

EFFETTI DEI POSSIBILI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUI FLUSSI DI CARBONIO FORESTALI IN TOSCANA

Marta CHIESI (*), Fabio MASELLI (*), Marco MORIONDO (**), Luca FIBBI (*),
Marco BINDI (**)

(*) IBIMET-CNR, via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI), tel. 055 5226023,
e-mail m.chiesi@ibimet.cnr.it

(**) DISAT-Università di Firenze, P.le delle Cascine 18, 50144 Firenze, tel. 055 3288257

Riassunto

L'obiettivo principale di questo lavoro è valutare i possibili effetti dei cambiamenti climatici sulla produttività degli ecosistemi forestali della regione Toscana. L'area di studio infatti è costituita dal territorio della regione, coperto per circa metà della sua estensione da foreste.

Si ipotizzano tre scenari diversi, ovvero incremento della temperatura media annuale di 2° C con riduzione delle precipitazioni annuali, aumento della concentrazione di biossido di carbonio dell'atmosfera e una combinazione dei due precedenti. Per ciascuno di essi, vengono valutati gli effetti sugli ecosistemi in termini di produttività primaria lorda (GPP), produttività primaria netta (NPP) e carbonio totale immagazzinato (OC).

Abstract

The main objective of this work is to assess the possible effects of climate change on productivity of forest ecosystems in Tuscany (Central Italy). The study area coincides with the territory of this Italian region, covered for about half of its extent by forests.

Three different scenarios are hypothesized, corresponding to an increase of the average annual temperature of 2° C with reduction of annual rainfall, an increase of the atmospheric concentration of carbon dioxide and a combination of the previous two. For each of them, the effects on the forest ecosystems in terms of gross primary productivity (GPP), net primary productivity (NPP) and total carbon stored (OC) are evaluated.

Introduzione

I crescenti livelli di emissioni di CO₂ nell'atmosfera ed il conseguente cambiamento climatico aumentano la necessità di monitorare la quantità di carbonio immagazzinato negli ecosistemi terrestri. Tra questi, gli ecosistemi forestali, che coprono circa il 40% della superficie terrestre libera dai ghiacci, rappresentano la parte principale di tutto il carbonio immagazzinato (Waring, Running, 2007). Quantificare e monitorare gli scambi gassosi degli ecosistemi acquisisce sempre più importanza anche in vista della negoziazione delle emissioni di carbonio da parte delle singole nazioni nel quadro degli accordi di Kyoto sulla riduzione delle emissioni dei gas serra.

È ampiamente accettato che il carbonio sequestrato dalle foreste all'interno delle piante e nella sostanza organica dei suoli è sensibile ai fattori meteorologici come la temperatura, l'umidità, le precipitazioni, la radiazione, ecc. e di conseguenza, esso è influenzato dai cambiamenti climatici che si stanno verificando in tutto il mondo e in particolare nel bacino del Mediterraneo (IPCC, 2007).

Quindi, una migliore comprensione delle interazioni tra cambiamenti climatici e biosfera terrestre è fondamentale ai fini della pianificazione e futura gestione del territorio (IPCC, 2007). Diversi approcci sono stati utilizzati per tale finalità, compresi i FACE (Free Air CO₂ Enrichment), gli esperimenti di riscaldamento dell'aria del suolo e le tecniche isotopiche di carbonio. Mentre i risultati

di questi studi non possono essere facilmente estesi su ampia scala per ragioni di tempo e di costi, i modelli di simulazione degli ecosistemi offrono il fondamentale vantaggio di essere applicabili sia in fase di valutazione dell'attuale situazione delle foreste che nell'analisi delle risposte ai probabili cambiamenti climatici e ai diversi scenari di gestione del territorio. Per queste ragioni Maselli et al., (2008) hanno proposto di combinare gli outputs del modello BIOME-BGC (modello di simulazione dei processi degli ecosistemi) con le stime di volume forestale per la simulazione dei flussi netti di carbonio negli ecosistemi forestali toscani. Obiettivo di tale lavoro è valutare l'uso di questa strategia integrata di modellizzazione per stimare i flussi e le quantità di carbonio immagazzinate nelle foreste della Toscana, sia per il presente che per futuri scenari ambientali.

