.162	0.260	0.934	0.648	0.766	1					
<i>G</i> PS_epigeo_tot	0.161	0.259	0.933	0.649	0.767	1.000	1				
<i>H</i> V_fusto	0.194	0.319	0.947	0.750	0.804	0.968	0.969	1			
<i>I</i> V_rami	0.038	0.114	0.818	0.473	0.655	0.956	0.956	0.887	1		
<i>L</i> V_dend	0.095	0.190	0.886	0.585	0.726	0.986	0.986	0.951	0.986	1	
<i>M</i> Data abbattim.	0.446	0.472	0.497	0.479	0.460	0.289	0.289	0.363	0.131	0.218	1

Tabella 32 – Matrice di correlazione

Il riquadro evidenziato nella Tabella 32 mostra che in sostanza la variabilità dei rapporti ponderali ottenuti dai campioni, peraltro contenuta, non risulta associata in modo forte a nessuno degli attributi osservati, nemmeno alla variabilità delle condizioni atmosferiche (associate alla data di rilievo). Il più elevato valore di correlazione (0.521) riguarda la relazione tra l'età ed il rapporto peso secco su peso fresco della componente rami.

Ciò consente di escludere che esistano elementi contrari all'unione dei singoli dati osservati sull'albero modello relativi al fusto e ai rami.

Il Test t per campioni accoppiati ha permesso di “non rigettare” l'ipotesi nulla (H_0): in media i due rapporti non sono tra loro diversi (vedi Box 8, sezione Appendice).

Dalle analisi eseguite si conclude che le due medie (fusto e rami) non appaiono statisticamente distinte, di conseguenza è stato deciso di utilizzare un unico valore di rapporto ponderale (ottenuto dalla media dei rapporti ponderali di fusto e rami) per entrambe queste componenti.

4.1.2 Analisi del peso secco e della ripartizione della fitomassa

La procedura di analisi dell'umidità ha suggerito di utilizzare per l'assortimento fusto e per l'assortimento rami un unico valore del rapporto ponderale che, moltiplicato per la rispettiva quantità di sostanza fresca, ha permesso di ottenere la relativa massa, espressa in termini di sostanza secca. Per gli assortimenti fascina e residui sono stati utilizzati i corrispondenti rapporti ponderali medi. Le masse dei 4 assortimenti principali sommati tra loro corrispondono alla fitomassa arborea epigea del singolo "albero modello grande".

Sfruttando le ulteriori distinzioni operate nel corso delle misure, la fitomassa, relativa all'assortimento fascina e residui, è stata scomposta nelle componenti foglie, ramuli e rametti, come è riassunto nella Figura 19.

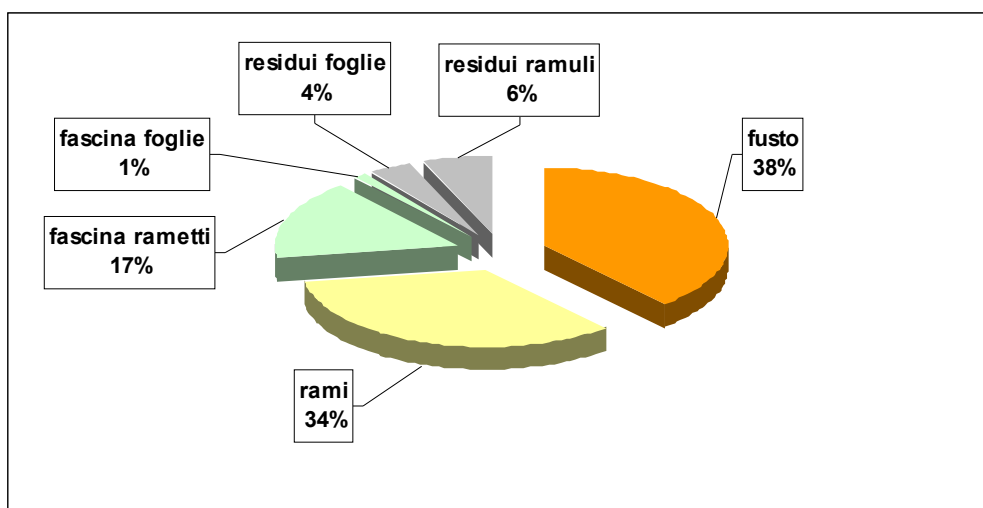


Figura 19 - Ripartizione della fitomassa

Nella componente rametti sono compresi i rami sottili di dimensioni comprese tra i 5 e i 2 cm di diametro, mentre nei ramuli si inseriscono quelli di dimensioni diametriche inferiori e quelli malformati che non consentono l'allestimento per formare le fascine.

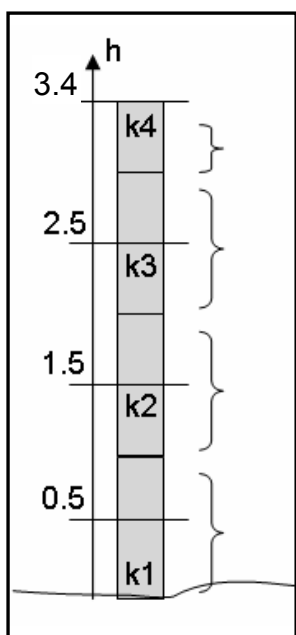
La fitomassa epigea di un "albero modello grande medio" è formata per il 38 % dal fusto e per il 34 % dai rami: insieme rappresentano il volume commerciale (la legna da ardere). L'assortimento fascina (anch'esso di interesse commerciale) rappresenta il 18 % in peso, mentre la componente residui è il 10 %.

4.1.3 Calcolo del volume legnoso

Calcolo del volume legnoso del fusto

Il volume del fusto svettato a 5 cm di diametro, è stato calcolato per via geometrica.

Di ciascun albero modello, sul letto di caduta, è stata misurata l'altezza totale e la circonferenza a distanze progressive di 1m a partire dalla sezione di abbattimento. I dati necessari sono stati estratti tramite query dal database relazionale (dove sono state immagazzinate tutte le informazioni derivanti dai rilievi), quindi si è proceduto al calcolo geometrico del volume del fusto (in realtà si tratta di una stima). Il metodo utilizzato è stato quello della cubatura per sezioni. Il principio consiste nel considerare un fusto scomposto in K "tronchetti elementari"; ciascuno di essi è stato "cubato" (calcolo del volume) singolarmente con la formula della sezione mediana (assimilando il tronchetto ad un cilindro). Il volume totale è dato dalla somma dei volumi dei singoli (K) tronchetti elementari. L'altezza di ogni tronchetto è, chiaramente, pari ad 1 m.



La figura (20) a lato mostra un disegno esemplificativo della metodologia applicata; il fusto modello, con un diametro di svettatura pari a 5 cm, ha un'altezza cormometrica di 3.4 metri ed è stato scomposto in 3 cilindri interi ed un cilindro terminale di 0.4 metri di altezza.

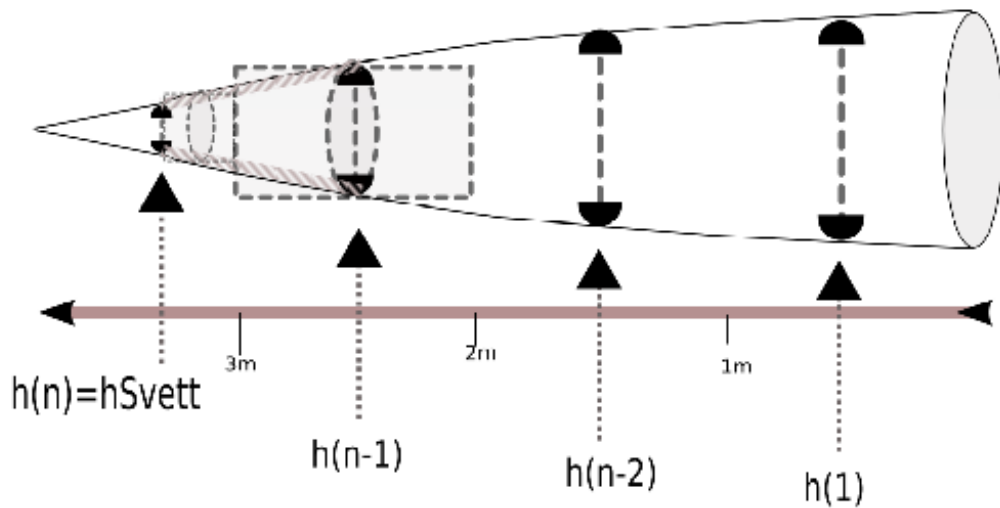
Il calcolo del volume della porzione terminale ha richiesto un approfondimento nella metodica di analisi in quanto possono verificarsi due casi descritti in dettaglio nella pagina successiva (Box 9) che richiedono una procedura di calcolo specifica.

Figura 20 - Esempio di cubatura per sezioni di un fusto

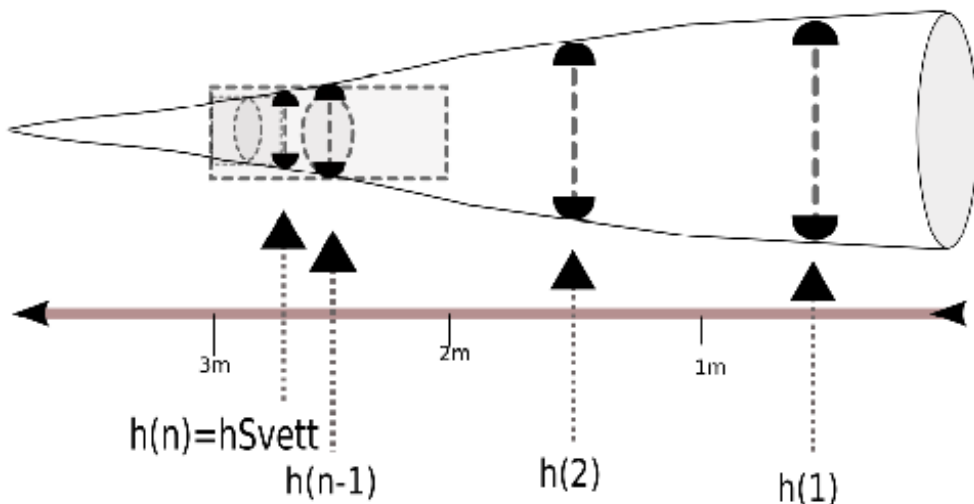
Calcolo del volume legnoso dei rami:

Il volume dell'assortimento rami è stato calcolato indirettamente in base al peso ed al rapporto volume/peso rilevato sul fusto, per cui, noti il peso fresco totale della componente rami, il volume del fusto e il relativo peso secco, si è proceduto attraverso una semplice proporzione al calcolo del volume legnoso della componente rami:
$$\text{volume rami} = \text{peso secco rami} * [\text{volume fusto} / \text{peso secco fusto}].$$

Stima del volume del fusto modello misurato per sezioni.
 distanza tra le sezioni = l_{toppi}
 h prima sezione = $l_{\text{toppi}} / 2$
 h ultima sezione = h cormometrica, h di svettatura
 ($l_{\text{toppi}} = 1\text{m}$)



volume_fusto = Somma(v_{toppi} (da 1 a n))
 v_{toppi} (da 1 a n-1) = area_sezione * l_{toppi}
 $l_{\text{ultimo_toppo}} = h(n) - (h(n-1) + 0.5)$
 - che, nel caso sopra è positiva, mentre nel caso sotto assume segno negativo, il vol viene detratto!
 $v_{\text{toppo}}(n) = \text{area_sez_a_metà} * l_{\text{ultimo_toppo}}$
 $\text{diam_sez_a_metà_toppo}(n) = \text{interpolazione/estrapolazione lineare da diam}(n-1) \text{ a diam}(n)$
 $= d(n-1) + [(d(n-1)-d(n))/(h(n-1)-h(n))] * [0.5 + l_{\text{ultimo_toppo}}/2]$



Box 9 - Stima del volume del fusto modello

4.2 Analisi esplorativa set dati definitivo

I risultati della prima fase di elaborazione sono confluiti nel database generale contenente tutte le variabili quantitative e qualitative misurate in campo e tutte le variabili calcolate durante le analisi. Successivamente si è proceduto ad un'esplorazione di questi dati in con lo scopo di verificare la presenza di significative relazioni tra le variabili stesse. Allo scopo di rendere maggiormente comprensibile l'esposizione le variabili sono state distinte in 4 categorie.

4.2.1 Variabili dendrometriche essenziali

Appartengono a questa categoria le seguenti variabili: diametro misurato ad 1.30 m (mediante utilizzo di cavalletto dendrometrico), altezza iposometrica totale (misurata con ipsometro elettronico), età. Quest'ultima è stata determinata in laboratorio attraverso l'analisi delle rotelle prelevate dal fusto, sulle quali è stata eseguita una conta degli anelli delle sezioni radiali. In Tabella 27 vengono presentate le statistiche di sintesi di queste variabili.

La Tabella 33 e la Figura 21 mostrano la distribuzione di frequenza, per dati raccolti in classi, della variabile età; viene indicata la frequenza relativa ($f_i = n_i / n$), la frequenza relativa percentuale ($p_i = f_i * 100$) la frequenza cumulativa percentuale ($P_i = \sum p_i$).

intervallo classe	valore centrale	n_i	f_i	p_i	P_i
45-55	50	17	0.362	36.2	36.2
55-65	60	14	0.298	29.8	66.0
65-75	70	3	0.064	6.4	72.3
75-85	80	3	0.064	6.4	78.7
85-95	90	3	0.064	6.4	85.1
95-105	100	1	0.021	2.1	87.2
105-115	110	4	0.085	8.5	95.7
115-125	120	0	0.000	0.0	95.7
125-135	130	2	0.043	4.3	100.0

Tabella 33 - Distribuzione di frequenza per dati raccolti in classi della variabile età

Il calcolo della distribuzione di frequenza della variabile età è stato eseguito su R predisponendo la semplice stringa di comando:

```
table(cut(età, breaks=c(45,55,65,75,85,95,105,115,125,135))).
```

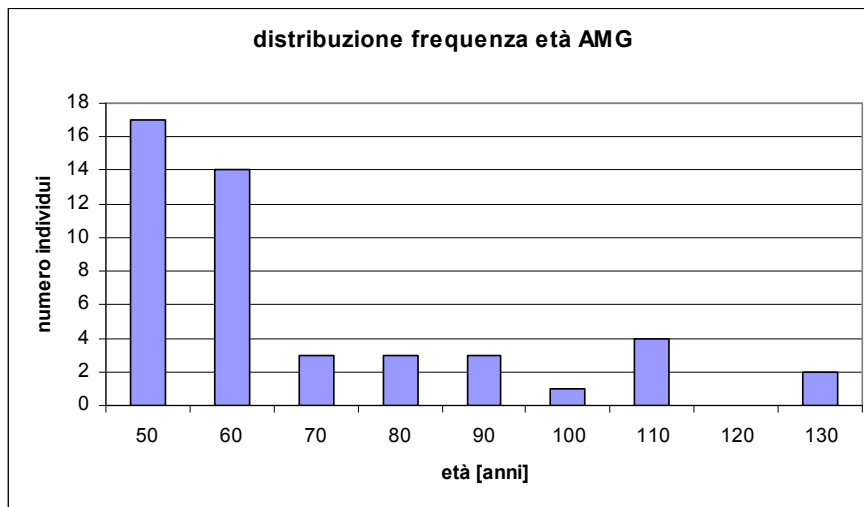


Figura 21- Istogramma distribuzione classi età AMG

La Figura 22 riporta l'andamento del diametro e dell'altezza in relazione all'età dell'AMG.

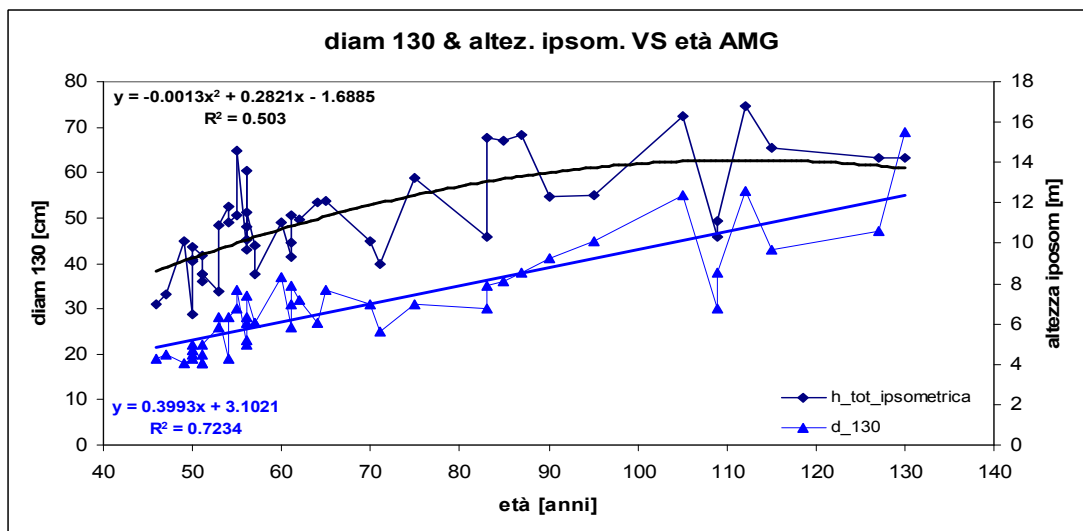


Figura 22 - Relazione tra diametro e altezza in funzione dell'età

La Figura 23 mostra una classica relazione dendrometrica: la variazione dell'altezza in funzione del diametro. Questo tipo di grafico, riferito ad un popolamento singolo, prende il nome di "curva ipsometrica".

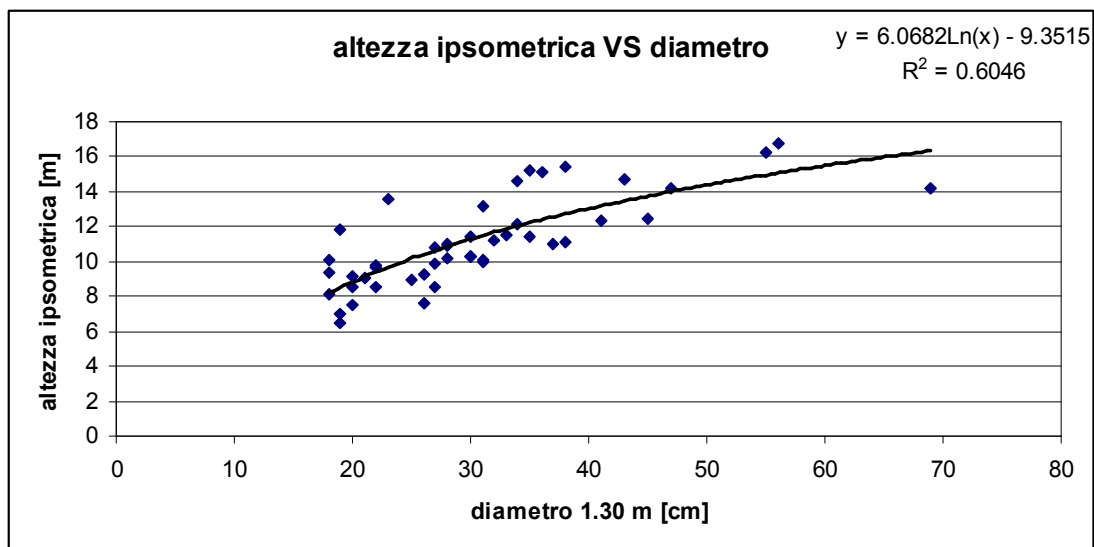


Figura 23 - Andamento altezza in funzione del diametro

4.2.2 Variabili dendrometriche non convenzionali

In questa categoria sono state raggruppate una serie di variabili dendrometriche non ordinariamente rilevate ma utili ad avere maggiori informazioni sulla “forma dell’albero”. Si tratta di misure eseguite in campo, sia prima che dopo l’abbattimento dell’albero, che hanno lo scopo di aiutare a comprendere quali sono le variabili che influenzano la forma della chioma e che risultano determinanti per giungere a stime affidabili del volume legnoso e della fitomassa epigea dell’AMG considerato.

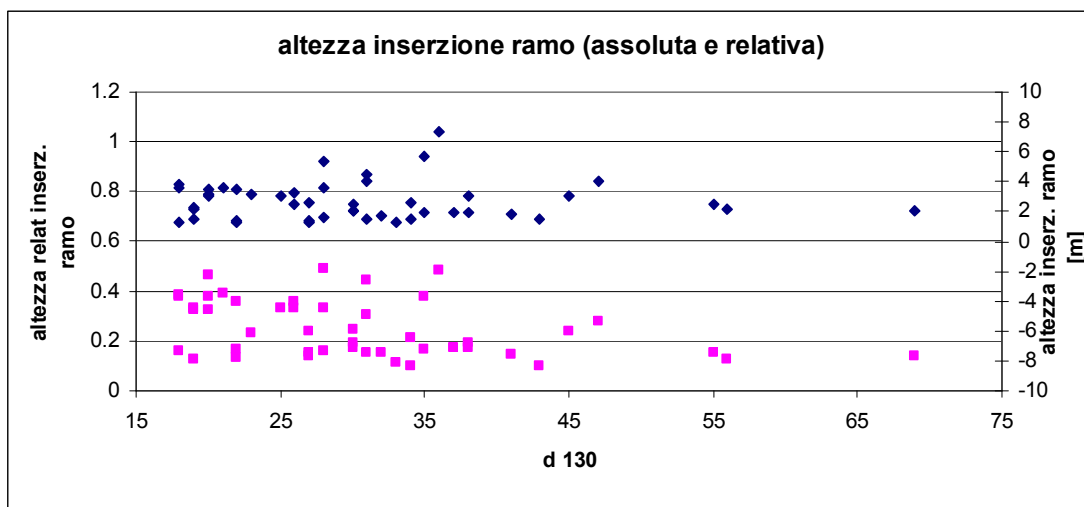


Figura 24 – Altezza inserzione ramo in relazione al diametro 1.30 m

Nella porzione superiore della Figura 24 si evidenzia la variabilità dell’altezza di inserzione del ramo massimo (compresa in un range di 1.30 e 7.30 m); l’altezza assoluta non risulta influenzata dal diametro. L’altezza relativa, invece (porzione inferiore del grafico), per diametri inferiori a 40 cm presenta almeno due livelli.

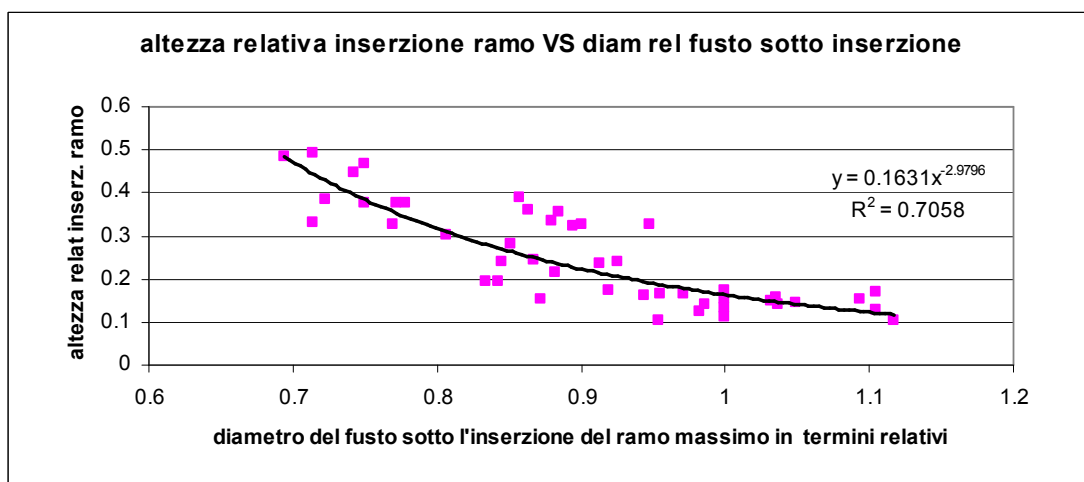


Figura 25 - Altezza relativa inserzione ramo VS diametro relativo fusto sotto inserzione

L'altezza relativa risulta inoltre ben correlata al corrispondente diametro relativo del fusto (Figura 25).

La Figura 26 cerca di evidenziare le possibili relazioni tra il diametro del ramo massimo e quello del fusto sotto l'inserzione, e il diametro del fusto misurato ad 1.30 m. Il diametro sotto inserzione è linearmente associato al diametro ad 1.30 m; la relazione, debole, tra il diametro del ramo massimo e il diametro 1.30 m è variabile.

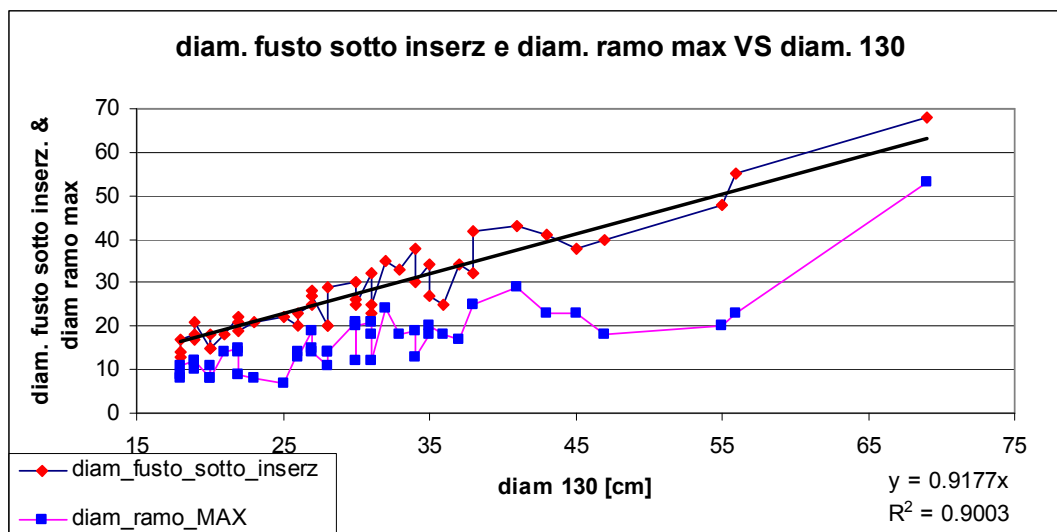


Figura 26– Diametro fusto sotto inserzione e diametro ramo principale in funzione diametro 1.30 m

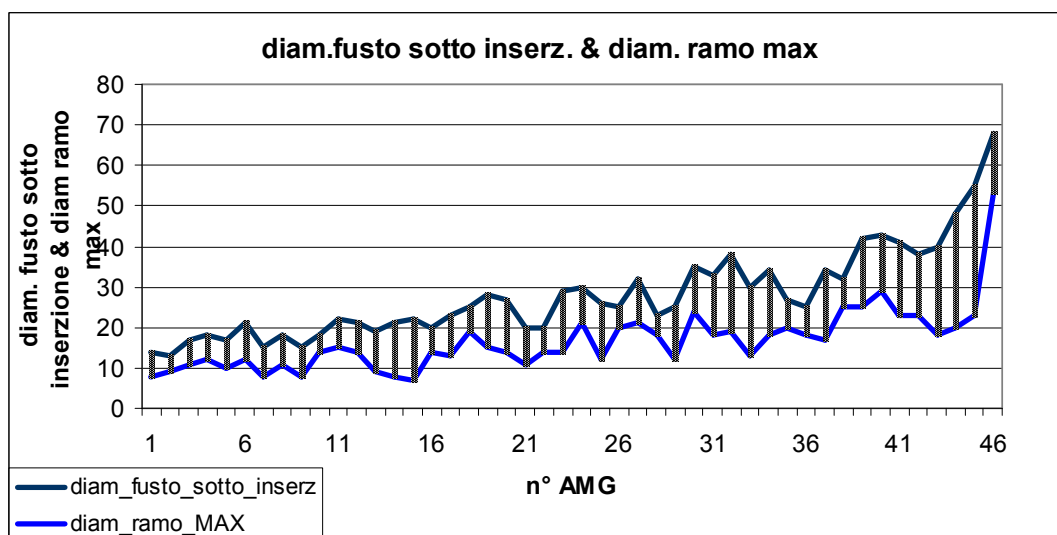


Figura 27 –Diametro fusto sotto inserzione VS diametro ramo massimo

La Figura 27 mostra invece un certo grado di associazione tra il diametro ramo massimo e quello del fusto sotto l'inserzione, per ogni singolo AMG.

4.2.3 Variabili ecologiche (in senso lato)

Sono sintetizzate in questo gruppo le relazioni che intercorrono tra una serie di variabili misurate e aspetti classificabili come ecologici quali la concorrenza, l'origine gamica o agamica degli alberi modello, le modalità di crescita etc.

Per scelta inventariale, data la limitata estensione del campione, sono stati indagati solo i fusti classificati nella "condizione fitosanitaria buona". La variabile "conformazione al piede" fornisce indicazioni sull'origine gamica o agamica del albero modello attraverso tre differenti opzioni:

- "condiviso" se l'albero modello è posizionato su una ceppaia e risulta quindi un fusto condiviso o meglio un pollone;
- "tracce" nel caso in cui risultano visibili delle tracce di passate utilizzazioni e quindi è presumibile un origine agamica;
- "senza" quando non sono visibili tracce di ceduzioni per cui l'albero modello proviene presumibilmente da origine gamica.

La Tabella 34 mostra i gruppi con un'indicazione dei valori delle variabili dendrometriche essenziali, mentre nella Figura 28 è stata valutata la relazione tra la conformazione al piede e l'età. Dalla lettura dei risultati emerge che l'assegnazione alla classe non è condizionata dalle variabili d, h ed età, tuttavia si possono sviluppare alcune considerazioni. Il gruppo di AMG appartenenti alla classe "condiviso" include, comprensibilmente i fusti di età limitata (54 anni) e quindi relativamente piccoli (un diametro medio pari a 24 cm e un'altezza di 9 metri). I fusti giovani senza tracce di condivisione sono classificabili con maggiore sicurezza come individui da seme piuttosto che polloni. I fusti di età più elevata, anche di origine agamica, possono facilmente avere inglobato e nascosto le tracce. Queste considerazioni sono confermate dalle notizie storiche circa le utilizzazioni eseguite nell'area oggetto di studio.

classi di conformazione al piede		variabili		
	n	d 1.30	h ipsometrica	età
1	7 condiviso	24.1	9.1	53.9
2	20 tracce	26.9	10.5	62.3
3	20 senza	36.7	12.4	81.1

Tabella 34 - Conformazione al piede degli AMG e variabili dendrometriche essenziali

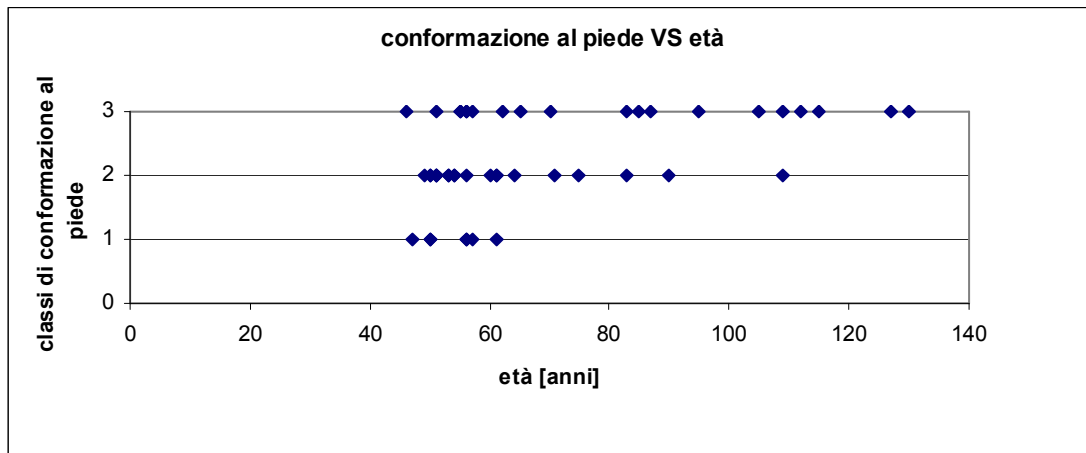


Figura 28 - Conformazione al piede in funzione dell'età

Appartengono alla categoria variabili ecologiche una serie 4 elaborazioni sui rilievi effettuati per caratterizzare l'intorno del fusto esaminato e i livelli di competizione cui era soggetto. Tre sono di tipo angolare ed una è un conteggio:

- angolo minimo (più piccolo in assoluto) tra 4 fusti più vicini
- angolo minimo concorrenti (più piccolo tra i fusti concorrenti)
- angolo medio concorrenti (media delle differenze tra azimut successivi considerando solo i fusti concorrenti, tra i 4 più vicini)
- quota di concorrenti (numero concorrenti / numero fusti vicini considerati)

Questa serie di variabili è correlata al calcolo dell'indice Winkelmass (UAI, Uniform Angle Index) che caratterizza il tipo di distribuzione dei fusti arborei nello spazio orizzontale.

