

GIACOMO NICOLINI (*) (°) - VIERI TARCHIANI (*)
ANDREA DI VECCHIA (*) - FABIO SALBITANO (**)

VERSO UN METODO DI VALUTAZIONE SINTETICA DELLA BIOMASSA DI RIMBOSCHIMENTI IN ZONE SEMI-ARIDE: LIMITI E PROSPETTIVE NELL'ADOZIONE DI MODELLI ALLOMETRICI A KEITA, NIGER

Nel Sahel, a fronte del progressivo degrado delle risorse forestali dovuto al fenomeno dei cambiamenti climatici e alla crescente pressione antropica, sono stati realizzati negli ultimi 30 anni importanti interventi di rimboschimento. La quantificazione della biomassa legnosa è il sistema più opportuno per valutarne l'efficacia. In questo lavoro viene proposto un approccio a basso impatto ambientale per stime correnti di biomassa. Sono stati sviluppati e analizzati modelli allometrici in piantagioni di Acacia spp. nella valle di Keita, in Niger e si è valutata la possibilità di utilizzare un modello generalizzato per le specie dominanti: Acacia seyal Del., A. raddiana Savi (syn. A. tortilis Hayne), A. nilotica (Guill. et Perrott.). Le funzioni sono state costruite adottando come variabili esplicative il diametro a 0,80 m e l'altezza totale delle piante modello. L'analisi della regressione è stata realizzata con il metodo dei minimi quadrati ordinari dopo aver eseguito la trasformazione logaritmica delle osservazioni. In seguito è stata confrontata l'efficacia perequativa del modello multi-specifico con quella dei modelli specie-specifici. L'analisi dell'entità degli scostamenti tra valori osservati e attesi ha mostrato un'ottima capacità interpretativa in entrambi gli approcci ($R^2 > 0,98$, $P < 0,001$). Diversi test statistici, parametrici e non, hanno permesso di affermare che le tre specie di Acacia possono essere considerate come appartenenti alla stessa popolazione statistica e quindi che nelle condizioni specifiche è possibile avvalersi di un unico modello «multi-specifico». Ciò consente di semplificare in modo sostanziale la procedura estimativa, senza un'eccessiva perdita di accuratezza.

I risultati ottenuti in questo lavoro vogliono rappresentare un contributo metodologico/operativo alle stime di biomassa in ambienti semi-aridi ai fini della loro sostenibilità tecnica ed economica ovvero, della loro riproducibilità ed efficacia.

Parole chiave: Sahel; Acacia; riforestazione; ambienti aridi; funzioni stereometriche.

Key words: Sahel; Acacia; reforestation; arid environments; stereometric functions.

(*) Ibimet-CNR - Istituto di Biometeorologia del Consiglio Nazionale delle Ricerche, via G. Caproni 8, 50145 Firenze.

(**) Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Scienze e Tecnologie Forestali, via San Bonaventura 13, 50145 Firenze.

(°) Corresponding author: g.nicolini@ibimet.cnr.it

INTRODUZIONE

I Paesi dell'area saheliana negli ultimi decenni hanno subito un progressivo ed apparentemente irreversibile processo di degradazione delle risorse forestali. A partire dagli anni '60 infatti, il peggioramento delle condizioni ambientali legato al fenomeno del *global warming*, assieme all'intensificazione della pressione antropica, hanno causato la scomparsa di intere superfici boscate. L'albero, in Regioni aride e semi aride come quella saheliana, riveste un ruolo chiave non soltanto negli equilibri ambientali ma anche in quelli sociali ed economici (BREMAN e KESSLER, 1995). Per le popolazioni rurali è una delle risorse naturali più importanti in quanto contribuisce al soddisfacimento di bisogni primari. In Niger, data la scarsa disponibilità e la limitata competitività di fonti energetiche alternative (petrolio e gas), il legno assicura circa il 90% del fabbisogno energetico locale di supporto all'alimentazione. Viene utilizzato sia come legna da ardere sia come carbone, destinato all'autoconsumo o commercializzato sui mercati locali e per molte famiglie rappresenta un'importante fonte di reddito. È impiegato come materiale da opera per la costruzione di abitazioni e fabbricati vari ma anche per la realizzazione di attrezzi da lavoro e utensileria domestica. Un ruolo molto importante è svolto anche dai prodotti forestali non legnosi (foglie, gomme, resine, polifenoli ecc.) che contribuiscono alla sicurezza alimentare sia attraverso il consumo diretto (prodotti freschi, conservati o trasformati) sia in modo indiretto in quanto costituiscono una base foraggera indispensabile per il bestiame, specialmente durante la stagione secca (BILLE, 1980). Questi prodotti svolgono inoltre rilevanti funzioni in altri settori delle società umane: basti pensare alle trasformazioni tessili ed ancor più al contributo nell'ambito medico e farmaceutico, convenzionale e non. I prodotti farmaceutici naturali rappresentano, per la larga maggioranza delle popolazioni rurali e urbane del Niger, l'unica risorsa terapeutica accessibile.

Indubbiamente, l'importanza di questa risorsa è altrettanto grande dal punto di vista ambientale.

La presenza di alberi e boschi nel paesaggio saheliano (savane, savane boscate o arbustive, steppe arboree o arbustive ed anche piantagioni arboree artificiali), comporta innumerevoli benefici tra i quali la protezione o il recupero dei terreni degradati, la riduzione dell'erosione (ostacolo alla desertificazione), l'aumento della fertilità edafica (in particolar modo le leguminose), aumento e conservazione della biodiversità e della biomassa vegetale.

Un approccio universalmente adottato per analizzare nel contempo lo *status* (salute, stadio evolutivo, flussi di energia e nutrienti) e le funzioni

ecologiche di una cenosi forestale, è la quantificazione della biomassa, intesa come sommatoria dell'efficienza fotosintetica dell'albero nel corso della sua storia. Tale analisi consente inoltre di proporre una serie di riflessioni sulla risposta degli alberi nel tempo in relazione ai criteri colturali adottati e agli obiettivi selvicolturali, ecologici e sociali ad essi sottesi. In questo modo è possibile osservare e interpretare le cause delle evoluzioni strutturali e produttive di un popolamento arboreo, informazioni fondamentali ai fini di una gestione corretta e sostenibile di questa risorsa.

La perequazione della massa legnosa può essere realizzata seguendo diversi approcci. La scelta del metodo più opportuno è condizionata da vari fattori quali la finalità della stima, il tipo e la qualità dei dati a disposizione, la scala alla quale si opera e l'errore che si è disposti a tollerare.

Le tecniche disponibili sono numerose, arricchite negli ultimi anni dagli sviluppi tecnologici nella modellistica ambientale, nelle tecniche di telerilevamento e in quelle *GIS-based* (LU, 2006).

