



LA TECNOLOGIA LiDAR PER LO STUDIO DELLA BIOMASSA NEGLI ECOSISTEMI FORESTALI

Andrea Barilotti,^{a,*} Sheera Turco,^b Rossella Napolitano,^c Enrico Bressan^c

^a Dipartimento di Georisorse e Territorio – Università degli Studi di Udine, Via del Cotonificio 114, 33100, Udine

^b Dipartimento di Scienze Agrarie ed Ambientali - Università degli Studi di Udine, Via delle Scienze 208, 33100, Udine

^c Dipartimento di Biologia – Università degli Studi di Trieste, Via Weiss 2, 34100, Trieste

Abstract

La quantificazione della biomassa forestale è un processo conoscitivo fondamentale per la caratterizzazione degli ecosistemi boschivi e per una razionale gestione della risorsa legnosa. In questo contesto, la nuova tecnologia di rilevamento laser scanner (LiDAR), nata come strumento perlopiù topografico, si sta rivelando utile in campo ambientale e forestale. L'obiettivo di questo lavoro è verificare la validità delle stime di biomassa ottenibili da dati laser scanning mediante misure forestali dirette ed indirette. L'area di studio è localizzata nel settore nord-occidentale delle Alpi Carniche (FVG) ed è costituita principalmente da boschi di conifere (peccete), principale fonte di sostentamento per il settore del legno della regione. Nella verifica sperimentale sono stati elaborati i dati LiDAR relativi al terreno ed alla vegetazione e sono stati calcolati indici statistici di penetrazione e profondità delle chiome. Mediante un campionamento stratificato sono stati definiti 15 subset sui quali sono state effettuate misure in situ riguardanti l'altezza delle piante, l'altezza e la larghezza delle chiome, la densità dei fusti, l'area basimetrica e l'indice di area fogliare (LAI) con lo strumento *LAI-2000 Plant Canopy Analyser*. I risultati dimostrano come gli indici estratti dai dati LiDAR siano correlati ai parametri ecologici forestali (altezza, diametro, densità della chioma, biomassa, LAI) e quindi possano essere utilizzati per monitorare la produttività di vaste aree boscate.

© 2005 SItE. All rights reserved

Parole chiave: Laser scanning; Biomassa forestale, LAI, Indici di vegetazione

1. Introduzione

La conoscenza delle relazioni tra dati biometrici forestali e dati telerilevati sta assumendo negli ultimi

anni particolare rilevanza in campo internazionale sia per il monitoraggio della biodiversità che per la stima dell'assimilazione del carbonio atmosferico da parte della vegetazione. Per quanto riguarda quest'ultimo

* Corresponding author. Tel.: +39 328 4132313; fax: +39 0432 558700; e-mail: andrea.barilotti@uniud.it

aspetto, il recente Terzo rapporto dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ha confermato come i cambiamenti nell'uso del suolo e nella gestione delle foreste possano offrire, unitamente al taglio delle emissioni antropogeniche, un significativo contributo alla riduzione della CO₂ atmosferica (Niles et al., 2004). Conoscere in modo particolareggiato la quantità di anidride carbonica che la vegetazione è in grado di sottrarre all'atmosfera e trasformare in biomassa è quindi di particolare rilevanza per determinare quale sia il ruolo effettivo delle foreste nella riduzione dell'effetto serra. Lo stesso Protocollo di Kyoto individua la necessità di una stima delle attività di afforestazione, riforestazione e deforestazione intercorse dal 1990 ad oggi per conoscere, in modo sufficientemente preciso, il quantitativo di carbonio stoccato nelle foreste. Un indice ampiamente utilizzato per descrivere la superficie fotosintetizzante e traspirante della vegetazione è il LAI (*Leaf Area Index*), descritto dalla seguente equazione (Beadle, 1993):

$$LAI = s / G \quad [1]$$

dove: s è l'area fogliare funzionale (verde) della vegetazione (m²);

G è l'area della proiezione delle foglie sul terreno (m²).