Per ulteriori approfondimenti relativi all'indice di Winkelmass si rimanda all'articolo di Corona (et al., 2005).

4.2.4 Variabili dendrometriche utili per cubatura

In questa sezione vengono presentate alcune variabili dendrometriche rilevate; la loro elaborazione risulta utile per la cubatura del soprassuolo oggetto di studio.

Inizialmente si analizza il risultato della “stima a vista” delle fitomassa (peso commerciale della legna fusto e rami) e del relativo volume eseguita sull’albero in piedi da un operatore locale. Quest’ultimo, operaio specializzato (motoseghista) nato e cresciuto a Seneghe, aveva il compito di eseguire l’abbattimento e l’allestimento del materiale seguendo gli usi e le consuetudini locali.

I risultati del confronto tra le stime a vista ed i valori misurati a seguito dell’abbattimento sono presentati nelle Figure (29 e 30) che seguono.

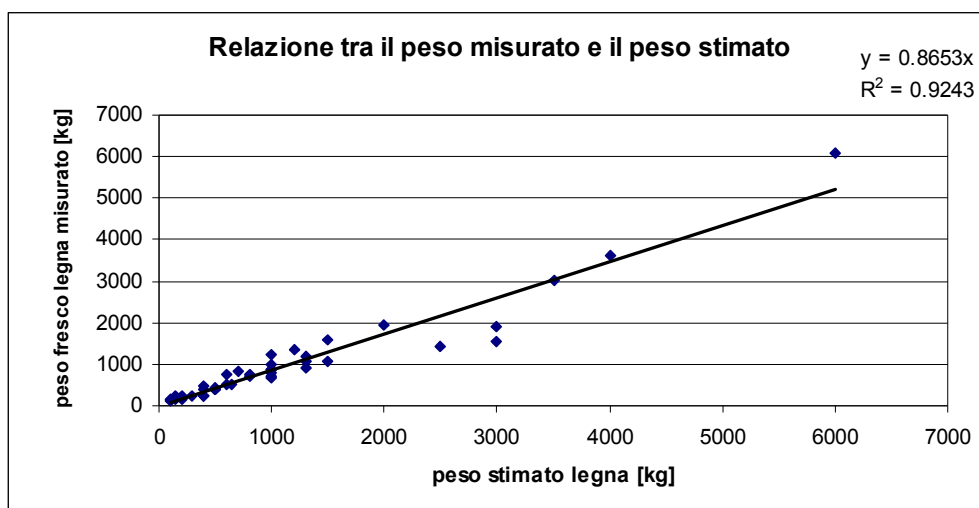


Figura 29 - Confronto tra peso fresco misurato e peso stimato a vista

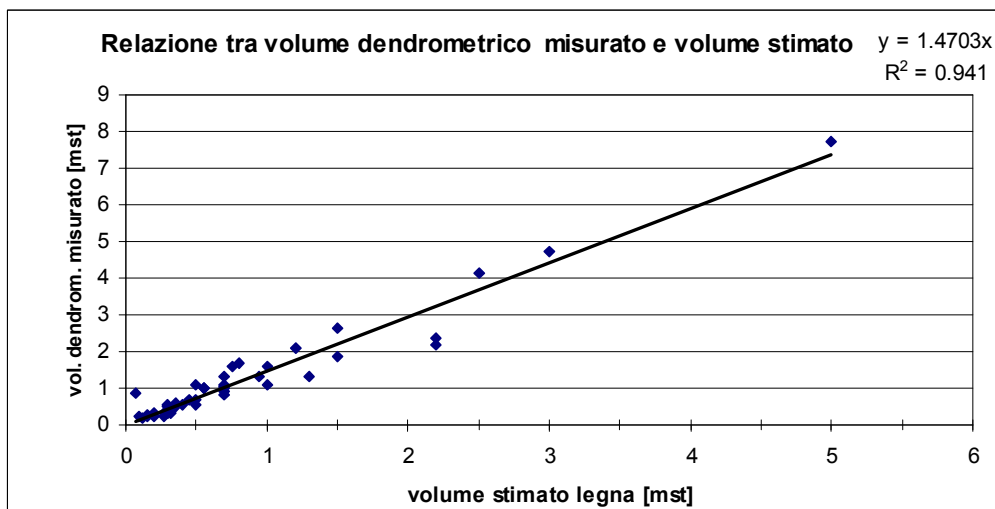


Figura 30 – Confronto tra il volume misurato e il volume stimato a vista

Le stime a vista appaiono strettamente correlate alle misure rilevate; in nessun caso si osservano evidenti distorsioni. Il peso fresco rilevato risulta significativamente maggiore di quanto stimato ma la differenza è destinata ad attutirsi con l'essiccazione cui il materiale è naturalmente soggetto. Più complesso risulta interpretare gli scostamenti nella stima del volume, mediamente inferiore al volume dendrometrico.

Dopo questa breve valutazione circa la bontà delle stime a vista si è proceduto all'analisi dei valori misurati di peso e volume relativi ai singoli assortimenti, messi in relazione con la variabile dendrometrica più importante, ossia il diametro 1.30 m.

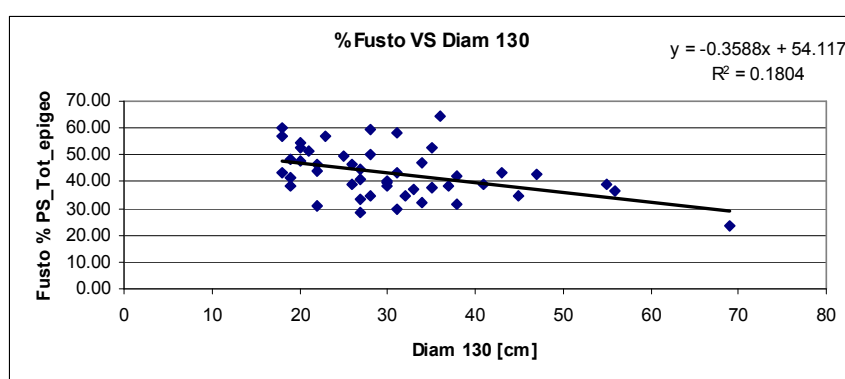


Figura 31 – Percentuale fusto su diametro 1.30 m

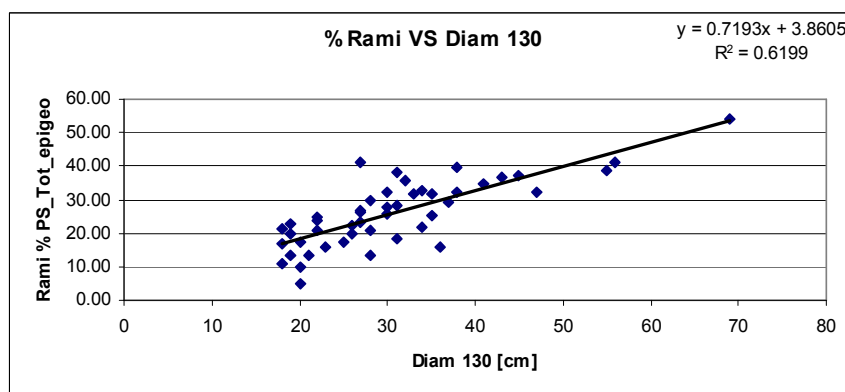


Figura 32– Percentuale rami su diametro 1.30 m

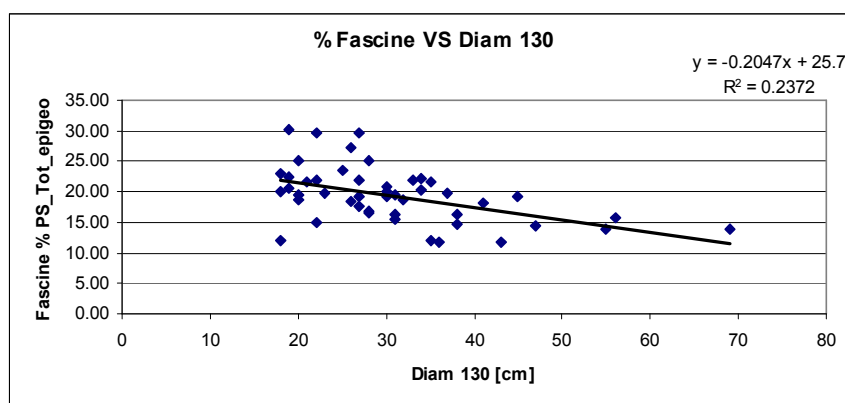


Figura 33– Percentuale fascina su diametro 1.30 m

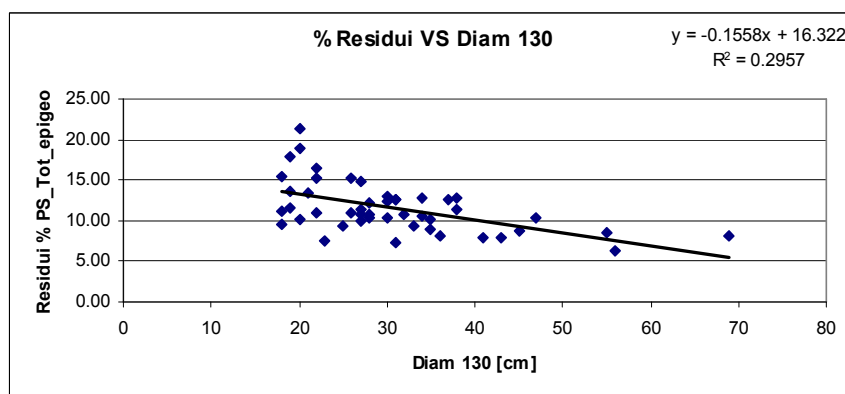


Figura 34 – Percentuale residui su diametro 1.30 m

Le Figure 31, 32, 33, 34 mostrano come varia la distribuzione del peso secco tra i comparti considerati. Solo in riferimento alla quota di fitomassa epigea concentrata nei rami si osserva, comprensibilmente, un significativo incremento all'aumentare del diametro. Tutti gli altri comparti si riducono ma nessuno con inclinazione significativa. Nella Figura 35 il rapporto peso secco epigeo su peso fresco epigeo è presentato in relazione al diametro. Questo rapporto equivale al "rapporto ponderale medio" e mostra un andamento crescente in funzione del diametro: gli alberi di dimensioni maggiori hanno generalmente età maggiore e un contenuto di tessuti legnosi più alto rispetto ad alberi di dimensioni minori.

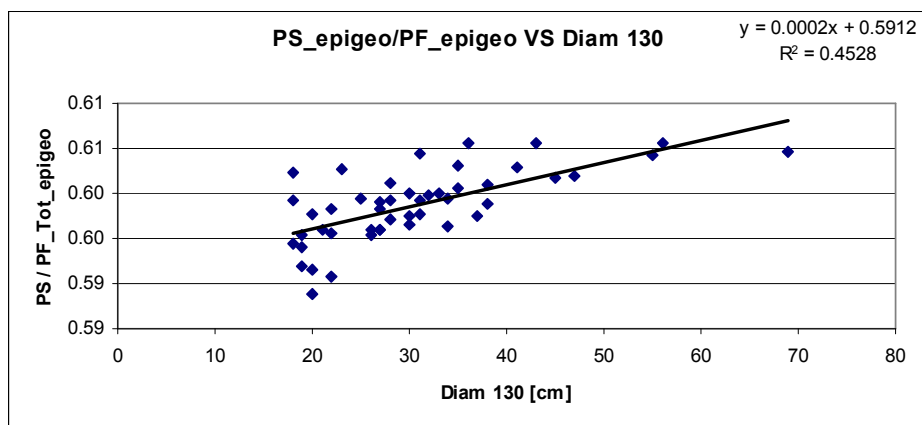


Figura 35 –Rapporto peso fresco epigeo/peso secco epigeo in funzione del diametro

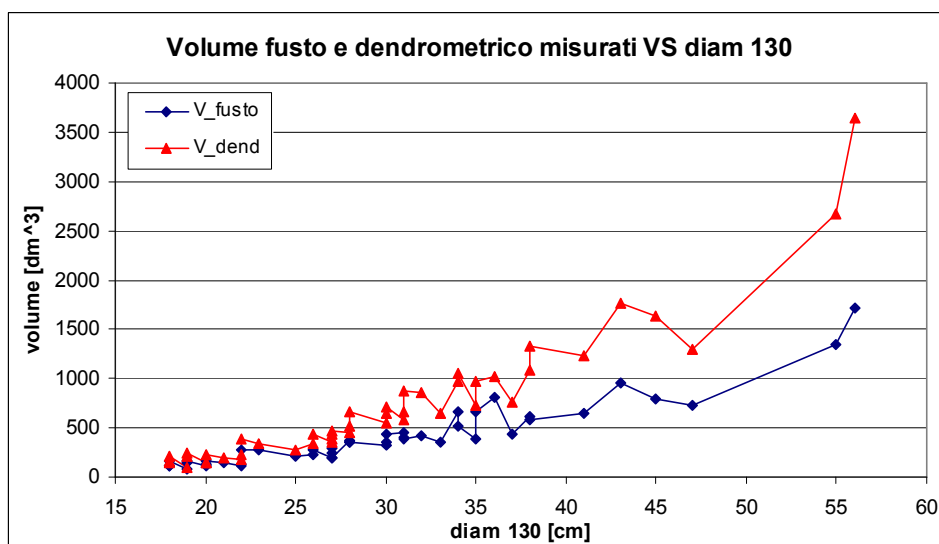


Figura 36- Volume fusto e dendrometrico in relazione al diametro (escluso L2_8)

La Figura 36 descrive la variazione del volume del fusto e di quello dendrometrico in funzione del diametro 1.30 m; la sua lettura mostra che all'aumentare del diametro il volume dendrometrico (comprendente la componente rami) si discosta significativamente dal volume del fusto.

4.3 Valutazione utilizzo strumenti di cubatura esistenti

La ricerca di strumenti di stima della fitomassa e della sua ripartizione in componenti, ai fini della valutazione dello stock carbonio della lecceta mediterranea, ha preso avvio dal recupero, avvenuto attraverso l'analisi bibliografica, degli strumenti di cubatura esistenti per la medesima tipologia forestale. Tenuto conto dell'estesa estrapolazione necessaria per stimare il volume e la fitomassa degli alberi modello di Seneghe utilizzando gli strumenti di cubatura pubblicati, si è comunque proceduto alla loro valutazione. Tale valutazione è avvenuta mediante il confronto tra i volumi e la fitomassa misurati sul campione di 47 AMG e i relativi valori stimati dai modelli esistenti, utilizzando come input la serie di diametri e altezze del campione di fusti modello.

4.3.1 Confronto con modelli di previsione della fitomassa

In letteratura, con riferimento ai popolamenti di leccio situati nell'Italia meridionale e insulare, si riscontrano solamente i lavori sintetizzati brevemente nella Tabella 22 presentata nell'introduzione.

Da una prima verifica risulta che solo Susmel (et al., 1976) ha preso in considerazione, nell'analisi, fusti aventi dimensioni paragonabili con quelle degli alberi modello misurati, ossia aventi diametro ad 1.30 m maggiore di 25 cm; tuttavia il suo lavoro risulta limitato a soli 18 AM, un campione statisticamente debole.

Dall'analisi delle metodologie utilizzate in ognuno dei lavori individuati è emerso il problema della scarsa confrontabilità dei modelli ottenuti a causa della diversa definizione degli assortimenti presi in considerazione. Ad esempio, in alcuni casi si considera l'assortimento fascina, altre volte risulta essere indistinto; talvolta, le soglie diametriche che distinguono gli assortimenti sono diverse; infine, in alcuni lavori la fitomassa fresca è stata stimata mediante un campionamento anziché essere misurata nella sua totalità. Riguardo alla diversa definizione degli assortimenti in cui viene ripartita la fitomassa, si evidenzia che, ad esempio, nel caso di studio la componente fascina e la componente residui ammontano rispettivamente al 18 % ed al 10 % del valore complessivo. Di conseguenza, uno studio che non prenda in considerazione queste componenti "marginali" di fitomassa, origina valori significativamente diversi.

In conseguenza di ciò, l'unico assortimento comune a tutti gli studi e che è stato da noi scelto per eseguire il confronto, è la fitomassa epigea arborea totale, ossia quella proveniente dalla somma dei vari assortimenti, anche diversamente definiti.

Si evidenzia che la mancanza di un protocollo di rilievo comune può rendere scarsamente confrontabili i dati ottenuti dall'utilizzo dei diversi modelli.

Il confronto ha preso avvio dalla selezione delle funzioni di previsione della fitomassa sviluppate per il solo peso secco epigeo totale; quindi sono stati utilizzati i valori misurati di diametro e l'altezza relativi ai 47 AMG e sono stati calcolati i valori attesi di fitomassa di ciascuna delle funzioni sviluppate dai vari Autori. Questi sono stati messi a confronto con i valori di fitomassa misurati in campo. La fase successiva ha previsto l'elaborazione di grafici (scatterplot) al fine di determinare la funzione che meglio interpolava la nube di punti inserita. Dall'analisi è emerso un chiaro legame lineare tra variabile indipendente x (valori stimati con le diverse funzioni) e variabile dipendente y (valori misurati). Questa relazione è stata ulteriormente messa in evidenza dal calcolo del coefficiente di correlazione lineare.

Successivamente è stata eseguita l'analisi di regressione utilizzando R, attraverso una funzione molto versatile per la stima dei parametri del modello di regressione lineare (cioè dei coefficienti della retta di regressione). Si tratta del comando *lm* dove "l" ed "m" sono le iniziali di *linear model* (la sequenza di comandi è mostrata nel Box 10 (sezione Appendice)).

La selezione del modello "migliore" di stima della fitomassa è stata basata su alcune considerazioni:

- il numero di AMG sui quali è stato sviluppato il modello (si è deciso di escludere quelli di numerosità inferiore a 20);
- il range di altezza e diametro (a riguardo esistono significative differenze tra i modelli e i dati misurati);
- gli output statistici offerti da R, in particolare la verifica della significatività dei coefficienti, R^2 adj etc.

La sintesi del confronto è stata riassunta nella Tabella 35.

Una prima visione dei dati ottenuti dal confronto fa emergere che, a parità di diametro e altezza, i dati di peso ottenuti da 47 AMG sono più alti rispetto ai valori di peso attesi dai modelli (con più di 20 AM). Questi risultati hanno suggerito un'ulteriore analisi del dato relativo all'umidità dei campioni per escludere la possibilità di un errore sistematico.

Sono stati raccolti i dati grezzi usati da Susmel (et al., 1976) relativi al peso fresco ed al peso secco ed è stato calcolato il rapporto ponderale peso secco su peso fresco per la componente fusto e rami ottenendo un valore di 0.69. Lo stesso dato è stato possibile calcolarlo per lo studio condotto da Brandini e Tabacchi (1996) ottenendo un valore di 0.57. Tali componenti nel nostro caso rappresentano il 72% del peso secco complessivo e registrano un valore del rapporto peso secco su peso fresco pari a 0.62. La lettura di queste informazioni consente di affermare che, probabilmente, il rapporto ponderale subisce l'influenza dell'età dell'albero e della fase di accrescimento. Infatti sia i campioni provenienti da Montes che quelli di Seneghe sono composti da alberi di diametro relativamente grosso, quindi più vecchi e di conseguenza con una maggior quantità di tessuti morti. Riguardo alla fase di accrescimento, si evidenzia che nel lavoro di Brandini e Tabacchi gli alberi, con diametro compreso tra i 4 ed i 26 cm (e quindi più giovani), erano tutti di provenienza agamica, il che giustifica probabilmente ritmi di accrescimento più sostenuti rispetto ai casi precedenti e quindi maggior contenuto di sostanza fresca nei tessuti legnosi.

In conclusione, si può riassumere affermando che il confronto tra campioni diversi per provenienza geografica, età, classe diametrica, origine (gamica o agamica), può generare valori significativamente differenti riguardo al rapporto peso secco su peso fresco il quale, a sua volta, determina differenze nella stima della fitomassa.

Lo strumento (tra quelli con più di 20 AM) che meglio si presterebbe, sembra essere la funzione già sviluppata per i cedui della Calabria (Ciancio et al., 2002). In realtà, però, oltre a richiedere una correzione di quasi il 50% (valore corretto = $1.46 * \text{valore Ciancio}$), il grafico di valutazione della correzione (Figura 37) evidenzia importanti debolezze:

- il valore estremo destro sostiene da solo buona parte della sovra-correzione (aumento);

- la distribuzione dei residui (intesi come valore misurato – valore stimato dal modello) appare lontana dall'essere uniforme e conferma una significativa sottostima della fitomassa del modello Ciancio (Figura 38).

La Figura 39 esprime l'andamento dei residui verso i valori attesi espressi con il log ().

Il Box 10 (sezione Appendice) raccoglie a titolo di esempio la procedura di confronto realizzata utilizzando il software R.

Di seguito sono mostrate le informazioni necessarie per la lettura del codice usato per il confronto dei modelli di previsione della fitomassa, soprattutto quelle fornite dalla funzione *summary()*.

La sezione *Call* contiene la funzione del modello utilizzato, in *Residuals* sono riportati alcuni quantili dei residui: il valore minimo, il primo quartile, la mediana, il terzo quartile e il valore massimo. Nella sezione *Coefficients* troviamo il valore del parametro (*Estimate*), il corrispondente errore standard (*Std. Error*), il valore del test t (*t value*) calcolato sotto l'ipotesi nulla che il valore del parametro sia nullo e il valore p (*Pr(>|t|)*) da confrontare con la soglia dell'errore di primo tipo oltre la quale non si rigetta l'ipotesi nulla. Infine, nell'ultima colonna viene riportato con simboli il livello di significatività del test. Sotto la voce *Residual standard error* abbiamo una stima della deviazione standard del termine di errore del modello e i gradi di libertà. In *Multiple R-Squared* abbiamo il calcolo del coefficiente di determinazione R^2 :

$$R^2 = 1 - SSE / SST$$

dove SSE è la devianza residua, cioè del termine di errore, mentre SST è la devianza totale. *Adjusted R-squared* è il valore di R^2 "corretto" tenendo conto dei gradi di libertà:

$$R^2 = 1 - (1 - R^2) n - 1 / n - p - 1$$

dove n è il numero di osservazioni e p il numero di variabili esplicative (esclusa l'intercetta). L' R^2 corretto tiene conto dei gradi di libertà e quindi del numero di variabili esplicative del modello. È utile per confrontare modelli con un numero diverso di variabili esplicative. Infine abbiamo la statistica F (rapporto tra le varianze) che ci fornisce una valutazione complessiva sulla significatività del modello rispetto ad un modello che contenga la sola intercetta.

La stima della bontà del modello lineare può essere valutata attraverso l'analisi della varianza (ANOVA) tramite la costruzione della classica Tabella:

Fonte di variabilità	g.d.l.	SS	MS	Statistica F
Regressione	1	SSR	MSR	$F=MSR/MSE$
Residui	n-2	SSE	MSE	
Totale	n-1	SST		

Questa si ottiene su R con il comando *anova* (vedi Box 10 sezione Appendice). Sempre riferendoci ai risultati dell'analisi presentati nel medesimo Box, si osserva che la statistica F risulta molto significativa.

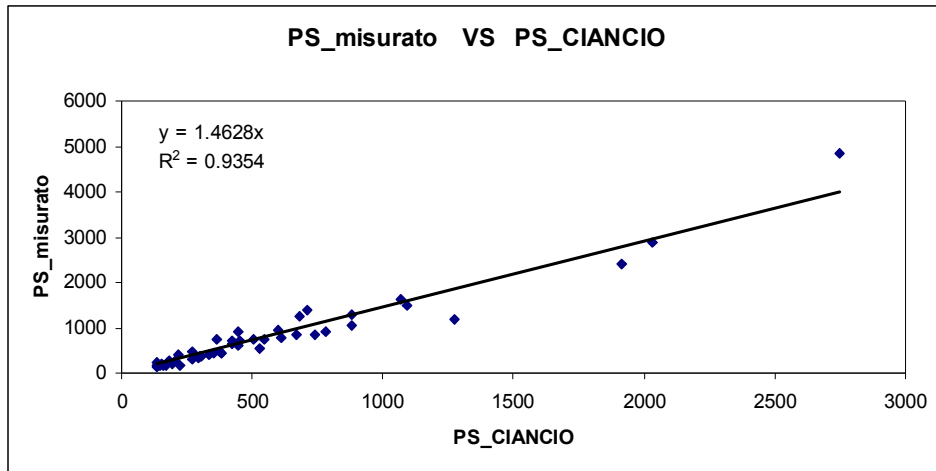


Figura 37–Valutazione della correzione del peso secco misurato VS il peso secco stimato dal modello Ciancio

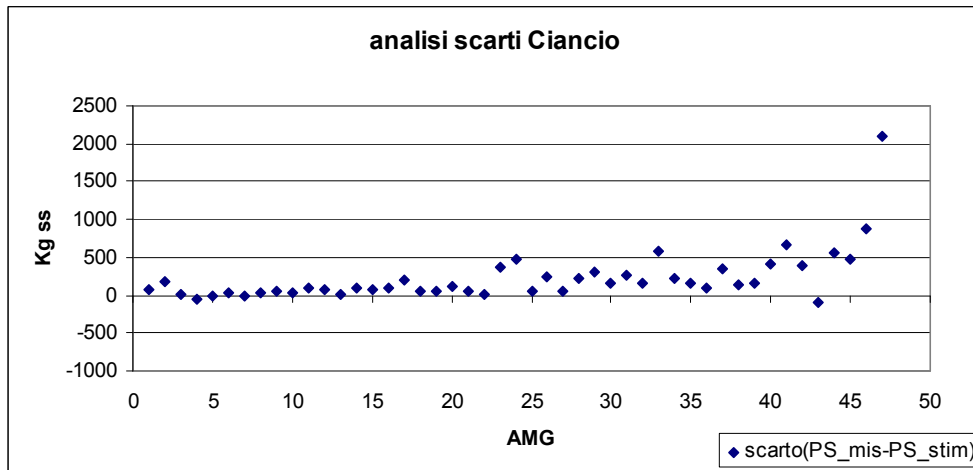


Figura 38– Analisi scarti (peso secco misurato – peso secco stimato)

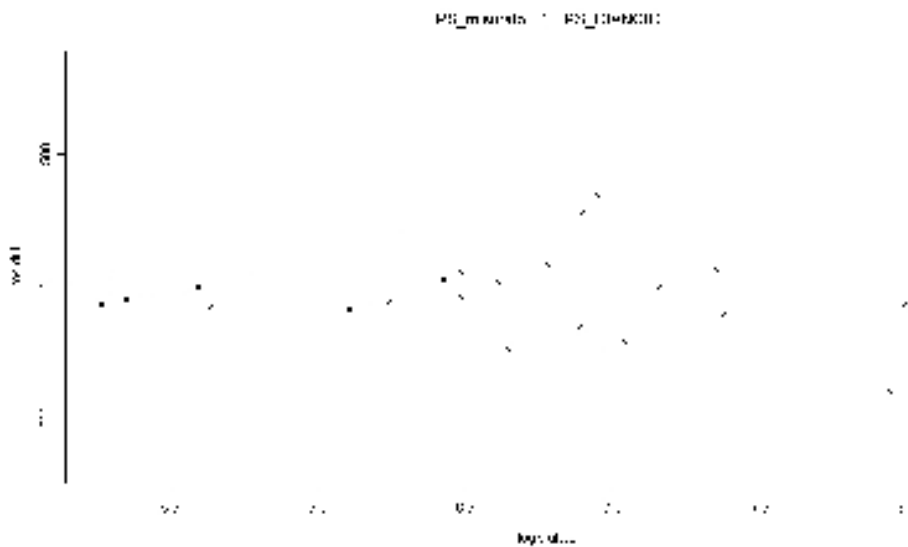


Figura 39– Residui verso i valori attesi espressi con il log()

<i>Modello</i>	<i>Termine noto</i>	<i>Significatività termine noto</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Significatività coefficiente</i>	<i>R-squared adj</i>	<i>n modello originale</i>	<i>Equazione</i>	<i>Media Scarto (PS_mis- PS_stim)</i>	<i>Media Rapporto (PS_mis su PS_stim)</i>
Ciancio et al. 2002	-----	-----	1.46275	***	0.9656	88	$y = a + bx^2z + cx^2$	228.996	1.369
Marziliano P.A. 2002_2	-----	-----	1.80645	***	0.9659	100	$y = a + bx^2z + cx^2$	330.718	1.650
Brandini et al. 1996	-----	-----	1.65913	***	0.9600	94	$y = a + bx^2 \cdot z$	316.729	1.730
Fabbio et al. 2002	-----	-----	1.18402	***	0.9600	88	$y = a + bx^2 \cdot z$	126.621	1.231
Marziliano 2002_1	-217.440	***	2.43212	***	0.9519	100	$y = a + b \cdot x^2$	375.074	1.725
Susmel et al. 1976_2	-----	-----	1.23910	***	0.9775	18	$y = a \cdot x^b$	123.886	1.134
Susmel et al. 1976_1	185.200	***	0.18380	***	0.9603	18	$y = a + bx + cx^2 + dx^3$	-2495.21	0.286
Leonardi e Rapp 1982	-191.719	***	3.5429	***	0.9541	12	$y = a \cdot x^b$	512.049	2.598

Tabella 35 – Sintesi confronto modelli esistenti per la stima fitomassa epigea

4.3.2 Confronto con modelli di previsione del volume

Per quanto riguarda il confronto tra i volumi misurati sul campione ed i relativi valori stimati dai modelli esistenti, si sono applicate metodologie diverse di analisi in relazione alla eterogeneità degli strumenti di cubatura emersi dalla ricerca bibliografica.

Sono stati selezionati 3 casi che risultano essere stati sviluppati specificatamente per la stima del volume dendrometrico del leccio e inoltre rappresentano la tipologia dei possibili strumenti disponibili. La valutazione dei modelli è stata sviluppata utilizzando la stessa procedura usata per il confronto tra i modelli di stima della fitomassa epigea totale ed i relativi valori misurati sugli alberi modello.