Le tecniche basate su rilievi in campo tramite campionamento distruttivo e peso dell'intera pianta costituiscono un approccio ideale ma nello stesso tempo laborioso (KETTERINGS *et al.*, 2001) e non sempre applicabile. Tralasciando l'aspetto economico, una valida alternativa ai metodi distruttivi classici è rappresentata dall'utilizzo di strumentazione ottica o laser (MC HALE *et al.*, 2009). In particolare quest'ultima categoria (*laser scanning*) sta mostrando un grande potenziale nello studio delle risorse forestali (ABRAMO *et al.*, 2007). Generalmente il sistema è aereotrasportato (NELSON *et al.*, 1997; DAVIS e ROBERTS, 2000; DANILIN e MEDVEDEV, 2004; NÆSSET e GOBAKKEN, 2008). Ad esempio il sistema LiDAR - *Light Detection and Ranging* (LEFSKY *et al.*, 1999; LEFSKY *et al.*, 2002; DRAKE *et al.*, 2003; RIANO *et al.*, 2003; POPESCU, 2007) acquisisce dati a una risoluzione spaziale di circa 15,0 cm. Tale accuratezza, oltre ad essere utile a innumerevoli applicazioni, consente di rilevare attributi dendrometrici a livello della singola pianta e quindi di ricostruire i relativi rapporti allometrici. Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla bibliografia citata.

Tuttavia, le tecniche tradizionali basate su rilievi in campo rappresentano probabilmente il modo più dettagliato per quantificare la biomassa presente su un territorio (LU, 2006), e in effetti l'approccio basato sullo sviluppo e l'applicazione di equazioni stereometriche *ad hoc* è tutt'oggi molto diffuso (BROWN *et al.*, 1989; ESHETE e STAHL, 1998; VEIGA *et al.*, 1998; ACOSTA-MIRALES *et al.*, 2002; LAAMOURI *et al.*, 2002).

In ecosistemi tropicali, laddove si incontrano spesso limiti sostanziali di vario genere (difficile accessibilità dei siti, condizioni di lavoro estremamente precarie, problemi di sicurezza, attendibilità delle misure dovuta a formazione tecnica inadeguata) nella concreta possibilità di raccolta di dati

e nella disponibilità di studi tematici pregressi, l'applicazione di equazioni stereometriche opportunamente ricavate è molto spesso l'unico approccio perseguibile. Basate sull'allometria degli alberi, queste relazioni sono adoperate al fine di correlare grandezze facilmente misurabili in campo come il diametro e/o l'altezza di un albero al suo volume o biomassa.

Il modello stereometrico può essere riadattato da uno già esistente, a patto che questo sia basato su condizioni ecologiche (vegetative, orografiche e climatiche) analoghe a quelle di studio (KETTERINGS *et al.*, 2001). Questa possibilità, nonostante presenti molte semplificazioni dal punto di vista operativo, è condizionata da un limite intrinseco dovuto alla forte influenza che le condizioni microambientali e le caratteristiche fisiologiche della specie esercitano sulle modalità di crescita della pianta. Ove possibile, è quindi raccomandabile generare *ex novo* funzioni stereometriche calibrate sul soprassuolo in esame.

Nella sua concezione classica, il metodo esprime a pieno la sua potenza estimativa a condizione che siano rispettati alcuni presupposti di applicabilità inerenti alla popolazione oggetto di stima quindi al campione da essa prelevato. Tali presupposti si basano fondamentalmente su tre criteri statistici (CUNIA, 1964; BASKERVILLE, 1972), ossia *i.* un campionamento completamente casuale, *ii.* la normalità della distribuzione delle osservazioni campionarie e *iii.* l'omogeneità della varianza campionaria (omoschedasticità).

In contesti forestali della fascia temperata (foreste di latifoglie e/o conifere dell'Europa, dell'Asia e dell'America del nord) queste condizioni vengono di norma rispettate grazie alle caratteristiche strutturali ed alla storia colturale dei soprassuoli (produttività, densità, estensione, accessibilità ecc.), nonché in virtù dei mezzi di rilievo utilizzabili (tecnici e logistici).

Al contrario, nelle formazioni arboree e boschive in contesti aridi o semi-aridi, tali condizioni si concretizzano raramente. I popolamenti arborei sono spesso disomogenei nello spazio (densità basse e irregolari), gravemente carenti in provvigione, difficilmente accessibili. La loro storia colturale è frequentemente frutto di interventi non sistematici, di prelievi illegali o non pianificati, derivati da esigenze particolari e momentanee che prescindono da considerazioni compiute relative a tecniche selvicolturali. Inoltre, le risorse a disposizione (tecniche, logistiche, economiche e temporali) sono sovente scarse e non consentono di rispettare totalmente l'iter procedurale di questo approccio. Tali limiti minacciano seriamente la fattibilità delle stime in queste aree.

Una breve analisi sinottica delle potenzialità e dei limiti che questo approccio può avere nei due contesti (temperato e semi-arido) è riepilogata nella Tabella 1.

Nei sistemi tropicali semi-aridi quindi, in condizioni operative correnti,

raramente sussistono le condizioni necessarie all'applicazione rigorosa dei metodi classici. Ciò nonostante, è proprio in contesti di questo tipo che una quantificazione della biomassa assume un'importanza vitale per la gestione sostenibile delle risorse forestali. L'utilità dell'informazione ottenibile attraverso una tale stima può in questi casi giustificare un grado di approssimazione che in altri contesti non risulterebbe accettabile. La domanda che ci si deve porre è se può essere giustificata o meno una quantificazione sommaria – seppur realistica – della biomassa legnosa se questa rappresenta il punto di partenza di un utilizzo razionale e sostenibile delle risorse forestali.

Questo lavoro tenta di fornire una risposta a questo interrogativo attraverso un approccio ricerca-azione. In condizioni limitanti, si è testata la

Tabella 1 – Tavola sinottica delle potenzialità e dei limiti dell'approccio per modelli allometrici. Confronto fra zone temperate e zone semi-aride.

– *Synoptic table of limits and capabilities of the allometric models approach. Comparison between temperate and semi-arid zones.*

<i>Condizioni</i>	<i>Limiti e potenzialità dell'approccio</i>	
	<i>Fascia temperata</i>	<i>Fascia tropicale-equatoriale</i>
Accessibilità ai popolamenti	Spesso elevata (viabilità dedicata)	Spesso scarsa o difficoltosa (condizioni climatiche e territoriali)
Caratteristiche strutturali dei popolamenti	Forte produttività, densità elevate, omogeneità strutturale e specifica	Scarsa produttività, densità basse, disomogeneità strutturale e specifica
Disponibilità di mezzi e attrezzature	Spesso si dispone di materiale tecnologico e innovativo	Spesso scarsi, carenti o inadeguati
Modalità di campionamento	Possibilità di effettuare il tipo di campionamento più adeguato allo studio (precampionamento e campionamenti successivi)	Campionamento determinato dalle conoscenze preliminari dei popolamenti e del luogo (raramente possono essere effettuati precampionamenti o campionamenti integrativi)
Rilievo degli attributi dendrometrici e misurazioni in campo e in laboratorio	Spesso di agevole programmazione e esecuzione	Programmazione e esecuzione rese difficili da condizioni climatiche, territoriali, tecnologiche e legislative
Numerosità del campione	Possibilità di abbattere un numero elevato di alberi modello	Inopportunità e/o divieto di effettuare molti abbattimenti
Dati disponibili	Generale presenza di serie storiche e/o tavole di cubatura per confronto	Generale assenza di modelli estimativi adatti e di banche dati esaustive
Potenza della stima	Generalmente adeguata a margini di errore bassi	Può risultare adeguata se viene tollerato un certo margine di errore
Relazioni con gli aspetti sociali	Popolazione locale spesso marginalmente coinvolta nel processo gestionale-produttivo	Popolazione locale particolarmente coinvolta nel processo gestionale; frequenti conflitti per l'utilizzo della risorsa

possibilità di applicare un metodo semplificato, adeguato a risorse esigue (*cost-effective technique*) ma nel contempo supportato da un processo metodologico classico, laddove vi sia un'esigenza concreta di una gestione sostenibile delle risorse forestali.