Attraverso le misure di LAI è possibile dedurre la quantità di foglie (biomassa fogliare) che costituiscono la copertura vegetale analizzando la quantità di radiazione solare attenuata dalla chioma. Nonostante siano stati pubblicati molti studi sui metodi per la misura dell'indice, c'è poca chiarezza sulla definizione di LAI, sulla metodologia applicata (stime dirette o indirette), sul tipo di strumento e sul modello di calcolo utilizzato dai diversi autori (Scurlock et al, 2001; Asner et al., 2003). Questo determina una certa difficoltà nel confrontare tra loro i dati riportati nei vari lavori (Eklundh, 2003).

Le metodologie di misurazione della biomassa fogliare si dividono in dirette e indirette (Norman e Campbell, 1989). I metodi diretti sono quelli che comportano un contatto con le piante o con alcune parti di esse. Generalmente sono i più accurati, ma richiedono un lavoro in campo dispendioso in termini di tempo e di costo e presentano notevoli limiti per

aree molto vaste o nel caso di una vegetazione molto eterogenea. In alcuni casi questi metodi possono essere distruttivi o per lo meno causare un certo disturbo alle piante, come nel caso del taglio totale o parziale di alcune di esse. In questo caso le fonti di errore possono derivare dalla definizione di LAI utilizzata o dalla frequenza con la quale le misure vengono ripetute.

I metodi indiretti si basano sulla determinazione delle relazioni esistenti tra la struttura della copertura vegetale e l'intercettazione della luce. Tali misure possono essere fatte sia a terra (con strumenti portatili in campo), sia attraverso l'utilizzo di dati telerilevati satellitari o avio-trasportati (indici spettrali come NDVI, EVI etc). I vantaggi sono sicuramente la rapidità delle misurazioni, la possibilità di estenderle su larga scala e l'opportunità di effettuare analisi multi-temporali; in linea generale, però, i metodi indiretti dovrebbero comunque essere calibrati e validati con misure dirette (Gower et al, 1999).

Negli ultimi anni sono stati valutati molti metodi per la caratterizzazione dei popolamenti forestali utilizzando tecniche di telerilevamento (Morsdorf et al., 2003). Tra queste, la tecnica laser scanning offre nuove possibilità nelle indagini in quanto, al contrario dei sistemi tradizionali, permette di misurare direttamente la struttura tridimensionale del bosco. Attraverso un rilievo LiDAR (*Light Detection and Ranging*) gli elementi presenti sulla superficie terrestre sono restituiti sottoforma di "nube georeferenziata di punti". In particolare, il bosco ed i singoli alberi che lo costituiscono sono acquisiti attraverso il campionamento discreto della chioma fogliare. L'elevata densità di punti per unità di superficie determina una copertura pressoché omogenea del territorio (Barilotti et al., 2005).

In questo lavoro viene presentato un metodo alternativo per derivare misure di LAI su larga scala a partire da dati laser scanning corrispondenti a boschi di conifere e di latifoglie.

2. Area di studio

Le aree d'indagine ricadono in due settori montani della regione Friuli Venezia Giulia, dove sono state definite due sottoregioni di interesse:

- il Bacino idrografico del Rio Moscardo, situato

nelle Alpi Carniche a Nord dell'abitato di Paluzza (UD), costituito prevalentemente da boschi di conifere (peccete e piceo-abbieti di Pramasio);
 - il Comprensorio Montano Valli del Torre e del Natisone, situato nelle Prealpi Giulie in corrispondenza dell'abitato di Taipana (UD), dove si hanno vaste superfici di boschi ricolonizzati da latifoglie (faggete e aceri-frassineti).

3. Materiali

3.1. I dati LiDAR

I dati LiDAR relativi alle due aree oggetto di studio sono stati acquisiti nell'ambito del progetto Interreg IIIA Italia-Slovenia. Le scansioni sono state effettuate da Helica Srl di Amaro (UD), in collaborazione con OGS di Trieste, mediante un sistema Optech ALTM 3033 installato su elicottero. L'elaborazione delle misure acquisite dallo strumento fornisce le coordinate cartografiche e le relative intensità di riflessione di due echi di ritorno per ogni impulso emesso dal telemetro laser (first & last pulse). In Tabella 1 sono riportati alcune specifiche del rilievo.