Area di studio

Il lavoro è stato condotto in Toscana (9°-12° long., 42°-44° lat.), regione caratterizzata da una morfologia estremamente variabile (zone costiere generalmente piatte ed aree interne con prevalenza di zone collinari e montuose). Il clima varia da tipicamente mediterraneo fino a temperato caldo e freddo. I boschi sono prevalentemente caratterizzati dalla presenza di specie quercine (*Q. ilex* L., *Q. pubescens* Willd., *Q. cerris* L.), pini mediterranei (*Pinus pinaster* Ait., *Pinus pinea* L.), castagni (*Castanea sativa* Mill.), faggi (*Fagus sylvatica* L.) ed abeti (*Picea abies* L., *Abies alba* Mill.).

Dati utilizzati

I dati meteorologici giornalieri di temperatura minima e massima e precipitazione necessari per inizializzare i modelli utilizzati sono stati ottenuti estrapolando, attraverso l'algoritmo DAYMET (Thornton et al., 1997), i dati di alcune stazioni di misura (rispettivamente 139 per la temperatura e 179 per le piogge). Usando queste stime di temperatura e precipitazione sono stati calcolati anche l'umidità e la radiazione sull'intera area utilizzando il modello MT-CLIM (Running et al., 1987). Il periodo di studio è il quinquennio 1999-2003 e la risoluzione spaziale è di 1 km.

Informazioni aggiuntive sono state derivate da un modello digitale del terreno (DTM) della regione con risoluzione spaziale di 200 m, da una mappa digitale relativa alla distribuzione delle foreste toscane in scala 1:250.000 (Arrigoni et al., 1998) (Figura 1) e da una mappa di volume ottenuta spazializzando i dati dell'inventario forestale con l'ausilio di alcune immagini Landsat TM (Maselli Chiesi, 2006).

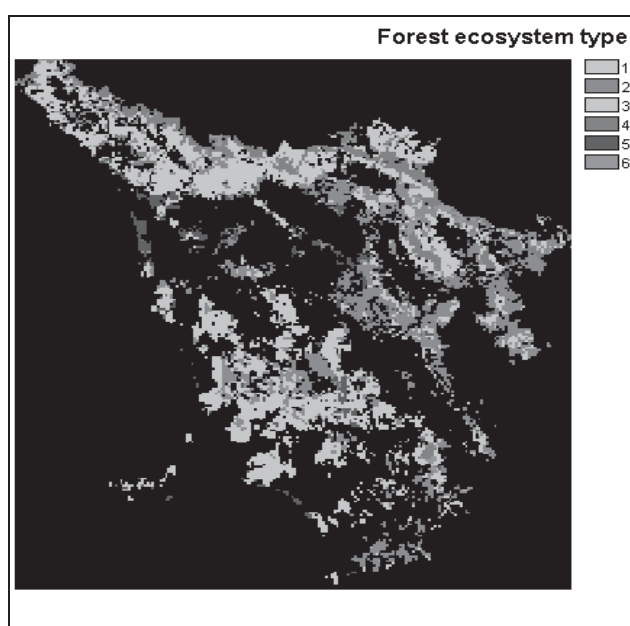


Figura 1 – Mappa delle principali tipologie di boschi della Toscana raggruppate in 6 classi (1, leccete; 2 querce decidue; 3 castagno; 4 faggio; 5 conifere del piano basale; 6 conifere montane).

I dati di profondità del suolo, tessitura e contenuto in carbonio sono stati derivati dalla mappa dei suoli della Toscana (1:250.000), prodotta dall'amministrazione regionale della Toscana, e attualmente disponibile sul web (<http://sit.lamma.rete.toscana.it/websuoli>).

Metodologia

La tecnica del “*delta-approach*” (Arnell, 2003) è stata applicata al set di dati meteorologici osservati per la produzione di dati climatici futuri per una corrispondente serie temporale di 5 anni. Seguendo questa procedura, per riprodurre il clima futuro a scala locale, gli *output* normalizzati di un modello di circolazione generale (GCM) sono stati adattati con un *downscaling* empirico sul set di dati meteorologici osservati. In particolare, le differenze di temperatura minima, temperatura massima, precipitazione e radiazione tra le uscite del modello che riproduce l'attuale clima e quelle per un determinato periodo futuro sono state calcolate su base mensile per il punto griglia più vicino alla regione Toscana ed i risultati sono stati aggiunti ai dati osservati.