Inizialmente è stata presa in considerazione la tavola cubatura di Falchi (vedi Castellani, 1982). Tale strumento consiste in una tavola di cubatura del volume dendrometrico a doppia entrata sviluppata per fustaie coetanee di leccio mature e stramature della Sardegna; le altezze riportate sulla tavola (vedi sezione Allegati) non sono quelle dendrometriche ma quelle che si ottengono svettando le piante a 10 cm di diametro. Di conseguenza, il primo problema affrontato per eseguire un confronto è stato quello del calcolo dell'altezza corrispondente alla sezione di fusto con diametro pari a 10 cm (nel nostro caso l'altezza di svettatura è stata fissata a 5 cm). L'altezza di riferimento alla sezione di 10 cm è stata calcolata utilizzando una serie di query che hanno realizzato un'interpolazione basata sui dati disponibili (Box 11). Successivamente è stato allestito un foglio di calcolo con la tavola di Falchi e i dati misurati (diametro, altezza relativa alla sezione 10 cm e volume dendrometrico); questo ha permesso di calcolare il volume previsto da Falchi. Tuttavia bisogna segnalare che il confronto è stato eseguito su 31 alberi modello su 47 in quanto alcuni non rientravano nella soglia di diametro minimo della tavola (20 cm); alcuni altri, pur essendo dentro il range di diametro, eccedevano come altezza rispetto a quanto previsto dal modello Falchi.

Sono state realizzate una serie di query atte ad estrarre dal data base originale i valori dei diametri maggiori e minori di 10 cm, con le relative altezze, partendo dalle sezioni misurate per la cubatura del fusto; quindi è stata impostata una formula per "interpolazione" realizzando un campo dove viene calcolata l'altezza relativa alla "sezione di svettatura virtuale" di 10 cm

Considerando:

y 1 = altezza sezione di diametro inferiore a 10 cm

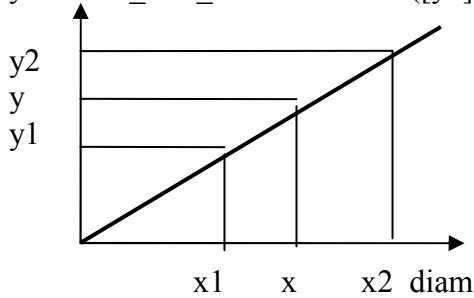
y 2 = altezza sezione di diametro maggiore a 10 cm

x 2 = diametro sezione > 10 cm

x 1 = diametro sezione < 10 cm

x = diametro sezione uguale 10 cm

y → h_svet_10cm: formula $([y2]-[y1])*(10-[x1])/([x2]-[x1])+[y1]$



$$[y-y1 / x-x1] = [y2 - y1 / x2 - x1] \quad y = [[y2 - y1 / x2 - x1] * [x - x1] + y1]$$

Box 11 - Calcolo dell'altezza relativa alla sezione virtuale di 10 cm

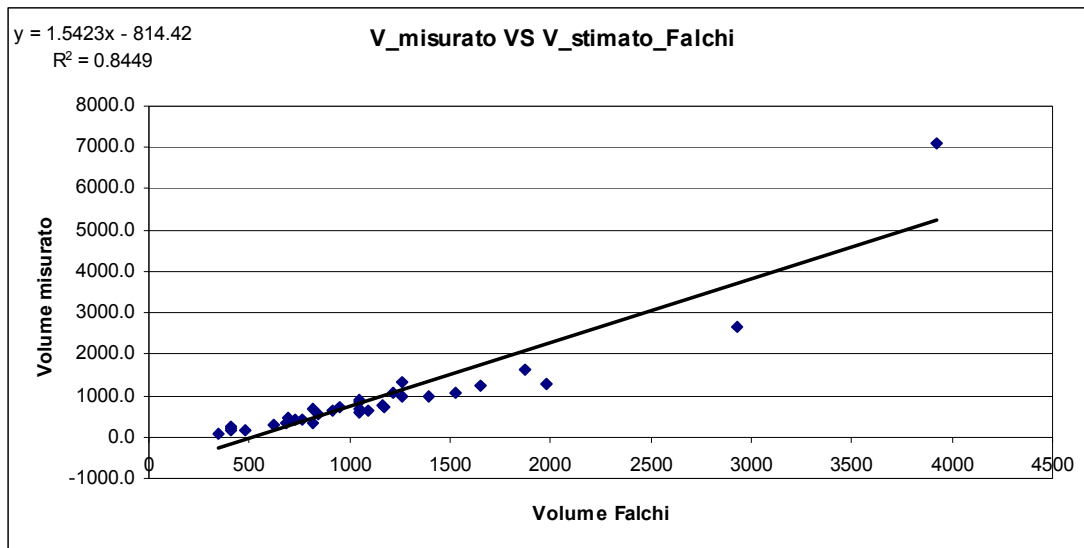


Figura 40 – Valutazione della correzione volume misurato VS volume stimato Falchi

La Figura 40 riassume l'esito del confronto con il modello Falchi.

Un secondo caso preso in analisi proviene dal copioso lavoro eseguito da Susmel (et al., 1976) nel Supramonte di Orgosolo. Il lavoro include una tavola allometrica degli organi

epigei della lecceta prevalentemente di alto fusto. La tavola è costruita sulla base di 18 alberi modello e offre, tra le altre informazioni, il valore del volume dendrometrico comprendente i rami fino a 3 cm di diametro. Partendo da una tabella con i valori di volume (perequati) relativi ai 18 alberi modello considerati da Susmel, mediante l'utilizzo di un foglio di calcolo, è stata ottenuta la relativa funzione (che interpola gli stessi valori con un R^2 pari a 0.998) che è stata utilizzata sul set di dati misurati consentendo di ottenere il volume atteso (Figura 41).

La Figura 42 mostra la valutazione della correzione del volume misurato verso il volume stimato dal modello Susmel.

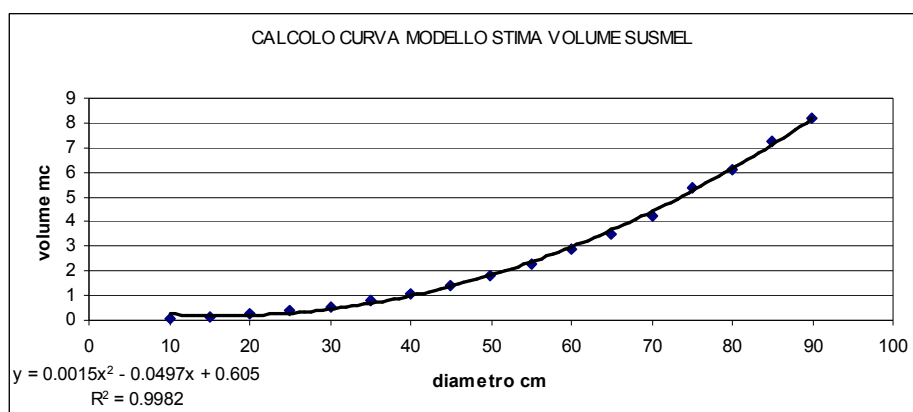


Figura 41 – Modello stima volume dendrometrico Susmel

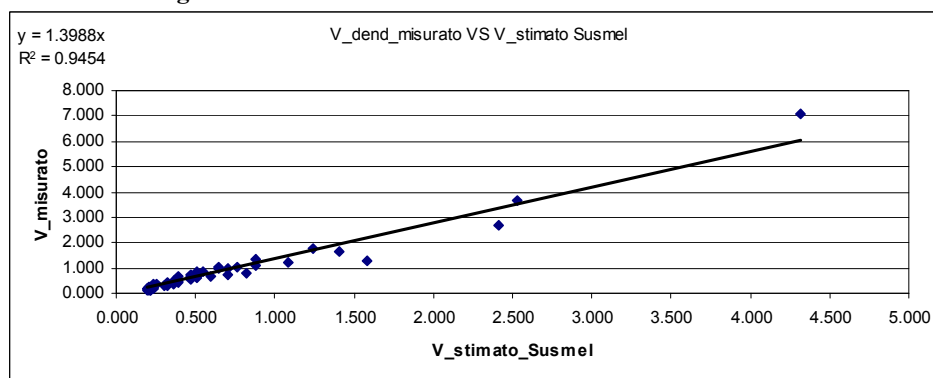


Figura 42 – Valutazione della correzione volume misurato VS volume stimato Susmel

L'ultimo strumento preso in considerazione consiste nella tavola sviluppata a livello nazionale in seguito all'elaborazione dei dati dell'Inventario Forestale Nazionale concluso nel 1985 (IFN 85 in Castellani et al., 1984). Si tratta della tavola generale a doppia entrata delle querce allevate a fustaia. La scelta di prendere in considerazione la tavola per le fustaie e non quella per i cedui è dovuta essenzialmente al fatto che i

diametri considerati nel presente studio sono decisamente superiori a quelli presenti nella tavola relativa ai cedui (diametro max. 30 cm), mentre ben si adattano al range considerato dalla tavola per le fustaie. Il calcolo dei valori stimati di volume è stato agevole in quanto la tavola è fornita di espressione funzionale con relativi coefficienti (Box 12), per cui è stato sufficiente inserire la funzione stessa su un foglio di calcolo per ottenere i relativi valori attesi. La massa dendrometrica presa in considerazione in questa tavola comprende anche i rami fino alla dimensione minima di 3 cm di diametro; i diametri dei fusti considerati sono compresi tra 15 e 80 cm mentre le altezze tra 7 e 36 m.

$$v = b_2 d^2 h + b_3 d + b_4 h + b_5 d^3 + b_6 h^3 + b_7 d h^2 + b_8 d^2 h^2 + b_9 d^3 h^2 + b_{10} d^3 h^3 \quad (v[m^3], h[m], d[cm])$$

$b_2 = 0,307106 \cdot 10^{-1}$	$b_5 = 0,172373 \cdot 10^{-3}$	$b_8 = 0,252758 \cdot 10^{-2}$	$b_{10} = 0,585386 \cdot 10^{-1}$
$b_3 = -0,120911 \cdot 10^{-1}$	$b_6 = 0,113982 \cdot 10^{-2}$	$b_7 = 0,152380 \cdot 10^{-2}$	$b_9 = 0,488191 \cdot 10^{-2}$
$b_4 = 0,397981 \cdot 10^{-6}$			

Box 12 – Espressione funzionale calcolo volume dendrometrico per fustaie (IFN 85)

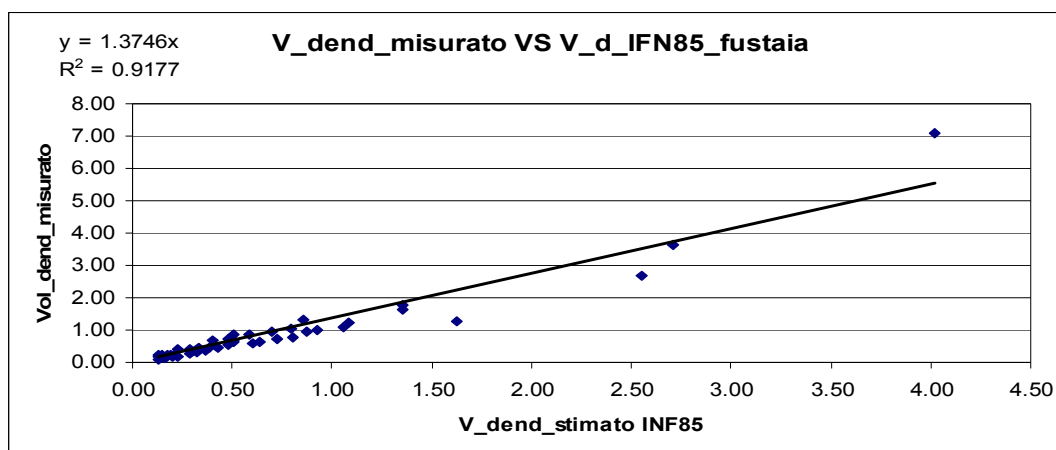


Figura 43 – Valutazione della correzione volume misurato VS volume stimato (IFN 85)

La Figura 43 mostra la valutazione della correzione del volume misurato verso il volume stimato dal modello IFN 85.

I risultati del confronto sono riassunti nella Tabella 36. In prima analisi si può affermare che i dati sono confrontabili ma non soddisfano esigenze di cubatura.

Il modello che offre una migliore adattabilità ai dati misurati sembra essere quello di Susmel, a tal fine si riportano due Figure significative (44 e 45).

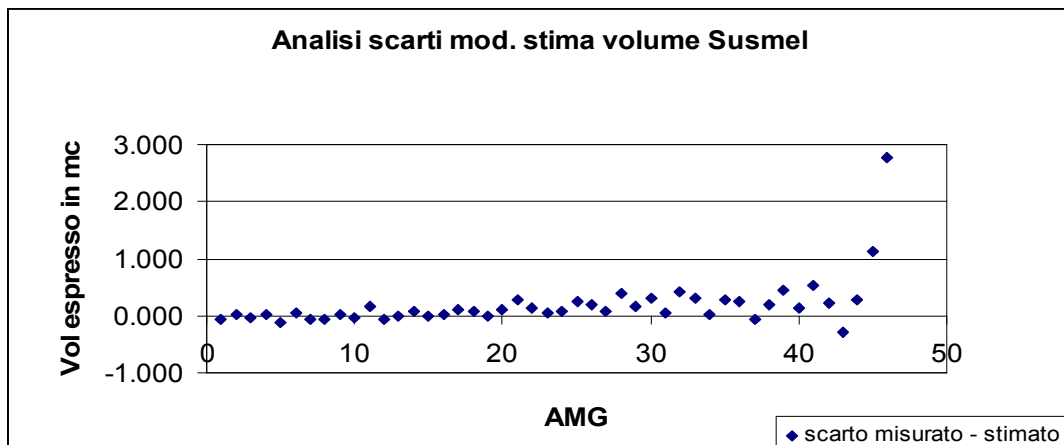


Figura 44 – Analisi scarti modello stima volume Susmel

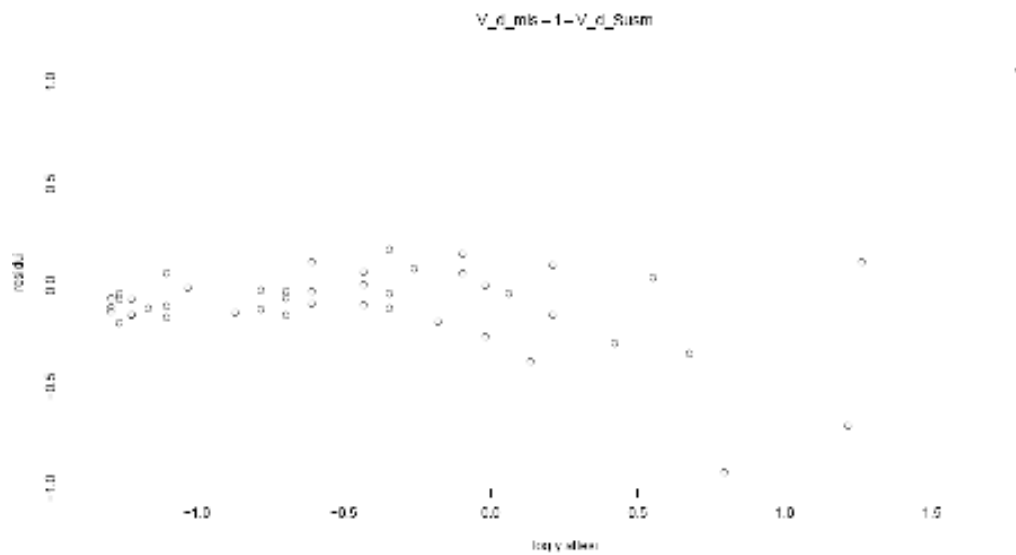


Figura 45 – Residui verso valori attesi su scala logaritmica modello stima Susmel

<i>Modello</i>	<i>Termine noto</i>	<i>Significatività termine noto</i>	<i>Coefficiente e</i>	<i>Significatività a coefficiente</i>	<i>R-square d adj</i>	<i>n modello originale</i>	<i>Equazione</i>	<i>Media Scarto (PS_mis-PS_stim)</i>	<i>Coefficiente e correlazione</i>
Tav. Falchi	- 814.418	***	1.5423	***	0.8397	numerose	Non disponibile	-195.7253	0.9191
Tav. Susmel	-----	-----	1.3988	***	0.9644	18	$y = ax^2 + bx + c$	0.1908	0.9765
Tav. INF 85	-----	-----	1.3745	***	0.9464	numerose	polinomio	0.1769	0.9626

Tabella 36 – Sintesi confronto modelli esistenti per la stima del volume dendrometrico

4.4 Stima diretta di fitomassa e volume

Gli strumenti di stima della fitomassa e del volume rilevabili in letteratura, per quanto sviluppati in relazione a popolamenti simili a quello dove sono stati realizzati i rilievi, non risultano soddisfare a pieno le esigenze cui si intende rispondere.

In conseguenza di ciò, consapevoli che le ridotte dimensioni del campione a disposizione limitano la “generalizzazione dei possibili risultati”, si è proceduto a definire una funzione di cubatura in base ai soli alberi modello disponibili.

Nella sezione corrente viene sviluppata la stima diretta utilizzando due approcci distinti, il primo basato sullo sviluppo di classiche funzioni di regressione utilizzando valori aggregati e il secondo utilizzando valori disaggregati e procedure non (ancora) consuetudinarie.

4.4.1 Sviluppo di equazioni di previsione della fitomassa e del volume

La Tabella 37 riassume le definizioni delle variabili utilizzate nelle equazioni di previsione; nella denominazione delle stesse si è cercato di essere coerenti con il protocollo suggerito dal progetto EFOMI (Fattorini et al., 2005).

Il volume dendrometrico (V) corrisponde al cosiddetto volume commerciale, ottenuto dalla somma del volume del fusto (V_f) e dei rami (V_r) con un diametro minimo di 5 cm; per quanto riguarda la fitomassa arborea epigea allo stato anidro, il suo ammontare complessivo (w_{tot}) è stato suddiviso nei 4 assortimenti: fusto (w_1) rami (w_2), fascina (w_3), residui (w_4). La componente residui comprende tutto il materiale che viene abbandonato in bosco, quindi le foglie e i rametti più sottili o malformati, tali da non poter essere allestiti e inseriti nelle fascine, ed eventualmente la componente legno morto, ossia le parti secche in genere. Tale componente, data l'esigua presenza negli AMG selezionati, è stata considerata trascurabile e di conseguenza non presa in considerazione nell'analisi di umidità dei campioni.

<i>Variabili</i>	<i>simbolo</i>	<i>descrizione</i>	<i>unità misura</i>
n	[n]	Numero	
d	[d]	Diametro ad 1.30 “petto d’uomo”	cm
h	[h]	Altezza iposmetrica	m
V Fusto (StemV)	[Vf]	Volume del fusto (d svettatura = 5 cm)	dm ³
V Rami (BranchV)	[Vr]	Volume dei rami (d > 5 cm)	dm ³
V Dendrometrico(Stem+BranchV)	[V]	Volume del fusto + volume dei rami	dm ³
PS Fusto (Stem DW)	[w ₁]	Peso secco del fusto (d svettatura = 5 cm)	Kg
PS Rami (Branch DW)	[w ₂]	Peso secco dei rami (d > 5 cm)	Kg
PS Fascina(Branch* DW)	[w ₃]	Peso secco fascina	Kg
PS Residui(Slash+ Dead DW)	[w ₄]	Peso secco dei residui	Kg
PS Epigeo tot (AG DW)	[w _{tot}]	Peso secco epigeo	Kg

Tabella 37 – definizione delle variabili utilizzate per modelli previsione volume e peso

L’individuazione di un modello di stima della fitomassa è stata eseguita utilizzando la regressione, selezionando un polinomio di grado variabile, tra la variabile dipendente (y) di volta in volta usata (Vdend, Vfusto, Vrami, PStot, PSfusto, PSrami, PSfascina, PS residui) ed il diametro 1.30 m insieme con l’altezza ipsometrica.

Inizialmente il modello di riferimento, relativo a ciascuna delle variabili dipendenti, è stato individuato utilizzando un polinomio di quarto grado, tra la variabile dipendente ed il solo diametro a petto d’uomo:

$$y = \beta_0 + \beta_1 * (d) + \beta_2 (d^2) + \beta_3 (d^3) + \beta_4 (d^4)$$

Un secondo modello è stato selezionato a partire da un polinomio di quarto grado tra la variabile dipendente considerata ed una serie di combinazioni di variabili indipendenti (diametro e l’altezza ipsometrica):

$$y = \beta_0 + \beta_1 (d) + \alpha_1 (h) + \alpha_2 (d*h) + \beta_2 (d^2) + \alpha_3 (h^2) + \alpha_4 (d^2*h) + \alpha_5 (d*h^2) + \beta_3 (d^3) + \alpha_6 (h^3) + \beta_4 (d^4) + \alpha_7 (h^4)$$

L’eliminazione delle variabili non significative ha permesso di ottenere una notevole semplificazione del modello considerato. Questo procedimento di selezione è stato eseguito con la tecnica della “*stepwise regression*” che ha consentito di escludere alcune combinazioni di variabili.

La metodica di analisi utilizzata per l’approntamento dei modelli previsionali è sinteticamente richiamata nel Box 13 (visibile nella sezione Appendice); la stessa è illustrata con maggior dettaglio nel lavoro di Ricci (2006) al quale si rimanda per eventuali approfondimenti.

Per una miglior comprensione del contenuto del Box 13 si riassumono brevemente i significati degli output statistici presentati. Il comando *step* () consente di effettuare una

stepwise regression basata sul criterio AIC; nell'argomento *direction* si può usare una procedura *backward*, *forward*, oppure entrambe come nel nostro caso (*direction="both"*). L'AIC (*Akaike's Information Criterion*) è un indicatore della bontà di adattamento del modello ai dati. Tale misura tiene conto del numero di parametri del modello e può essere proficuamente utilizzata per vedere cosa accade al variare del numero dei regressori inseriti nell'analisi. Un valore basso risulta essere un indicatore di buon adattamento del modello ai dati. L'indicatore diminuisce al crescere della verosimiglianza e aumenta al crescere del numero dei parametri inseriti nel modello (Iacus e Masarotto, 2008)

L'analisi eseguita ha permesso l'individuazione di una serie di equazioni (sintetizzate nelle Tabelle 38 e 39) di previsione della fitomassa arborea epigea e degli assortimenti principali in cui viene convenzionalmente ripartita, per la tipologia forestale oggetto d'interesse. La predisposizione di tali funzioni risulta affetta da alcune debolezze non eliminabili quali: la disponibilità di poche osservazioni, la distribuzione dei residui non proprio omoscedastica, l'influenza dei valori estremi sulle statistiche che governano il processo, etc. Un ulteriore approfondimento ha preso spunto dalle equazioni, presentate nella Tabella 38, le quali sono state utilizzate per elaborare la *tavola ad 1 entrata per la lecceta su Monte di Seneghe (OR)*, (Tabella 40). Affinché la sommatoria delle diverse componenti della fitomassa risulti identica a quella ottenibile dalla funzione unica, i valori riferiti alla fitomassa dei residui sono stati ottenuti per differenza tra la fitomassa totale e quella delle altre componenti.

Equazione	Coefficienti			AIC	F	R ² adj.	
	estimate	Std. error	Signif.				
V	β_0	-8.803e+02	3.032e+02	**	475.37	693.9	0.9788
	β_1	6.072e+01	1.722e+01	**			
	β_3	-2.899e-02	1.118e-02	*			
	β_4	5.875e-04	1.270e-04	***			
Vf	β_0	-49.57406	23.20960	*	423.75	759.8	0.944
	β_2	0.47116	0.01709	***			
Vr	β_0	1.569e+03	1.247e+03		441.37	496.2	0.9778
	β_1	-2.257e+02	1.436e+02				
	β_2	1.142e+01	5.811e+00	.			
	β_3	-2.332e-01	9.812e-02	*			
	β_4	1.817e-03	5.861e-04	**			
W _{tot}	β_0	-4.412e+02	1.061e+02	***	464.67	669.9	0.9675
	β_1	3.217e+01	3.947e+00	***			
	β_4	1.343e-04	1.157e-05	***			
W ₁	β_0	1.733e+02	1.662e+02		386.86	214.2	0.9343
	β_1	-1.804e+01	1.269e+01				
	β_2	7.504e-01	2.530e-01	**			
	β_4	-5.879e-05	2.342e-05	*			
W ₂	β_0	-1.806e+02	7.349e+01	*	404.69	439.8	0.9669
	β_2	1.005e+00	3.231e-01	**			
	β_3	-3.073e-02	1.052e-02	**			
	β_4	3.582e-04	8.969e-05	***			
W ₃	β_0	-1.664650	10.385523		349.76	300.7	0.8695
	β_2	0.132633	0.007648	***			
W ₄	β_0	2.489066	5.606898		293.05	310.6	0.8731
	β_2	0.072776	0.004129	***			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tabella 38 - Equazioni selezionate in funzione del diametro 1.30 m

Equazione	Coefficienti			AIC	F	R ² adj.	
	estimate	Std. error	Signif.				
V	β_0	-9.922e+02	3.015e+02	**	473.79	549.9	0.9799
	β_1	6.755e+01	1.718e+01	***			
	β_3	-3.805e-02	1.197e-02	**			
	β_4	6.954e-04	1.371e-04	***			
	α_7	3.962e-03	2.176e-03	.			
Vf	β_0	5.592e+01	1.655e+01	**	405.17	1160	0.9626
	α_4	2.973e-02	8.731e-04	***			
Vr	β_0	1.503e+01	1.295e+02		445.96	448	0.9755
	β_4	3.464e-04	2.933e-05	***			
	α_1	-5.401e+01	2.663e+01	*			
	α_2	4.620e+00	1.295e+00	***			
	α_4	-9.901e-02	2.284e-02	***			
W _{tot}	β_0	-4.412e+02	1.061e+02	***	464.67	669.9	0.9675
	β_1	3.217e+01	3.947e+00	***			
	β_4	1.343e-04	1.157e-05	***			
W ₁	β_0	-38.493669	25.992628		360.55	572.9	0.9621
	α_2	0.657810	0.144471	***			
	α_4	0.008133	0.002199	***			
W ₂	β_0	-2.131e+02	8.262e+01	*	404.75	439.2	0.9669
	β_1	1.386e+01	4.155e+00	**			
	β_4	1.198e-04	8.931e-06	***			
	α_4	-1.245e-02	4.641e-03	*			
W ₃	β_0	1.423130	10.208249		347.97	161.4	0.877
	β_2	0.164272	0.018053	***			
	α_5	-0.008202	0.004265	.			
W ₄	β_0	-11.867475	7.604137		288.25	179.4	0.888
	β_2	0.137529	0.025038	***			
	α_4	-0.004097	0.001565	*			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tabella 39 - Equazioni selezionate in funzione di diametro e altezza

Nel Box 13 (sezione Appendice), a titolo di esempio, viene riportata la procedura di selezione seguita per la predisposizione del modello di previsione, ritenuto più accurato, per la stima della fitomassa arborea epigea:

$$W_{tot} = \beta_0 + \beta_1(d) + \beta_4(d^4)$$

Inoltre, lo stesso contiene le stringhe di comando usate per creare la Figura 46, che presenta la curva di interpolazione dei dati di peso secco epigeo, espressi in funzione del diametro, associata alle bande di confidenza che mostrano, in prima approssimazione, la qualità del modello stesso; la Figura 47 indica la distribuzione dei residui in funzione dei valori attesi per il modello di stima del peso secco epigeo.