Tabella 1
I parametri dei rilievi laser scanning per le due aree

METADATI	Pramasio	Taipana
Periodo di acquisizione	set-03	lug-04
Area acquisita	21 Km ²	16 Km ²
Quota minima	564,71 m	435 m
Quota massima	2.093 m	1140 m
Densità media	~ 2 pt/m ²	~ 4.3 pt/m ²
N° di strisciate	11	10
Quota di volo sul terreno	~ 1000 m	~ 1000 m
Divergenza del fascio	0,2 mrad	0,2 mrad
Angolo di scansione	± 18°	± 18°

3.2. I dati in campo

All'interno delle due aree oggetto di studio sono stati definiti 20 transetti forestali, georeferenziati

mediante strumentazione topografica (stazione totale) e GPS (*Global Positioning System*). Per ogni transetto sono state effettuate misure allo scopo di acquisire alcuni parametri forestali di interesse, quali:

- altezza delle piante, con l'ipsometro digitale Vertex;
- altezza e la larghezza delle chiome;
- l'area basimetrica, mediante cavallettamento a 1,30 metri di altezza;
- il numero di alberi, per conteggio diretto degli individui con diametro maggiore di 3 cm;
- l'indice di area fogliare (LAI), attraverso lo strumento *LAI - 2000 Plant Canopy Analyser*.

Le dimensioni dei transetti, la categoria forestale ed i rispettivi valori risultanti dal campionamento sono riportati in Tabella 2. Tutti i dati sono relativi al periodo Luglio – Agosto 2005 e, nel contesto di questo studio, assumono il ruolo di “verità a terra”.

4. Metodi

4.1. Pre-processamento dei dati LiDAR

Il risultato di una scansione laser è una “nube” di punti georeferenziati (*raw data*) corrispondenti al terreno, alla vegetazione, agli edifici e a tutti quegli elementi che sulla superficie vengono colpiti dall'impulso. La prima fase nel processamento dei dati consiste nell'eliminare dal dataset originale i punti che possono essere considerati “errori grossolani” (*outliers*) in quanto si discostano “visibilmente” dalla superficie media. Si procede quindi con l'estrazione dei punti terreno mediante la procedura tecnicamente definita “filtraggio”. Tale operazione è stata effettuata in questo lavoro utilizzando l'algoritmo implementato nel software commerciale TerraScan™ di Terrasolid (Axelsson, 2000) che fornisce risultati di buona qualità già in modalità automatica. Nelle aree montane caratterizzate da una morfologia complessa e con linee di cresta accentuate (ad esempio nell'area del Rio Moscardo) si rende comunque necessaria una ottimizzazione locale dei parametri di filtraggio in funzione delle diverse caratteristiche del rilievo. Il filtraggio rappresenta una fase fondamentale nella classificazione dei dati ovvero nella suddivisione

Tabella 2

Parametri rilevati in campo per ciascun transetto forestale

id_transetti	area (ha)	categoria forestale	diametro medio (cm)	altezza media (m)	area basimetrica (cm ²)	profondità chioma (m)	volume (m ³)
1	0,04	pecceta	41	35	74	16	853
2	0,04	pecceta	36	28	61	17	663
3	0,04	pecceta	35	30	49	14	490
4	0,04	piceo-abieto	40	32	49	16	563
5	0,04	piceo-abieto	43	34	66	15	793
6	0,04	abieteto	35	32	68	12	718
7	0,04	piceo-abieto	34	26	57	11	575
8	0,04	piceo-abieto	34	27	65	9	640
9	0,04	piceo-abieto	33	25	47	10	453
10	0,04	pecceta	33	26	82	8	773
11	1	pecceta	na	na	na	na	na
12	0,04	pecceta	31	27	63	9	890
13	0,04	pecceta	27	26	74	10	690
14	0,1	faggeta	22	14	44	7	293
15	0,1	acero-frassineto	15	15	27	11	259
16	0,04	acero-frassineto	15	16	25	11	233
17	0,04	faggeta	18	17	38	8	355
18	0,04	faggeta	26	28	43	22	505
19	1	pecceta	na	na	na	na	na
20	1	faggeta	na	na	na	na	na

successiva dei punti per classi tematiche. In questo lavoro la vegetazione è stata ripartita in due classi di scostamento altimetrico rispetto al terreno, definite come:

- bassa vegetazione ($h \leq 1$ m sul terreno);
- alta vegetazione ($h > 1$ m sul terreno).

