

## STIME DI FLUSSO NETTO DI CARBONIO DEGLI ECOSISTEMI FORESTALI DELLA REGIONE TOSCANA

Marta CHIESI (\*), Fabio MASELLI (\*), Marco MORIONDO (\*\*), Luca FIBBI (\*),  
Marco BINDI (\*\*), Steven W. RUNNING (\*\*\*)

(\*) 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

(\*\*\*)NTSG-Dept. of Ecosystem Sciences, University of Montana, Missoula, MT 59812 USA

### Riassunto

L'obiettivo principale del lavoro è offrire un contributo allo studio dei flussi netti di carbonio che caratterizzano gli ecosistemi forestali della regione Toscana. La metodologia adottata prevede di ottenere tali flussi integrando la produttività primaria lorda (GPP) stimata utilizzando un modello di tipo parametrico (C-Fix) con le respirazioni stimate da un modello di tipo bio-geochimico (BIOME-BGC). I risultati ottenuti hanno permesso di effettuare un passo importante verso lo sviluppo di un sistema per il monitoraggio a scala regionale dell'accumulo di carbonio da parte delle foreste.

### Abstract

The main objective of this work is to offer a contribution to the knowledge of net carbon fluxes through Tuscany forest ecosystems. The methodology applied enables to obtain net carbon fluxes by integrating values of gross primary productivity (GPP) estimated using a parametric model (C-Fix) with ecosystem respirations simulated by a bio-geo-chemical model (BIOME-BGC). The results obtained are an important step forward towards the development of an operational system to monitoring net carbon fluxes on a regional scale.

### Introduzione

La stima dei processi che caratterizzano gli ecosistemi forestali è uno degli obiettivi primari di studio relativi ai cambiamenti climatici e all'applicazione delle misure di mitigazione del protocollo di Kyoto. In generale queste ricerche sono necessarie per promuovere una gestione sostenibile delle risorse forestali sia a scala locale che regionale. Tra le varie metodologie che vengono proposte nell'ambito dei più avanzati studi (es. tecniche di *eddy-covariance*, telerilevamento, modelli di simulazione, etc.), quelle basate sullo studio di immagini satellitari e su modelli di simulazione risultano particolarmente promettenti: il telerilevamento infatti può fornire, con buona approssimazione, stime dirette delle condizioni della vegetazione (es. LAI, FAPAR, etc.) che sono legate alla produttività lorda dell'ecosistema (GPP), mentre i modelli, combinando dati da varie fonti (es. dati meteorologici, condizione del suolo e della vegetazione, etc.), riescono a produrre stime dei vari processi (traspirazione, fotosintesi, respirazioni, allocazioni, etc.). Una integrazione tra queste due tecniche può portare quindi ad una più completa ed efficiente caratterizzazione dei processi legati agli ecosistemi forestali.

Il lavoro è basato sui risultati di precedenti studi che hanno riguardato l'utilizzo di tecniche di telerilevamento (attraverso l'analisi di immagini ad alta e bassa risoluzione spaziale) e di un modello di tipo biogeochimico (prima FOREST-BGC e poi la sua evoluzione BIOME-BGC) per arrivare alla stima delle principali voci del ciclo del carbonio (fotosintesi e respirazioni). Dopo una descrizione dell'area di studio e del materiale utilizzato, viene descritta la metodologia applicata per la determinazione dei flussi. Essa è basata sull'uso congiunto del modello parametrico C-Fix

(Veroustraete et al., 2002) impiegato per stimare direttamente la produttività lorda dell'ecosistema, e del modello biogeochimico BIOME-BGC, opportunamente calibrato e validato per le specie forestali mediterranee (Chiesi et al., 2007). Vengono poi esposti i principali risultati insieme ad una discussione degli stessi.

### Area di studio

Il lavoro è stato condotto in Toscana (9°-12° long., 42°-44° lat.), regione la cui superficie è per metà coperta da foreste. È 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 (Rapetti e Vittorini, 1995). 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 (temperature minima e massima, precipitazione) giornalieri necessari per inizializzare i modelli applicati sono stati ottenuti estrapolando, attraverso l'algoritmo DAYMET (Thornton et al., 1997), i dati di alcune stazioni di misura (rispettivamente 74 per le temperature e 159 per le piogge). Il periodo di riferimento è 1999-2003.

Per la regione Toscana è disponibile un inventario delle foreste redatto negli anni 1990-1998 (Arrigoni et al., 1998), attuato in due fasi: la prima per la determinazione dell'uso suolo lungo una maglia di campionamento di 400 m, la seconda per il rilevamento delle grandezze forestali di maggior rilievo (es. specie forestale, diametro, altezza, volume, etc.).

Informazioni aggiuntive sono state raccolte 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) e da una mappa di volume (Figura 1) ottenuta spazializzando i dati dell'inventario con l'ausilio di alcune immagini Landsat TM (Maselli e Chiesi, 2006).