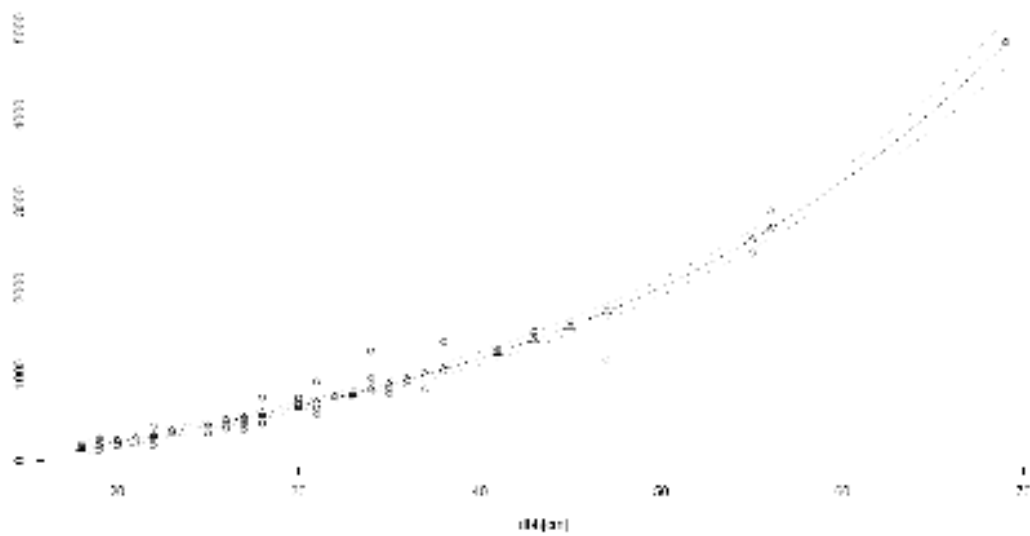


Figura 46 – Modello di previsione del peso secco epigeo, bande di confidenza

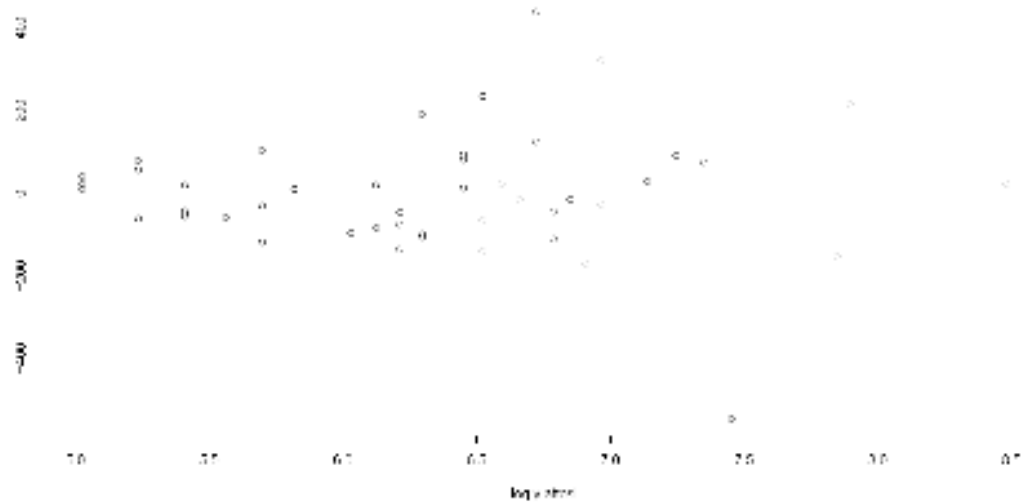


Figura 47 - Distribuzione residui in funzione dei valori attesi del peso secco epigeo (espressi con log())

diametro [cm]	vol_dend [dm ³]	vol_fusto [dm ³]	vol_rami [dm ³]	ps_epigeo [kg]	ps_fusto [kg]	ps_rami [kg]	ps_fascine [kg]	ps_residui [kg]
18	105.4	80.2	37.2	152.0	85.5	3.4	41.3	21.7
19	151.3	110.7	40.6	187.5	93.8	18.1	46.2	29.4
20	198.4	148.3	48.1	223.7	103.3	32.9	51.4	36.2
21	240.8	181.6	59.2	260.5	114.0	47.7	56.8	42.0
22	284.7	211.3	73.4	298.0	125.8	62.5	62.5	47.1
23	328.2	238.0	89.2	336.3	136.9	77.4	68.5	51.5
24	371.4	262.2	109.2	375.4	153.1	92.3	74.7	55.3
25	414.5	284.5	130.0	415.5	166.3	107.3	81.2	56.7
26	457.6	305.3	152.3	456.6	184.7	122.4	88.0	61.6
27	501.0	325.2	175.8	498.8	202.0	137.5	95.0	64.2
28	544.9	344.8	200.3	542.1	220.4	152.9	102.3	66.5
29	589.4	363.8	225.5	586.7	239.6	168.5	109.9	68.7
30	634.7	383.4	251.4	632.7	259.6	184.3	117.7	70.6
31	681.3	403.6	277.7	680.1	280.9	200.5	125.8	72.8
32	729.2	424.7	304.4	729.1	302.8	217.2	134.2	75.0
33	778.7	447.1	331.6	779.7	325.4	234.3	142.8	77.2
34	830.2	471.0	359.1	832.0	348.8	252.0	151.7	79.5
35	883.9	496.7	387.2	886.3	372.9	270.5	160.8	82.1
36	940.2	524.4	415.8	942.5	397.6	289.8	170.2	84.9
37	999.3	554.2	445.2	1000.8	422.9	310.0	179.9	87.9
38	1061.7	586.3	475.4	1061.3	448.6	331.3	189.9	91.4
39	1127.7	620.8	506.9	1124.1	475.1	353.8	200.1	95.2
40	1197.5	657.8	539.7	1189.4	501.6	377.7	210.5	99.4
41	1271.7	697.4	574.4	1257.3	529.0	403.1	221.3	104.0
42	1350.7	739.6	611.1	1327.8	556.4	430.1	232.3	109.0
43	1434.7	784.3	650.4	1401.3	584.1	459.0	243.6	114.6
44	1524.3	831.6	692.7	1477.6	612.0	489.9	255.1	120.6
45	1620.0	881.5	738.5	1557.2	640.0	523.1	268.0	127.2
46	1722.0	933.7	788.3	1639.9	668.1	558.7	279.0	134.2
47	1831.0	988.3	842.7	1726.1	696.2	596.9	291.3	141.8
48	1947.4	1045.0	902.4	1815.9	724.2	637.9	303.9	149.6
49	2071.6	1103.6	968.0	1909.3	752.1	682.0	316.8	158.4
50	2204.3	1164.1	1040.3	2006.7	779.9	729.4	329.9	167.5
51	2345.9	1226.1	1119.9	2108.0	807.3	780.3	343.3	177.1
52	2497.0	1289.3	1207.7	2213.6	834.5	835.1	357.0	187.1
53	2658.1	1353.5	1304.6	2323.5	861.2	893.6	370.9	197.6
54	2829.8	1418.4	1411.4	2437.9	887.4	956.9	385.1	208.5
55	3012.6	1483.8	1529.0	2557.1	913.1	1024.6	399.8	219.9
56	3207.2	1548.7	1658.5	2681.1	938.1	1097.1	414.3	231.6
57	3414.2	1613.3	1800.9	2810.2	962.5	1174.8	429.3	243.6
58	3634.2	1678.9	1957.2	2944.5	986.0	1258.0	444.5	255.9
59	3867.8	1739.2	2128.6	3084.2	1008.7	1346.9	460.0	268.5
60	4115.7	1799.5	2316.1	3229.5	1030.4	1442.0	475.8	281.3
61	4378.5	1857.4	2521.0	3380.7	1051.1	1543.5	491.9	294.2
62	4656.9	1912.3	2744.6	3537.8	1070.7	1651.7	508.2	307.3
63	4951.7	1963.8	2988.0	3701.1	1089.0	1767.0	524.8	320.4
64	5263.5	2010.7	3252.7	3870.9	1106.0	1889.8	541.6	333.4
65	5593.0	2053.0	3540.0	4047.2	1121.7	2020.4	558.7	346.4
66	5941.0	2089.7	3851.3	4230.3	1135.9	2159.2	576.1	359.2
67	6308.3	2120.1	4188.1	4420.5	1148.5	2306.5	593.7	371.7
68	6695.5	2143.8	4551.9	4617.9	1159.4	2462.6	611.6	384.0
69	7103.5	2159.3	4944.2	4822.7	1168.6	2628.5	629.8	395.8

Tabella 40 – Tavola ad un'entrata per la lecceta di *su Monte*, Seneghe (OR)

4.4.2 Coefficienti tradizionali per la stima diretta

Per una migliore comprensione si ritiene necessario richiamare alcuni concetti (in parte già affrontati nella sezione introduttiva) che riguardano i metodi di stima del volume arboreo. La totalità dei metodi di stima del volume di singoli alberi in piedi o di interi soprassuoli boschivi si basa direttamente o indirettamente sulla soluzione della equazione generale di cubatura degli alberi in piedi:

$$V = (\pi / 4 D^2) H F = G H F \quad \text{in cui:}$$

D è il diametro con corteccia misurato a 1.30 m da terra;

G è detta area basimetrica e corrisponde alla superficie della sezione trasversale a 1.30 m;

H è l'altezza totale (detta altezza dendrometrica);

F è il coefficiente di riduzione.

Risulta evidente che il termine fondamentale da cui dipende l'errore di stima rimane il coefficiente di riduzione (F). Il prodotto G * H fornisce il volume cilindrometrico di riferimento (calcolabile con facilità misurando sull'albero in piedi il diametro 1.30 m e l'altezza). La parte del fusto inferiore alla sezione misurata ad 1.30 m possiede un volume maggiore della corrispondente parte del cilindro. La parte superiore del fusto, per effetto della rastremazione, ha invece un volume inferiore a quello della corrispondente parte del cilindro di confronto. Da questo si deduce che il coefficiente di riduzione non è un'espressione della forma del fusto, ma è solamente un elemento di stima del volume.

Il coefficiente di riduzione del volume (o dendrometrico) considera tutta la parte arborea fuori terra:

$$F = V \text{ dendrometrico} / V \text{ cilindro}$$

Il coefficiente di riduzione fusto intero (cormometrico) prende in considerazione solo il volume del fusto svettato (si esprime in riferimento al diametro minimo di svettatura e all'altezza a cui si trova tale diametro, detta altezza cormometrica).

$$F = V \text{ cormometrico} / V \text{ cilindro}$$

I coefficienti di riduzione variano in funzione del diametro, dell'altezza dell'albero e della forma, la quale a sua volta è influenzata dal portamento. Infatti, l'espansione della chioma e la sua altezza di inserzione sul fusto influenzano il coefficiente dendrometrico

ma, influenzando direttamente sul grado di rastremazione del fusto, anche il coefficiente cormometrico.

Il coefficiente dendrometrico e quello cormometrico sono stati calcolati sulla base dei dati sperimentali misurati sui 46 alberi modello grandi; i risultati delle statistiche descrittive sono riportati nella Tabella 41.

Dopo questa breve introduzione circa i concetti basilari, si produce una riflessione più approfondita sul classico procedimento di stima del volume dei fusti arborei basato sulla modifica del denominatore del coefficiente di riduzione F .

4.4.3 Riflessioni intorno al classico procedimento adottato in dendrometria per la stima del volume dei fusti arborei.

I fusti degli alberi presentano forma irregolare, diversa tra individui distinti e mutevole nel tempo con lo sviluppo della pianta. Di conseguenza, la stima del volume del fusto comporta sempre importanti approssimazioni.

Il procedimento classico della dendrometria si sviluppa in due passaggi.

Il primo consiste nell'approssimare il volume del fusto a quello di un cilindro di pari altezza e sezione derivata dal diametro del fusto misurato ad altezza del petto d'uomo, convenzionalmente a 1.30 m da terra. Al secondo passaggio il volume (detto "cilindrometrico", strutturalmente approssimato per eccesso) viene ridotto al volume reale applicando un fattore adimensionale empiricamente valutato detto *coefficiente di riduzione F* (Figura 48).

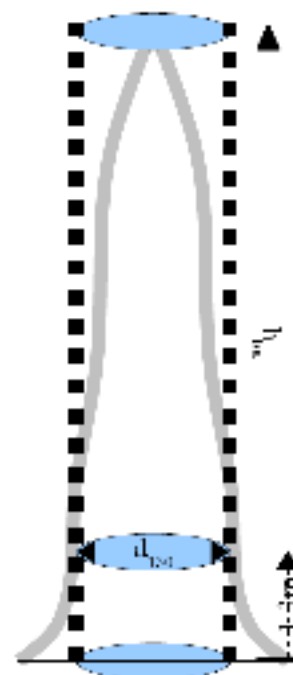


Figura 48 – Rappresentazione grafica volume cilindrometrico convenzionale

La pratica evidenza che il valore di F , pur soggetto ad ampie oscillazioni, in mancanza di informazioni più dettagliate, è approssimabile a 0.5.

La scomposizione della stima in due passaggi di questo tipo risponde ad una logica analitica razionale: noti il diametro del fusto a petto d'uomo e la sua altezza totale, il

livello del volume del fusto è determinato (e il volume “cilindrometrico” lo esprime); l’approssimazione successiva sintetizza l’esperienza empirica già accumulata in relazione alla specifica categoria cui il fusto appartiene.

In realtà, se pure tale procedimento trova applicazione in molte condizioni operative, lo sviluppo dei sistemi di cubatura (stima del volume) dei fusti arborei ha, in genere, rifuggito da questa scomposizione. Si osserva infatti che la variabilità dei valori assunti dal coefficiente di riduzione F , determinato sperimentalmente dal rapporto tra il volume reale effettivamente misurato ed il corrispondente volume cilindrometrico, mal si presta allo sviluppo di convincenti e rassicuranti interpolazioni quali quelle che si producono stimando l’ovvio, ovvero il valore del volume reale dei fusti come funzione diretta delle due dimensioni note: d_{130} e h_{tot} . Di seguito è riportata l’equazione del coefficiente di riduzione ordinario.

$$V_{cyl} = \frac{\pi}{4} * d_{130}^2 * h_{tot}$$

$$F = \frac{V_{reale}}{V_{cyl}}$$

Volendo, al contrario, affinare le capacità di stima del volume reale dei fusti, è ragionevole ed opportuno scindere il problema separando l’ovvio, la prima approssimazione, il livello dimensionale che le misure note esplicitano, dalla componente non ovvia, la seconda approssimazione. In questo modo è possibile concentrare l’indagine sulla componente non ovvia.

Affinando il ragionamento secondo questa logica si osserva che, come è ben noto e geometricamente intuibile, il tradizionale volume cilindrometrico, avendo sezione definita sulla misura di un diametro misurato ad altezza assoluta fissa (1.30 m da terra), costituisce un’approssimazione di carattere variabile in funzione dell’altezza totale assoluta del fusto stesso: per un albero alto 2.6 m la sezione a petto d’uomo rappresenta la sezione mediana, per uno alto 13 m, rappresenta la sezione a un decimo dell’altezza totale.

Questo effetto, nella logica di scindere la stima in due approssimazioni successive, la prima di carattere ovvio, semplicemente geometrica e la seconda tesa a consentire di andare oltre, costituisce un difetto: la seconda approssimazione dipende ancora, strutturalmente, geometricamente, dalle dimensioni note, segnatamente dall’altezza.

Allo scopo di correggere tale difetto il prof. Scotti ha proposto di impostare in modo leggermente diverso la prima approssimazione.

La dendrometria insegna che, per la cubatura di fusti interi, il ricorso alla formula detta della *sezione mediana* (basata sulla sezione valutata a metà della lunghezza del tronco), pur richiedendo una sola misura diametrica, costituisce un metodo di stima affidabile e robusto.

Ora, noti il diametro del fusto a 1.30 m da terra e la sua altezza totale, è piuttosto elementare determinare la proiezione del diametro a petto d'uomo da 1.30 m da terra ad un'altezza pari a metà dell'altezza totale (Figura 49).

Nell'ipotesi più semplice e robusta, tale *diametro ridotto* si determina per interpolazione lineare tra la misura a petto d'uomo (d_{130} ; 1.3 m) e l'apice del fusto (0 cm; h_{tot}). Di seguito è riportata l'equazione del coefficiente di riduzione standardizzato.

$$d_r = d_{130} * \frac{h_{tot}}{2 * (h_{tot} - 1.30)}$$

$$v_{cil.stz} = \frac{\pi}{4} * d_r^2 * h_{tot}$$

$$F_{stz} = \frac{v_{reale}}{v_{cil.stz}}$$

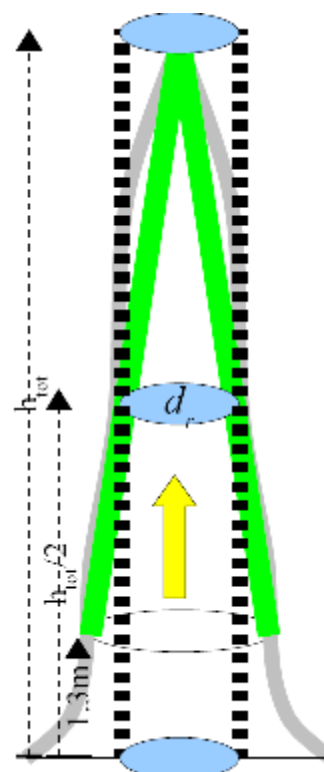


Figura 49 – Rappresentazione grafica volume cilindrometrico standardizzato

Il *diametro ridotto* e l'altezza totale definiscono un cilindro il cui volume è detto "cilindrometrico standardizzato" poiché il suo rapporto con il volume reale non è geometricamente condizionato.

Il volume cilindrometrico standardizzato costituisce, in media, un'approssimazione per difetto del volume reale. Il diametro ridotto rappresenta infatti, nella generalità dei casi di interesse operativo, una sottostima del diametro a metà della lunghezza del tronco. Dal rapporto tra il volume reale del tronco e quello cilindrometrico standardizzato si ricava, parallelamente al coefficiente di riduzione ordinario, il coefficiente di riduzione standardizzato: F_{stz}

Le prime analisi condotte sulla base dei campioni di fusti arborei rappresentati dagli “alberi modello grandi” confermano che F_{stz} presenta valori non molto superiori all’unità e che la loro variabilità non risulta associata all’altezza totale.

Per costruzione, il rapporto tra il volume cilindrometrico standardizzato e quello ordinario è variabile in funzione dell’altezza del fusto (Figura 50).

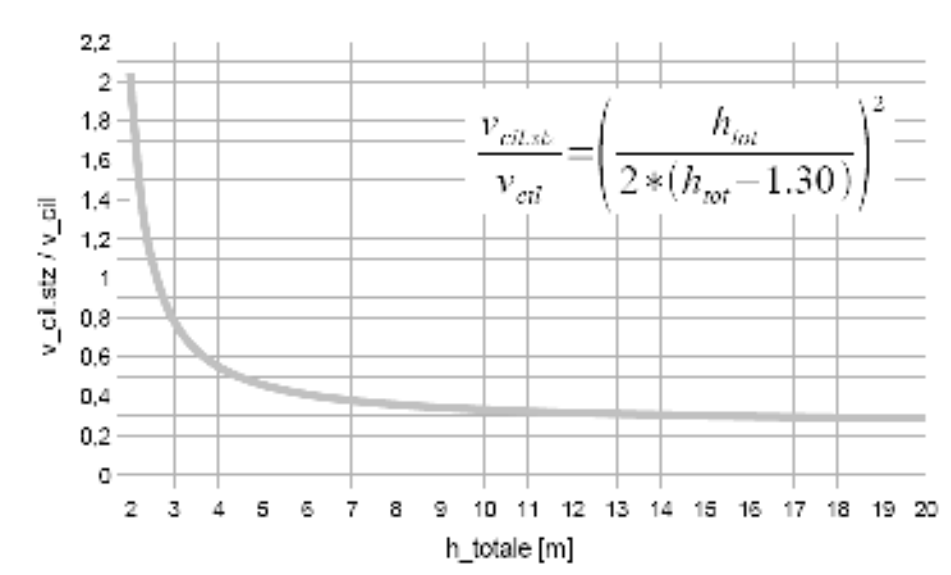


Figura 50 – Variazione del rapporto tra il volume cilindrometrico standardizzato e quello ordinario

In realtà, dal punto di vista dell’indagine proposta, la variabilità di tale rapporto è incisiva solo per altezze relativamente limitate. Si osserva infatti che la frazione tende asintoticamente al valore di 1/4 e che, per altezze superiori a 15 m, è già praticamente costante.

Ai fini dell’analisi di dettaglio sui fattori che influenzano, a parità di diametro ed altezza, il volume del fusto, il ricorso al coefficiente di riduzione standardizzato (in sostituzione di quello ordinario) è quindi tanto più efficace tanto più è limitata l’altezza dei fusti considerati.

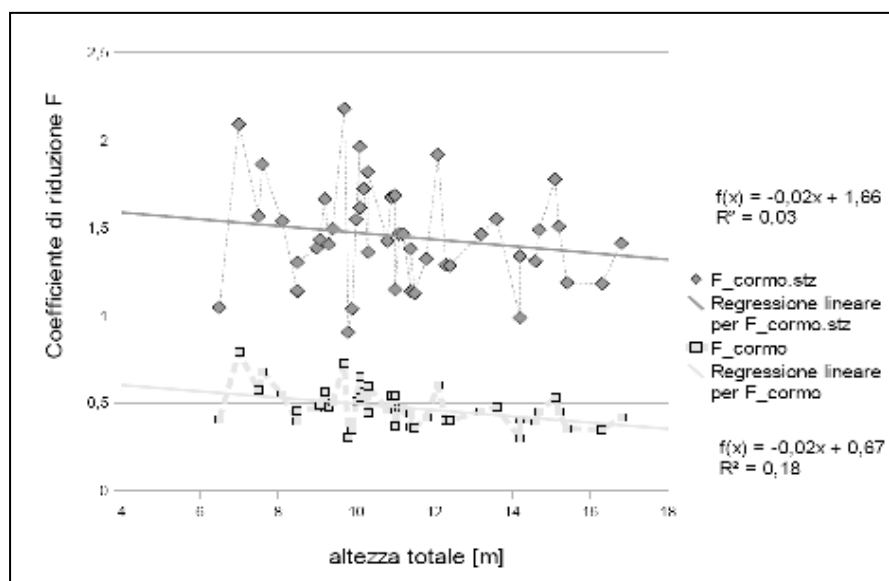


Figura 51-Confronto tra coefficiente di riduzione ordinario e standardizzato

Nel caso in esame, essendo l'altezza dei campioni considerati contenuta nell'intervallo 6-15 m, ci si attende solo una limitata efficacia operativa dal ricorso al coefficiente di riduzione standardizzato; già l'evidente parallelismo tra le spezzate e le curve di interpolazione, in funzione dell'altezza, dei valori del coefficiente ordinario e di quello standardizzato (Figura 51) non alimenta grandi aspettative sotto il profilo pratico per questi dati. Scopo dell'esercizio è principalmente di proporre un metodo e di mostrare come procedere alla sua valorizzazione e valutazione.

4.4.4 Coefficienti non convenzionali per la stima diretta

Viste le considerazioni svolte nel paragrafo precedente, è stato eseguito il calcolo dei coefficienti dendrometrico e cormometrico standardizzati (visibile in Tabella 41); sulla base dei dati dei 46 AMG si possiede uno strumento che in prima analisi può fornire una stima del volume arboreo di un dato numero di alberi modello.

	F_cormo	F_dendro	F_cormo_stz	F_dendro_stz
Media	0.4738	0.7775	1.4494	2.3908
Errore standard	0.0157	0.0290	0.0427	0.0897
Mediana	0.4569	0.7296	1.4282	2.2813
Deviazione standard	0.1064	0.1969	0.2893	0.6083
Minimo	0.2985	0.4679	0.9031	1.3287
Massimo	0.7885	1.3361	2.1791	4.4107
Conteggio	46	46	46	46

Tabella 41 – Coefficienti di riduzione misurati: statistiche descrittive

Il passo successivo ha comportato la stima del volume dendrometrico e cormometrico del campione di AMG (calcolato come somma dei singoli volumi) ottenuto utilizzando i rispettivi coefficienti tradizionali e i nuovi coefficienti non convenzionali; quindi, i volumi così ottenuti sono stati messi a confronto con quelli misurati.

La tabella 42 mostra l'esito di questo confronto; utilizzando F cormo_stz rispetto all' F cormo la stima migliora sensibilmente (circa il 5%) mentre non offre un buon risultato l'utilizzo dell'F dendro_stz..

	V_cil	V_cil_r	F_convenz	F_standz	V_stim	V_misurato	V_mis - V_stim	%
F_cormo		14984.01	0.474		22753.16	20754.58	-1998.584	-9.630
F_cormo_stz	48025.55			1.449	21718.27	20754.58	-963.689	-4.643
F_dendro		14984.01	0.777		37337.81	39667.78	2329.972	5.874
F_dendro_stz	48025.55			2.391	35823.62	39667.78	3844.154	9.691

Tabella 42 –Confronto stima volume utilizzando strumento classici e non convenzionali

L'analisi ha quindi confrontato il coefficiente F_cormo con F_cormo_stz: questo confronto è stato realizzato mediante l'uso delle regressioni, in cui il volume del fusto è stato posto in relazione con, rispettivamente, il volume cilindrometrico e il volume cilindrometrico standardizzato.

Considerando (vedi Tabella 43) il coefficiente di determinazione del volume del fusto sul volume del cilindro di riferimento, questo migliora utilizzando il volume del cilindro standardizzato; ne consegue che la validità della scelta del coefficiente cormometrico standardizzato come strumento migliore di stima è confermata.

<i>Modello</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Significatività coefficiente</i>	<i>R-squared adj</i>
V_Fusto VS V_cilindrom	0.4049	***	0.9787
V_Fusto VS V_cilind_stz.	1.3356	***	0.9817

Tabella 43 –Risultato regressioni

Successivamente, utilizzando la *stepwise regression*, si è cercato di selezionare una funzione basata sulle variabili diametro e altezza (e loro combinazioni) che possa esprimere il coefficiente cormometrico e quello cormometrico standardizzato. Il risultato di tale analisi (per brevità omissso dal presente paragrafo) consente di affermare che F_cormo convenzionale non è costante ma è significativamente dipendente dal prodotto di $d * h$, tuttavia il coefficiente di determinazione della regressione migliore è

infimo (R^2 adj. pari a 0.17). Il coefficiente cormometrico standardizzato invece è solo debolmente influenzato dal diametro (R^2 adj. pari a 0.02) ma nella pratica si può considerare costante.

Si ricorda che l'utilizzo dell'informazione di una variabile ausiliaria q , quale il volume cilindrometrico standardizzato, (un attributo correlato a quello dell'attributo oggetto di interesse ossia la variabile principale $x = \text{Vol. fusto}$), può consentire di procedere alla stima dei parametri statistici della variabile principale (volume fusto) in modo più efficiente (Corona, 2000). In questo caso la variabile ausiliaria q e la variabile principale x risultano correlate quindi si può procedere tramite la stima per regressione.

Quando la relazione statistica tra la variabile ausiliaria q e la variabile principale x è tale da assumere graficamente la forma di una linea retta passante per l'origine, e la varianza di x per i vari livelli di q aumenta all'aumentare di q (eteroschedasticità della varianza di x), si può procedere ad una stima del rapporto. Si distinguono due casi:

- se la varianza di x , per vari livelli di q , è proporzionale a q si può procedere ad una stima per rapporto tra le medie delle due variabili;
- se la varianza di x , per i vari livelli di q , è proporzionale a q^2 si può procedere ad una stima sulla base della media dei rapporti tra le due variabili.

Viste le considerazioni esposte e ricordando le analisi già eseguite, si è proceduto alla valutazione di come varia la variabilità del fusto per i diversi livelli di volume cilindrometrico standardizzato.

L'analisi è stata eseguita su R (vedi codice su Box 14 sezione Appendice); sono state create delle classi di volume standardizzato attraverso la funzione *cut*, che si occupa di raggruppare i dati relativi ad un vettore in intervalli (*breaks*, gli estremi degli intervalli). Create le classi, è stata calcolata la varianza del volume del fusto per i diversi livelli (classi) di volume cilindrometrico standardizzato. Quindi si è creata la Figura 52 dove la varianza fusto è espressa in funzione del valore centrale della classe di volume cilindrometrico standardizzato. Dalla lettura della stessa si evince chiaramente che si è in presenza di un andamento parabolico per cui si rientra nel caso due. Si può procedere ad una stima sulla base della media dei rapporti tra le due variabili. La media del coefficiente cormometrico standardizzato è lo stimatore migliore.

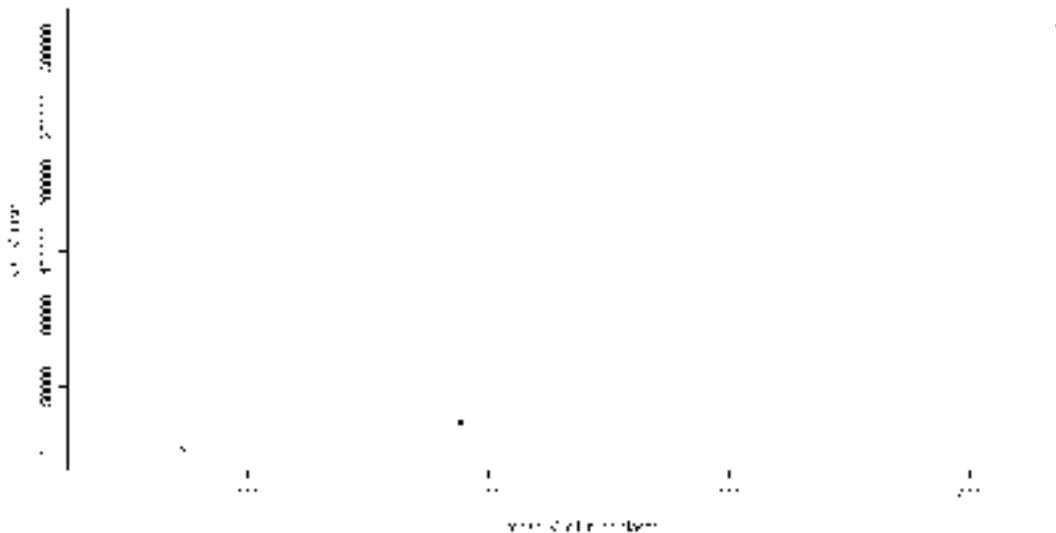


Figura 52 – Andamento della varianza volume fusto in funzione valore medio classi di volume cilindrometrico standardizzato, visibile andamento parabolico

4.4.5 Strumenti poco noti per la stima diretta: “la partizione ricorsiva”

L’analisi prosegue con l’obiettivo di valutare se la variabilità del coefficiente di riduzione cormometrico standardizzato è legata significativamente a qualche variabile tra quelle misurate e presentate nella sezione di esplorazione dati.

Lo strumento individuato per compiere tale verifica è il “*regression tree*” attraverso l’utilizzo del programma R (necessità di un pacchetto opzionale denominato *rpart*).

In breve, assumendo come variabile obiettivo (target) il coefficiente cormometrico standardizzato, assumono il ruolo di potenziali predittori le altre variabili, misurate o rilevate (quantitative o qualitative). Lo scopo dell’analisi è di individuare dei gruppi di osservazioni che presentano valori della variabile target massimamente diversi tra loro e omogenei al loro interno.

L’analisi procede iterando una procedura concettualmente piuttosto semplice. Per ciascuno dei valori assunti da ogni predittore, utilizzando tale valore come soglia (*split* = divisione), l’insieme delle osservazioni viene suddiviso in due gruppi e si memorizza

la performance della suddivisione. Alla fine si sceglie la suddivisione che ha evidenziato la migliore performance. Nei gruppi derivati la procedura si reitera fino al soddisfacimento dei criteri di conclusione. Il risultato è rappresentato dall'albero delle "decisioni" da assumere per stabilire il valore di stima della variabile target, per ogni possibile osservazione (o combinazione legittima di valori dei predittori). A partire dalla "radice", ogni nodo è costituito da test del tipo "il valore del predittore i-esimo è minore del valore soglia k-esimo". In caso affermativo l'osservazione viene assegnata al primo sotto-gruppo, altrimenti al secondo sotto-gruppo. Se si tratta di un nodo terminale l'osservazione è classificata e si assume come valore di stima della variabile target la media dei valori osservati nel gruppo originario, altrimenti si ripresenta un test e il procedimento si reitera fino a raggiungere un nodo terminale.

La procedura è flessibile e robusta, permette di valutare in modo piuttosto rapido ed efficace l'importanza relativa dei potenziali predittori e le interazioni tra i predittori che risultano contribuire alla stima. I risultati dell'analisi sul coefficiente di riduzione standardizzato (Box 15 sezione Appendice) mostrano, ad esempio, che di tutti i potenziali predittori considerati (d, h, età, hr_ins_ramo_max, dr_ramo_MAX, ang_min, ang_min_c, ang_med_c, V_cil_r) solo due incidono in qualche misura sulla stima:

- in primo luogo l'altezza relativa del ramo maggiore (hr_ins_ramo_max), espressione anche del livello di concorrenza laterale che il fusto ha subito fino a quando ha impostato la sua chioma attuale;
- secondariamente, ang_min_c, una variabile espressione della disposizione delle chiome attualmente concorrenti del fusto considerato.

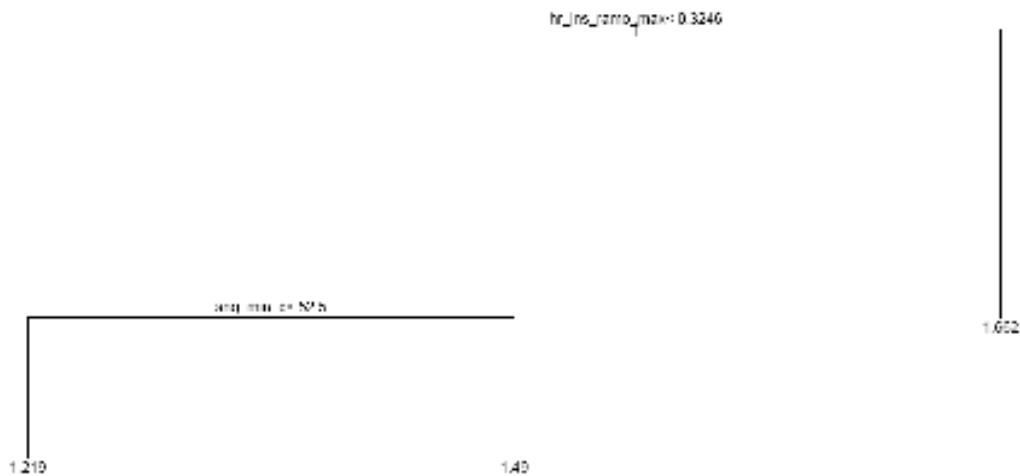


Figura 53 – Schema albero relativo F cormometrico standardizzato

La rappresentazione del risultato in forma di grafico ad albero “rovesciato” (Figura 53) evidenzia la gerarchia dei predittori e consente di capire immediatamente come si utilizza lo strumento per ottenere una stima.