4.2. Indici di vegetazione

A partire dai dati LiDAR classificati sono stati realizzati due modelli sintetici che descrivono la struttura tridimensionale del bosco: un modello delle altezze degli alberi ed un indice di penetrazione del raggio laser attraverso la coltre fogliare. Tali indici possono essere realizzati utilizzando una rappresentazione matriciale delle superfici, interpolate attraverso la griglia di un Sistema Informativo Geografico (GIS).

4.2.1. Altezza degli alberi

Il “Modello di Altezza degli Alberi” (CHM) è un indice vegetazionale ampiamente utilizzato per la stima dell'altezza dei popolamenti, per l'individuazione automatica delle superfici vegetate ed anche, nel caso si disponga di scansioni laser successive, per la verifica dei cambiamenti nell'uso e copertura del suolo boscato. Tale modello è stato

realizzato, secondo una prassi ormai consolidata, per sottrazione algebrica tra il Modello Digitale delle Chiome (DCM) ed il Modello Digitale del Terreno (DTM), entrambi in formato raster (Hyypä et al., 2001). Lavori di letteratura (Patenaude, 2004), hanno mostrato una certa tendenza alla sottostima nelle altezze degli alberi, dovuta a due aspetti principali:

- l'impulso emesso dal telemetro laser tende a penetrare all'interno delle chiome prima che possa essere registrato un apprezzabile segnale di ritorno (Brandtberg et al., 2003);
- l'interpolazione dei punti su celle regolari comporta un inevitabile smussamento della quota dei picchi.

4.2.2. Indice di penetrazione

La capacità del raggio laser di raggiungere il terreno nelle aree boscate è legata alla struttura tridimensionale della foresta. Lo studio nelle due aree in esame ha messo in evidenza come la percentuale di raggi che riescono a raggiungere il terreno sia:

- maggiore per il bosco a conifere (~ 8 %) rispetto al bosco di latifoglie (~ 3 %);
- inversamente proporzionale all'altezza degli alberi e alla densità di popolamento.

Un nuovo indice sintetico che mette in relazione tali parametri è stato elaborato utilizzando i dati LiDAR,

precedentemente classificati in punti terreno e punti vegetazione, attraverso la seguente formula:

$$P_index_{ij} = T_{ij} / (T_{ij} + V_{ij}) \quad [2]$$

dove:

T_{ij} = raster densità dei punti terreno

V_{ij} = raster densità dei punti vegetazione (con quota superiore a un metro rispetto al terreno)

T_{ij} e V_{ij} (in Figura 1a e 1b) sono stati interpolati su celle di 1 x 1 metro utilizzando un raggio esplorativo di 5 metri attorno alla cella centrale.

5. Analisi dei risultati

In Figura 1c si mostra l'indice di penetrazione (P_index) ottenuto su parte del dataset nell'area a conifere del Rio Moscardo. L'indice assume valori compresi tra 0 ed 1, rispettivamente in bianco e nero in figura. Valori prossimi allo 0 indicano presenza di vegetazione arborea molto densa (struttura tridimensionale complessa del bosco) mentre valori vicini a 1 indicano assenza di vegetazione (strade forestali, radure, prati, pascoli, suolo nudo).

E' stata eseguita un'analisi di regressione lineare tra i dati raccolti in campo e gli indici vegetazionali elaborati da dati laser scanning. Da questa sono emerse relazioni significative sia tra le altezze medie degli alberi (Figura 2) ed i valori massimi dell'indice di altezza degli alberi (CHM), sia tra LAI misurato ed indice di penetrazione (Figura 3). In particolare, l'elevato grado di correlazione osservato tra il LAI e l'indice di penetrazione proposto in questo studio ($R^2 = 0,89$; $p < 0,001$) permette di utilizzare il P_index come modello predittivo di LAI sull'intera area, anche a partire da un numero limitato di misure in situ. Invece non sono risultati significativamente correlati il CHM ed il LAI ($R^2 = 0,27$).