Il periodo futuro selezionato per questo esperimento è stato scelto tenendo conto del fatto che le strategie di adattamento e mitigazione dell'Unione Europea considerano tollerabile un aumento della temperatura media globale della terra di 2° C al di sopra del livello pre-industriale. Per il bacino del Mediterraneo, il modello GCM HadCM3 (Pope et al., 2000) nello scenario A2 simula che tale soglia possa essere raggiunta in un periodo compreso tra il 2031-2060 (Giannakopoulos et al., 2005). Di conseguenza, i fattori delta per il *downscaling* sono stati calcolati a partire dal modello GCM HadCM3 (scenario A2) come differenza tra il valore basale (1971-2000) e il periodo futuro (2031-2060) per un singolo punto griglia che copre tutta la regione Toscana (incentrato su 11° 25' Lon. E e 45° Lat. N).

Il modello BIOME-BGC, che è stato sviluppato presso l'Università degli Studi del Montana, è in grado di simulare i flussi e le quantità di acqua, di carbonio e di azoto immagazzinate all'interno dei vari ecosistemi terrestri (Running, Hunt, 1993). In particolare, esso riproduce il comportamento degli ecosistemi in condizioni di equilibrio con l'ambiente (climax). La versione del modello attualmente in uso include la parametrizzazione per sei principali biomi terrestri (White et al., 2002). Questa è stata modificata per adattare il modello agli ecosistemi mediterranei, che mostrano caratteristiche eco-climatiche notevolmente diverse da quelle per le quali era stato originariamente sviluppato (Chiesi et al., 2007). Utilizzando stime di GPP prodotte da un modello parametrico di efficienza produttiva, C-Fix, è stato configurato BIOME-BGC in termini di conduttanza stomatica e di efficienza fotosintetica. Nella corrente taratura sono stati introdotti due miglioramenti rispetto ai lavori precedenti. In primo luogo, le stime di GPP di riferimento sono state prodotte da una versione modificata di C-Fix che considera un indice di stress idrico per meglio simulare la fotosintesi della vegetazione mediterranea. In secondo luogo, il modello BIOME-BGC ha utilizzato i dati reali di profondità e tessitura dei suoli della Toscana.

Il modello BIOME-BGC configurato in modo ottimale è stato fatto girare su tutti i pixel forestali della Toscana. I risultati ottenuti sono riferibili ad ecosistemi forestali allo stato climax, in genere diverso da quello in cui si trovano effettivamente le foreste, a causa della frequente presenza di disturbi sia naturali che indotti dall'uomo (incendi, diradamenti, tagli, ecc.). Ciò implica che il contenuto in C della biomassa forestale e del suolo può essere molto diverso da quello simulato dal modello. Questo problema è stato affrontato considerando che il volume della parte legnosa delle foreste, che è direttamente collegato alla biomassa totale, può essere impiegato come indicatore della prossimità dell'ecosistema al climax (Maselli et al., 2008). In particolare, il rapporto tra volume reale e potenziale è considerato come un indice di tale prossimità ed è utilizzato per correggere la fotosintesi e la respirazione delle simulazioni prodotte da BIOME-BGC. Seguendo questo approccio, il volume effettivo delle foreste è stato derivato dalla mappa di Maselli, Chiesi (2006), e degradato ad 1 km di risoluzione. Queste stime di volume sono state combinate con il volume massimo (climax) calcolato da BIOME-BGC per stimare la frazione effettivamente coperta da alberi per ogni pixel dell'area considerata. Queste frazioni sono state quindi utilizzate per pesare gli *outputs* del modello BIOME-BGC al fine di riportarli da una situazione della foresta di climax a

quella reale e riuscire quindi a determinare il contributo della parte arborea per quanto riguarda i flussi e gli stock di C (Maselli et al., 2008). Il contributo della parte erbacea è stato simulato con l'esecuzione della versione standard di BIOME-BGC per specie erbacee C4 (White et al., 2002). Le stime definitive relative all'intero ecosistema sono state ottenute sommando gli *output* della parte erbacea ridotti in funzione del grado di copertura della foresta di ogni pixel a quelli della parte arborea.