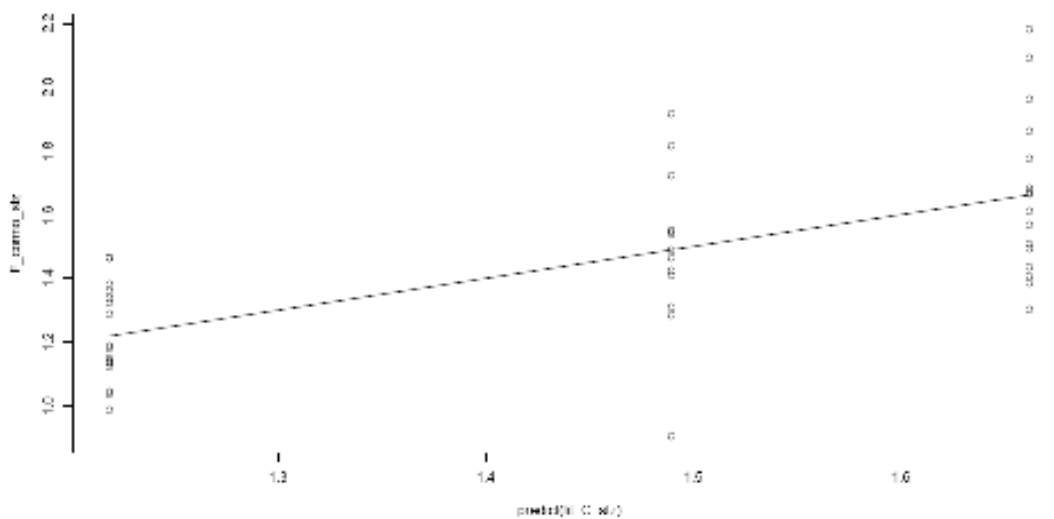


Figura 54 - Valore di F corno relativo ai singoli gruppi identificati

In modo del tutto analogo a come, nelle consuete analisi di regressione, si opera per valutare come e quanto il “modello” sviluppato interpola le osservazioni disponibili, anche in questo caso si osserva la loro dispersione attorno alla diagonale principale in un grafico in funzione del valore stimato (Figura 54). La retta rappresenta il “modello”; si osserva che, se esiste un minimo di separazione tra i valori di F del primo e dell’ultimo gruppo, tuttavia, l’affidabilità del modello quale strumento di stima appare piuttosto

limitata. Rimane qualitativamente interessante il fatto che i caratteri dendrometrici consueti non risultano contribuire alla stima e che, al loro posto, si segnalano due parametri interpretabili come indicatori dei livelli di concorrenza passata ed attuale del fusto esaminato, due variabili relativamente semplici da rilevare e quindi da inserire nei protocolli da seguire per effettuare stime. Il primo richiede di verificare se il ramo di maggiori dimensioni si inserisce sul fusto ad altezza inferiore ad un terzo dell'altezza totale, il secondo di valutare se i fusti concorrenti sono disposti a formare un angolo, con vertice sul fusto considerato, più piccolo dell'angolo retto.

Tutto questo ha consentito di confrontare il volume del fusto stimato con un valore medio di F cormometrico standardizzato, e il volume del fusto ottenuto utilizzando il valore medio di F cormometrico standardizzato dei diversi gruppi distinti con la procedura di regression tree. I risultati sono sintetizzati nella tabella 44.

	Volume cilindro	Volume cilin_stz	F convenz	F standz	Volume stimato	Volume misurato	Differenza V_mis - V_stim	%
F_corno	48025.5		0.474		22753.2	20754.6	-1998.6	-9.6
F_corno_stz		14984.0		1.449	21718.3	20754.6	-963.7	-4.6
F_corno_reg_tree	48025.5		*		20715.5	20754.6	39.1	0.2

Tabella 44 - Stima del volume del fusto utilizzando i diversi coefficienti cormometrici

L'efficacia di questo strumento nel costruire dei gruppi relativamente omogenei di AMG è confermata, in relazione all'indagine eseguita per il coefficiente F_corno_stz, dall'esistenza di una certa relazione tra gruppi creati dall'analisi e le provenienze geografiche degli AMG (caratteristiche stazionali e dendrometriche, trattamenti selvicolturali subiti, passaggio di incendi, etc.); a questo proposito si rimanda a quanto esposto nel paragrafo relativo alla descrizione dell'area di studio.

Confortati da questi risultati, si è ampliata ulteriormente l'analisi verificando la possibilità di inserire la variabile *altezza inserzione ramo principale* nell'equazione di stima diretta della fitomassa epigea totale. Lo scopo che si intendeva perseguire era quello di valutare se effettivamente tale variabile contribuisse a migliorare l'accuratezza della stima. Il procedimento di analisi è riportato nel Box 16 (sezione Appendice). La procedura automatica basata sulla *stepwise regression* ha individuato la variabile oggetto di approfondimento come maggiormente esplicativa rispetto alla variabile

classica altezza ipsometrica (che non compare neppure nel modello w_{tot} di migliore capacità predittiva). Il confronto tra le equazioni è mostrato in Tabella 45.

$$W_{tot} = \beta_0 + \beta_1(d) + \beta_4(d^4)$$

$$W_{tot} \ h_ins1 = \beta_0 + \beta_1(d) + \gamma(h_ins) + \beta_4(d^4)$$

$$W_{tot} \ h_ins2 = \beta_1(d) + \gamma(h_ins) + \beta_4(d^4)$$

Equazione	Coefficienti			F	R ² adj.	
		estimate	Std. error			Signif.
W_{tot}	β_0	-4.412e+02	1.061e+02	***	669.9	0.9675
	β_1	3.217e+01	3.947e+00	***		
	β_4	1.343e-04	1.157e-05	***		
$W_{tot} \ h_ins1$	β_0	-2.552e+02	1.317e+02	.	488.9	0.9702
	β_1	2.973e+01	3.936e+00	***		
	γ	-4.577e+02	2.064e+02	*		
	β_4	1.365e-04	1.112e-05	***		
$W_{tot} \ h_ins2$	β_1	2.288e+01	1.788e+00	***	892.9	0.9831
	γ	-7.124e+02	1.641e+02	***		
	β_4	1.504e-04	8.714e-06	***		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tabella 45 - Equazioni selezionate in funzione di diametro, altezza inserzione ramo e altezza ipsometrica.

La funzione w_{tot} risultava essere quella più accurata, selezionata a partire da un polinomio di quarto grado tra la variabile dipendente considerata ed una serie di combinazioni di variabili indipendenti (diametro e altezza ipsometrica). L'inserimento nel polinomio di origine della variabile h_ins ha consentito di ottenere un modello (ulteriormente semplificabile) che migliora l'accuratezza nella stima della fitomassa arborea epigea, principale variabile oggetto di studio.

Le Figure 55 e 56 mostrano la distribuzione dei residui in funzione dei valori attesi per i modelli di stima del peso secco epigeo ottenuti con l'inserimento della variabile altezza inserzione ramo ($W_{tot} \ h_ins2$ e $W_{tot} \ h_ins2$); per quanto riguarda l'analogo grafico relativo al modello (W_{tot}) si rimanda alla Figura 47.

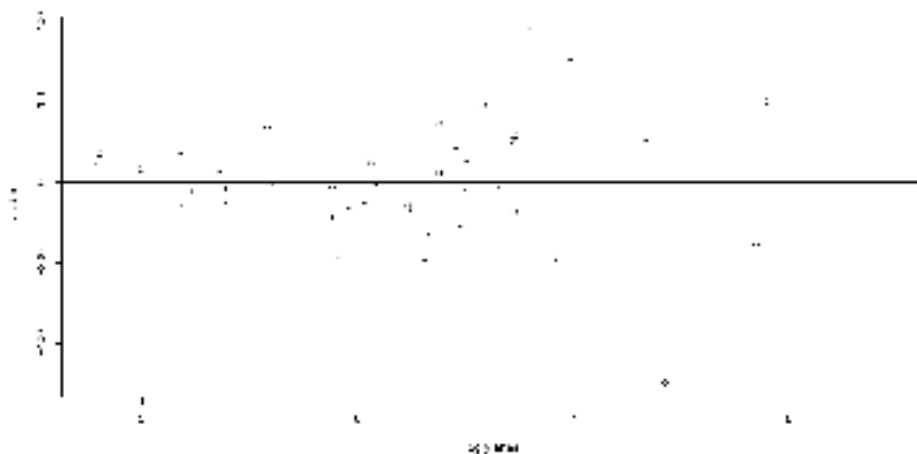


Figura 55 - Distribuzione residui in funzione dei valori attesi del peso secco epigeo (espressi con log()) relativi al modello Wtot h_ins1

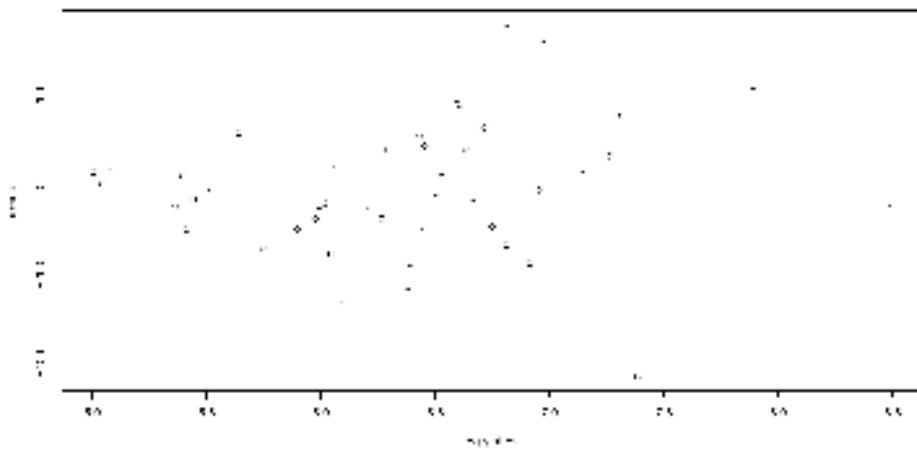


Figura 56 - Distribuzione residui in funzione dei valori attesi del peso secco epigeo (espressi con log()) relativi al modello Wtot h_ins2

Infine, per fornire un ulteriore apporto conoscitivo che contribuisca ad ampliare la disponibilità di informazioni utili alla stima della fitomassa delle formazioni forestali mediterranee, si è proceduto, sul data set originale, al calcolo di due coefficienti (BEF2 e ABEF) di espansione/conversione presentati in letteratura.

Il BEF2 viene utilizzato in una serie di equazioni per il calcolo degli stock di carbonio, nei casi in cui sia noto il volume commerciale (GPG-LULUCF in IPCC, 2003).

Un secondo coefficiente, o meglio, fattore di espansione della biomassa epigea (ABEF) è stato definito secondo quanto esposto da Sabaté et al. (2003) (si veda il Box 17).


```

# BEF2 = PESO SECCO EPIGEO TOT / VOLUME COMMERCIALE * DENSITA'
## vol. comm. = vol. fusto + volume rami = vol. dendrometrico
## vol. dendrometrico * densita' = peso secco fusto + peso secco rami
# BEF2 = peso secco epigeo / (peso secco fusto + peso secco rami)

# ABEF = PESO SECCO EPIGEO TOTALE / VOLUME FUSTO

```

Box 17 – Definizione dei coefficienti di espansione della biomassa calcolati

La tabella 45 mostra le statistiche descrittive relative ai coefficienti BEF2 e ABEF calcolati sul campione dei 46 AMG. Il valore medio ottenuto per il BEF2 è pari a 1.458, non distante dal valore fornito dal GPG-LULUCF e pressoché uguale a quello calcolato da Federici (2004) per un popolamento simile a quello oggetto di studio (vedi Tabella 16). L'ABEF medio relativo ai 46 AMG è pari a 1.69; il suo confronto con il valore medio esposto da Sabaté (2003) non risulta soddisfacente (1.28); a questo proposito è necessario considerare che le caratteristiche dendrometriche del campione analizzato dall'Autore sono assai differenti da quelle oggetto di indagine.

	<i>BEF2</i>	<i>ABEF</i>
Media	1.459	1.696
Errore standard	0.019	0.052
Mediana	1.456	1.641
Deviazione standard	0.129	0.351
Minimo	1.245	1.134
Massimo	1.817	2.432
Conteggio	46	46

Tabella 46 - Statistiche descrittive sui coefficienti BEF2 e ABEF

4.5 Analisi dei costi delle operazioni di raccolta dati

Un'analisi dei costi (intesi in termini di tempo impiegato) delle operazioni di raccolta dati è stata inserita nella presente relazione con l'obiettivo di cercare di quantificare lo sforzo economico necessario per eseguire questa tipologia di indagini scientifiche. L'analisi è stata basata sull'osservazione del cantiere di lavoro e sulla descrizione dettagliata delle singole fasi in cui era articolato. Questo ha consentito di stimare la capacità lavorativa e quindi la produttività giornaliera della squadra di rilevatori.

La squadra che ha proceduto ad eseguire i rilievi sugli AMG era composta da:

- un tecnico responsabile delle operazioni (per l'individuazione dell'AMG ed il controllo del rispetto di tutte le fasi del protocollo di rilievo);
- un tecnico che collaborava ai rilievi (misure, raccolta dati, prelievo e trattamento dei campioni);
- un operaio motoseghista (specializzato) dotato di due motoseghe;
- un operaio di comprovata esperienza per l'allestimento dell'assortimento fascina;
- un operaio di supporto generico alle operazioni di campagna, responsabile dell'automezzo.

Il cantiere allestito per l'individuazione e l'abbattimento del fusto e la misura di tutte le variabili necessarie su ogni singolo AMG ha previsto fasi distinte:

- individuazione sulla cartografia tecnica dell'area di saggio e, all'interno di questa, dell'individuo selezionato da abbattere;
- raggiungimento del sito (ripulitura di una pista per il transito dell'automezzo);
- preparazione della zona circostante per procedere in sicurezza all'abbattimento e all'allestimento (taglio e asportazione della vegetazione che poteva essere d'intralcio alle operazioni);
- taglio sommario, sul fusto atterrato, di una parte dei rami principali per consentire la misura di una serie di variabili dendrometriche (circonferenze fusto, diametro ramo principale ecc);
- completa sramatura e sezionatura in topi del fusto e separazione del cimale;
- selezione del materiale legnoso in fusto, rami e ramaglia indistinta;

- allestimento della ramaglia indistinta per selezionare il materiale per preparare le fascine;
- allestimento dei residui in fasci per consentirne la successiva operazione di pesata;
- misura del peso fresco complessivo di ciascuno dei 4 assortimenti considerati (fusto, rami, fascina, residui);
- allestimento delle cataste per la misura del volume sterico, previa depezzatura del materiale legnoso in pezzi lunghi circa 50-60 cm e spaccatura longitudinale dei topi più grossi;
- riordino e inserimento nel database dei dati raccolti a fine giornata.

La tabella 46 sintetizza la capacità lavorativa della squadra di rilievo, espressa in termini di quantità di volume, fitomassa e numero di *Alberi Modello Grandi* allestiti e misurati per giornata (circa 7 ore di attività).

	Volume dendrometrico	Peso Fresco epigeo totale	Peso Secco epigeo totale	AMG
	dm³	kg	kg	n
Media	1820.6	2803.8	1685.2	2.1
Errore standard	299.6	330.5	200.4	0.3
Mediana	1468.9	2455.5	1480.2	2.0
Deviazione standard	1405.4	1550.1	939.8	1.2
Minimo	386.3	810.0	484.7	1.0
Massimo	7094.4	8019.0	4848.1	5.0
Somma	40054.1	61684.5	37073.9	47.0
Conteggio	22	22	22	22

Tabella 47 – Capacità lavorativa squadra

I fattori che principalmente hanno inciso sulla capacità lavorativa sono stati:

- la morfologia (l'accidentalità, le pendenze elevate, la distanza dell'area di campionamento dalle piste hanno reso gli spostamenti e le operazioni di taglio estremamente difficoltose);
- la vegetazione (operare in presenza di vegetazione arbustiva o rovi ha influito negativamente sui tempi di rilievo, di taglio e allestimento);
- le condizioni meteorologiche (inevitabilmente il vento, la pioggia e il gelo hanno condizionato lo svolgimento del lavoro).

5. CONCLUSIONI

Il Protocollo di Kyoto (PK) riconosce alle foreste, per la loro capacità di assorbire anidride carbonica, un ruolo rilevante nelle strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici.

La stima accurata del volume e della fitomassa arborea è ritenuta indispensabile per lo sviluppo degli *inventari forestali e del carbonio per Kyoto*, a livello nazionale, regionale, distrettuale, aziendale.

La Sardegna, in ragione del suo patrimonio forestale, può contribuire al raggiungimento degli obiettivi nazionali di riduzione delle emissioni dei gas serra fissati dal PK.

In questo contesto, l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) indica una metodologia standard (GPG_LULUCF) di stima del bilancio di carbonio degli ecosistemi forestali basata sulla sottrazione delle perdite di biomassa (utilizzazioni forestali, incendi) dall'incremento della stessa in un dato periodo di tempo. Le stime fanno riferimento alle tecniche impiegate dagli inventari forestali, concepiti e progettati per valutare le provvigioni legnose.

Lo studio preliminare realizzato in fase d'impostazione del percorso di ricerca ha permesso di individuare una serie di problematiche di ordine teorico (carenza di strumenti di stima della fitomassa, "complessità" della vegetazione mediterranea e quindi necessità di circoscrivere l'analisi ad una sola tipologia forestale, scelta della metodologia d'indagine più appropriata) e pratico (risorse necessarie per realizzare tali indagini). In considerazione di queste valutazioni si è scelto di attivare una cooperazione con un progetto di ricerca già operante sul territorio (ForEnCarb). Questa reciproca collaborazione ha permesso di razionalizzare l'uso delle risorse disponibili e di affrontare i notevoli sforzi organizzativi ed economici necessari per realizzare materialmente l'indagine.

Sinteticamente il percorso di ricerca ha consentito di fornire un contributo conoscitivo alla stima del carbonio fissato dalla *lecceta mediterranea*, attraverso la valutazione dell'utilizzo degli strumenti esistenti di stima della fitomassa e la predisposizione, seguita da una verifica operativa, di metodologie e di strumenti innovativi classificabili come "non consuetudinari".

La prima fase della ricerca ha previsto, attraverso una approfondita analisi bibliografica, la raccolta delle informazioni riguardanti la stima della fitomassa arborea delle tipologie forestali mediterranee; in particolare, è stata effettuata la ricognizione degli strumenti di cubatura, sviluppati in Italia sulla lecceta. Da questa fase è emersa una significativa carenza di dati utili per perseguire gli obiettivi previsti.

Rispetto ad un protocollo di rilievo classico, che prevede la misura di un numero limitato di variabili dendrometriche tali da consentire la stima del solo volume legnoso, per venire incontro alle finalità di ricerca espresse in premessa, è stato messo a punto un protocollo ampliato, attraverso l'inserimento di misure su una serie di numerose variabili dendrometriche definibili "non convenzionali".

L'applicazione rigorosa dello stesso, ha permesso la selezione del campione di alberi modello su base probabilistica, nel quadro di un campionamento casuale stratificato; quindi, sull'albero in piedi, sul suo intorno e sull'albero abbattuto, si è proceduto a misurare una serie di variabili di tipo quantitativo e qualitativo. Contestualmente alla realizzazione delle misure in campo si è proceduto al rilievo della capacità lavorativa della squadra di operatori, questo ulteriore approfondimento consente di valutare i costi necessari per la sua applicazione.

Il protocollo così impostato ha consentito il rilievo di attributi stazionali dendrometrici e di "intorno" che, senza incidere significativamente sui tempi di esecuzione del lavoro, estendono e potenziano i rilievi convenzionali.

La mole di informazioni disponibili ha permesso di realizzare uno studio che, non solo, quantifica la fitomassa epigea della lecceta considerata ma, contemporaneamente, analizza le relazioni tra la struttura e la fitomassa di tutte le componenti del popolamento.

Per ogni singolo *albero modello grande* (AMG) è stato ottenuto il volume cormometrico, quello dendrometrico e la ripartizione della fitomassa in componenti e assortimenti commerciali. Da quest'analisi emerge che l'assortimento commerciale, ossia la legna da ardere proveniente dal fusto e dai rami, ammonta a circa il 72 % della fitomassa complessiva, a questa va sommata la quota di fitomassa delle fascine (18%); la componente residui, solitamente trascurata negli studi indirizzati da esigenze di stima produttive, è pari al 10% del totale. Nella gestione delle utilizzazioni boschive,

quest'ultima quantificazione può fornire significative indicazioni sulla possibile destinazione di questa componente.

La disponibilità del set di dati completo ha permesso di confrontare e valutare gli strumenti di cubatura esistenti in letteratura sviluppati su popolamenti di provenienza geografica affine a quello considerato. Gli strumenti reperiti sono di natura eterogenea (si va dalle tavole di cubatura alle più evolute funzioni di previsione della fitomassa); comune a tutti è l'esprimere il valore della variabile oggetto di stima (ad esempio, la fitomassa arborea epigea) in funzione delle variabili dendrometriche classiche, quali il diametro 1.30 m ed eventualmente l'altezza ipsometrica. Dal confronto sono emerse alcune criticità che rendono poco accurato l'utilizzo di questi strumenti: l'incidenza delle caratteristiche della struttura del popolamento, le condizioni stazionali, che a loro volta influenzano la crescita, e soprattutto la mancanza di uno standard che regoli la definizione degli assortimenti in cui è ripartita la fitomassa.

L'approccio metodologico proprio di questi strumenti convenzionali di cubatura è stato applicato al set dati disponibile. La stima diretta del volume e della fitomassa è stata sviluppata predisponendo una serie di classiche funzioni di regressione; la ricerca delle funzioni ottimali di stima è stata realizzata con la tecnica della "*stepwise regression*" partendo da un modello massimo costituito da variabili ottenute come combinazione del diametro e dell'altezza. Per la lecceta oggetto di studio, sono state individuate una serie di equazioni di previsione della fitomassa arborea epigea e degli assortimenti principali in cui viene convenzionalmente ripartita (vedi Tabelle 38 e 39). L'utilizzo di queste funzioni ha consentito di allestire una tavola di cubatura ad un'entrata per la lecceta *su Monte di Seneghe* (vedi Tabella 40).

La predisposizione di tali funzioni risulta affetta da alcune debolezze non eliminabili: la disponibilità di poche osservazioni, la distribuzione dei residui non proprio omoscedastica, l'influenza dei valori estremi sulle statistiche che governano il processo, etc..

La consapevolezza delle criticità riscontrate nei procedimenti di stima diretta convenzionali e la disponibilità di un notevole volume di informazioni relative ad ogni fusto modello, ha indirizzato il lavoro a sviluppare *approcci non-convenzionali alla predisposizione di strumenti di stima*.

Un primo approfondimento ha avuto come oggetto il procedimento adottato in dendrometria per la stima del volume dei fusti. In particolare, l'esigenza di analizzare i fattori che, a parità di diametro e altezza, influenzano il volume del fusto, ha portato alla definizione di un *coefficiente di riduzione standardizzato* (in sostituzione di quello ordinario). Le analisi eseguite hanno verificato che l'utilizzo di tale coefficiente migliora la stima del volume del fusto (vedi Tabelle 43 e 44); questo risulta maggiormente significativo per fusti di altezza contenuta.

L'analisi è proseguita mettendo a punto uno strumento che consente di valutare il contributo delle variabili dendrometriche classificabili come *non consuetudinarie* al miglioramento degli strumenti di cubatura. L'analisi statistica individuata, ritenuta più efficace per questa finalità, è stata la cosiddetta "partizione ricorsiva" (*regression tree* attraverso l'utilizzo del programma R). Nel caso preso in considerazione, questa metodica individua come variabile obiettivo (target) il coefficiente cormometrico standardizzato, e assume a ruolo di potenziali predittori le altre variabili, misurate o rilevate (quantitative o qualitative). Lo scopo dell'analisi è stato quello di individuare gruppi di osservazioni che presentassero valori della variabile target massimamente diversi tra loro e omogenei al loro interno. La procedura ha permesso di valutare in modo piuttosto rapido ed efficace l'importanza relativa dei potenziali predittori e le loro interazioni che risultano contribuire alla stima.

Da queste osservazioni è emerso che, oltre ai caratteri dendrometrici consueti contribuiscono al miglioramento della stima due variabili interpretabili come indicatori dei livelli di concorrenza passata ed attuale del fusto esaminato. Due variabili relativamente semplici da rilevare e quindi da inserire nei protocolli da seguire per effettuare stime. La prima prevede di verificare se il ramo di maggiori dimensioni si inserisce sul fusto ad altezza inferiore ad un terzo dell'altezza totale, la seconda di valutare se i fusti concorrenti sono disposti a formare un angolo, con vertice sul fusto considerato, più piccolo dell'angolo retto.

In considerazione di queste evidenze è stata verificata la possibilità di migliorare le stime dirette di fitomassa sviluppate utilizzando funzioni basate sulle variabili diametro 1.30 m e altezza ipsometrica, mediante l'inserimento della variabile dendrometrica non consuetudinaria altezza inserzione ramo principale. L'analisi effettuata ha mostrato che questa variabile consente un miglioramento dell'accuratezza del modello di previsione

della fitomassa epigea e possiede una superiore capacità esplicativa rispetto alla variabile classica altezza ipsometrica.

Nella prospettiva della gestione sostenibile del territorio i boschi svolgono un ruolo chiave, in particolare per quanto riguarda la capacità di sequestro del carbonio atmosferico. L'implementazione di questa prospettiva richiede di disporre di metodi, tecniche e strumenti di stima della complessità ambientale, con affidabilità e precisione tali da permettere, attraverso un attento monitoraggio, di discriminare, con sicurezza e sufficiente anticipo, trend potenzialmente regressivi. Le indagini effettuate hanno mostrato che gli strumenti attualmente disponibili sono carenti e hanno indicato la necessità della predisposizione di strumenti non convenzionali, sintonizzati con le realtà locali, sensibili alla variabilità del contesto selvicolturale e quindi capaci di incidere costruttivamente nella configurazione delle strategie di pianificazione della gestione sostenibile del territorio.

La presente ricerca ha inteso apportare un contributo conoscitivo allo sviluppo di strumenti di stima dello stock di carbonio fissato dalla "lecceta mediterranea", quale mezzo che, indirettamente, agevola la contabilizzazione regionale degli assorbimenti di CO₂ relativi alle tipologie forestali mediterranee.

BIBLIOGRAFIA

- Agnoletti M, Scotti R. (2004) Pianificazione e risorse paesaggistiche in area mediterranea: verso una critica degli attuali modelli di sostenibilità. *Italus Hortus*, 4, 25-30.
- Amorini E., Brandini P., Fabbio G., Tabacchi G. (2000). Modelli di previsione delle masse legnose e delle biomasse per i cedui di cerro della Toscana centro-meridionale. *Annali Istituto Sperimentale Selvicoltura* 29: 41-56.
- Amorini E., Bruschini S., Cutini A., Fabbio G., Manetti M.C., (1996) - Studi su struttura e processi ecologici in popolamenti di Leccio della Sardegna meridionale. *Comunicazioni di Ricerca dell'ISAFSA 96/1*, Trento. Pag. 35 - 48.
- Anderle A, Ciccarese L, Dal Bon D, Pettenella D, Zanolini E (2002). Assorbimento e fissazione di carbonio nelle foreste e nei prodotti legnosi in Italia .Rapporto 21/2002 APAT, Roma, pp. 58.
- Anfodillo T., Pilli R., Carrer M., Carraro V. Rossi S., (2006), Stima della biomassa forestale: le nuove potenzialità delle relazioni allometriche. In Pilli R., Anfodillo T., Dalla Valle E. (eds.), *Stima del Carbonio in foresta: metodologie ed aspetti normativi*, Pubblicazione del Corso di Cultura in Ecologia, Atti del 42° corso, Università di Padova: 161-183
- APAT (2007). Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2005. National Inventory Report 2007- Agency for Environmental Protection and Technical Services Environment Department Climate Change and Sustainable Development Division Air Emission Inventory Unit Rome ITALY
- Arrigoni P.V. (1968). *Fitoclimatologia della Sardegna*. Webbia 23, 1968
- Aru A. (1997). La pianificazione territoriale e la mitigazione dei processi di desertificazione. Il consumo delle risorse non rinnovabili. *Genio Rurale*, LX, 6, 54-60
- Aubinet M., Grelle A., Ibrom A., Rannik U., Moncrieff J., Foken T., Kowalski A.S., Martin P.H., Berbigier P., Bernhofer C., Clement R., Elbers J., Granier A., Grunvald T., Morgenstern K., Pilegaard K., Rebmann C., Snijders W., Valentini R., Vesala T. (2000). Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX methodology. *Advanced in Ecological Research* 30: 113-175.
- Baldocchi D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology* 9: 479-492

- Baldocchi D., Hicks B., Meyers T.P. (1988). Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods *Ecology* Vol. 69 No 5
- Barilotti A., Turco S., Napoletano R., Bressan E. (2005) La tecnologia LiDAR per lo studio della biomassa negli ecosistemi forestali. Atti XV Congresso della Società Italiana di Ecologia, Torino
- Batjes N.H. (1996) Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*. 47, 151- 163.
- Beccu E. (2000). Tra cronaca e storia le vicende del patrimonio boschivo della Sardegna. Carlo Delfino Editore, Sassari.
- Bernetti G. (1998). Lessico Mediterraneo. 2a parte. Italia Forestale e Montana LIII (2): 109-112.
- Bernetti G. (1995) *Selvicoltura speciale*. UTET Torino 1995
- Bezzi A., Brandini P., Menguzzato G., Tabacchi G. 1991. I boschi puri e densi di ontano napoletano nel Cilento. Indagine per un loro inquadramento vegetazionale, selvicolturale e produttivo. *Annali Istituto Sperimentale Assestamento Forestale e Alpicoltura*: 3-90
- Bianchi L., Calamini G., Gregori E., Paci M., Pallanza S., Pierguidi A., Salbitano F., Tani A., Vedele S. (2002). Valutazione degli effetti del rimboschimento in zone aride della Sardegna: risultati preliminari sulla vegetazione. *Italia Forestale e Montana* LVII (4): 353-368
- Boone R.D., Grigal D.F., Sollins P., Ahrens R.J., Armstrong D.E. (1999) Soil sampling, preparation, archiving, and quality control. In: Robertson GP, Coleman DC, Bledsoe CS, and Sollins P (eds.), *Standard Soil Methods for Long-term Ecological Research*, Oxford Univ. Press, New York, NY, pp. 3-28.
- Borghetti M., Magnani F., Scarascia Mugnozza G., Valentini R. (2001). Valutazione del ruolo delle foreste italiane nell'assorbimento dell'anidride carbonica atmosferica. *ISFA Comunicazioni di Ricerca* 2001/2 p. 85-91.
- Bossel H. (1996) TREEDYN3 Forest Simulation Model. *Ecol. Model.* 90, 187-227.
- Brandini P., Tabacchi G. (1996). Modelli di previsione del volume e della biomassa per I polloni di leccio e di corbezzolo in boschi cedui della Sardegna meridionale. *ISFA Comunicazioni di Ricerca* 96(1): 59-69.
- Brown S. (2002). Measuring carbon in forest: current status and future challenges *Environmental pollution* 116 (2002) 363-372.
- Brown S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. *FAO Forestry Paper* 134, Rome, Italy.
- Brown S., Schroeder P., Kern J.S. (1999). Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management* 123, 81-90.