MATERIALI E METODI

Contesto operativo

Questo studio nasce nel contesto di un programma di sviluppo rurale e recupero ambientale (PDR/ADM, *Programme de Développement Rural dans l'Ader Doutchi Maggia*) avviato nella valle di Keita in Niger nel 1984 a causa della catastrofica situazione ambientale e sociale in cui versava il territorio agli inizi degli anni '80. L'analisi è stata rivolta ad una determinata tipologia di opere di rimboschimento (*banquettes de glacis*), concepite per il recupero dei terreni degradati e il miglioramento delle potenzialità agro-silvo-pastorali del territorio. Si tratta di arginature in terra compattata e pietre, a monte delle quali sono stati piantati alberi del Genere *Acacia* – in larga misura – e *Prosopis*. La superficie complessiva trattata con queste opere ammonta a 6 493 ha, irregolarmente suddivisa in sub-unità di superficie media pari a 25 ha (si passa da aree di meno di mezzo ettaro a aree di oltre 250 ettari). Queste sub-unità rappresentano le singole zone di intervento, per cui il soprassuolo al loro interno può essere considerato coetaneo. Nell'ambito della zona complessivamente interessata dai rimboschimenti sono state selezionate le unità di indagine. L'accesso ai rimboschimenti è consentito da piste in terra battuta, solitamente dissestate o interrotte da profondi solchi scavati dalla forte erosione idrica superficiale durante la stagione delle piogge (Figura 1)

Da un punto di vista gestionale, la politica che finora ha prevalso è stata quella del divieto assoluto di taglio. I regolamenti hanno sia carattere regionale (PNUD, 2004; MAGHA, 2006) che locale. Questo approccio conservativo ha però favorito il verificarsi di massicci tagli illegali da parte della popolazione locale che vede – comprensibilmente – queste piantagioni come una fonte di legno a loro libera disposizione. In alcune zone, non a caso in prossimità villaggi, sono state rase al suolo intere superfici.

Area di studio

Da un punto di vista geo-politico il Niger è suddiviso in 8 regioni a loro volta frazionate in 36 dipartimenti. Quello di Keita si trova nella regione di *Tahoua*, a circa 600 km ad est della capitale *Niamey* e ricopre una superficie di 4 860 km². Compreso tra 5° 20' e 6° 35' longitudine est e tra 15° 10' e 14° 20' latitudine nord, rispecchia a pieno le caratteristiche della



Figura 1 – A. Valle di Keita, sottobacino di Tinkirana: veduta aerea di una superficie rimboschita con *banquettes* (le frecce indicano le aree trattate). Si noti l'intensità dell'erosione idrica dovuta all'azione dei corsi d'acqua stagionali (*kori*). Volo FAO 1992, scala 1:24000. B. Veduta prospettica del rimboschimento: in primo piano alberi di *Acacia seyal*.

– A. Keita valley, Tinkirana sub-watershed: aerial view of a reforested area (arrows indicate the stands). Notice the strong water erosion caused by seasonal furrows (*kori*). Flight FAO 1992, scale 1:24000. B. Prospective view of a stand: *Acacia seyal* are on foreground.

Regione sahèliana. Le temperature medie mensili relative agli ultimi 20 anni vanno dai 23°C di gennaio (fine della stagione fresca) fino ai 34°C di maggio (fine della stagione secca), con medie attorno ai 29°C. La stagione delle piogge si verifica tra Maggio e Settembre, con precipitazioni medie di 460 mm a⁻¹ distribuite in maniera unimodale e concentrate normalmente in 90 giorni. Il substrato pedologico è costituito prevalentemente da sedimenti lateritici che vanno a formare altopiani (*plateaux*) e zone collinari (*glacis*) e da sedimenti di arenaria che costituiscono dune stabili, terrazze sabbiose e i fondovalle secchi.

Dai rilievi fitosociologici realizzati in passato su questa area (SOUMANA, 1996; FAO, 1999) e dai sopralluoghi effettuati per questo studio, emerge che la vegetazione è caratterizzata da un forte grado di antropizzazione dovuto ai ripetuti interventi effettuati negli ultimi decenni.

Individuazione dei punti di campionamento e collezione dei dati

La campagna di raccolta dati è stata programmata *a priori* prendendo atto di ineluttabili limiti temporali e operativi. Il posizionamento dei punti di rilievo è stato effettuato in modo soggettivo (non probabilistico a scelta ragionata) attraverso l'analisi della cartografia e di immagini telerilevate. Data l'estensione del territorio e la distribuzione irregolare delle zone di indagine si è deciso di collocare arbitrariamente le aree di saggio su punti di coordinate note e di facile accesso, situati in prossimità delle zone centrali

dei rimboschimenti. Queste sono state distribuite in modo omogeneo su tutta l'area di studio servendosi della cartografia tematica, campionando su diverse tipologie strutturali e orografiche. A causa della variabilità dei popolamenti è stata effettuata una stratificazione per gruppi di età (Tabella 2) in modo da distribuire i rilievi – 68 aree di saggio circolari di 25,0 m di raggio – in modo proporzionale alla rappresentatività del gruppo in termini di superficie occupata.

In ogni area di saggio è stato eseguito il cavallettamento totale delle piante, per un totale di 1190 individui censiti, rilevando l'altezza totale (H) e il diametro ($d_{0,8}$) a 80,0 cm dal suolo. Questo punto di rilievo diametrico è stato scelto al fine di ridurre il più possibile la probabilità di censire piante policormiche (o *multi-stem*, *sensu* ESHETE e STAHL, 1997) e diminuire così l'errore dovuto all'approssimazione del calcolo del diametro medio. Gli alberi con biforcazione al disotto di 80,0 cm sono stati considerati come piante diverse. La soglia di cavallettamento è stata fissata a 2,5 cm così da considerare anche l'apporto delle piante più piccole alla biomassa totale. I diametri sono stati organizzati in classi di 5,0 cm.

Tabella 2 – Stratificazione dei popolamenti in classi di età. Distribuzione delle 68 aree di saggio tra le classi in modo proporzionale alla superficie occupata. Gli anni sono quelli di impianto.

– *Stands stratification in age classes. Allocation of the 68 sample areas between classes, proportional to relative area. The time span is referred to the plantation year.*

classe	Superficie totale (ha)	Superficie percentuale (%)	Numero Aree di saggio	Superficie campionata (ha)
1985 - 1990	4296,97	66,18	41	8,05
1991 - 1997	1612,56	24,84	14	2,75
1998 - 2003	583,50	8,99	13	2,55
TOTALE	6493,03	100	68	13,35

Analisi preliminare dei dati e misurazione della biomassa dei campioni

Dai rilievi è emersa la netta predominanza di tre specie, *Acacia seyal*, *A. nilotica* e *A. raddiana*. Si è scelto quindi di prelevare i campioni esclusivamente tra queste. Il numero di alberi abbattuti per la costruzione dei modelli è stato determinato sia dai vincoli legislativi precedentemente menzionati, sia da vincoli di natura etica. In effetti, il prelievo di un campione cospicuo di alberi avrebbe potuto causare un ulteriore indebolimento del soprassuolo, determinando il fallimento del rimboschimento stesso.