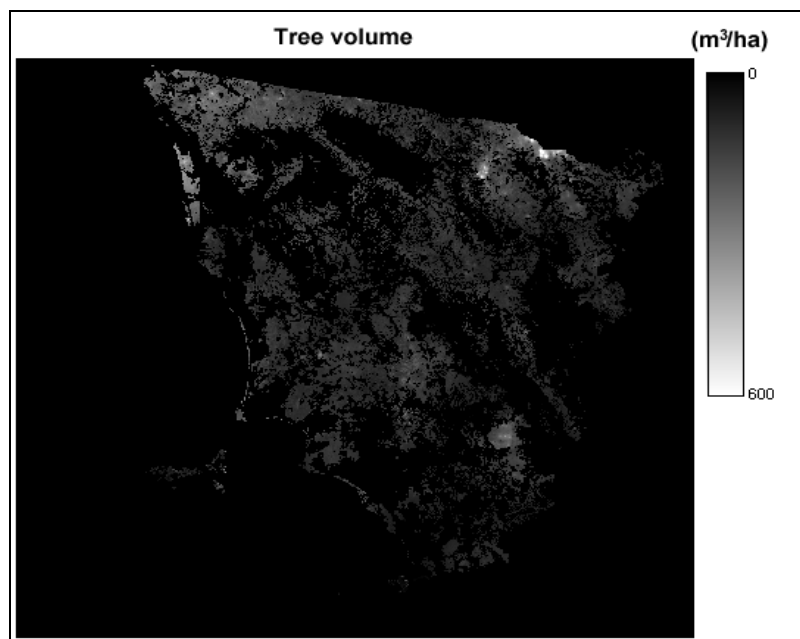


Figura 1 – Mappa di volume dei boschi della Toscana raggruppate in 6 classi (1, leccete; 2 querce decidue; 3 castagno; 4 faggio; 5 conifere del piano basale; 6 conifere montane) ottenuta a partire dai dati di volume dell'inventario forestale regionale.

Le immagini NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) necessarie per l'applicazione del modello C-Fix sono state ottenute dal satellite Spot-VEGETATION, con risoluzione spaziale di 1 km, pre-elaborate in formato NDVI dal Flemish Institute for Technological Research (VITO), Belgium. La risoluzione temporale delle immagini è dieci giorni.

### Metodologia

L'approccio utilizzato è ampiamente descritto in Maselli et al. (2007) e schematizzato in Figura 2. È basato sull'utilizzo di un modello parametrico, C-Fix, ed uno bio-geo-chimico, BIOME-BGC, per simulare la fotosintesi e le respirazioni degli ecosistemi forestali. Più precisamente, C-Fix viene utilizzato per stimare direttamente la GPP in funzione della radiazione fotosintetica assorbita dalla vegetazione (FAPAR) attraverso l'equazione:

$$GPP = \varepsilon \sum_{i=1}^N T_{cor_i} FAPAR_i Rad_i \quad [1]$$

dove  $\varepsilon$  corrisponde al coefficiente di efficienza d'uso della radiazione (1.1 gC/MJ APAR, secondo Veroustraete et al., 2002), N è il numero dei periodi considerati, Tcor è un fattore che considera la relazione tra fotosintesi e temperatura, e Rad è la radiazione fotosinteticamente attiva incidente. FAPAR, a sua volta, può essere ricavata dalle immagini Spot-VEGETATION di NDVI, secondo quanto proposto da Myneni e Williams (1994).