- Brown S., Sathaye J., Cannell M., Kauppi P. (1996) Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. 773-797. In: Watson R. T. et al. (eds.) - Climate Change 1995, Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical analysis. Report of Working Group II, Second Assessment Report, IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Brown S., Lugo A.E., (1992). Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia* 17, 8–18.
- Brown S., Gillespie A.J.R., Lugo A.E. (1989). Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35, 881–902.
- Cairns M.A., Brown S., Helmer E.H., Baumgardner G.A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111: 1-11.
- Calamini G., Gregori E. (2001). Studio di una faggeta dell'Appennino Pistoiese: relazioni allometriche per la stima della biomassa epigea. *L'Italia Forestale e Montana*, LVI, 1: 1-23
- Calamini G., Gregori E., Hermanin L., Lopresti R. (1989). Studio di una faggeta dell'Appennino Pistoiese. Ulteriori indagini su biomassa e produzione primaria netta: distribuzione nelle componenti delle chiome - *Annali Accademia It. Scienze Forestali*, XXXVII: 373-399.
- Calamini G., Gregori E., Hermanin L., Lopresti R., Manolacu M. 1983. Studio di una faggeta dell'Appennino Pistoiese: Biomassa e produzione primaria netta epigea - *Annali ISSDS, Firenze*; XIV: 193-214.
- Camarda I. (2007) Aspetti della vegetazione sempreverde nell'area mediterranea - pag. 5-14. Atti del Convegno "La foresta Mediterranea: una risorsa strategica" Nuoro 1 dicembre 2006.
- Camarda I., Valsecchi F. (1982). Alberi e arbusti spontanei della Sardegna, Gallizzi, Sassari.
- Canadell J., Riba M., Andrés P. (1988). Biomass Equations for *Quercus ilex* L. in the Montseny Massif, Northeastern Spain *Forestry* 1988 61(2):137-147
- Cannell M.G.R. (1988) Woody biomass of forest stands. *Forest Ecology and Management*, 8:299-312.
- CarboeuropelP Project (2005) dati relativi al sito di Puechabon (Francia). <http://gaia.agraria.unitus.it/database/datacx3.asp>
- Castellani C. (1982) – Tavole stereometriche ed alsometriche per i boschi italiani. *Ann. Ist. per l'assestamento forestale e per l'alpicoltura (ISAFa)*. Trento
- Castellani C., Scrinzi G., Tabacchi G., Tosi V. (1984) Tavole di cubatura a doppia entrata. Ministero Agricoltura e Foreste, ISAFa, Inventario Forestale Nazionale Italiano. Trento

- Cherubini P., Gartner B.L., Tognetti R., Bräker O., Schoch W., Innes J.L. (2003). Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from Mediterranean climates. *Biol. Rev.* 78:119-148.
- Chirici G., Corona P. (2006) - Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione nel rilevamento delle risorse forestali, Roma, Aracne Editrice.
- Ciais P., Schelhaas M.J., Zaehle S., Piao S.L., Cescati A., Liski J., Luysaert S., LeMaire G., Schulze E.D., Bouriaud O., Freibauer A., Valentini R., Nabuurs G.J. (2008). Carbon accumulation in European forests. *Nature Geoscience* 1: 425-429.
- Ciancio O., Iovino F., Menguzzato G., Tabacchi G. (2002) Entità e distribuzione di elementi minerali nella biomassa arborea epigea di un ceduo di leccio. In *Bosco ceduo in Italia*. Ciancio e Nocentini. AISF, Firenze 2002.
- Ciccarese L. (2005). Selvicoltura e cambiamenti climatici. Come adempiere agli impegni di Kyoto. *Alberi e territorio* 3: 44-49.
- Ciccarese L., Pettenella D. (2008). Compensazione delle emissioni di gas-serra. Gli investimenti forestali di carattere volontario. *Sherwood -Foreste e Alberi Oggi*, 147: 5-9.
- Ciccarese L., Kloehn S., Lumicisi A., Magri L. (2006). Gestione forestale e CO₂. *Sherwood -Foreste e Alberi Oggi*, 124 (7): 5-9.
- Ciccarese L., Brown S., Schlamadinger B. (2005) Carbon sequestration through restoration of temperate and boreal forests. In: *Restoration of boreal and temperate forests* (Stanturf J.A. e Madsen P., eds). Cap. 7: 111-120. ISBN 1-56670-635-1. CRC Press. Boca Raton, USA. 569 p.
- Ciccarese L., Pettenella D. (2005) Il Protocollo di Kyoto. *Sherwood -Foreste e Alberi Oggi*, 108 (2): 5-9.
- Ciccarese L., Avitabile V., Brown S., Pettenella D. e Schlamadinger B. (2003) Possono le foreste mitigare i cambiamenti climatici? *Sherwood -Foreste e Alberi Oggi*, 94 (10): 25-30.
- Ciccarese L., Dolci C., Pettenella D. (2000). CSEM: un modello per la stima del bilancio del carbonio nel settore forestale in Italia. S.I.S.E.F. Atti del Convegno.
- Ciccarese L., Pettenella D. (1999). Il protocollo di Kyoto e le risorse forestali: implicazioni tecniche e politiche in campo nazionale e internazionale. *Sherwood -Foreste e Alberi Oggi*, 41: 13-18.
- Clark D., Brown S., Kicklighter D.W., Chambers J.Q., Thomlinson J.R., Ni J. (2001) Measuring net primary production in forests: concepts and field methods -*Ecological Applications*, 11(2), pp. 356–370 by the Ecological Society of America
- Colleselli A. (1974) Tavola allometrica del Larice per il Cadore occidentale. *Monti e boschi*, 25/5:17-25.
- Colpi C., Hellring B. (2008) Foreste, carboni e assestamento forestale. Alcune meditazioni in tema. *Italia Forestale e Montana* LXIII (2): 73-89.

- Colpi C., De Mas G. (1992) Appunti di dendroauxonomia. Ed. Libreria Progetto-Padova
- Corona P. (2007a) Gestione sostenibile delle foreste mediterranee - pag. 15-21. Atti del Convegno "La foresta Mediterranea: una risorsa strategica" Nuoro 1 dicembre 2006.
- Corona P. (2007b) Metodi di inventariazione delle masse e degli incrementi legnosi in assestamento forestale –Dispense didattiche. Ed. ARACNE Roma.
- Corona P. (2005) Deseriticazione, siccità, foreste e ricerca. *Forest@* 2 (3): 256-257. [online] URL: <http://www.sisef.it/>
- Corona P. (2000) Introduzione al rilievo campionario delle risorse forestali. Ed. CUSL Firenze.
- Corona P., D’Orazio P., Lamonaca A., Portoghesi L. (2005). L’indice Winkelmass per l’inventariazione a fini assestamentali della diversità strutturale di soprassuoli forestali. *Forest@* 2 (2): 225-232. [online] URL: <http://www.sisef.it/>
- Costa G., La Mantia T. (2005). Il ruolo della macchia mediterranea nel sequestro del carbonio. *Forest@* 2 (4): 378-387.
- D’Angelo M., Delogu G., Dettori S. (1999). La gestione delle risorse forestali in Sardegna: problemi e prospettive. In: Nuove Frontiere nella gestione forestale. Accademia Italiana Scienze Forestali, Firenze, 131-144.
- De Angelis P., De Dato G., Scarascia Mugnozza G., Scoppola A., Spano D., Sirca C., Asunis C., Sechi S., Duce P., Pellizzaro G., Cesaraccio C., D’Angelo M. (2003). Vulnerability assessment of shrubland ecosystems in Europe under climatic changes. In: Miglietta F. e Valentini R. (Eds.) Proceedings of the first Italian IGBP Conference. –Paestum (SA), 14-16 november 2002, 79-83.
- Del Favero R. (2008) I boschi nelle regioni meridionali e insulari d’Italia. Tipologia, funzionamento, selvicoltura. Ed. CLEUP, Padova 2008
- Delogu G., Giaini G., Iovino F. (1998) Problematiche e prospettive della selvicoltura in ambiente mediterraneo. – Atti secondo congresso di selvicoltura. Venezia, 2 209-218
- Drake J.B., Dubayah R.O., Knox R.G., Clark D.B., Blair J.B. (2002). Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. *Remote Sensing of Environment* 81: 378–392 .
- Drigo R., Chirici G., Lasserre B., Marchetti M. (2007) Analisi su base geografica della domanda e dell’offerta di combustibili legnosi in Italia. *Italia Forestale e Montana* (5-6)
- Duce P., Cesaraccio, Pellizzaro G., Spano D., Asunis C., Sirca C., Sechi S., Caria C., Arca A., Scarascia Mugnozza G., De Angelis P., De Dato G. (2002). Shrubland ecosystems in Europe under climatic changes: preliminary results from a mediterranean-type ecosystem. Book of abstract of the 16 th Congress of the International Society of Biometeorology, 28 October-1 November, Kansas City, USA.

- Enquist B.J. (2003) Cope's Rule and the evolution of long distance transport in vascular plants: allometric scaling, biomass partitioning and optimization. *Plant Cell and Environ* 26: 151-161
- Enquist B.J. (2002) Universal scaling in tree vascular plant allometry: toward a general quantitative theory linking form and functions from cells to ecosystems. *Tree Physiol* 22: 1045-1064.
- Enquist B.J., Niklas K.J. (2002) Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants. *Science* 295: 1517-1520
- Fabbio G., Iovino F., Menguzzato G., Tabacchi G. (2002) Confronto fra modelli di previsione della biomassa arborea elaborati per cedui di leccio. In *Bosco ceduo in Italia*. Ciancio e Nocentini. AISF, Firenze 2002.
- FAO (2001). *Global Forest Resources Assessment 2000*. FAO Forestry Paper 140. FAO Roma. 479 p. Main Report. [online] URL: <http://www.fao.org/forestry/site/fra2000report/en>
- Farrell E.P., Fuhrer E., Ryan D., Andersson F., Huttel R., Pissi P. (2000). European forest ecosystems: building the future on the legacy of the past. *Forest Ecology and Management* 132: 5-20.
- Fattorini L., Gasparini P., Nocetti M., Tabacchi G., Tosi V., (2005). Above-ground tree phytomass prediction and preliminary shrub phytomass assessment in forest stands of Trentino. In *EFOMI, Ecological valuation in alpine forest ecosystems by integrated monitoring – edited by Salvadori C. e Ambrosi P. Studi Trentini di Scienze Naturali, Acta Biologica*, 81 (2004) -Supplemento 1 –Trento 2005
- Federici S., Vitullo M., Tulipano S., De Lauretis R., Seufert G., (2008). An approach to estimate carbon stocks change in forest carbon pools under the UNFCCC: the Italian case. *iForest* 1: 86-95 [online: 2008-05-19] URL: <http://www.sisef.it/iforest/>
- Federici S. (2004) Preliminary results of Riselvitalia project - ISAFa – 2004 - <http://ghgdata.jrc.it/carboinvent/ciinternal/cidownloadocdata.cfm>
- Fenu G. (2004) *Aspetti della vegetazione forestale del Montiferru Centro-Meridionale (Sardegna Centro-Occidentale)*. Università di Cagliari. Tesi di laurea in Scienze naturali. Relatore prof. Bacchetta.
- FRA (2005) *Global Forest Resources Assessment*. [online] URL: <http://www.fao.org/forestry/site/fra2005>
- Gioli B., Miglietta F. (2007). Stima del bilancio del carbonio a scala regionale. *Forest@* 4 (4): 469-477. [online] URL: <http://www.sisef.it/forest@/>
- Giordano A. (2005). Il ruolo del suolo come serbatoio di cattura del carbonio. *Il Suolo* 1-3 2005, numero 34-35 anno XI
- Gomasasca M.A. (1997). *Introduzione al telerilevamento e GIS per la gestione delle risorse agricole e ambientali*. ArteStampa, Varese, 246p

- Grace J. 2004. Understanding and managing the global carbon cycle. *Journal of Ecology* 92 (2): 189-202
- Gracia C.A., Tello E., Sabate' S., Bellot J. (1999). GOTILWA: an integrated model of water dynamics and forest growth. In: Roda', F., Retana, J., Gracia, C.A. and Bellot, J. (Eds.), *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests: Ecological Studies*, Vol. 137. Springer, Berlin, pp. 163–178.
- Gratani L., Amadori M., Veri L., Bruno F., Porri M. (1980). Determinazione di un metodo di stima della biomassa nella macchia di Castelporziano (Lazio). *Annali di Botanica* XXXXI (1): 131-151.
- Hall D.O. (1997). Biomass energy in industrialised countries – a view of the future. *Forest Ecology and Management* 91: 17–45.
- Harmon M.E., Sexton J., (1996). *Guidelines for Measurements of Woody Detritus in Forest Ecosystems* (US LTER Publication No. 20). US LTER Network Office, University of Washington, Seattle, WA, USA.
- Harmon M.E., Brown S., Gower S.T. (1993). Consequences of tree mortality to the global carbon cycle. In: Vinson, T.S., Kolchugina, T.P. (Eds.), *Carbon Cycling in Boreal and Subarctic Ecosystems, Biospheric Response and Feedbacks to Global Climate Change*. Symposium Proceedings. USEPA, Corvallis, OR, pp. 167–176.
- Hellrigl B. (1974) Relazioni e tavole della biomassa arborea. In: prime indagini sulla biomassa dell'abete bianco, parte prima. Università degli studi di Firenze, Istituto di assestamento forestale, Firenze. *Ricerche sperimentali di dendrometrica e auxometria*, 5:1-40.
- Heurich M. (2008) Automatic recognition and measurement of single trees based on data from airborne laser scanning over the richly structured natural forests of the Bavarian Forest National Park Article in press: *Forest Ecology and Management* (2008)
- Hilbert D.W., Candell J. (1995). Biomass partitioning and resource allocation of plants from Mediterranean-type ecosystems: possibile responses to elevated atmospheric CO₂. In: (Moreno JM, Oechel WC eds.) "Global change and Mediterranean-type Ecosystem". *Ecological Studies* 117. Springer, New York, NY, pp. 76-10.
- Houghton R.A. (2005). Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. *Global Change Biology* 11, 945–958.
- Houghton R.A. (2003). Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? *Global Change Biology* 9(4): 500–509.
- Iacus S., Masarotto G. (2008) *Laboratorio di statistica con R*. Ed. McGraw-Hill.
- INFC (2007a) – Le stime di superficie 2005 – Prima parte. Autori G. Tabacchi, F. De Natale, L. Di Cosmo, A. Floris, C. Gagliano, P. Gasparini, L. Genchi, G. Scrinzi, V. Tosi. *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio*. MiPAF

- Corpo Forestale dello Stato - Ispettorato Generale, CRA - ISAFa, Trento. [on line] URL: <http://www.infc.it>.
- INFC (2007b) – I caratteri quantitativi 2005 – parte 1. Autori P. Gasparini, De Natale, L. Di Cosmo, C. Gagliano, G., Salvatori, G. Tabacchi, L., V. Tosi. Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. MiPAF – Corpo Forestale dello Stato - Ispettorato Generale, CRA - ISAFa, Trento. [on line] URL: <http://www.infc.it>.
- INFC (2003). Guida alla classificazione della vegetazione forestale. Autore Pignatti S. Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio. MiPAF – Direzione Generale per le Risorse Forestali Montane e Idriche, Corpo Forestale dello Stato, ISAFa, Trento. [online] URL: <http://www.isafa.it>
- IPCC (2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- IPCC (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry GPGGLULUCF. Edited by J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe and F. Wagner The Intergovernmental Panel on Climate Change. Hayama, Kanagawa, Japan.
- IPCC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press. 881 p.
- IPCC (2000) Land Use, Land-use Change, and Forestry. Watson R.T., Noble I.R., Bolin B., Ravindranath N.H., Verardo D.J e Doken D.J. (eds). A special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Cambridge University Press, United Kingdom and New York, USA.
- ISTAT (2001) Istituto nazionale di statistica, 14° Censimento della Popolazione e delle abitazioni, anno 2001
- Jackson R.B., Canadell J., Ehleringer J.R., Mooney H.A., Sala O.E., Schulze E.D. (1996). A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108: 389-411.
- Jalkanen A., Mäkipääb R., Ståhl G., Lehtonen A., Petersson H. (2005). Estimation of the biomass stock of trees in Sweden: comparison of biomass equations and age-dependent biomass expansion factors *Ann. For. Sci.* 62 (2005) 845–851 845
- Janssens I.A., Freibauer A., Ciais P., Smith P., Nabuurs G.J., Folberth G., Schlamadinger B., Hutjes R.W.A., Ceulemans R., Schulze E.D., Valentini R., Dolman A.J. (2003). Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO₂ emissions. *Science* 300, 1538-1542.
- Jenkins J., Chojnacky D., Heath L., Birdsey R., (2003). National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science* 49(1): 12-35.

- Kauppi P.E., Mielikainen K., Kuusela K. (1992). Biomass and carbon budget to European forest, 1971 to 1990. *Science* 256, 70-74
- Kurz W.A., Beukema S.J., Apps M.J. (1996). Estimation of root biomass and dynamics for the carbon budget model of the Canadian forest sector. *Canadian Journal of Forest Research* 26: 1973-1979.
- La Marca O. (2004) Determinazione della biomassa arborea di un popolamento forestale. Cap XV Elementi di dendrometria. Patron editore.
- Lasserre B., Tognetti R., Marchetti M. (2006). Problematiche di inventariazione del carbonio nella biomassa forestale ipogea. *Forest@* 3 (4): 542-554. [online] URL: <http://www.sisef.it/>
- Lehtonen A. (2005). Carbon stocks and flows in forest ecosystems based on forest inventory data. *Finnish Forest Research*, <http://www.metla.fi/dissertationes>.
- Lehtonen A., Mäkipää R., Heikkinen J., Sievänen R., Liski J. (2004). Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management* 188: 11–22 4.
- Leonardi S., Rapp M., Denes A. (1992) Organic matter distribution and fluxes within a holm oak (*Quercus ilex* L.) stand in the Etna volcano *Vegetatio* 99-100:219-224, 1992.
- Leonardi S., Rapp M. (1982). Phytomasse et mineralomasse d'un taillis de thane vert du massif de l'Etna. *Ecologia Mediterranea* 8, 3: 125-138.
- Li Z., Kurz W.A., Apps M.J., Beukema S.J. (2003). Belowground biomass dynamics in the Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector: recent improvement and implications for the estimation of NPP and NEP. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 126-136.
- Lindner M., Lucht W., Bouriaud O., Green T., Janssens I., Brumme R., Butterbach-Bahl K., Grace J., Lehtonen A., Lettens S., Liski J., Mencuccini M., Milne R., Nabuurs G.J., Olsson M., Schadauer K., Troeltzsch K., Van Camp N., de Vries W., Williams M., Zaehle S. (2004). Specific Study on Forest Greenhouse Gas Budget. 1–62 p.
- Lledò M.J., Sánchez J.R., Bellot J., Boronat J., Ibañez J.J., Escarré A. (1992) Structure, biomass and production of a resprouted holm-oak (*Quercus ilex* L.) forest in NE Spain. *Vegetatio* 99-100:51-59
- Lumicisi A. (2006). Il Protocollo di Kyoto e le foreste in Italia: un altro passo avanti. *Agronomi e Forestali* (4): 28-30.
- Lumicisi A., Tedeschi V., Federici S. (2006). Il registro nazionale dei serbatoi di carbonio agro-forestale. *Agronomi e Forestali* 2/2006.
- Lund H.G. (2006) Guide for Classifying Lands for Greenhouse Gas Inventories *Journal Of Forestry* Vol. 104, No. 4, June 2006, Page 211 - 216

- MacDicken K. (1997). A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Winrock International, 1611 N. Kent St., Suite 600, Arlington, VA 22209, USA.
- Magnani F., Grassi G., Tonon G., Cantoni L., Ponti F., Vicinelli E., Boldreghini P., Rossi F. (2005). Quale ruolo per l'arboricoltura da legno italiana nel protocollo di Kyoto? Indicazioni da una "Kyoto Forest" della pianura emiliana. *Forest@* 2(4): 333-344.
- Marimon-Junior B.H., Hay J. (2008) A new instrument for measurement and collection of quantitative samples of the litter layer in forests. Article in press, *Forest Ecology and Management*
- Marino C., Manca G., Matteucci G., Scarascia Mugnozza G., (2005). Cambiamenti climatici nel mediterraneo: un caso di studio sul ciclo del carbonio in una pineta della Sila, Calabria. *Forest@* 2 (1): 52-65. [online] URL: <http://www.sisef.it/>
- Marland G., Fruit K., Sedjo R. (2001) Accounting for sequestered carbon: the question of permanence. *Environmental Science and Policy* 4 259-268
- Marras S., Spano D., Sirca C., Duce P., Snyder R.L., Pyles R.D., Paw U.K.T. (2008). Modeling of maquis and grape vineyard fluxes with ACASA. 28th Conference on Agricultural and Forest Meteorology. Orlando FL. (28 April-2 May 2008).
- Marziliano P.A. (2002) Studi sulla biomassa in un ceduo di leccio (*Quercus ilex* L.) del Gargano. In *Bosco ceduo in Italia*. Ciancio e Nocentini. AISF, Firenze 2002.
- Masera O., Garza-Caligaris J.F., Kanninen M., Karjalainen T., Liski J., Nabuurs G.J., Pussinen A., de Jong B.J. (2003). Modelling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling* 164: 177-199.
- Means J. E., Hansen H.A., Koerper C.J., Alaback P.B., Klopsch M.W. (1994). Software for computing plant biomass-BIOPAK users guide, General Technical Report PNW-GTR-340, Pacific Northwest Research Station, USDA Forest Service, Portland, OR, 184 pp.
- Menguzzato G., Tabacchi G. (1995). Prove sperimentali sulle distanze d'impianto in piantagioni di douglasia sulla Catena costiera (Calabria). *L'Italia Forestale e Montana*. L:170-189
- Menguzzato G., Tabacchi G. (1990). Modelli di previsione del peso fresco, della biomassa e del volume per pino insignne ed eucalitti nell'Azienda Massanova (Salerno). *Annali dell'Istituto Sper. per la Selvicoltura*. XIX:323-354
- Menguzzato G., Tabacchi G. (1988). Prove di diradamento su *Pseudotsuga menziesii* in Calabria. Ambiente, tavole di cubatura e della biomassa. *Annali dell'Istituto Sper. per la Selvicoltura*. XVII:255-293.
- Miglietta F., Peressotti A. (1999). MEDEFU: summer drought reduces carbon fluxes in mediterranean forest. *IGBP Newsletter* 39

- Milne R., Pateh Jallow B. (2003) Basis for consistent representation of land areas. Chapter 2: 2.1-2.29. In: Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Edito da: J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buen-dia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, and F. Wagner. The Institute for Global Environmental Strategies for the IPCC and The Intergovernmental Panel on Climate Change. Hayama, Kanagawa, Japan. Disponibile al sito http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf_files/Chp2
- Mohren G.M.J., Garza Caligaris J.F., Masera O., Kanninen M., Karjalainen T., Pussinen A., Nabuurs G.J. (1999). CO2FIX For Windows: a dynamic model of the CO2-fixation in forests; Version 1.2. IBN Research Report 99/3. 33 p.
- Mollicone D., Federici S. (2005). L'uso delle terre: il Protocollo di Kyoto, la definizione FAO di foresta e l'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. *Forest@ 2* (4): 321-330. [online] URL: <http://www.sisef.it/>
- Montes N., Gauquelin T., Badri W., Bertaudiere V., Zaoui (2000). A non-destructive method for estimating above-ground forest biomass in threatened woodlands. In *For. Ecol. Management* 130: 37-46.
- Muller R.N., Liu Y. (1991). Coarse woody debris in an old-growth deciduous forest on the Cumberland Plateau, southeastern Kentucky *Canadian journal of forest research* 1991, vol. 21, n°11, pp. 1567-1572
- Nabuurs G.J., Ravindranath N.H., Paustian K., Freibauer A., Hohenstein W., Makundi W. (2003). LUCF sector good practice guidance. Chapter 3: 3.1-3.312. In: Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (Edito da J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buen-dia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, and F. Wagner). The Institute for Global Environmental Strategies for the IPCC and The Intergovernmental Panel on Climate Change. Hayama, Kanagawa, Japan. Disponibile al sito http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf_files/Chp3/
- Nabuurs G. J., Schelhaas M.J., (2000). Validation of the European forest information scenario model (EFISCEN) and a projection of Finnish forests. *Silva Fennica* 34(2): 167-179.
- Nemani R.R., Keeling C.D., Hashimoto H., Jolly W.M., Piper S.C., Tucker C.J., Myneni R.B., Running S.W. (2003). Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science* 300 (5625): 1560-1563.
- Niklas K.J. (1994). *Plant Allometry. The scaling of form and Process.* The University of Chicago Press, Chicago and London.
- Nocetti M., Bertini G., Fabbio G., Tabacchi G. (2007). Equazioni di previsione della fitomassa arborea per i soprassuoli di cerro in avviamento ad altofusto in Toscana. *Forest@ 4* (2): 204-212. [online] URL: <http://www.sisef.it/>.

- Nosenzo A. (2008) Tavola di cubature a doppia entrata per i cedui di faggio del Piemonte. *Forest@* 5: 227-232
- Ogaya R., Penuelas J., Martinez-Vilalta J., Mangiron M. (2003). Effect of drought on diameter increment of *Q. ilex*, *P. latifolia* and *A. unedo* in a holm oak forest of NE Spain. *Forest Ecology and Management* 180: 175-184.
- Olson C.M., Martin R.E. (1981). Estimating Biomass of Shrubs and Forbs in Central Washington Douglas-Fir Stands. Research Note, Forest Service USDA 1981
- Paciornik N., Rypdal K. (2003). Cross-Cutting Issues. Chapter 5: 5.1-5.81. In: Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Edito da: J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buen-dia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, and F. Wagner. The Institute for Global Environmental Strategies for the IPCC and The Intergovernmental Panel on Climate Change. Hayama, Kanagawa, Japan. Disponibile al sito http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/Chp5/
- Paltrinieri E. (1968). Tavola alsometrica per cedui misti di leccio. In Castellani C. Tavole stereometriche ed allometriche costruite per i boschi italiani. *Annali dell'istituto Sperimentale per l'Assesamento e per l'alpicoltura* Voll. VII e VIII Trento.
- Papale D. (2006). Il Progetto CARBOITALY: una rete nazionale per la misura dei *sink* forestali e agricoli italiani e lo sviluppo di un sistema di previsione dell'assorbimento dei gas serra. *Forest@* 3 (2): 165-167. [online 2006-06-13] URL: <http://www.sisef.it/forest@/show.php?id=382>
- Parikka M. (2004). Global biomass fuel resources. *Biomass and Bioenergy* 27: 613-620.
- Patenaude G., Hill R. A., Milne R., Gaveau D.L.A., Briggs B.B.J., Dawson T.P. (2004). Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 93, 368–380.
- Paul K.I., Polglase P.J., Nyakuengama J.G., Khanna P.K. (2002) Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 168: 241-257.
- Peressotti A., Asunis C., Cesaraccio C. (1999). Stima della biomassa e della copertura vegetale di un ecosistema mediterraneo a macchia: il caso della riserva integrale Arca di Noè. Collana Tecnico-scientifica INAPA, Monitoraggio di un ecosistema a macchia mediterranea: misure ecofisiologiche e micrometeorologiche. Quaderno 6: 81-86.
- Pettenella D., Piazzi M. (2006) Carbonio nei suoli degli ecosistemi semi-naturali piemontesi. *Sherwood -Foreste e Alberi Oggi*, 123 (6) :29-34.
- Pettenella D., Zanchi G. (2006) Inquadramento generale del Protocollo di Kyoto. Opportunità e limiti per il settore forestale. Atti del 42° corso di Cultura in Ecologia “stima del carbonio in foresta: metodologie ed aspetti normativi”, San Vito di Cadore 5-8 giugno 2006.

- Pignatti S. (1998). I boschi d'Italia. UTET Torino, 677pp.
- Pignatti S. (1995) Ecologia vegetale. UTET, Torino, pp 531.
- Pilli R., Anfodillo T. (2006). L'impiego dei dati assestamentali per la stima dello stock di carbonio ai fini delle richieste poste dal Protocollo di Kyoto. *Forest@* 3(1): 22-38.
- Pilli R., Anfodillo T., Carter M. (2006) Towards a functional and simplified allometry for estimating forest biomass *Forest Ecology and Management* 237 583–593
- Piotto B., Di Noi A. (2001). Propagazione per seme di alberi e arbusti della flora mediterranea Dipart. Prevenzione e Risanamento Ambientali ANPA Roma 2001
- Plantinga A., Birdsey R.A. (1993) Carbon Fluxes resulting from U. S. private timberland management. *Climatic Change* 23:37-53
- Ponti F., (1999). Ruolo dell'arboricoltura da legno nel bilancio del carbonio. *Genio Rurale*, numero 6-1999
- Post W., Kwon K.C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology* (2000) 6, 317-327.
- Prentice I.C., Farquhar G., Fashm M., Goulden M., Heimann V., Jaramillo H, Kheshgi G., Le Quere C., Scholes R.J. (2001). The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.T. Houghton, et al., Eds., Cambridge University Press.
- Raich J.W., Nadelhoffer K.J. (1989) Belowground carbon allocation in forest ecosystem: global trends. *Ecology*, Vol 70, No. 5: 1346-1354
- Rapp M., Santa Regina I., Rico M., Gallego H.A. (1999). Biomass, nutrient content, litterfall and nutrient return to the soil in Mediterranean oak forests *Forest Ecology and Management* 119 (1999) 39±49
- RAS (1998). Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna (SISS) dell'Ente Autonomo del Flumendosa e del Genio Civile di Cagliari.
- Regione Emilia-Romagna - Assessorato Agricoltura. Ambiente e Sviluppo Sostenibile Direzione Generale Programmazione e Pianificazione Urbanistica (2000) Tavole dendrometriche regionali. Bologna
- Ricci V. (2006). Principali tecniche di regressione con R. <http://cran.r-project.org/doc/contrib/Ricci-regression-it.pdf>
- Richards G., Evans D. (2000). Carbon accounting model for forests (CAMFor) user manual, Version 3.35. NCAS Technical Report 26. Australian Greenhouse Office, Canberra, Australia. ISSN: 14426838, 56 pp.
- Rodeghiero M. (2006). Metodologie per la stima del carbonio nei suoli forestali. In Pilli R., Anfodillo T., Dalla Valle E. (eds.), *Stima del Carbonio in foresta: metodologie ed aspetti normativi*, Pubblicazione del Corso di Cultura in Ecologia, Atti del 42° corso, Università di Padova: 161-183.

- Rossi V. (2006). Global Forest Resources Assessment 2005 – Alcuni dati sulle foreste del pianeta. *Sherwood -Foreste e Alberi Oggi*, 127 pag: 25-27.
- Running S.W., Coughlan (1988a). A general model of forest ecosystem processes for regional applications. Hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling* 43: 125-154.
- Running S.W., Coughlan (1988b). A general model of forest ecosystem processes for regional applications. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiol.* 9: 147-160.
- Sabaté S., Gracia C., Vayreda J., Ibanez J. (2003). Differences among species in aboveground biomass expansion factor in Mediterranean forest. Manuscript submitted to *Forest Ecology and Management*
- Sabaté S., Gracia C., Sanchez A. (2002). Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. *Forest Ecology and Management* 162 (2002) 23–37
- Santantonio D., Hermann R.K., Overton W.S. (1977). Root biomass studies in forest ecosystems. *Pedobiologia* 17: 1-31.
- Scarascia Mugnozza G., Matteucci G., Hajny M., Montagnani L., Masci A. (2001). Gestione Forestale sostenibile e Carbonio organico nei suoli in ambiente mediterraneo: inquadramento del problema e aspetti metodologici per una ricerca nel territorio del Parco Nazionale della Calabria. *Italia Forestale Montana* (5) 333-343.
- Schelhaas M.J., van Esch P.W, Groen T.A., de Jong B.H.J., Kanninen M., Liski J., Masera O., Mohren G.M.J., Nabuurs G.J., Palosuo T., Pedroni L., Vallejo A., Vilén T. (2004). CO2FIX V 3.1 – A modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems. *ALTERRA Report 1068*. Wageningen, The Netherlands.
- Schlamadinger B., Boonpragod K., Janzen H, Kurtz W., Lasco R., Smith P. (2003). Supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto Protocol. Chapter 4: 4.1-4.88. In: *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Edito da: J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buen-dia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, and F. Wagner. The Institute for Global Environmental Strategies for the IPCC and The Intergovernmental Panel on Climate Change. Hayama, Kanagawa, Japan. Disponibile al sito http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/Chp4/
- Schlamadinger B., Marland G. (1996), The Role of Forest and Bioenergy Strategies in the Global Carbon Cycle, *Biomass and Bioenergy* 10: 5/6, 275-300
- Schroeder P., Brown S., Mo J., Birdsey R., Cieszewski C. (1997). Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the US using inventory data. *Forest Science* 43, 424–434.