Sono stati quindi abbattuti 14 alberi campione, distribuiti tra le specie e fra la specie in modo proporzionale alla rappresentatività specifica e della classe diametrica. Gli alberi sono stati scelti tra quelli con dimensioni che

più si avvicinavano all'albero medio di ogni classe, ovvero al diametro medio di area basimetrica (poiché rappresenta al meglio l'albero di volume medio) e all'altezza media. L'analisi preliminare dei dati ha portato all'esclusione di un individuo, poiché mostrava valori del tutto anomali rispetto alla media campionaria (*outlier*). Lo studio è stato quindi basato su un totale di 13 alberi modello (Tabella 3).

Tabella 3 – Schema riassuntivo dei dati relativi agli alberi campione.
– *Characteristics of the sample trees.*

Classe diametrica	Numero di alberi per specie			d med cm	H med m
	<i>A. nilotica</i>	<i>A. raddiana</i>	<i>A. seyal</i>		
5	1	2	1	5,00	2,86
10	2	1	1	9,75	3,78
15	1	1	–	16,50	4,95
20	–	–	1	21,00	9,50
25	–	–	2	24,50	25,00

Il protocollo per la quantificazione della biomassa legnosa ha previsto l'utilizzo di due procedure differenti a seconda della grandezza della pianta. Per gli alberi con $d_{0,8}$ inferiore a 10,0 cm è stato utilizzato un approccio totalmente distruttivo. Subito dopo l'abbattimento è stato misurato sul campo il peso fresco totale del fusto e della chioma. Successivamente, sono stati prelevati campioni dai vari comparti dell'albero in modo proporzionale alla loro importanza relativa, sono stati essiccati in laboratorio (vedi di seguito) e si sono quindi determinati i rapporti ponderali peso secco/peso fresco (ACOSTA-MIRALES *et al.*, 2002; NOCETTI *et al.*, 2007). Questi, moltiplicati per il peso fresco totale relativo e sommati tra loro, hanno permesso di stimare la biomassa totale epigea.

Per gli alberi di diametro superiore a 10,0 cm sono stati seguiti due approcci distinti, uno per la chioma nel suo insieme ed uno per fusto e rami principali. La biomassa della chioma è stata ricavata in modo simile a quella degli alberi con $d_{0,8} < 10$ cm, basandosi cioè sui rapporti ponderali delle foglie, dei rami secondari e della ramaglia. Per la biomassa del fusto si è adottato un approccio basato sul rapporto peso-volume del legno. Il volume è stato calcolato con la formula di Cavalieri/Newton:

$$V = \frac{S_b + S_{bif} + 4S_{b/2}}{6} h \quad [1]$$

nella quale S_b , S_{bif} e $S_{b/2}$ sono rispettivamente le superfici estreme e mediana del fusto ed h è la sua altezza. In seguito è stata prelevata una sezione circolare del fusto di circa 2,0 cm di spessore (per i campioni di *A. seyal* sono

state prelevate due sezioni) utilizzate per il calcolo della densità basale. Il volume allo stato fresco è stato misurato con il metodo dello spostamento dell'acqua (LA MARCA, 1999). Il peso anidro è stato ottenuto essiccando i campioni in stufa per 24 ore ad una temperatura costante di $103 \pm 2^\circ\text{C}$ (LUHENDE *et al.*, 2006), ripetendo l'operazione ogni 4 ore fino ad una riduzione sostanziale delle oscillazioni in peso. La biomassa è stata ottenuta moltiplicando il volume calcolato tramite la [1] per la relativa densità basale. La biomassa legnosa epigea totale, è stata ottenuta sommando la biomassa della chioma e quella del fusto.

Modelli per la stima della biomassa legnosa

Per il computo della biomassa legnosa dei rimboschimenti, sono stati analizzati vari modelli stereometrici riportati in bibliografia, costruiti in ecosistemi affini (VEIGA *et al.*, 1988; BROWN *et al.*, 1989; DEANS *et al.*, 1996). La scelta del modello più appropriato è stata operata attraverso un approccio *best-subset*. Secondo questo procedimento, da un insieme di modelli potenzialmente applicabili, se ne individua un sottoinsieme in base a criteri di varia natura. Nel caso specifico sono stati adottati criteri statistici (il coefficiente di determinazione R^2 e l'errore standard SE) e tecnici (la semplicità operativa).

È stato quindi individuato un sottoinsieme di due modelli, uno di tipo lineare basato su una variabile esplicativa semplice (d), l'altro, esponenziale, basato su una variabile combinata (d^2H):

$$AWB = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 \quad [2]$$

$$AWB = \beta_0 (d^2)^{\beta_1} \quad [3]$$

in essi AWB è la biomassa legnosa epigea espressa in kg, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ sono i coefficienti della regressione, H è l'altezza totale dell'albero espressa in m e d il diametro a 0,80 m espresso in cm. Questi due modelli, oltre ad essere tra quelli maggiormente impiegati nella fascia sub-tropicale (BROWN *et al.*, 1989; DEANS *et al.*, 1996; ABBOT *et al.*, 1997; OLA-ADAMS, 1997; LAAMOURI *et al.*, 2001), presentano un ottimo compromesso tra affidabilità e semplicità.

Le indagini preliminari sul campo e i risultati dell'inventario e delle misurazioni in laboratorio (densità basali, rapporti peso-volume) hanno mostrato forti similitudini allometriche delle specie in esame (cfr. § RISULTATI). Questa constatazione ha consentito di ipotizzare e testare l'utilizzo di un'unica funzione perequatrice multispecifica (DEANS *et al.*, 1996; ABBOT, 1997; NAVAR *et al.*, 2004) per l'intera comunità vegetale.

L'analisi delle regressioni è stata effettuata con il metodo dei minimi quadrati ordinari dopo aver eseguito le necessarie trasformazioni delle osservazioni (BASKERVILLE, 1972; TABACCHI, 1983). Nelle regressioni stereometri-

che è infatti ampiamente dimostrata la presenza di eteroschedasticità nelle distribuzioni campionarie, caratteristica che comporta un aumento della varianza dei valori osservati (biomassa o volume) all'aumentare del valore delle variabili esplicative (le dimensioni dell'albero). Di conseguenza, al fine di aumentare l'efficienza della stima e nello stesso tempo l'affidabilità dei relativi test statistici (CUNIA, 1964; TABACCHI, 1985) è stata eseguita la trasformazione logaritmica delle osservazioni (BASKERVILLE, 1972; BROWN *et al.*, 1998; ESHETE e STAHL, 1998; VEIGA *et al.*, 1998; NAVAR *et al.*, 2004; ZIANIS e MENCUCCINI, 2004) e calcolati i parametri della regressione con il metodo dei minimi quadrati ordinari. Questo procedimento tuttavia comporta delle distorsioni dei valori stimati nel momento in cui si passa dai valori logaritmici a quelli naturali, inconveniente che viene di norma evitato grazie all'applicazione di un coefficiente di correzione (CF) ai valori naturali trasformati (BASKERVILLE, 1972; TER-MIKAELIAN, 1997; SALIS *et al.*, 2006). In fine, il modello regressivo ottimale è stato selezionato per confronti successivi attraverso l'applicazione di indicatori sintetici di *performance* (DEL FAVERO e HEL-RLIGL, 1976; TABACCHI, 1983; PARRESOL, 1999; NAVAR *et al.*, 2004).