Questo tipo di modellizzazione degli ecosistemi forestali è stata applicata per prima utilizzando i dati meteorologici osservati di cinque anni (1999-2003, scenario S1). Il volume forestale utilizzato in questa fase è quello rilevato da Maselli, Chiesi (2006). Gli *outputs* relativi alla produttività forestale erano già stati validati in Maselli et al., (2008), solo la previsione del C contenuto nel suolo necessita di una nuova validazione. Questo è stato realizzato confrontando la stima prodotta con la mappa del contenuto in C nel suolo derivata da misure.

Successivamente, lo stesso approccio di modellizzazione è stato applicato ai tre scenari con i vari cambiamenti ambientali. Questi scenari corrispondono a:

- solo aumento della concentrazione di CO₂ atmosferica, da 369.4 ppm a 550 ppm (scenario S2);
- solo il cambiamento del clima (scenario S3);
- entrambi i cambiamenti insieme (scenario S4).

Per tutti questi scenari le variabili che caratterizzano la vicinanza delle foreste alla situazione di climax sono stati mantenuti costanti, il che corrisponde a supporre uno sfruttamento delle risorse forestali proporzionalmente stabile rispetto ai cambiamenti di produttività. Gli effetti dei tre scenari sul bilancio del C sono stati valutati attraverso l'analisi comparata della produttività forestale e del C immagazzinato rispetto alle condizioni attuali.

Risultati

In Figura 2 si riporta il grafico che mostra il clima medio attuale e quello futuro. Nello scenario futuro ogni mese è sempre più caldo dell'attuale (circa 14 °C contro 16 °C di media annuale) ed è interessante notare che le massime differenze si registrano nel periodo estivo (fino a +4°C), che è anche il più critico per il frequente insorgere di carenze idriche. Per quanto riguarda le precipitazioni la quantità totale non varia molto (si riduce del 5% nel futuro), ma la sua distribuzione cambia significativamente. In particolare, le precipitazioni si riducono durante la tarda primavera e l'estate mentre aumentano in autunno ed a fine inverno accentuando anche in questo caso lo stress idrico estivo.

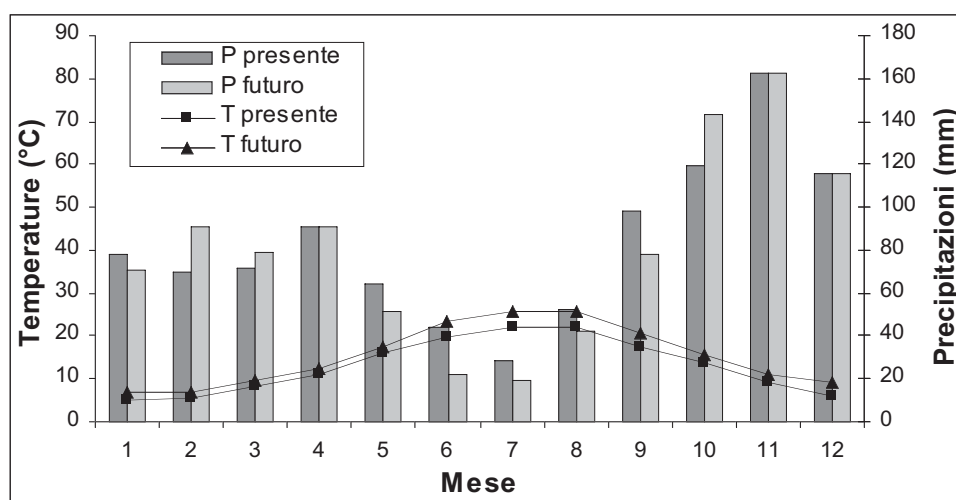


Figura 2 – Dati di temperatura e pioggia mensili per il clima attuale (1999-2003) e futuro. Valori medi di tutti i pixel classificati come forestali.

La comparazione della stima del contenuto in C del suolo con la mappa derivata dalle misure dà una correlazione di $r = 0.315$, $P < 0,01$ e un RMSE di 1.79 kg C m^{-2} al livello di pixel. Ancora migliori sono i risultati a livello di classi ($r = 0.903$, $\text{RMSE} = 0.97 \text{ kg C m}^{-2}$) con una leggera sovrastima per tutte le classi eccetto che per l'ecosistema 1. Si può quindi dedurre che il modello proposto riproduce in maniera ragionevole il contenuto di C nei suoli forestali della Toscana.