- Scotti R. (2007) L'asestamento Forestale ed il "valore civico" attuale degli "usi civici": il progetto ForEnCarb a Seneghe (OR). - pag. 22-33. Atti del Convegno "La foresta Mediterranea: una risorsa strategica" Nuoro 1 dicembre 2006.
- Scotti R., Ibba C., Puddu S. (2008) Piano di asestamento dei boschi di *su Monte*, comune di Seneghe (OR), terreni gravati da uso civico, 2008-2018. Progetto ForEnCarb Regione Sardegna, Consorzio universitario nuorese, Università di Sassari (in stampa)
- Sirca C., Spano D., Duce P. (2001). Analisi della funzionalità di un ecosistema a macchia mediterranea. SISEF, III Congresso Nazionale "Alberi e foreste per il nuovo millennio". Viterbo, 15-18 ottobre 2001: (79-85).
- Six J., Elliott E.T., Paustian K. (1999) Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1350-1358.
- Smith P. (2004). Monitoring and verification of soil carbon changes under Article 3.4 of the Kyoto Protocol. *Soil Use and Management* 20, 264±270.
- Smith W.B., Brand G.J. (1983) Allometric biomass equations for 98 species of herbs, shrubs, and small trees. North Central Forest Experiment Station. USDA 1983
- Somogyi Z., Teobaldelli M., Federici S., Matteucci G., Pagliari V., Grassi G., Seufert G. (2008). Allometric biomass and carbon factors database. *iForest* 1:107-113 [online: 2008-07-09] URL: <http://www.sisef.it/iforest/>
- Somogyi Z., Cienciala E., Mäkipää R., Muukkonen P., Lehtonen A., Weiss P. (2006) Indirect methods of large-scale forest biomass estimation *Eur J Forest Res*
- Spano D., Duce P. (2004). Funzionalità dei sistemi a macchia mediterranea. *Italus Hortus*, 4, 16-19.
- Spano D., Duce P., Sirca C., Zara P., Marras S., Pisanu S., Arca A., Ventura A. (2006). Energy and CO₂ exchanges of a Mediterranean shrubland ecosystem. Proc. of the 27th Conference on Agricultural and Forest Meteorology of the American Meteorological Society. San Diego, California (22-25 May 2006).
- Sun O.J., Campbell J., Law B.E., Wolf V. (2004) Dynamics of carbon stocks in soils and detritus across chronosequences of different forest types in the Pacific Northwest, USA. *Global Change Biology*, 10(9): 1470-1481.
- Susmel L. (1988). Principi di ecologia. Fattori ecologici, ecosistemica, applicazioni. Ed. CLEUP Padova.
- Susmel I., Viola F., Bassato G. (1976). Ecologia della lecceta del Supramonte di Orgosolo (Sardegna Centro-orientale) *Annali del Centro di Economia Montana delle Venezie*
- Swift R.S. (2001) Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*. November 2001 -Vol. 166, No 11

- Tabacchi G. (1985) Scelta e determinazione del modello perequativo per la costruzione di tavole di cubature a singola e doppia entrata. Ann. Ist. Sper. Ass. For. Alp., Volume 9, Trento.
- Tahvanainen T., Forss E. (2008) Individual tree models for crown biomass distribution of Scots pine, Norway spruce and birch in Finland. Forest Ecol. Manage. (2008) doi: 10.1016/j.foreco.2007.09.035
- Tedeschi V., Lumericisi A. (2006). L'attuazione del Protocollo di Kyoto nel settore forestale: il punto di vista sulla situazione attuale e sulle prospettive future. In Forest@ 3(1): 3-5
- Tirone G., Dore S., Matteucci G., Greco S., Valentini R. (2003). Evergreen Mediterranean forests: carbon and water fluxes, balances, ecological and ecophysiological determinants. In: Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests (Valentini R ed), Ecological Studies 163, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 125-149
- Tognetti R., Marchetti M. (2006) Influenza dei cambiamenti d'uso del suolo e delle strategie di gestione del bosco sull'allocazione del carbonio nel suolo negli ecosistemi forestali. Italia Forestale e Montana LXII (1): 5-51
- UNCCD (1994). United Nations Convention to Combat Desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa A/AC.241/27 12 September 1994; convention text. <http://www.unccd.int/convention/text/pdf/conv-eng.pdf>
- UN-ECE/FAO (2000). Forest resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand. Contribution to the global forest resources assessment 2000, Geneva, Switzerland.
- UNFCCC (1997) The Kyoto Protocol (FCCC/CP/1997/Add 1.) [online] <http://www.unfccc.int>
- UNFCCC (1992) United Nations Framework Convention on Climate Change. Convention text: <http://www.unfccc.int/resource/docs.conkp/conveng.pdf>
- Usò J.L., Mateu J., Karjalainen T., Salvador P. (1997). Allometric regression equations to determine aerial biomasses of Mediterranean shrubs. Plant Ecology 132: 59-69.
- Valentini R, Scarascia Mugnozza G, De Angelis P., Bimbi R. (1991) An experimental test of the eddy correlation technique over a Mediterranean macchia canopy. Plant Cell Environment 14 : 987 - 994.
- Valentini R. (2004) Cicli e cambiamenti climatici in Ecologia Forestale elementi di conoscenza dei sistemi forestali. Paci M. ed Edagricole 2004.
- Valentini R., Baldocchi D. (1999). FLUXNET: a challenge that is becoming reality. Global Change News Letter 37: 15-17

- Vallet P., Dhote J.F., Le Moguedec G., Ravart M., Pignard G.(2006) Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France *Forest Ecology and Management* 229 (2006) 98–110
- West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. (1999a) A general model for the structure and allometry of plant vascular systems. *Nature* 400: 664-667.
- West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. (1999b) The fourth dimension of life: fractal geometry and allometric scaling of organisms. *Science* 248: 1677-1679
- White M.A., Thornton P.E., Running S.W., Nemani R.R. (2000). Parameterisation and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Eart Interaction*, 4: 1-85.
- Zanchi G., Ciccarese L., Del Moro M.A., Pettenella D. (2005). Revegetation in the Mediterranean areas. In *CarboInvent Multi-source inventory methods for quantifying carbon stocks and stock changes in European forest*. Joanneum Research, Austria.
- Zeide B. (1993). Analysis of growth equations. *Forest Sci.* 39: 594-615.
- Zianis D., Mencuccini M. (2004). On simplifying allometric analyses of forest biomass *Forest Ecology and Management* 187 (2004) 311–332
- Zianis D., Muukkonen P., Makipaa R., Mencuccini M. (2005). Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fenica*, monographs 4 – 2005

ALLEGATI

TAVOLE STEREOMETRICHE ED ALSOMETRICHE COSTRUITE PER BOSCHI ITALIANI (ISAFRA-Raccolte, coordinate e illustrate dal Prof. Camillo Castellani, 1982)

LECCIO

del Supramonte di Orgosolo – L. Susmel – F. Viola (Annali del Centro di Economia Montana delle Venezie vol. X, anni 1969-1970)

Tavola allometrica e tavola incrementale degli organi epigel della lecceta prevalentemente d'altofusto, di struttura pluristratificata e disetaneiforme, del territorio demaniale di Montes al Supramonte di Orgosolo (Nuoro). Le tavole sono state costruite sulla base di n. 18 alberi modello. Esse forniscono il peso della biomassa in kg. di sostanza secca. Il volume indicato comprende i rami fino a 3 cm. di diametro. I dati della tavola allometrica sono stati arrotondati al multiplo di 5 kg.

Tavola allometrica

Diam. a m. 1.30	Legno		Corteccia	Foglie	Superficie fogliare	Ramuli	Biomassa totale epigea perequata
	Biomassa	Volume					
cm.	kg. s.s.	me.	kg. s.s.	kg. s.s.	mq.	kg. s.s.	kg. s.s.
10	45	0,06	2	3	35	4	50
15	130	0,16	5	5	55	7	150
20	225	0,27	10	8	90	10	250
25	340	0,41	15	10	115	15	390
30	470	0,57	20	15	170	20	535
35	640	0,78	25	20	225	25	725
40	890	1,08	35	25	285	30	980
45	1.160	1,41	45	30	340	35	1.275
50	1.500	1,82	55	35	395	45	1.625
55	1.890	2,30	70	40	455	50	2.050
60	2.350	2,86	80	45	510	55	2.515
65	2.880	3,51	95	50	565	65	3.080
70	3.480	4,23	115	55	625	70	3.690
75	4.400	5,35	130	60	680	80	4.650
80	4.930	6,10	145	65	735	85	5.200
85	5.980	7,27	170	70	795	95	6.300
90	6.750	8,21	190	80	905	105	7.090
95	7.830	—	215	85	965	115	8.235
100	8.980	—	235	95	1.075	125	9.415

Tavola incrementale

Diam. a m. 1.30	Legno			Corteccia	Foglie	Superficie fogliare	Ramuli	Biomassa totale
	Biomassa	Volume	%					
cm.	kg. s.s.	dc.	%	kg. s.s.	kg. s.s.	mq.	kg. s.s.	kg. s.s.
10	2,02	1,87	4,51	0,10	0,065	0,65	0,10	2,3
15	3,59	3,32	2,76	0,20	0,100	1,50	0,16	4,1
20	5,90	5,46	2,62	0,28	0,170	2,10	0,23	6,6
25	8,35	7,73	2,46	0,35	0,230	2,50	0,28	9,2
30	10,99	10,17	2,34	0,42	0,270	3,00	0,32	11,3
35	13,40	12,41	2,09	0,48	0,300	3,20	0,36	14,5
40	15,99	14,80	1,80	0,54	0,310	3,40	0,38	17,2
45	18,78	17,39	1,62	0,60	0,320	3,50	0,40	20,1
50	21,20	19,63	1,41	0,69	0,320	3,60	0,41	22,6
55	23,55	21,181	1,25	0,69	0,310	3,60	0,41	25,0
60	26,05	24,12	1,11	0,74	0,300	3,50	0,41	27,5
65	28,51	26,40	0,99	0,77	0,290	3,40	0,40	30,0
70	30,66	28,39	0,88	0,80	0,280	3,30	0,39	32,1
75	32,41	30,01	0,74	0,83	0,270	3,20	0,38	33,9
80	34,61	32,04	0,70	0,87	0,260	3,10	0,36	36,1
85	36,06	33,36	0,60	0,89	0,240	3,00	0,34	37,6
90	36,50	33,79	0,54	0,91	0,220	2,80	0,32	38,0

LECCIO

della Sardegna – M. Falchi (L'Eco della montagna, pag. 198, Firenze, 1946)

Tavola dendrometrica locale a doppia entrata delle fustaie coetanee di leccio mature e stramature della Sardegna. Detta tavola è stata costruita sulla base di « numerose » osservazioni. I valori della presente tavola non corrispondono esattamente a quelli riportati nella pubblicazione sopra citata essendo stati ulteriormente compensati. Dà la massa legnosa carbonizzabile; l'A. informa che da un mc. di tale massa si ottengono in media q.li 2,10 di carbone. Le altezze riportate nella tavola non sono quelle dendrometriche, ma quelle che si hanno sveltando le piante a 10 cm. di diametro.

Diam. a m. 1,30	GRADUAZIONI DI ALTEZZA											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
cm.	mc.	mc.	mc.	mc.	mc.	mc.	mc.	mc.	mc.	mc.	mc.	
20	0.205	0.281	0.342	0.408								
22	0.245	0.339	0.406	0.479								
24	0.270	0.372	0.463	0.548	0.601							
26	0.303	0.421	0.523	0.620	0.680	0.731						
28	0.339	0.469	0.582	0.690	0.760	0.820						
30	0.370	0.515	0.642	0.760	0.841	0.910	0.950					
32		0.561	0.703	0.831	0.920	0.998	1.050	1.103				
34		0.610	0.763	0.901	1.001	1.089	1.147	1.218	1.263			
36			0.822	0.969	1.081	1.173	1.241	1.328	1.395			
38			0.881	1.037	1.160	1.261	1.342	1.428	1.530			
40			0.941	1.104	1.241	1.350	1.442	1.545	1.665			
42			1.000	1.170	1.321	1.432	1.540	1.652	1.790			
44			1.060	1.240	1.400	1.522	1.639	1.763	1.918	2.100		
46			1.120	1.309	1.480	1.611	1.738	1.870	2.041	2.230		
48			1.179	1.375	1.560	1.700	1.835	1.981	2.170	2.370		
50			1.138	1.442	1.640	1.776	1.932	2.088	2.298	2.515	2.700	
52			1.297	1.510	1.720	1.874	2.025	2.199	2.430	2.650	2.846	
54				1.569	1.798	1.961	2.132	2.310	2.550	2.791	3.000	
56					1.878	2.052	2.222	2.417	2.675	2.932	3.152	
58					1.956	2.141	2.320	2.522	2.809	3.075	3.310	
60					2.036	2.231	2.418	2.632	2.930	3.217	3.461	
62					2.116	2.320	2.512	2.740	3.051	3.360	3.612	
64					2.194	2.411	2.610	2.846	3.179	3.500	3.765	
66					2.272	2.500	2.705	2.953	3.308	3.641	3.921	
68					2.351	2.588	2.802	3.061	3.430	3.781	4.073	
70					2.430	2.673	2.892	3.170	3.552	3.922	4.229	
72					2.511	2.763	2.990	3.280	3.677	4.067	4.380	
74					2.590	2.850	3.088	3.386	3.801	4.200	4.533	
76						2.936	3.180	3.500	3.927	4.338	4.690	
78						3.025	3.277	3.607	4.051	4.472	4.841	
80						3.111	3.370	3.716	4.170	4.610	5.000	
82						3.200	3.467	3.820	4.288	4.748	5.140	
84						3.288	3.569	3.922	4.410	4.882	5.290	
86						3.372	3.660	4.030	4.530	5.018	5.440	
88						3.461	3.757	4.130	4.650	5.153	5.590	
90							3.861	4.235	4.900	5.430	5.888	
92								4.342	5.020	5.561	6.035	
94								4.444	5.140	5.693	6.181	
96								4.550	5.140	5.693	6.181	
98								4.653	5.200	5.831	6.330	
100								4.760	5.377	5.960	6.480	

LECCIO E ROVERELLA

del Goceano – E. Paltrinieri (Piano di assestamento, quindicennio 1968-1982)

Tavole alsometriche locali dei cedui misti di leccio e roverella costruite una per le foreste di Bultei ed Anela e l'altra per la foresta di Monte Pisanu, del comprensorio del Goceano (Sassari).

Dette tavole sono state costruite sulla base di 115 aree di saggio di mq. 800 ciascuna.

Foreste di Bultei ed Anela			
Età	Massa per ha.	Increment. corren.	Increment. medio
anni	mc.	mc.	mc.
	0,50	0,50	0,50
2	1,00	0,50	0,50
3	1,50	0,50	0,50
4	2,00	1,00	0,50
5	3,00	1,00	0,60
6	4,00	1,50	0,66
7	5,50	1,50	0,78
8	7,00	1,50	0,87
9	8,50	2,00	0,94
10	10,50	2,00	1,05
11	12,50	2,50	1,13
12	15,00	3,00	1,25
13	18,00	3,50	1,38
14	21,50	3,50	1,53
15	25,00	5,00	1,66
16	30,00	5,00	1,87
17	35,00	6,00	2,05
18	41,00	6,50	2,27
19	47,50	6,50	2,50
20	54,00	6,50	2,70
21	60,50	5,50	3,00
22	66,00	5,50	3,00
23	71,50	5,00	3,10
24	76,50	4,50	3,18
25	81,00	4,00	3,24
26	85,00	3,50	3,26
27	88,50	3,50	3,27
28	92,00	3,00	3,28
29	95,00	2,50	3,28
30	98,50	2,00	3,28
31	100,50	2,00	3,24
32	102,50	2,00	3,20
33	104,50	1,50	3,16
34	106,00	1,00	3,11
35	107,00		3,05

Foreste di Monte Pisanu			
Età	Massa per ha.	Increment. corren.	Increment. medio
anni	mc.	mc.	mc.
1	0,50	0,50	0,50
2	1,00	0,50	0,50
3	1,50	0,50	0,50
4	2,00	0,50	0,50
5	2,50	1,00	0,50
6	3,50	1,00	0,58
7	4,50	1,50	0,64
8	6,00	1,50	0,75
9	7,50	1,50	0,83
10	9,00	1,50	0,90
11	10,50	1,50	0,95
12	12,00	2,00	1,00
13	14,00	2,50	1,07
14	16,50	2,50	1,18
15	19,00	2,50	1,26
16	21,50	2,50	1,34
17	24,00	3,50	1,41
18	27,50	3,50	1,52
19	31,00	3,50	1,63
20	34,50	3,50	1,72
21	38,00	4,50	1,81
22	42,50	5,00	1,93
23	47,50	5,00	2,06
24	52,50	4,00	2,19
25	56,50	4,00	2,26
26	60,50	4,00	2,32
27	64,50	3,50	2,38
28	68,00	3,50	2,42
29	71,50	2,50	2,46
30	74,00	2,50	2,46
31	76,50	2,50	2,47
32	79,00	2,50	2,47
33	81,50	2,50	2,47
34	83,00	1,50	2,44
35	94,50	1,50	2,41

LECCIO E ROVERELLA

del Goceano – E. Paltrinieri (Piano di assestamento, quindicennio 1968-1982)

Tavola dendrometrica locale ad una sola entrata del ceduo misto di leccio e roverella del bosco della foresta demaniale del Goceano (Sassari). Detta tavola è stata costruita sulla base di 115 aree di saggio di 800 mq. ciascuna.

Diam. a m. 1,30	Peso	Volume	Età
cm.	Kg	mc.	anni
3	2,270	0,002270	9,829
4	4,246	0,004246	11,838
5	6,996	0,006996	13,676
6	10,522	0,010522	15,887
7	14,856	0,014856	17,000
8	20,029	0,020029	18,533
9	26,070	0,026070	20,000
10	33,003	0,033003	21,410
11	40,848	0,040848	22,770
12	49,630	0,049630	24,088
13	59,365	0,059365	25,368
14	70,073	0,070073	26,613
15	81,772	0,081772	27,817
16	94,479	0,094479	29,013
17	108,207	0,108207	30,173
18	122,972	0,122972	31,309
19	138,788	0,138788	32,423
20	155,668	0,155668	33,516
21	173,628	0,173628	34,591
22	192,678	0,192678	35,647
23	212,831	0,212811	36,6116
24	234,095	0,234095	37,710
25	256,485	0,256485	38,719

SUGHERA

del Comune di Buddusò – P. D'Errico – E. Beccu (Piano di assestamento, decennio 1967-1976) Tavola dendrometrica locale ad una sola entrata del bosco di sughera della foresta del Comune di Buddusò (Sassari). Detta tavola è stata costruita sulla base di 400 alberi modello.

Classi diametriche sopra scorza	Altezza indicativa	Peso totale	Massa dendrometrica
cm.	m.	ql.	Mc.
10	4,3	0,36	0,045
15	4,7	0,80	0,100
20	5,0	1,35	0,168
25	5,5	2,30	0,287
30	6,0	3,40	0,425
35	6,6	4,50	0,562
40	7,3	6,20	0,775
45	8,0	8,00	1,000
50	8,9	10,00	1,250
55	9,3	13,00	1,625
60	9,6	16,00	2,600

SUGHERA

del Comune di Buddusò – P. D’Errico – E. Beccu (Piano di assestamento, decennio 1967-1976) Tavola locale per il calcolo della superficie di plancia del bosco di sughera della foresta del comune di Buddusò (Sassari). Detta tavola è stata costruita sulla base di “numerosi” osservazioni.

Classi diametriche sopra scorza	Altezza media di decortica	Circonferenza sopra scorza	Superficie di plancia	Coefficiente di decortica
cm.	cm.	cm.	mq.	
10	77	31,42	0,24	2,45
15	86	47,12	0,40	1,82
20	95	62,83	0,59	1,51
25	104	78,54	0,81	1,32
30	117	94,25	1,10	1,24
35	132	110,00	1,45	1,20
40	150	125,70	1,88	1,19
45	174	141,40	2,46	1,23
50	200	157,10	3,14	1,27
55	230	172,80	3,97	1,33
60	260	188,50	4,90	1,37

SUGHERA

del Goceano – E. Paltrinieri (Piano di assestamento, quindicennio 1968-1982)

Tavola alsometrica locale della fustaia coetanea prevalentemente pura di sughera a tratti mista con leccio e roverella del bosco della foresta demaniale del Goceano (Sassari). Detta tavola è stata costruita sulla base di rilievi eseguiti in occasione dell'approntamento del piano di assestamento e di particolari. artifici di cui si è valso l'autore, tenendo conto anche di esperienze portoghesi di J. V. Natividade e di indicazioni dei dott. G. Bosetto e M. Falchi.

Età	Piante	Volume complessivo	Superficie coperta	Incremento corrente	Incremento medio	Arca basimetrica	Superficie sughero		Incremento medio superf. sughericola
							unitaria	compl.	
anni	n.	mc.	mq.	mc.	mc.	mq.	mq.	mq.	mq.
20	857	24	1.285		1,20	4,88	0,175	150	7,50
30	606	40	1.818	1,60	1,33	7,69	0,380	230	7,66
40	500	61	2.250	2,10	1,52	10,65	0,640	320	8,00
50	436	86	3.052	2,50	1,72	14,34	0,950	414	8,30
60	388	115	3.686	2,90	1,91	19,05	1,287	499	8,30
70	350	146	4.200	3,10	2,08	23,13	1,670	584	8,30
80	315	172	4.882	2,60	2,15	26,11	2,050	646	8,07
90	278	192	5.560	2,00	2,13	28,66	2,400	667	7,04
100	239	205	5.855	1,30	2,05	30,04	2,866	679	6,80
110	205	213	6.150	0,80	1,94	32,59	3,270	670	6,09
120	172	214	6.450	0,10	1,78	29,84	3,700	636	5,00
130	142	210	6.603	0,40	1,61	28,42	4,116	584	4,49
140	117	203	6.786	0,70	1,45	27,02	4,650	544	3,90
150	95	191	7.125	1,20	1,27	25,09	5,050	480	3,20

SUGHERA

del Goceano – E. Paltrinieri (Piano di assestamento, quindicennio 1968-1982).

Tavola dendrometrica locale, ad una sola entrata della fustaia coetanea prevalentemente pura di sughera a tratti mista con leccio e roverella del bosco della foresta demaniale del Goceano (Sassari).

Detta tavola è stata costruita sulla base di n. 176 alberi modello; contiene anche la tabella relativa alla superficie di decortica in corrispondenza dei vari diametri, ricavata da rilievi eseguiti su n. 1000 piante.

Diam. a m. 1,30	Volume	Incremento corrente	Età	Superficie di decortica
cm.	mc.	mc.	anni	mq.
10	0,041	0,0032	24	0,245
15	0,097	0,0057	36	0,527
20	0,181	0,0078	48	0,867
25	0,296	0,0109	60	1,287
30	0,446	0,0138	72	1,771
35	0,631	0,0146	86	2,288
40	0,885	0,0173	100	2,866
45	1,113	0,0203	115	3,507
50	1,124	0,0233	128	4,116
55	1,776	0,0265	142	4,752
60	2,171	0,0298	156	5,335
65	2,613	0,0332	170	5,963
70	3,104	0,0367	185	6,575

TAVOLE DI CUBATURA A DOPPIA ENTRATA
 Castellani C., Scrinzi G., Tabacchi G., Tosi V. (1984). Ministero Agricoltura e Foreste,
 ISAFA, Inventario Forestale Nazionale Italiano. Trento

Tavola generale a doppia entrata delle quercie allevate a fustaia
 Valenza dendrologica
 Codice I.F.N.I.
 344 Quercus ilex leccio
 348 Quercus pubescens roverella
 349 Quercus suber sughera
 Espressione funzionale

$$v = b_1 d^2 h + b_2 d + b_3 h + b_4 d^2 + b_5 h^2 + b_6 d h^2 + b_7 d^2 h^2 + b_8 d^3 + b_9 d^3 h^2 \quad (v[m^3], h[m], d[cm])$$

$$\begin{aligned} b_1 &= 0,307106 \cdot 10^{-4} & b_2 &= 0,172373 \cdot 10^{-3} & b_3 &= -0,252758 \cdot 10^{-3} & b_4 &= 0,585386 \cdot 10^{-4} \\ b_5 &= -0,120911 \cdot 10^{-4} & b_6 &= 0,113982 \cdot 10^{-5} & b_7 &= 0,152380 \cdot 10^{-7} & b_8 &= 0,488191 \cdot 10^{-5} \\ b_9 &= 0,397981 \cdot 10^{-9} \end{aligned}$$

Tavola generale delle quercie allevate a fustaia

d [cm]	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
15	0,099	0,086	0,095	0,100	0,107	0,114	0,120	0,127	0,134	0,141	0,148	0,155	0,162	0,169	0,176	0,183	0,191	0,198	0,206	0,214	0,222	0,230	0,238	0,246	0,254	0,262	0,270	0,278	0,286	0,294	0,302	0,310	0,318	0,326	0,334	0,342	0,350	0,358	0,366	0,374	0,382	0,390	0,398	0,406	0,414	0,422	0,430	0,438	0,446	0,454	0,462	0,470	0,478	0,486	0,494	0,502	0,510	0,518	0,526	0,534	0,542	0,550	0,558	0,566	0,574	0,582	0,590	0,598	0,606	0,614	0,622	0,630	0,638	0,646	0,654	0,662	0,670	0,678	0,686	0,694	0,702	0,710	0,718	0,726	0,734	0,742	0,750	0,758	0,766	0,774	0,782	0,790	0,798	0,806	0,814	0,822	0,830	0,838	0,846	0,854	0,862	0,870	0,878	0,886	0,894	0,902	0,910	0,918	0,926	0,934	0,942	0,950	0,958	0,966	0,974	0,982	0,990	0,998	1,006	1,014	1,022	1,030	1,038	1,046	1,054	1,062	1,070	1,078	1,086	1,094	1,102	1,110	1,118	1,126	1,134	1,142	1,150	1,158	1,166	1,174	1,182	1,190	1,198	1,206	1,214	1,222	1,230	1,238	1,246	1,254	1,262	1,270	1,278	1,286	1,294	1,302	1,310	1,318	1,326	1,334	1,342	1,350	1,358	1,366	1,374	1,382	1,390	1,398	1,406	1,414	1,422	1,430	1,438	1,446	1,454	1,462	1,470	1,478	1,486	1,494	1,502	1,510	1,518	1,526	1,534	1,542	1,550	1,558	1,566	1,574	1,582	1,590	1,598	1,606	1,614	1,622	1,630	1,638	1,646	1,654	1,662	1,670	1,678	1,686	1,694	1,702	1,710	1,718	1,726	1,734	1,742	1,750	1,758	1,766	1,774	1,782	1,790	1,798	1,806	1,814	1,822	1,830	1,838	1,846	1,854	1,862	1,870	1,878	1,886	1,894	1,902	1,910	1,918	1,926	1,934	1,942	1,950	1,958	1,966	1,974	1,982	1,990	1,998	2,006	2,014	2,022	2,030	2,038	2,046	2,054	2,062	2,070	2,078	2,086	2,094	2,102	2,110	2,118	2,126	2,134	2,142	2,150	2,158	2,166	2,174	2,182	2,190	2,198	2,206	2,214	2,222	2,230	2,238	2,246	2,254	2,262	2,270	2,278	2,286	2,294	2,302	2,310	2,318	2,326	2,334	2,342	2,350	2,358	2,366	2,374	2,382	2,390	2,398	2,406	2,414	2,422	2,430	2,438	2,446	2,454	2,462	2,470	2,478	2,486	2,494	2,502	2,510	2,518	2,526	2,534	2,542	2,550	2,558	2,566	2,574	2,582	2,590	2,598	2,606	2,614	2,622	2,630	2,638	2,646	2,654	2,662	2,670	2,678	2,686	2,694	2,702	2,710	2,718	2,726	2,734	2,742	2,750	2,758	2,766	2,774	2,782	2,790	2,798	2,806	2,814	2,822	2,830	2,838	2,846	2,854	2,862	2,870	2,878	2,886	2,894	2,902	2,910	2,918	2,926	2,934	2,942	2,950	2,958	2,966	2,974	2,982	2,990	2,998	3,006	3,014	3,022	3,030	3,038	3,046	3,054	3,062	3,070	3,078	3,086	3,094	3,102	3,110	3,118	3,126	3,134	3,142	3,150	3,158	3,166	3,174	3,182	3,190	3,198	3,206	3,214	3,222	3,230	3,238	3,246	3,254	3,262	3,270	3,278	3,286	3,294	3,302	3,310	3,318	3,326	3,334	3,342	3,350	3,358	3,366	3,374	3,382	3,390	3,398	3,406	3,414	3,422	3,430	3,438	3,446	3,454	3,462	3,470	3,478	3,486	3,494	3,502	3,510	3,518	3,526	3,534	3,542	3,550	3,558	3,566	3,574	3,582	3,590	3,598	3,606	3,614	3,622	3,630	3,638	3,646	3,654	3,662	3,670	3,678	3,686	3,694	3,702	3,710	3,718	3,726	3,734	3,742	3,750	3,758	3,766	3,774	3,782	3,790	3,798	3,806	3,814	3,822	3,830	3,838	3,846	3,854	3,862	3,870	3,878	3,886	3,894	3,902	3,910	3,918	3,926	3,934	3,942	3,950	3,958	3,966	3,974	3,982	3,990	3,998	4,006	4,014	4,022	4,030	4,038	4,046	4,054	4,062	4,070	4,078	4,086	4,094	4,102	4,110	4,118	4,126	4,134	4,142	4,150	4,158	4,166	4,174	4,182	4,190	4,198	4,206	4,214	4,222	4,230	4,238	4,246	4,254	4,262	4,270	4,278	4,286	4,294	4,302	4,310	4,318	4,326	4,334	4,342	4,350	4,358	4,366	4,374	4,382	4,390	4,398	4,406	4,414	4,422	4,430	4,438	4,446	4,454	4,462	4,470	4,478	4,486	4,494	4,502	4,510	4,518	4,526	4,534	4,542	4,550	4,558	4,566	4,574	4,582	4,590	4,598	4,606	4,614	4,622	4,630	4,638	4,646	4,654	4,662	4,670	4,678	4,686	4,694	4,702	4,710	4,718	4,726	4,734	4,742	4,750	4,758	4,766	4,774	4,782	4,790	4,798	4,806	4,814	4,822	4,830	4,838	4,846	4,854	4,862	4,870	4,878	4,886	4,894	4,902	4,910	4,918	4,926	4,934	4,942	4,950	4,958	4,966	4,974	4,982	4,990	4,998	5,006	5,014	5,022	5,030	5,038	5,046	5,054	5,062	5,070	5,078	5,086	5,094	5,102	5,110	5,118	5,126	5,134	5,142	5,150	5,158	5,166	5,174	5,182	5,190	5,198	5,206	5,214	5,222	5,230	5,238	5,246	5,254	5,262	5,270	5,278	5,286	5,294	5,302	5,310	5,318	5,326	5,334	5,342	5,350	5,358	5,366	5,374	5,382	5,390	5,398	5,406	5,414	5,422	5,430	5,438	5,446	5,454	5,462	5,470	5,478	5,486	5,494	5,502	5,510	5,518	5,526	5,534	5,542	5,550	5,558	5,566	5,574	5,582	5,590	5,598	5,606	5,614	5,622	5,630	5,638	5,646	5,654	5,662	5,670	5,678	5,686	5,694	5,702	5,710	5,718	5,726	5,734	5,742	5,750	5,758	5,766	5,774	5,782	5,790	5,798	5,806	5,814	5,822	5,830	5,838	5,846	5,854	5,862	5,870	5,878	5,886	5,894	5,902	5,910	5,918	5,926	5,934	5,942	5,950	5,958	5,966	5,974	5,982	5,990	5,998	6,006	6,014	6,022	6,030	6,038	6,046	6,054	6,062	6,070	6,078	6,086	6,094	6,102	6,110	6,118	6,126	6,134	6,142	6,150	6,158	6,166	6,174	6,182	6,190	6,198	6,206	6,214	6,222	6,230	6,238	6,246	6,254	6,262	6,270	6,278	6,286	6,294	6,302	6,310	6,318	6,326	6,334	6,342	6,350	6,358	6,366	6,374	6,382	6,390	6,398	6,406	6,414	6,422	6,430	6,438	6,446	6,454	6,462	6,470	6,478	6,486	6,494	6,502	6,510	6,518	6,526	6,534	6,542	6,550	6,558	6,566	6,574	6,582	6,590	6,598	6,606	6,614	6,622	6,630	6,638	6,646	6,654	6,662	6,670	6,678	6,686	6,694	6,702	6,710	6,718	6,726	6,734	6,742	6,750	6,758	6,766	6,774	6,782	6,790	6,798	6,806	6,814	6,822	6,830	6,838	6,846	6,854	6,862	6,870	6,878	6,886	6,894	6,902	6,910	6,918	6,926	6,934	6,942	6,950	6,958	6,966	6,974	6,982	6,990	6,998	7,006	7,014	7,022	7,030	7,038	7,046	7,054	7,062	7,070	7,078	7,086	7,094	7,102	7,110	7,118	7,126	7,134	7,142	7,150	7,158	7,166	7,174	7,182	7,190	7,198	7,206	7,214	7,222	7,230	7,238	7,246	7,254	7,262	7,270	7,278	7,286	7,294	7,302	7,310	7,318	7,326	7,334	7,342	7,350	7,358	7,366	7,374	7,382	7,390	7,398	7,406	7,414	7,422	7,430	7,438	7,446	7,454	7,462	7,470	7,478	7,486	7,494	7,502	7,510	7,518	7,526	7,534	7,542	7,550	7,558	7,566	7,574	7,582	7,590	7,598	7,606	7,614	7,622	7,630	7,638	7,646	7,654	7,662	7,670	7,678	7,686	7,694	7,702	7,710	7,718	7,726	7,734	7,742	7,750	7,758	7,766	7,774	7,782	7,790	7,798	7,806	7,814	7,822	7,830	7,838	7,846	7,854	7,862	7,870	7,878	7,886	7,894	7,902	7,910	7,918	7,926	7,934	7,942	7,950	7,958	7,966	7,974	7,982	7,990	7,998	8,006	8,014	8,022	8,030	8,038	8,046	8,054	8,062	8,070	8,078	8,086	8,094	8,102	8,110	8,118	8,126	8,134	8,142	8,150	8,158	8,166	8,174	8,182	8,190	8,198	8,206	8,214	8,222	8,230	8,238	8,246	8,254	8,262	8,270	8,278	8,286	8,294	8,302	8,310	8,318	8,326	8,334	8,342	8,350	8,358	8,366	8,374	8,382	8,390	8,398	8,406	8,414	8,422	8,430	8,438	8,446	8,454	8,462	8,470	8,478	8,486	8,494	8,502	8,510	8,518	8,526	8,534	8,542	8,550	8,558	8,566	8,574	8,582	8,590	8,598	8,606	8,614	8,622	8,630	8,638	8,646	8,654	8,662	8,670	8,678	8,686	8,694	8,702	8,710	8,718	8,726	8,734	8,742	8,750	8,758	8,766	8,774	8,782	8,790	8,798	8,806	8,814	8,822	8,830	8,838	8,846	8,854	8,862	8,870	8,878	8,886	8,894	8,902	8,910	8,918	8,926	8,934	8,942	8,950	8,958	8,966	8,974	8,982	8,990	8,998	9,006	9,014	9,022	9,030	9,038	9,046	9,054	9,062	9,070	9,078	9,086	9,094	9,102	9,110	9,118	9,126	9,134	9,142	9,

Tavola generale a doppia entrata delle *quercie* allevate a ceduo

Valenza dendrologica

Codice I.F.N.I.