Analisi statistica per il modello definitivo

L'adozione di un modello unico per le tre specie di acacia è stata formalmente valutata attraverso l'utilizzo di test parametrici e non-parametrici. Per assicurare la validità dei test (parametrici) le distribuzioni campionarie devono rispettare condizioni di carattere sostanziale e condizioni di carattere formale (SOLIANI, 2005). Attraverso la trasformazione logaritmica delle osservazioni si è innanzitutto perfezionata la forma della distribuzione dato che i dati misurati sono risultati affetti da asimmetria «destra» (i valori che si allontanano di più dalla media sono quelli più elevati).

L'inferenza statistica è proseguita con la stratificazione delle osservazioni in tre gruppi omogenei secondo la specie e l'esecuzione dei confronti fra medie e mediane, tra e fra i gruppi, attraverso l'analisi della varianza (ANOVA). I calcoli sono stati eseguiti ad un livello di significatività del 5% ($\alpha = 0,05$). Si è testata l'ipotesi nulla

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \quad [4]$$

contro l'ipotesi alternativa

$$H_1: \text{le } \mu \text{ non sono tutte uguali} \quad [5]$$

dove μ rappresenta la media (o mediana) dei tre gruppi.

Se l'ipotesi nulla [4] viene verificata – ovvero non rifiutata – dal risultato dei test, può essere asserito che le osservazioni appartengono alla stessa popolazione, vale a dire, le caratteristiche fisiologiche e strutturali delle tre specie possono essere considerate analoghe.

Il primo test di tipo parametrico effettuato, il *Modified-Levene Equal-Variance Test*, consiste in un ANOVA sugli scarti dei valori osservati rispetto alla mediana del gruppo eseguita tramite un test F. Successivamente, attraverso il *Principio di Bonferroni*, si è controllato tra quali medie (gruppi) vi erano le differenze più significative.

Constatata la significatività dei modelli con questi test, ma rimanendo nell'incertezza della loro completa validità (un numero esiguo di campioni non assicura il rispetto delle condizioni di normalità) sono stati eseguiti test non parametrici, che hanno il vantaggio di non richiedere la normalità, osservata o presunta, delle distribuzioni. I tre test applicati in questa fase, il *Median test for several samples*, il *Kruskal-Wallis One-Way ANOVA by ranks* e il *Test per l'eterogeneità della varianza*, vengono di norma eseguiti sui dati ordinati per ranghi, sono particolarmente indicati per campioni molto piccoli e non richiedono gruppi numericamente omogenei. Per una descrizione dettagliata dei procedimenti si rimanda a test specializzati (SNEDECOR e COCHRAN, 1980; SOLIANI, 2005).

RISULTATI

In totale sono stati campionati 1190 individui. L'indagine floristica ha confermato i risultati di studi precedenti (PEICRE, 1995; PAFAGE, 2004, 2005) mostrando una netta prevalenza delle Acacie sulle altre specie. Gli alberi delle tre specie più rappresentate – *A. seyal* (51%), *A. raddiana* (16,5%) e *A. nilotica* (15,6%) – costituiscono oltre l'83% della comunità arborea; gli individui di *Prosopis juliflora*, per i quali è consueto l'*habitus* cespuglioso a causa dei frequenti tagli, rappresentano il 9,5% mentre il restante 7,5% è composto da alberi di specie di qui in seguito considerate sporadiche (*A. laeta*, *A. Senegal*, *Balanithes aegyptiaca*, *Bauhinia rufescens* e *Ziziphus mauritiana*). La densità media (riferita alle ceppaie) è pari a 68 piante ha⁻¹ caratterizzata da una forte variabilità tra le aree di saggio ($\mu \pm 30$ con valori compresi tra 25 e 170 piante ha⁻¹) ovvero tra i rimboschimenti.

L'analisi della dispersione dei diametri mostra un campo di variazione abbastanza ampio ma ad eccezione di alcune piante di *A. nilotica* e di *P. juliflora*, sembra contenuta nei limiti della normalità ($\alpha = 5\%$).

Le densità basali medie delle tre specie di *Acacia* variano in un range sufficientemente ristretto $0,73 \div 0,83$ g cm⁻³ e sono simili a quelle riportate in altri studi (LUHENDE *et al.*, 2006).

Supponendo la similitudine interspecifica, l'analisi della regressione eseguita sui modelli trasformati [2] e [3] ha condotto ai risultati mostrati in tabella 4. A un livello di significatività del 95% ($P < 0,001$) entrambe i modelli forniscono buoni risultati ma l'introduzione di una seconda variabi-

le indipendente, H nel caso specifico (BROWN *et al.*, 1989; DEANS *et al.*, 1996; ABBOT *et al.*, 1997), migliora la capacità estimativa nonostante il modello risulti formalmente semplice (Tabella 4). Le analisi sono quindi proseguite considerando esclusivamente il modello esponenziale.

Tabella 4 – Confronto dei parametri e degli indicatori sintetici dei due modelli multi-spp. (in forma logaritmica). a , b c coefficienti di regressione, R^2 coefficiente di determinazione che in questo caso uguaglia il *fit index FI* (PARRESOL, 1999), SE errore standard, CV coefficiente di variazione, S_m media algebrica dei residui, S_q media quadratica degli scarti assoluti, S_{qr} media quadratica degli scarti relativi, z_i variata relativa al test dei segni (TABACCHI, 1983).

– *Comparison between statistical parameters for the multi-spp models (in log form). a , b c regression coefficients, R^2 determination coefficient, here is equal to the fit index FI (PARRESOL, 1999), SE standard error, CV coefficient of variation, S_m residual algebraic mean, S_q absolute deviations quadratic mean, S_{qr} relative deviations quadratic mean, z_i relative varied to the sign test (TABACCHI, 1983).*

Mod	a	b	c	R^2 (FI)	SE	CV	S_m	S_q	S_{qr}	z_i
[4]	-0,471845	0,414387	0,830044	0,979	0,098	6,26	$5,0 \cdot 10^{-8}$	0,087	0,220	0,267
[5]	-0,461888	0,783729	–	0,983	0,083	5,25	$1,98 \cdot 10^{-16}$	0,076	0,065	0,267

La quantificazione della biomassa legnosa epigea (AWB) è stata pertanto eseguita attraverso la seguente equazione di regressione

$$AWB = INV \log [a + b \log (d^2 H)] \quad [6]$$

Il fattore di correzione ($CF = INV \log (SE^2/2)$) è risultato pari a 1,000055 Kg, ritenuto quindi non significativo e di conseguenza non applicato.

Nella Tabella 5 sono riassunte le caratteristiche del modello, riferito sia ai gruppi specifici che al gruppo multi-specifico.

Tabella 5 – Confronto del modello multi-specifico (*multi-spp.*) con quelli specie-specifici. a e b coefficienti di regressione, R^2 coefficiente di determinazione, ES errore standard, Res campo di variazione dei residui. Si noti l'analogia tra i differenti casi.