6. Conclusioni

In questo lavoro è stata verificata l'applicabilità dei dati LiDAR per lo studio di alcuni aspetti funzionali degli ecosistemi forestali. Rispetto agli strumenti tradizionale del telerilevamento,

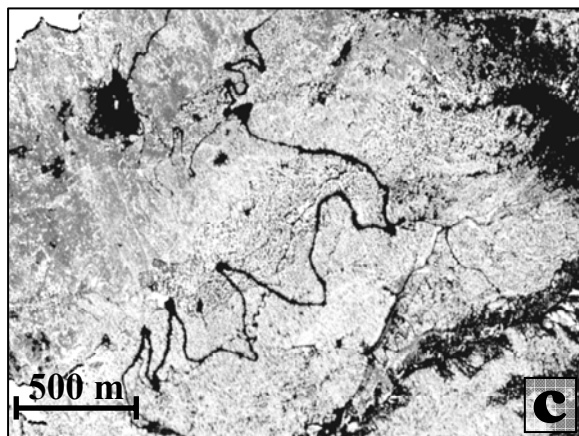
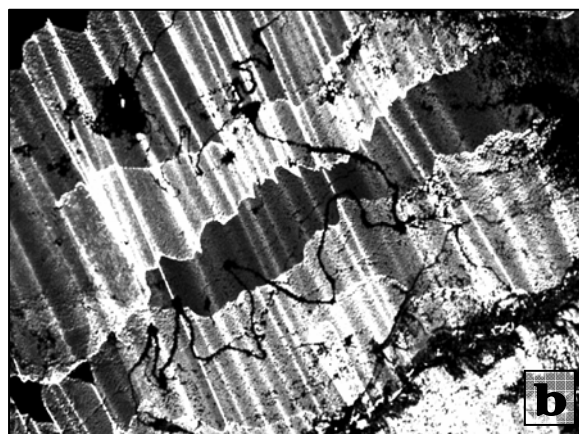
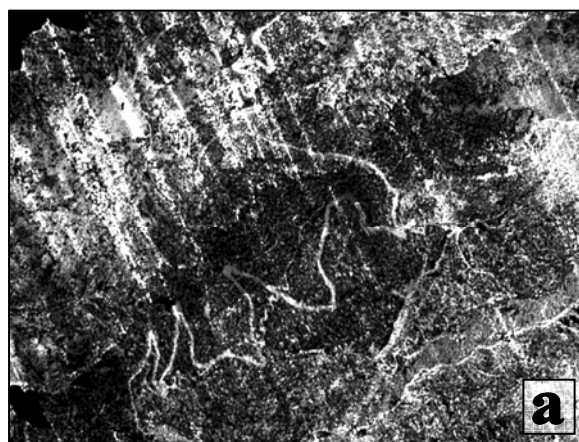


Figura 1 Elaborazione dell'indice di penetrazione (P_index) con risoluzione spaziale di 1 x 1 m nell'area del bosco di Pramasio:

- Mapa di densità dei punti terreno
- Mapa di densità dei punti vegetazione
- Indice di penetrazione del raggio laser (P_index) attraverso la coltre fogliare

il laser scanning si è dimostrata una tecnica precisa ed efficace per il rilievo e la caratterizzazione tridimensionale della struttura del bosco. In particolare, è stata proposta una metodologia alternativa di elaborazione dei dati laser che ha permesso di ottenere un indice (P_index) predittivo del LAI su vaste aree boscate. L'indice è funzione della tipologia e della struttura complessa del bosco (altezza, volume e densità) e permette il monitoraggio speditivo della biomassa fotosintetizzante. Inoltre, può essere utilizzato per descrivere con grande livello di dettaglio la frammentazione del paesaggio forestale, attraverso la definizione automatica delle superfici di bosco/non bosco. Il metodo presentato può essere integrato nella modellistica per le stime di produttività e per il bilancio del carbonio atmosferico.

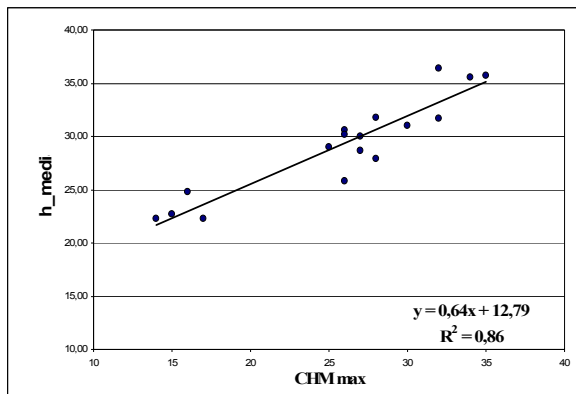


Fig. 2. Correlazione tra valori medi di altezza delle piante rilevati in campo e valori massimi sul Modello Digitale di Altezza delle Chiome in 17 transesti forestali.