Nella Tabella 1 sono riportati i risultati ottenuti con la metodologia proposta per i diversi scenari ed i diversi ecosistemi. Nello scenario S2 l'aumento della concentrazione di CO_2 in atmosfera determina un incremento della produzione forestale sia in termini di GPP che di NPP e un incremento del C immagazzinato nella vegetazione e nel suolo. Questo incremento è più evidente per gli ecosistemi che già attualmente sono sottoposti a più elevato stress idrico durante il corso degli anni (1 e 5). Nello scenario S3, con i soli cambiamenti climatici, si nota che la GPP e l'NPP tendono generalmente a diminuire. Anche in questo caso gli ecosistemi che sembrano più sensibili sono quelli più xerofili (1 e 5). Una diminuzione si registra anche nel C della vegetazione e del suolo. Lo scenario climatico futuro ha un effetto maggiore per quanto riguarda la riduzione del C del suolo rispetto alla GPP in alcuni ecosistemi collinari e montani (2, 3 e 4). In un clima più caldo la GPP di questi ecosistemi tende ad avere piccole riduzioni o ad aumentare, mentre il C nel suolo tende sempre a diminuire in maniera simile agli altri ecosistemi. Questo può essere spiegato con il fatto che l'aumento della temperatura ha un deciso effetto sulla respirazione eterotrofa del suolo che libera nell'atmosfera parte del C in esso contenuto.

Nell'ultimo scenario S4, che considera entrambi i cambiamenti, si produce un generale incremento della produttività forestale sia lorda che netta, mentre il C contenuto nella vegetazione mostra solamente un leggero incremento e quello nel suolo rimane più o meno inalterato rispetto alla situazione attuale.

	GPP Kg C m ⁻²				NPP Kg C m ⁻²				Vegetazione Kg C m ⁻²				Suolo Kg C m ⁻²			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
E1	1.22	1.59	1.04	1.43	0.35	0.56	0.23	0.42	6.06	7.86	4.59	6.30	7.69	9.70	6.21	7.46
E2	1.32	1.61	1.35	1.71	0.30	0.42	0.27	0.42	6.18	7.51	5.66	7.13	9.93	12.1 2	8.66	10.5 9
E3	1.21	1.46	1.21	1.50	0.36	0.50	0.32	0.47	8.75	10.5 2	7.89	9.78	11.1 1	13.7 3	9.45	11.6 7
E4	1.10	1.25	1.07	1.25	0.32	0.40	0.28	0.37	9.21	10.4 1	8.26	9.63	13.1 0	15.1 3	11.1 5	12.9 6
E5	1.43	1.76	1.27	1.69	0.34	0.51	0.25	0.42	7.87	9.71	6.23	8.33	8.58	10.8 4	6.77	8.40
E6	1.31	1.55	1.21	1.48	0.32	0.44	0.26	0.37	7.28	8.66	6.15	7.52	10.5 5	12.9 2	8.96	10.6 2

Tabella 1: Stima dei valori medi di GPP e NPP e quantità di C immagazzinato nella vegetazione e nel suolo per i 6 ecosistemi considerati e per i vari scenari (S1-S4 vedi testo).

Discussione e conclusioni

I cambiamenti climatici utilizzati (scenario A2 IPCC del modello HadCM3) hanno come effetto sugli ecosistemi forestali quello di ridurre sia la capacità di fissazione che la quantità di C accumulato in essi. Questi risultati sono in accordo con il fatto che il principale fattore che limita la produttività degli ecosistemi in ambiente mediterraneo è la disponibilità idrica nel periodo estivo che viene ulteriormente ridotta nello scenario utilizzato; sono inoltre in accordo col fatto che le maggiori riduzioni si registrano negli ecosistemi più aridi e quelle minori negli ecosistemi montani che sono più freddi ed umidi. L'incremento di CO_2 produce un incremento piuttosto omogeneo in tutti i tipi di foreste sia della fissazione che dell'accumulo di C. Tale incremento risulta