– *Comparison between multi-specific model (multi-spp.) and the specie-specific model. a e b are the regression coefficients, R^2 determination coefficient, ES standard error, Res residual variation range. Note the analogy between cases.*

	Statistica delle regressioni			
	<i>A. seyal</i>	<i>A. nilotica</i>	<i>A. raddiana</i>	<i>Multi-spp</i>
N	5	4	4	13
R^2	0,998	0,980	0,995	0,983
ES	0,031	0,080	0,043	0,083
a	-0,602641	-0,144133	-0,404360	-0,461888
b	0,828216	0,664212	0,770751	0,783729
Res	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,15$

L'assunzione iniziale, che fosse possibile considerare tutte le specie distintamente grazie alle similitudini allometriche, è stata infine confermata dai risultati dei test statistici. La Tabella 6 mostra le relazioni tra i vari casi.

Tabella 6 – Confronto statistico tra i tre gruppi specie-specifici. Per questi test si rifiuta l'ipotesi nulla H_0 alla probabilità (in questo caso pari a 0,05), quando il valore del parametro calcolato è uguale o superiore a quello critico. In tutti i casi analizzati, al contrario, il valore calcolato è minore di quello critico, quindi si accetta H_0 : i campioni appartengono alla stessa popolazione statistica.

– *Statistical comparison between the specie-specific groups. In these tests, the null hypothesis H_0 is rejected at probability when the calculated parameter is higher than the critic one. In each tested instances, the calculated value is lower than the critic one, whereupon, the null hypothesis is accepted: samples are from the same statistic population.*

	Test	Indicatore	Valore calcolato	Valore critico	P ($\alpha=0,05$)
Parametrici	Modified-Levene Equal-Variance Test	F	0,307	4,103	< 0,05
	Bonferroni				< 0,05
	<i>Seyal</i> vs <i>Nilotica</i>	t	0,262	2,870	< 0,05
	<i>Seyal</i> vs <i>Raddiana</i>	t	0,274	2,870	< 0,05
	<i>Nilotica</i> vs <i>Raddiana</i>	t	0,011	2,870	< 0,05
Non Parametrici	Median test for several samples	Pe	7,50E+22	–	< 0,05
	Kruskal-Wallis One-Way ANOVA by Ranks	KW	0,8	4,71	< 0,05
	Test per l'eterogeneità della varianza con K campioni	g	1,8	5,99	< 0,05

DISCUSSIONE

In questo studio è stato proposto un approccio sintetico per la stima della biomassa di impianti arborei in ambienti semi-aridi. Nonostante i numerosi interventi di rimboschimento eseguiti sull'area in esame, la Valle di Keita in Niger, i modelli perequativi qui presentati sono i primi ad essere stati sviluppati.

L'assunzione iniziale che per il computo della biomassa fosse possibile considerare le principali specie in modo indiscriminato, è stata verificata dai test parametrici e confermata da quelli non parametrici.

Nel confronto tra modelli (Tab. 4), gli indicatori sintetici mostrano che quello esponenziale ([3] e [6]) è nell'insieme non distorto ($Sm = 1,98 \cdot 10^{-16}$) ma che tende leggermente a sovrastimare sia per le piante più piccole ($Sq = 0,076$) che per quelle più grosse ($Sqr = 0,065$). Tuttavia il valore molto basso della variata relativa al test dei segni ($z_1 = 0,267$) indica che viene operata una buona compensazione complessiva. Dall'applicazione del modello ai dati dell'inventario (valori non riportati) si evince che tende, com'era lecito aspettarsi, a sottostimare per le specie con densità basale più alta (DEANS *et al.*, 1996), in questo caso *Acacia nilotica*. La conversione logaritmica delle osservazioni ha permesso di attenuare la sovrastima sistematica del volume delle classi diametriche minori causata dai valori elevati che assume l'intercetta nel modello esponenziale. Il confronto con studi simili ha evidenziato forti analogie sia tra le stime ottenute (POUPON, 1976;

BROWN *et al.*, 1998; PEICRE, 1998; PAFAGE, 2004) che tra i coefficienti della regressione (VEIGA *et al.*, 1988; BROWN *et al.*, 1998; NAVAR *et al.*, 2004).

Passando ad esaminare il confronto statistico tra i gruppi (specie-specifici *vs* multi-specifico) si osservano coefficienti di determinazione (R^2) e errori standard (*ES*) in ogni caso simili. L'analisi della varianza dei modelli specie-specifici effettuata nei vari test sia sui valori osservati (logaritmici) che sugli scarti, evidenzia l'omogeneità dei tre gruppi. Infatti, la varianza nei gruppi (o *within*) spiega oltre il 90% della varianza totale, rilevando il fatto che la variabilità campionaria ha una dipendenza allometrica piuttosto che specifica (dipende cioè dalla variabilità intra-specifica).

I risultati dei test consentono di affermare con una probabilità di errore inferiore al 5%, che i tre gruppi di acacie possono essere considerate come appartenenti ad un'unica popolazione (in senso statistico) e quindi, che è possibile applicare ad esse un modello perequativo unico senza una eccessiva perdita di precisione.

Per ciò che concerne la dimensione del campione, è evidente che considerata secondo gli standard classici dell'asestamento forestale e dell'auxometria, risulta poco rappresentativa. Di fatti, nonostante sia stato seguito un criterio di rappresentatività basato sul diametro medio di area basimetrica, e quindi sul volume medio delle piante censite (1190), un campione di alberi modello composto da soli 13 individui (1,1% del totale censito) può risultare eccessivamente esiguo. Tuttavia in questo studio si è deciso di adottare e testare un approccio il meno possibile distruttivo e il più possibile attuabile, sia per ciò che riguarda gli aspetti ambientali che per le relazioni con le problematiche sociali ed economiche. Di fronte all'alta variabilità strutturale dei popolamenti si è deciso di rilevare un numero elevato di piante, ma di abbatterle il meno possibile. L'87% delle zone campionate mostrava densità inferiori alle 100 piante ad ettaro, per cui abbassare ulteriormente questo valore è sembrato inopportuno (queste densità estremamente basse possono contribuire ad una reinterpretazione della significatività campionaria).

Quando si opera in ecosistemi particolarmente complessi e fragili come quelli che caratterizzano gli ambienti semi-aridi, gli standard le metodologie generalmente calibrati su contesti ambientali-forestali completamente diversi – da un punto di vista strutturale produttivo e gestionale – dovrebbero essere riletti e riadattati in un'ottica euristica. Ciò permetterebbe di renderli più elastici e di conseguenza conformi ad esigenze concrete che preludono alle stime di biomassa.

I risultati qui ottenuti sono stati organizzati nel tentativo di rispondere, tramite un approccio ricerca/azione, alla necessità di ottenere stime realistiche di biomassa che possano essere utilizzate a vari livelli, gestionali, pianificatori, politici e decisionali, senza un eccessivo e a volte determinante

impiego di risorse, ma nello stesso tempo senza una inaccettabile perdita di accuratezza.

Nel giudicare la metodologia adottata si ritiene inoltre di non poter tralasciare considerazioni riguardo la sua praticabilità sul piano economico e operativo. In circa due mesi di lavoro (e una squadra composta da quattro operatori) è stato possibile collezionare dati sufficienti. Una campagna più lunga e l'abbattimento di un numero maggiore di alberi, avrebbe sicuramente condotto a stime più precise e affidabili, ma avrebbe aumentato enormemente i costi economici, ambientali e sociali. Lo studio quindi si è posto nell'ottica di enucleare e applicare una metodologia che consentisse di associare una procedura speditiva di rilievo ad un livello di approfondimento sufficiente per gli obiettivi preposti. Le potenzialità ed i limiti di questo approccio vengono sintetizzati nella Tabella 7.