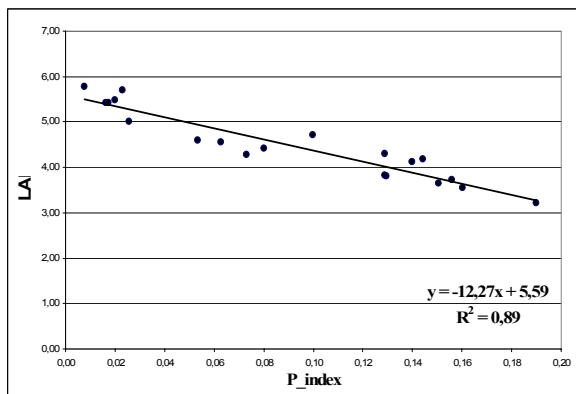


Fig. 3. Correlazione tra valori medi di LAI rilevati in campo e valori medi di P_index in 20 transesti forestali.

Ringraziamenti

Si ringraziano la dott.ssa Barbara Fico e il dott. Emiliano Sossai per il supporto fornito nella campagna di rilievo topografico dei transesti.

Bibliografia

- Asner, G.P., Scurloch, J.M.O., Hicke, J.A. (2003) *Global synthesis of Leaf Area Index observations: implications for ecological and remote sensing studies*. Global Ecology and Biogeography, 12, 195-205.
- Axelsson, P. (2000) *DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models*. ISPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam.
- Barilotti, A., Turco, S., Ciampalini, R. (2005) *Misurazione automatica dei singoli alberi attraverso analisi morfologiche su dati laser scanning*. Atti 9° Conf. Naz. ASITA, Catania.
- Beadle, C.L. (1993) *Growth analysis in Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual*. Hall D.O. ed, Chapman & Hall, London, 36-46.
- Brandtberg, T., Warner, T.A., Landerberger, R.E., McGraw, J.B. (2003) *Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density LiDAR data from the eastern deciduous forest in North America*. Remote Sensing of Environment, 85, 290-303.
- Eklundh, L., Hall, K., Eriksson, H., Ardö, J., Pilesjö, P. (2003) *Investigating the use of Landsat thematic mapper data for estimation of forest leaf area index in southern Sweden*. Canadian Journal of Remote Sensing, 29, 349-362.
- Gower, S.T., Kucharik, C.J., Norman, J.M., (1999) *Direct and indirect estimation of Leaf Area Index, f(APAR), and net primary production of terrestrial ecosystem*. Remote Sensing of Environment, 70, 29-51.
- Hyypä, J., Kelle, O., Lehtinen, M., Inkinen, M. (2001) *A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D height models produced by laser scanners*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 39, 969-975.
- Morsdorf, F., Meier, E., Koetz, B., Nüesch, D., Itten, K., Allgöwer, B. (2003) *The potential of high resolution airborne laser scanning for deriving geometric properties of single trees*. In EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Nice, France., 2003.
- Niles, J.O., Brown, S., Pretty, J., Ball, A.S., Fay, J. (2002) *Mitigazione del carbonio e paesi in via di sviluppo, in CO2 e biodiversità - Un approccio integrato a favore del clima e del patrimonio naturale*. Edizioni Ambiente, Milano, 2004, 77-94.
- Patenaude, G., Milne, R., Dawson, T.P. (2005) *Synthesis of remote sensing approaches for forest carbon estimation: reporting to the Kyoto Protocol*. Environmental Science & Policy, 8 (2005), 161-178.
- Scurloch, J.M.O., Asner, G.P., Gower, S.T. (2001) *Worldwide historical estimates of Leaf Area Index 1932-2000*. ORNL/TM, 2001, 268.
- Norman, J.M., Campbell, J.S. (1989) *Canopy structure in Plant Physiological Ecology, field methods and instrumentation*. Chapman et Hall, London, 301-325.