344 *Quercus ilex* leccio

348 *Quercus pubescens* roverella

349 *Quercus suber* sughera

Espressione funzionale

$$v = b_1 d^2 h + b_2 d h + b_3 d^2 + b_4 d^2 h^2 + b_5 d^3 h \quad (v[m^3], h[m], d[cm])$$

$$b_1 = 0,444912 \cdot 10^{-4} \quad b_2 = 0,217520 \cdot 10^{-4} \quad b_3 = 0,642760 \cdot 10^{-4} \quad b_4 = -0,728724 \cdot 10^{-6}$$

$$b_5 = -0,297849 \cdot 10^{-6}$$

Tavola generale delle *quercie* allevate a ceduo

$\frac{h}{d}$ d (cm)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3	0.0019	0.0023	0.0027	0.0031	0.0035	0.0038	0.0042	0.0045	0.0048	0.0051	0.0054							
4	0.0033	0.0040	0.0046	0.0053	0.0059	0.0065	0.0071	0.0077	0.0082	0.0087	0.0092							
5	0.0050	0.0061	0.0071	0.0081	0.0090	0.0099	0.0108	0.0116	0.0124	0.0132	0.0139	0.0146	0.0153	0.0159				
6	0.0071	0.0086	0.0100	0.0114	0.0127	0.0140	0.0152	0.0164	0.0175	0.0186	0.0196	0.0205	0.0214	0.0223				
7	0.0095	0.0115	0.0134	0.0152	0.0170	0.0187	0.0203	0.0219	0.0234	0.0248	0.0261	0.0274	0.0286	0.0297				
8	0.0123	0.0148	0.0173	0.0196	0.0219	0.0241	0.0262	0.0281	0.0300	0.0318	0.0335	0.0351	0.0367	0.0381				
9		0.0186	0.0216	0.0246	0.0274	0.0301	0.0327	0.0351	0.0375	0.0397	0.0418	0.0438	0.0457	0.0474				
10		0.0227	0.0264	0.0300	0.0334	0.0367	0.0398	0.0428	0.0457	0.0484	0.0509	0.0533	0.0556	0.0577	0.0596	0.0615	0.0631	0.0647
11			0.0317	0.0360	0.0400	0.0439	0.0477	0.0512	0.0546	0.0578	0.0608	0.0637	0.0663	0.0688	0.0711	0.0733	0.0752	0.0770
12			0.0374	0.0424	0.0472	0.0518	0.0561	0.0603	0.0642	0.0680	0.0715	0.0748	0.0779	0.0808	0.0835	0.0860	0.0883	0.0903
13			0.0435	0.0493	0.0549	0.0602	0.0652	0.0700	0.0746	0.0789	0.0830	0.0868	0.0904	0.0937	0.0968	0.0996	0.1022	0.1045
14			0.0501	0.0567	0.0631	0.0691	0.0749	0.0804	0.0856	0.0905	0.0952	0.0995	0.1036	0.1074	0.1108	0.1141	0.1170	0.1196
15			0.0570	0.0645	0.0717	0.0786	0.0852	0.0914	0.0973	0.1028	0.1081	0.1130	0.1175	0.1218	0.1257	0.1293	0.1326	0.1355
16				0.0728	0.0809	0.0887	0.0960	0.1030	0.1096	0.1158	0.1217	0.1271	0.1322	0.1370	0.1413	0.1453	0.1489	0.1522
17				0.0816	0.0906	0.0992	0.1074	0.1152	0.1225	0.1294	0.1359	0.1420	0.1477	0.1529	0.1577	0.1621	0.1661	0.1696
18				0.0907	0.1007	0.1103	0.1193	0.1279	0.1360	0.1437	0.1508	0.1575	0.1637	0.1695	0.1748	0.1796	0.1839	0.1878
19				0.1003	0.1113	0.1218	0.1318	0.1412	0.1501	0.1585	0.1664	0.1737	0.1805	0.1868	0.1925	0.1977	0.2024	0.2066
20				0.1103	0.1224	0.1338	0.1447	0.1550	0.1648	0.1739	0.1825	0.1905	0.1979	0.2047	0.2109	0.2165	0.2216	0.2261
21					0.1338	0.1463	0.1582	0.1694	0.1800	0.1899	0.1992	0.2078	0.2158	0.2232	0.2299	0.2360	0.2414	0.2462
22					0.1457	0.1593	0.1721	0.1842	0.1957	0.2064	0.2164	0.2258	0.2344	0.2423	0.2495	0.2560	0.2618	0.2668
23					0.1580	0.1726	0.1865	0.1996	0.2119	0.2234	0.2342	0.2442	0.2534	0.2619	0.2696	0.2765	0.2827	0.2880
24					0.1707	0.1864	0.2013	0.2154	0.2286	0.2410	0.2525	0.2632	0.2731	0.2821	0.2903	0.2976	0.3041	0.3098
25					0.1837	0.2006	0.2166	0.2316	0.2457	0.2590	0.2713	0.2827	0.2931	0.3027	0.3114	0.3192	0.3260	0.3319
26						0.2152	0.2322	0.2483	0.2633	0.2774	0.2905	0.3026	0.3137	0.3238	0.3330	0.3412	0.3483	0.3545
27						0.2301	0.2483	0.2653	0.2813	0.2963	0.3101	0.3230	0.3347	0.3454	0.3550	0.3636	0.3711	0.3775
28						0.2454	0.2647	0.2828	0.2997	0.3155	0.3302	0.3437	0.3561	0.3674	0.3775	0.3864	0.3942	0.4009
29						0.2611	0.2815	0.3006	0.3185	0.3352	0.3507	0.3649	0.3779	0.3897	0.4003	0.4096	0.4177	0.4246
30						0.2771	0.2986	0.3188	0.3377	0.3552	0.3715	0.3864	0.4001	0.4124	0.4234	0.4331	0.4415	0.4486

APPENDICE

```
> #ANALISI UMIDITÀ CAMPIONI VERIFICA RAPPORTO PONDERALE FUSTO E RAMI
> obslab<- read.table("D:/Z_elab_R/obslab_zero.txt",header =
TRUE,row.names="ID_AMG")
> attach(obslab)
> rsf<-
data.frame(fus=psc_fusto/pfc_fusto,ram=psc_rami/pfc_rami,fas=psc_fasc/
pfc_fasc,res=(psc_res_ramu+psc_res_fog)/(pfc_res_ramu+pfc_res_fog)
> rsf[,]
      fus      ram      fas      res
1 0.6253627 0.6365719 0.573063 0.535684
> ## la stringa precedente calcola il rapporto ponderale tra le
componenti fusto, rami, fascina, residui
> ## la stringa sotto calcola la media dei 46 rapporti relativi alle 4
componenti principali
> mean(rsf,na.rm=TRUE)
      fus      ram      fas      res
0.6203625 0.6183857 0.5775708 0.5261086
> attach(rsf)
> ## si crea il grafico(fig. 17) con tutti i rapporti per una verifica
> matplot(rsf)
> plot(fus,ram)
> # si crea un grafico (fig. 18) a dispersione tra fusto e rami e
> # si imposta una regressione lineare passante per origine
> regr_fus_ram1<-lm(ram~-1+fus)
> summary(regr_fus_ram1)
Call:
lm(formula = ram ~ -1 + fus)
Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.0388256 -0.0034674 -0.0004042  0.0049338  0.0336033
Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
fus  0.996748   0.002762   360.9  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 0.01162 on 45 degrees of freedom
Multiple R-Squared:  0.9997,    Adjusted R-squared:  0.9996
F-statistic: 1.303e+05 on 1 and 45 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Box 7 Codice R analisi umidità campioni: elaborazione rapporti ponderali

```
## TEST T AD UNA SOLA CODA (r rami < r fusto)
>Test_medie_1coda<-
t.test(fus,ram,mu=0,alternative="greater",conf.level=0.95,paired=T)
> Test_medie_1coda      Paired t-test
data: fus and ram
t = 1.1526, df = 45, p-value = 0.1276
alternative hypothesis: true difference in means is greater than 0
95 percent confidence interval:
 -0.0009035368      Inf
sample estimates:
mean of the differences
      0.001976821
```

Box 8 - Codice R: T'test

```

# CODICE R UTILIZZATO PER IL CONFRONTO CON I MODELLI DI STIMA DELLA
FITOMASSA ESISTENTI
> ## sui dati contenuti su una tabella (omessa) si realizza un grafico
a dispersione
> plot(PS_CIANCIO,PS_misurato)
> ## calcolo del coefficiente di correlazione
> cor(PS_CIANCIO,PS_misurato)
[1] 0.9686293
> ## calcolo della retta di regressione
> ciancio_pas_orig<-lm(PS_misurato~-1+PS_CIANCIO,data=Tab)
> ## sintesi delle statistiche
> summary(ciancio_pas_orig)
Call: lm(formula = PS_misurato ~ -1 + PS_CIANCIO, data = Tab)
Residuals:
            Min       1Q   Median       3Q      Max
      -682.94   -95.53   -50.50    33.70   832.59
Coefficients:
            Estimate      Std. Error      t value      Pr(>|t|)
PS_CIANCIO  1.46275      0.04024      36.35      <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 211.2 on 46 degrees of freedom
Multiple R-Squared:  0.9664,    Adjusted R-squared:  0.9656
F-statistic: 1321 on 1 and 46 DF,  p-value: < 2.2e-16
> ## si calcolano gli scarti (misurato - stimato )
> scarto<-(PS_misurato-PS_CIANCIO)
> ## grafico degli scarti (fig. 38)
> plot(scarto, ylab="scarto = PS_misurato -
PS_Ciancio",xlab="AMG",main="Scarti");abline(h=0)
> ## calcolo dei valori teorici che stanno sulla retta di regressione
con funzione predict
> ## calcolo dei residui del modello di regressione con funzione
residuals
> ## grafico residui verso i valori attesi dal modello (predict o
fitted) (fig. 39)
> plot(fitted(ciancio_pas_orig),residuals(ciancio_pas_orig),
ylab="residui",xlab="y
attesi",main=formula(ciancio_pas_orig));abline(h=0)
> ## grafico residui verso i valori attesi espressi con log
> plot(log(fitted(ciancio_pas_orig)),residuals(ciancio_pas_orig),
ylab="residui",xlab="log y
attesi",main=formula(ciancio_pas_orig));abline(h=0)
> ## applicazione ANOVA al modello lineare
> anova(ciancio_pas_orig)
Analysis of Variance Table
Response: PS_misurato
            Df Sum Sq      Mean Sq    F value    Pr(>F)
PS_CIANCIO  1  58938339    58938339    1321.4      < 2.2e-16 ***
Residuals   46  2051808     44605
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> ## anova utili per fare ulteriori considerazioni sul modello

```

Box 10 – Codice R: confronto dei modelli esistenti per la stima della fitomassa

```

#STIMA DIRETTA DELLA FITOMASSA
> #
> P1<- read.table("D:/Z_elab_R/prova_modelli_cub.txt",header = TRUE)
> P1[,2,] (omesso)
> attach(P1)
> h<-h_tot_ipsometrica
> d<-d_130
> #polinomio di riferimento iniziale con le variab. indipend.dbh e h
> ## fm= regr.lineare multipla con tutte possibili combinaz. utili
>summary(fm<lm(formula=PS_epigeo_tot~d+h+I(d*h)+I(d^2)+I(h^2)+
+I(d^2*h)+I(d*h^2)+I(d^3)+I(h^3)+I(d^4)+I(h^4)))

Call:
lm(formula = PS_epigeo_tot ~ d + h + I(d * h) + I(d^2) + I(h^2) +
    I(d^2 * h) + I(d * h^2) + I(d^3) + I(h^3) + I(d^4) + I(h^4))
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-295.49  -90.22  -10.66   57.73  427.83
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.336e+04  7.497e+03   1.781  0.0835 .
d            -3.666e+02  3.700e+02  -0.991  0.3286
h            -4.353e+03  2.931e+03  -1.485  0.1464
I(d * h)     -1.349e+01  3.715e+01  -0.363  0.7188
I(d^2)       2.046e+01  1.592e+01   1.285  0.2071
I(h^2)       6.636e+02  4.090e+02   1.623  0.1137
I(d^2 * h)  -1.699e-01  7.169e-01  -0.237  0.8141
I(d * h^2)   8.018e-01  3.082e+00   0.260  0.7962
I(d^3)      -3.248e-01  3.646e-01  -0.891  0.3792
I(h^3)      -4.255e+01  2.550e+01  -1.668  0.1042
I(d^4)       2.193e-03  2.107e-03   1.040  0.3053
I(h^4)       9.772e-01  5.622e-01   1.738  0.0910 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 147.5 on 35 degrees of freedom
Multiple R-Squared:  0.976,    Adjusted R-squared:  0.9685
F-statistic: 129.5 on 11 and 35 DF,  p-value: < 2.2e-16

> # inizia la procedura per stepwise-regression
> fm0<-lm(PS_epigeo_tot~1)
> s<-step(fm0,scope=formula(fm),direction="both")
Start:  AIC=632.89
PS_epigeo_tot ~ 1

```

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
+ I(d^3)	1	30499027	1246980	483
+ I(d^2)	1	30253599	1492408	491
+ I(d^2 * h)	1	29358654	2387353	513
+ I(d^4)	1	29239929	2506078	516
+ d	1	27673373	4072634	538
+ I(d * h)	1	25811654	5934353	556
+ I(d * h^2)	1	23776542	7969465	570
+ I(h^3)	1	13922380	17823627	608
+ I(h^4)	1	13822227	17923780	608
+ I(h^2)	1	13744113	18001894	608
+ h	1	13178140	18567867	610
<none>			31746007	633

```

Step: AIC=482.75
PS_epigeo_tot ~ I(d^3)
      Df Sum of Sq      RSS      AIC
+ d    1  194064  1052916    477
+ I(d^2) 1  163432  1083548    478
+ I(d * h) 1  122613  1124367    480
+ h    1  105021  1141959    481
+ I(d^4) 1  100768  1146212    481
+ I(h^2) 1   86788  1160192    481
+ I(d * h^2) 1   69492  1177488    482
+ I(h^3) 1   69052  1177928    482
+ I(d^2 * h) 1   61089  1185891    482
+ I(h^4) 1   54051  1192929    483
<none>                1246980    483
- I(d^3) 1 30499027 31746007    633
Step: AIC=476.8
PS_epigeo_tot ~ I(d^3) + d
      Df Sum of Sq      RSS      AIC
+ I(d^4) 1   79021  973895    475
+ I(d^2) 1   68983  983933    476
<none>                1052916    477
+ I(d^2 * h) 1   9966 1042950    478
+ h    1   3756 1049161    479
+ I(h^2) 1   1560 1051357    479
+ I(d * h^2) 1   1517 1051399    479
+ I(d * h) 1    648 1052268    479
+ I(h^3) 1    444 1052473    479
+ I(h^4) 1     54 1052862    479
- d    1  194064 1246980    483
- I(d^3) 1 3019718 4072634    538
Step: AIC=475.13
PS_epigeo_tot ~ I(d^3) + d + I(d^4)
      Df Sum of Sq      RSS      AIC
- I(d^3) 1   10552  984448    474
<none>                973895    475
+ I(h^4) 1   19481  954414    476
+ I(h^3) 1   17337  956559    476
+ I(d * h^2) 1   16104  957792    476
+ I(h^2) 1   15478  958417    476
+ I(d^2 * h) 1   14458  959437    476
+ I(d * h) 1   14105  959790    476
+ h    1   13692  960203    476
+ I(d^2) 1   10616  963279    477
- I(d^4) 1   79021 1052916    477
- d    1  172317 1146212    481
Step: AIC=473.64
PS_epigeo_tot ~ d + I(d^4)
      Df Sum of Sq      RSS      AIC
<none>                984448    474
+ I(d^3) 1   10552  973895    475
+ h    1   9955  974493    475
+ I(d^2) 1   8900  975548    475
+ I(h^2) 1   8863  975585    475
+ I(h^3) 1   7916  976532    475
+ I(h^4) 1   7340  977108    475
+ I(d * h) 1   3334  981114    475
+ I(d * h^2) 1   2925  981523    475
+ I(d^2 * h) 1     40  984407    476
- d    1 1521630 2506078    516
- I(d^4) 1 3088186 4072634    538
> s$call
lm(formula = PS_epigeo_tot ~ d + I(d^4))
> ## si verifica l'equazione di regressione proposta dall'analisi
> summary(fm1<-lm(PS_epigeo_tot~d+I(d^4)))
Call:
lm(formula = PS_epigeo_tot ~ d + I(d^4))
Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-546.35  -72.08  -13.80   65.14  437.98

```

```

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -4.417e+02  1.047e+02  -4.216 0.000122 ***
d             3.218e+01  3.902e+00   8.247 1.79e-10 ***
I(d^4)       1.344e-04  1.144e-05  11.748 3.70e-15 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 149.6 on 44 degrees of freedom
Multiple R-Squared:  0.969,    Adjusted R-squared:  0.9676
F-statistic: 687.4 on 2 and 44 DF,  p-value: < 2.2e-16
> #
> ## Grafico (fig. 47): residui in funzione valori attesi log()
> plot(log(fitted(fm1)), residuals(fm1), ylab="residui", xlab="log y
attesi",); abline(h=0)
> #
> # impostazione analisi per grafico successivo
> predict(fm1) (omesso)
> # stringa sopra calcola i valori di volume attesi in
> # corrispondenza dei diametri
> seq(min(P1$d), max(P1$d), len=30)
 [1] 18.00000 19.75862 21.51724 23.27586 25.03448 26.79310 28.55172
30.31034
 [9] 32.06897 33.82759 35.58621 37.34483 39.10345 40.86207 42.62069
44.37931
[17] 46.13793 47.89655 49.65517 51.41379 53.17241 54.93103 56.68966
58.44828
[25] 60.20690 61.96552 63.72414 65.48276 67.24138 69.00000
> # la stringa crea una sequenza di valori tra il diametro minimo e
massimo
> diam_prev<-seq(min(P1$d), max(P1$d), len=30)
> # si rinomina la sequenza
> PS_epigeo_tot_prev<-
predict(fm1, data.frame(d=diam_prev), interval="confidence")
> PS_epigeo_tot_prev[,]
      fit      lwr      upr
151.59511  69.79669 233.39354
> # la stringa calcola sulla base del modello una serie di valori di
> # volume attesi (fit), valori di estremo superiore (upr) e
inferiore (lpr)
> # Grafico (fig. 46): grafico a dispersione del peso secco epifeo
in funzione del diametro
> plot(PS_epigeo_tot~d, data=P1, xlab="dbh[cm]", ylab="peso secco
epiegeo [kg]")
> # si migliora il grafico
> points(predict(fm1)~d, data=P1, pch=2)
> ## aggiunge al grafico una serie di triangoli che corrispondono ai
> ## valori di volume calcolati dal modello in corrispondenza dei
diametri misurati in campo
> lines(diam_prev, PS_epigeo_tot_prev[, "fit"], lty=3, lwd=2:2)
> ## aggiunge la linea di tendenza del modello
> lines(diam_prev, PS_epigeo_tot_prev[, "lwr"], lty=3)
> lines(diam_prev, PS_epigeo_tot_prev[, "upr"], lty=3)
> ## disegna le bande di confidenza

```

Box 13 - Codice R per applicazione “stepwise regression”

```

> ## Elaborazione dal volume cilindrometrico standardizzato
> summary(V_cil_r)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 71.99 123.10  228.10  325.70  394.60 1608.00
> cl_V_cil_r<-cut(V_cil_r,breaks=c(70,100,200,300,500,1610))
> summary(cl_V_cil_r)
  (70,100]  (100,200]  (200,300]  (300,500]  (500,1.61e+03]
         8         12          9          9          8
> ## sono state create classi di volume cilind standard
> ## ora si calcola il valore medio della classe di vol_cil_standard.
> mean_V_cil_r_perclasse<-by(V_cil_r,cl_V_cil_r,mean)
> mean_V_cil_r_perclasse
INDICES: (70,100]      [1] 82.79314
INDICES: (100,200]    [1] 147.1994
INDICES: (200,300]    [1] 240.2566
INDICES: (300,500]    [1] 377.077
INDICES: (500,1.61e+03] [1] 874.9092
> ## si calcola la varianza del volume del fusto per i diversi livelli
di vol_cil_standardizzato
> var_V_fusto<-by(V_fusto,cl_V_cil_r,var)
> var_V_fusto
INDICES: (70,100]      [1] 942.6072
INDICES: (100,200]    [1] 3770.065
INDICES: (200,300]    [1] 1261.543
INDICES: (300,500]    [1] 22981.3
INDICES: (500,1.61e+03] [1] 317535.4
> ## ora si crea il grafico (fig. 52) dove la var_V_fusto è espressa
in funzione dei valori medio delle classi di vol_cil_stand
> plot(mean_V_cil_r_perclasse,var_V_fusto)
> ## sul grafico si nota chiaramente un andamento di tipo parabolico

```

Box 14 – Codice R: analisi rapporto tra volume fusto e volume standardizzato

```

## stringa di comando che esegue la partizione ricorsiva
fit_C_stz<rpart(F_cormo_stz~d+h++eta+hr_ins_ramo_max+dr_ramo_MAX+ang_m
in+ang_min_c+ang_med_c+V_cil_r,tab)
fit_C_stz
n= 46
node),          split, n,  deviance,  yval    * denotes
terminal node
1) root                46  3.7660240  1.449429
  2) hr_ins_ramo_max< 0.3245819 30  1.6727820  1.336092
    4) ang_min_c<      52.5 17  0.3501663  1.218740 *
    5) ang_min_c>=    52.5 13  0.7823476  1.489553 *
  3) hr_ins_ramo_max>=0.3245819 16  0.9853396  1.661936 *
## la stringa successiva crea il grafico (fig. 53)
> plot(fit_C_stz);text(fit_C_stz)
## seguono una serie di stringhe che consentono per ogni AMG di avere
il gruppo ## di appartenenza, il valore del coefficiente del singolo
albero e quello medio ## relativo al gruppo di appartenenza(predict
Ftr).
> tabella_F_C_stz<-data.frame(fit_C_stz$where,fit_C_stz$y,
predict(fit_C_stz))
## sotto si costruisce il grafico (fig. 54)
> plot(predict(fit_C_stz),F_cormo_stz)
> lines(predict(fit_C_stz),predict(fit_C_stz))

```

Box 7 – codice R: regression tree

```

> ## Verifica inserimento altezza inserzione ramo su una funzione di
> ## cubatura fitomassa epigea totale
> ## contribuisce a migliorare l'accuratezza della stima
> P1<- read.table("D:/R_prove/.....",header = TRUE)
> attach(P1)
> d<-d_130
> h<-h_tot_ipsometrica
> hin<-hr_ins_ramo_max
> summary(fm<-lm(formula=PS_epigeo_tot~d+h+hin+I(d*h)+I(d^2)+I(h^2)+
+I(d^2*h)+I(d*h^2)+I(d^3)+I(h^3)+I(d^4)+I(h^4)))

Call:
lm(formula = PS_epigeo_tot ~ d + h + hin + I(d * h) + I(d^2) +
    I(h^2) + I(d^2 * h) + I(d * h^2) + I(d^3) + I(h^3) + I(d^4) +
    I(h^4))

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-264.81  -58.69   -1.80    67.87   345.58

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.338e+04  7.246e+03   1.846  0.0739 .
d            -1.871e+02  3.903e+02  -0.479  0.6349
h            -4.816e+03  2.904e+03  -1.658  0.1067
hin          -4.837e+02  2.195e+02  -2.204  0.0346 *
I(d * h)     -1.302e+01  3.651e+01  -0.357  0.7237
I(d^2)        1.173e+01  1.645e+01   0.713  0.4809
I(h^2)        7.300e+02  4.060e+02   1.798  0.0814 .
I(d^2 * h)   -5.576e-01  7.480e-01  -0.745  0.4613
I(d * h^2)    1.784e+00  3.139e+00   0.568  0.5737
I(d^3)       -1.013e-01  3.840e-01  -0.264  0.7936
I(h^3)       -4.763e+01  2.530e+01  -1.882  0.0687 .
I(d^4)        9.359e-04  2.205e-03   0.424  0.6740
I(h^4)        1.078e+00  5.502e-01   1.960  0.0585 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 141.8 on 33 degrees of freedom
Multiple R-Squared:  0.979,    Adjusted R-squared:  0.9714
F-statistic: 128.4 on 12 and 33 DF,  p-value: < 2.2e-16
> ## si procede allo step
> fm0<-lm(PS_epigeo_tot~1)
> s<-step(fm0,scope=formula(fm),direction="both")
Start:  AIC=620.32
PS_epigeo_tot ~ 1
> ## ometto output intermedi
Step:  AIC=461.57
PS_epigeo_tot ~ d + hin + I(d^4)

            Df Sum of Sq      RSS      AIC
<none>          0          881101    462
+ I(h^4)         1          13779    463
+ I(h^3)         1          13518    463
+ I(h^2)         1          13115    463
+ h              1          12281    463
+ I(d^3)         1           9352    463

```



```

+ I(d^2)      1      7818  873283    463
+ I(d * h^2) 1      6812  874289    463
+ I(d * h)   1      6777  874324    463
+ I(d^2 * h) 1       876  880225    464
- hin        1     103152  984253    465
- d           1     1196618 2077719    499
- I(d^4)      1     3160696 4041797    530
> ##
> s$call
lm(formula = PS_epigeo_tot ~ d + hin + I(d^4))
> s$coefficients
      (Intercept)              d              hin              I(d^4)
-2.551789e+02  2.972594e+01 -4.577119e+02  1.364457e-04
> ## si verifica la regressione proposta
> summary(fm1<-lm(PS_epigeo_tot~d+hin+I(d^4)))
Call:
lm(formula = PS_epigeo_tot ~ d + hin + I(d^4))
Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-498.950  -63.894   -1.912    62.557   379.018
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -2.552e+02  1.317e+02  -1.937  0.0595 .
d             2.973e+01  3.936e+00   7.552 2.38e-09 ***
hin          -4.577e+02  2.064e+02  -2.217  0.0321 *
I(d^4)        1.365e-04  1.112e-05  12.274 1.76e-15 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 144.8 on 42 degrees of freedom
Multiple R-Squared:  0.9722,    Adjusted R-squared:  0.9702
F-statistic: 488.9 on 3 and 42 DF,  p-value: < 2.2e-16

> # un'ulteriore selezione/semplificazione del modello
> # eliminazione coefficienti meno significativi (intercetta)
> summary(fm2<-lm(PS_epigeo_tot~-1+d+hin+I(d^4)))
Call:
lm(formula = PS_epigeo_tot ~ -1 + d + hin + I(d^4))
Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-428.93  -92.97  -17.46    77.61   364.06
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
d             2.288e+01  1.788e+00   12.80 2.94e-16 ***
hin          -7.124e+02  1.641e+02  -4.34 8.49e-05 ***
I(d^4)        1.504e-04  8.714e-06   17.27 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 149.4 on 43 degrees of freedom
Multiple R-Squared:  0.9842,    Adjusted R-squared:  0.9831
F-statistic: 892.9 on 3 and 43 DF,  p-value: < 2.2e-16
> ## crea grafico dei residui
> plot(log(fitted(fm2)),residuals(fm2), ylab="residui",xlab="log y
attesi");abline(h=0) (fig. 56)
> plot(log(fitted(fm1)),residuals(fm1), ylab="residui",xlab="log y
attesi");abline(h=0) (fig. 55)

```

Box 16 – Codice R: verifica inserimento altezza inserzione ramo principale su modello stima diretta fitomassa arborea epigea