Tabella 7 – Analisi SWOT del procedimento estimativo proposto. È suddivisa in un'analisi interna, nella quale vengono considerati i fattori intrinseci al metodo ed un'analisi esterna, nella quale si esaminano le condizioni del contesto operativo. SWOT sta per Forza (Strength), una caratteristica del metodo sulla quale avvalersi per raggiungere gli obiettivi; Debolezza (Weakness) un limite che ostacola il suo svolgimento ottimale; Opportunità (Opportunities), una condizione che ne favorisce l'applicazione; Minacce (Threat), una condizione che potenzialmente ne impedisce l'attuazione.

– SWOT analysis for the estimation method proposed. It is branched in an internal analysis where the own characteristics of the methodology are regarded, and an external analysis in which all the contextual conditions are examined. SWOT means Strength, a methodology characteristic to hit the mark, Weakness, a limit that encumber its normal process, Opportunities, an optimum for the method applicability and Threat an unfavourable condition that can thwart its implementation.

SWOT		Fattori
Analisi		
Analisi interna	<i>Strength</i>	– Metodologia speditiva e poco onerosa – Stima sufficientemente accurata (dipende dall'errore tollerabile) – Impatto ambientale e sociale molto ridotto – Elasticità operativa
	<i>Weakness</i>	– Scarsa rappresentatività del campione – Accuratezza della stima incerta – Indifferenziazione specifica – Affinità biometriche da verificare <i>a priori</i>
Analisi esterna	<i>Opportunity</i>	– Metodologia integrabile e migliorabile in relazione ad obiettivi specifici e disponibilità di manodopera e fondi dedicati – Consente di mantenere bassi gli impatti dovuti al prelievo di alberi modello – Adattabile ed estensibile in situazioni analoghe in ambienti fragili e particolarmente degradati – Applicabile in contesti socio-economico, tecnologico e politico-gestionale poco sviluppati
	<i>Threats</i>	– Incongruente quando si rendano necessarie stime su vasta scala – Basso margine di errore tollerato – Inapplicabile (o potenzialmente non congruente) in caso di impianti ad elevata diversità specifica e/o strutturale

In conclusione, la metodologia qui proposta finalizzata all'applicazione di un modello perequativo unico per intere comunità arboree di origine artificiale, può essere efficiente e conveniente nei casi in cui si verificano alcune circostanze particolari (vedi tabella SWOT) relative alle condizioni operative (intrinseche) nelle quali viene redatta la stima, e alle esigenze estimative (estrinseche) legate a costi e tempo. Nelle realtà rurali delle aree semi-aride queste condizioni si verificano frequentemente, soprattutto nelle fasi *ex-ante* e *in itinere* di progetti di recupero ambientale e rimboschimento, durante le quali la quantificazione della biomassa riveste un ruolo determinante per una corretta pianificazione e quindi una gestione sostenibile delle risorse forestali.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Professoressa Susanna Nocentini per il sostegno ed i consigli forniti durante lo svolgimento dei lavori e le revisioni del testo. Si ringrazia inoltre il PDL/ADM nella persona del Dott. Claudio Errighi per il fondamentale appoggio logistico a Keita.

SUMMARY

Toward a synthetic biomass evaluation method in reforestations of semi-arid zones. Limits and outlooks for allometric models at Keita, Niger

In the Sahel there have been important interventions of reforestations because of the progressive degradation of the forest resources due to the anthropic pressure and global warming in the last 30 years. Estimating biomass in forest stands is therefore essential for evaluating their efficacy. In this work an approach is proposed for current biomass estimations. Some allometric models were developed and analyzed in Acacia plantations in the Keita valley in Niger, and the effectiveness of using a generalized model for dominant species – *Acacia seyal* Del., *A. raddiana* Savi (syn. *A. tortilis* Hayne), *A. nilotica* (Guill. Et Perrott.) – is evaluated. Equations were built by taking the diameter at 0.80 m and the total height as independent variables. The regression analysis was made according to the ordinary least squares method on log-transformed observations because of the heteroscedasticity of stereometric relations. In addition, a comparison between models with or without species distinction is done in order to quantify the loss of precision. Each model shows a good estimative performance ($R^2 > 0.98$, $P < 0.001$). Non-parametric tests confirm that the three acacia species belong to the same statistical population. Therefore, in the specific condition of this region, the use of a multi-species model is possible without an excessive loss in precision. Results obtained in this work represent an important contribution to biomass estimations in semi-arid environments in terms of technical reproducibility and economic sustainability.

BIBLIOGRAFIA

- ABBOT P., LOWORE J., WERREN M., 1997 – *Models for estimation of single tree volume in four Miombo woodland types*. Forest Ecology and Management, 97: 25-37; doi:10.1016/S0378-1127(97)00036-4
- ABRAMO E., BARILOTTI A., SEPIC F., 2007 – *Dalla dendrometria diametrica alla dendrometria ipsometrica: stima del volume degli alberi da rilievi laser-scanning*. Forest@, 4: 373-385; doi: 10.3832/efor0481-0040373
- ACOSTA-MIRALES M., VARGAS-HERNANDEZ J., VELAZQUEZ-MARTINEZ A., ETCHEVERS-BARRA J., 2002 – *Estimacion del la biomasa aerea mediante el uso de relaciones alometricas en seis especies arboreas en Oaxaca, Mexico*. Agrociencia, 36: 725-736.
- BASKERVILLE G.L., 1972 – *Use of logarithmic Regression in the Estimation of Plant Biomass*. Canadian Journal of Forest Research, 2: 49-53; doi: 10.1139/x72-009
- BILLE J.C., 1980 – *Measuring the primary palatable production of browse plants*. In: «Browse in Africa, the current state of knowledge», Le Houérou H.N. Papers presented at the International Symposium on Browse in Africa Addis Ababa, April, 1980.
- BREMAN H., KESSLER J.J., 1995 – *Le rôle des ligneux dans les agro-écosystèmes des régions semi-arides (avec un accent particulier sur les pays sahéliens)*. CABO, Wageningen.
- BROWN S., GILLESPIE A.J.R., LUGO, A.J., 1989 – *Biomass Estimation Methods for Tropical Forests with Applications to Forest Inventory Data*. Forest Science, 35 (4): 881-902.
- CUNIA T., 1964 – *Weighted Least Square Method and Construction of Volume Tables*. Forest Science, 10 (2): 180-191.
- DANILIN I.M., MEDVEDEV E.M., 2004 – *Forest inventory and biomass assessment by the use of airborne laser scanning method (example from Siberia)*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36: 139-144.
- DAVIS, F.W., ROBERTS D., 2000 – *Stand structure in terrestrial ecosystems* - In: «Methods in Ecosystem Science», Sala O.E., Jackson R.B., Mooney H.A., Howarth R.W.. Springer, New York, p. 7-30.
- DEANS J.D., MORAN J., GRACE J., 1996 – *Biomass relationships for tree species in regenerating semi-deciduous tropical moist forest in Cameroon*. Forest Ecology and Management, 88: 215-225; doi: 10.1016/S0378-1127(96)03843-1
- DEL FAVERO R., HELLRIGL B., 1976 – *Indagine sulla capacità interpretativa delle funzioni stereometriche impiegabili nella costruzione delle tavole di cubatura a doppia entrata*. Annali dell'ISAF, vol. 5, Trento.
- DRAKE J.B., KNOX R.G., DUBAYAH R.O., CLARK D.B., CONDIT R., BLAIR J.B., HOFTON M., 2003 – *Above-ground biomass estimation in closed canopy Neotropical forests using lidar remote sensing: factors affecting the generality of relationships*. Global Ecology and Biogeography, 12 (2): 147-159; doi: 10.1046/j.1466-822X.2003.00010.x
- ESHETE G., STAHL G., 1998 – *Functions for multiphase assessment of biomass in*