proporzionale alla produttività dell'ecosistema stesso ed è maggiore per l'NPP rispetto alla GPP tanto che il rapporto NPP/GPP passa da 0.23-0.29 dello scenario S1 a 0.26-0.36 nello scenario S2. Nello scenario S4 un incremento significativo è stato osservato per GPP e NPP e in misura minore per il C immagazzinato nella vegetazione. Gli incrementi sono stati più pronunciati per gli ecosistemi che si trovano ad altitudini intermedie (2 e 3). L'effetto contrastante del cambiamento climatico (che tende a favorire le zone più umide e fredde) e quello dell'aumento di CO₂ (che agisce prevalentemente sulle zone più calde) ha, quindi, favorito le zone intermedie. Il rapporto NPP/GPP rimane inalterato rispetto alla situazione attuale. L'effetto dei cambiamenti climatici è stato di tipo additivo nei confronti dell'aumento di CO₂ con nessun apparente interazione. Il C contenuto nel suolo in questo scenario rimane quasi identico alla situazione attuale, probabilmente perché la maggiore produzione di sostanza organica da parte delle foreste è bilanciata da un aumento della respirazione da parte degli organismi decompositori. Questi risultati sembrano indicare che, in un ambiente forestale di tipo mediterraneo, il suolo non aumenterà il suo contenuto di C qualora si verificino le prospettate situazioni di aumento di temperatura e di CO₂.

Bibliografia

- Arnell N. W., D. A. Hudson, R. G. Jones (2003), "Climate change scenarios from a regional climate model: Estimating change in runoff in southern Africa." *J. Geophys. Res.*, 108(D16), 4519, doi:10.1029/2002JD002782.
- Arrigoni P.V., Raffaelli M., Rizzotto M., Selvi F., Vicini D., Lombardi L., Foggi B., Melillo C., enesperi R., Ferretti G., Benucci S., Turrini S., di Tommaso P.L., Signorini M., Bargelli E., Miniati U., Farioli C., de Dominicis V., Casini S., Chiarucci A., Tomei P.E., Ansaldo M., Maccioni S., Guazzi E., Zocco Pisana L., Cenerini A., Dell'Olmo L., Menicagli E. (1998), *La vegetazione forestale. Serie Boschi e Macchie di Toscana.*, Regione Toscana, Giunta regionale, Firenze, 215 pp.
- Chiesi M., Maselli F., Moriondo M., Fibbi L., Bindi M., Running S.W. (2007), Application of BIOME-BGC to simulate Mediterranean forest processes, *Ecological Modelling*, 206: 179-190.
- Giannakopoulos C., Bindi M., Moriondo M., Tin T. (2005). *Climate change impacts in the Mediterranean from a 2°C global temperature rise.* Un report per il WWF (World Wide Fund for Nature) Disponibile da: <http://assets.panda.org/downloads/medreportfinal8july05.pdf>.
- IPCC (2007) *Climate change 2007. IPCC Forth Assessment Report.* Disponibile da: <http://www.ipcc.ch>.
- Maselli F., Chiesi M. (2006), "Evaluation of statistical methods to estimate forest volume in a Mediterranean region." *IEEE Transaction of Geoscience and Remote Sensing*, 44(8): 2239-2250.
- Maselli F., Chiesi M., Moribondo M., Fibbi L., Bindi M., Running, S. W. (2008), "Integration of ground and satellite data to simulate the forest carbon budget of a Mediterranean region". *Ecological Modelling*, in stampa.
- Pope V.D., Gallani M.L., Rowntree P.R., Stratton R.A. (2000) "The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model-HadAM3." *Clim. Dynam.* 16: 123-146.
- Running S.W., Nemani R.R., Hungerford R.D., (1987). "Extrapolation of synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating forest evaporation and photosynthesis." *Canadian Journal of Forest Research*, 17:472-483.
- Running S.W., Hunt E.R. (1993). "Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models." In: Ehleringer, J.R., and Field, C.B. (eds.), *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*, Academic Press, San Diego, pp. 141-158.
- Thornton P.E., Running S.W., and White M.A. (1997), "Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain", *Journal of Hydrology*, 190: 214-251.
- Waring H.R., Running S.W. (2007), *Forest Ecosystems. Analysis at Multiples Scales.*, 3rd edition. Academic Press, San Diego.
- White M.A., Thornton P.E., Running S.W., Nemani R.R. (2002), "Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls", *Earth Interactions*, 4: 1-85.