- Acacia woodland of the Rift Valley of Ethiopia*. Forest Ecology and Management, 105: 79-90; doi:10.1016/S0378-1127(97)00273-9
- FAO, 1999 – *Les ressources forestières naturelles et les plantations forestières au Niger*. EC/FAO ACP Collecte de données. Rapport Technique AFDCA/TR/13.
- KETTERINGS Q.M., COE R., NOORDWIJK M., AMBAGAU Y., PALM C., 2001 – *Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests*. Forest Ecology and Management, 146: 199-209; doi: 10.1016/S0378-1127(00)00460-6
- LA MARCA O., 1999 – *Elementi di dendrometria*. Pàtron Editore, Bologna.
- LAAMOURI A., CHTOUROU A., BEN SALEM H., 2002 – *Prédiction de la biomasse aérienne d'Acacia cyanophylla Lindl. (Syn. A. saligna (Labill.) mH. Wendll) à partir de mensurations dimensionnelles*. Annals of Forest Science, 59: 335-340.
- LEFSKY M.A., COHEN W.B., HARDING D.J., PARKER G.G., ACKER S.A., GOWER S.T., 2002 – *Lidar remote sensing of above-ground biomass in three biomes*. Global Ecology and Biogeography, 11: 393-399; doi: 10.1046/j.1466-822x.2002.00303.x
- LEFSKY M.A., HARDING D., COHEN W.B., PARKER G., SHUGART H.H., 1999 – *Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA*. Remote Sensing of Environment, 67 (1): 83-98.
- LU D., 2006 – *The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation*. International Journal of Remote Sensing, 27 (7): 1297-1328.
- LUHENDE R., NYADZI G., MALIMBWI R.E., 2006 – *Comparison of wood basic density and basal area of 5-year-old Acacia crassicaarpa, A. julifera, A. leptocarpa, Leucaena pallida and Senna siamea in rotational woodlots trials in western Tabora, Tanzania*. IUFRO NFT 91: 5-6.
- MAGHA M. I., 2006 – *Politiques et programmes GRN et tendances environnementales au Niger: nature, richesse et pouvoir*. FRAME/CILLS, Niamey.
- MCHALE M.R., BURKE I.C., LEFSKY M.A., PEPER P.J. MCPHERSON E.G., 2009 – *Urban forest biomass estimates: is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees?* Urban Ecosystems, 12 (1): 95-113.
- NÆSSET E., GOBAKKEN T., 2008 – *Estimation of above-and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser*. Remote Sensing of Environment, 112: 3079-3090.
- NAVAR J., MENDEZB E., NAJERA A., GRACIANO J., DALE V., PARRESOL B., 2004 – *Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of North-eastern Mexico*. Journal of Arid Environments, 59: 657-674.
- NELSON R., ODERWALD R., GREGOIRE T.G., 1997 – *Separating the ground and airborne laser sampling phases to estimate tropical forest basal area, volume, and biomass*. Remote Sensing of Environment, 60 (3): 311-326.
- 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; doi: 10.3832/efor0449-0040204
- OLA-ADAMS B.A., 1997 – *Assessment of three allometric regression techniques of biomass determination in two hardwood species*. Journal of Tropical Forest Science, 9 (3): 321-328.

- PAFAGE, 2004 – *Evaluation de la durabilité du développement*. Ce.S.I.A., IBIMET-CNR, DSCF. Niamey.
- PAFAGE, 2005 – *Evaluation de l'importance de Keita dans le cadre de la Convention des Nations Unies sur les Changements Climatiques*. Ce.S.I.A., IBIMET-CNR, DSCF. Niamey.
- PARRERSOL B.R., 1999 – *Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons*. Forest Science, 45 (4):573-593.
- PEICRE, 1998 – *Projet d'évaluation des interventions pour la conservation e la recuperation de l'environnement*. Ce.S.I.A., IBIMET-CNR, UTA. Niamey.
- PNUD, 2004 – *Consultation Sectorielle sur l'Environnement et la Lutte Contre la Désertification: Diagnostic Régional de Taboua*. PNUD, Niamey.
- POPESCU C.S., 2007 – *Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar*. Biomass and Bioenergy, 31 (9): 646-655.
- POUPON H., 1976 – *La biomasse et l'évolution de sa répartition au cours de la croissance d'Acacia senegal dans une savane sahélienne (Sénégal)*. Bois et Forets de Tropicque, 166: 23-38.
- RIANO D., MEIER E., ALLGOWER B., CHUVIECO E., USTIN S.L., 2003 – *Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling*. Remote Sensing of Environment, 86 (2):177-186.
- SALIS S.M., ASSIS M.A., MATTOS P., PIÃO A.C.S., 2006 – *Estimating the aboveground biomass and wood volume of savanna woodlands in Brazil's Pantanal wetlands based on allometric correlations*. Forest Ecology and Management, 228: 61-68; doi: 10.1016/j.foreco.2006.02.025
- SNEDECOR G.W., COCHRAN W.G., 1980 – *Statistical Methods* 7th ed. The Iowa State University Press, Ames.
- SOLIANI L., 2005 – *Statistica Univariata e Bivariata, Parametrica e Non Parametrica per le Discipline Ambientali e Biologiche*. UNI.NOVA, Parma, <http://www.dsa.unipr.it/soliani>.
- SOUMANA I., 1996 – *L'environnement au Niger*. RESADEP, Niamey.
- TABACCHI G., 1983 – *Scelta e determinazione del modello perequativo per la costruzione di tavole di cubatura a singola e a doppia entrata*. Annali dell'ISFAA vol. 9, Trento.
- TABACCHI G., 1985 – *I minimi quadrati ponderati nella stima dei coefficienti delle equazioni stereometriche*. Annali dell'ISFAA, vol. 10, Trento.
- TER-MIKAELIAN M.T., KORZUKHIN M.D., 1997 – *Biomass equations for sixty-five North American tree species*. Forest Ecology and Management, 97: 1-24; doi: 10.1016/S0378-1127(97)00019-4
- VEIGA R., BRASIL M., CARVALHO C., 1998 – *Aboveground Biomass Equations for 7-years old Acacia mangium Willd in Botucatu, Brazil*. Integrated Tools Proceedings, Boise, Idaho, USA.
- ZIANIS D., MENCUCCINI M., 2004 – *On simplifying allometric analyses of forest biomass*. Forest Ecology and Management, 187: 311-332; doi: 10.1016/j.foreco.2003.07.007