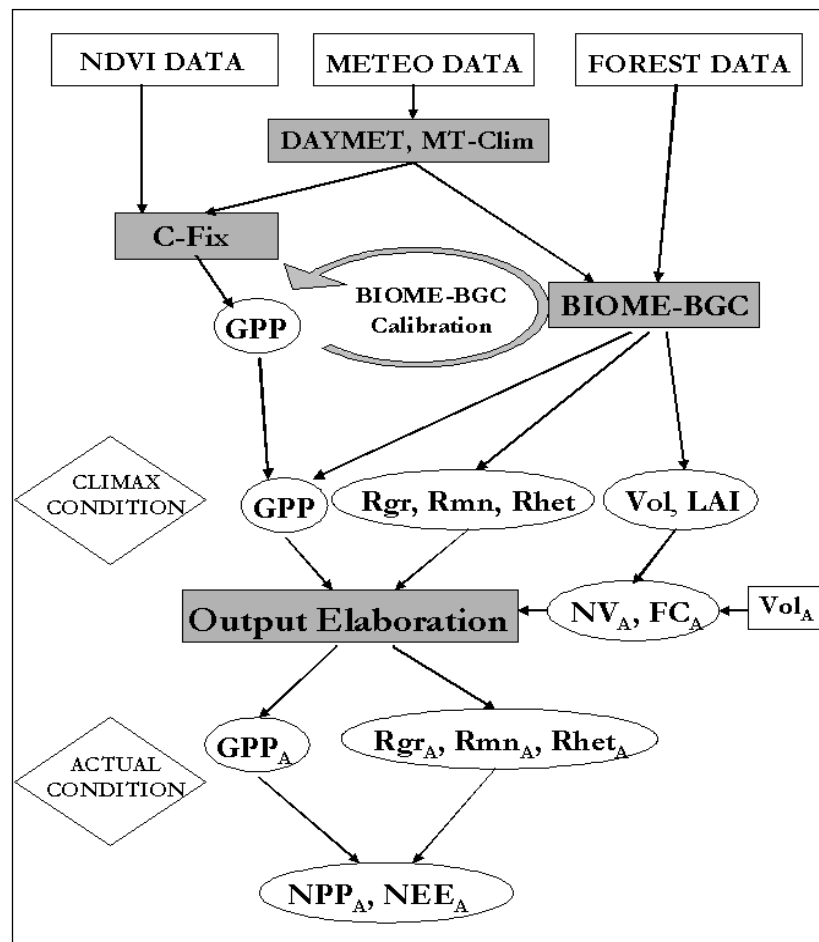


Figura 2 – Schema esemplificativo della metodologia adottata per la stima dei flussi netti di carbonio degli ecosistemi forestali.

Successivamente, BIOME-BGC viene calibrato e applicato per simulare la fotosintesi e le respirazioni di ecosistemi forestali in condizioni di equilibrio (*climax*) (White et al., 2002). La conversione di questi flussi in quelli reali, di solito molto diversi dall'equilibrio, viene effettuata considerando il volume reale del bosco come indicatore della distanza dalle condizioni climax (Maselli et al., 2007). Il volume reale è combinato con quello stimato da BIOME-BGC per calcolare il volume reale normalizzato ( $NV_A$ ). Questo viene poi utilizzato per calcolare il LAI reale ( $LAI_A$ ) moltiplicando  $NV_A$  per il LAI massimo stimato da BIOME-BGC.  $LAI_A$  viene trasformato in copertura ( $FC_A$ ) attraverso la legge di Beer:

$$FC_A = (1 - e^{-LAI_A}) \quad [2]$$

$NV_A$  e  $FC_A$  sono utilizzati per stimare la NPP e la NEE del bosco ( $NPP_A$  ed  $NEE_A$ ) attraverso due equazioni:

$$NPP_A = GPP \cdot FC_A - Rgr \cdot FC_A - Rmn \cdot NV_A \quad [3]$$

$$NEE_A = NPP_A - Rhet \cdot NV_A \quad [4]$$

dove Rgr, Rmn e Rhet sono rispettivamente le respirazioni di crescita, di mantenimento ed eterotrofa simulate da BIOME-BGC (Maselli et al., 2007).

Come è possibile vedere in Figura 2, l'applicazione di C-Fix e di BIOME-BGC è stata preceduta dalla raccolta di dati meteorologici giornalieri (temperature minima e massima, precipitazione e radiazione): a tale scopo sono stati utilizzati il modello MT-CLIM per la stima della radiazione e l'algoritmo DAYMET (Thornton et al., 1997) per la spazializzazione sul territorio regionale dei dati disponibili. Per quanto riguarda invece i dati da satellite, le immagini NDVI impiegate per il modello C-Fix sono state pre-elaborate per rimuovere ogni contaminazione dovuta alla nuvolosità. Le procedure adottate per ridurre questi effetti consistono in un'operazione di filtraggio applicato alle immagini originali per rimuovere i *pixels* isolati con valori di NDVI anomali e sostituirli con medie mobili. Successivamente un nuovo algoritmo MVC è stato applicato per ottenere immagini mensili per il periodo 1999-2003.

## Risultati

Le stime di  $NPP_A$  ottenute sono state confrontate con i dati derivati dall'inventario forestale raggruppando i dati misurati in 6 classi in base al volume per ognuno dei principali ecosistemi forestali presenti nella regione. I risultati di questa validazione hanno mostrato un buon accordo tra dati misurati e simulati con differenze significative visibili solo per i castagneti e le conifere montane (Maselli et al., 2007).

In Figura 3 si riportano le mappe di NPP ed NEE ottenute per la regione. In generale, le stime di NPP sono circa il 20% più elevate di quelle di NEE le due carte sono molto simili dal momento che la respirazione eterotrofa stimata ha valori molto bassi. Questo indica che, per la maggior parte delle foreste toscane, il flusso netto dell'ecosistema è dovuto quasi totalmente all'accumulo di nuova biomassa legnosa coincidente con la produttività primaria netta.

A titolo esemplificativo si riportano in Tabella 1 le medie di NPP ed NEE ottenute per le 6 classi forestali. I valori di NPP sono intorno a 300-400 g C/m<sup>2</sup>/anno, mentre quelli di NEE variano tra 250 e 350 g C/m<sup>2</sup>/anno circa. Entrambi i valori indicano che si tratta di ecosistemi poco produttivi e comunque lontani dalla situazione di climax.

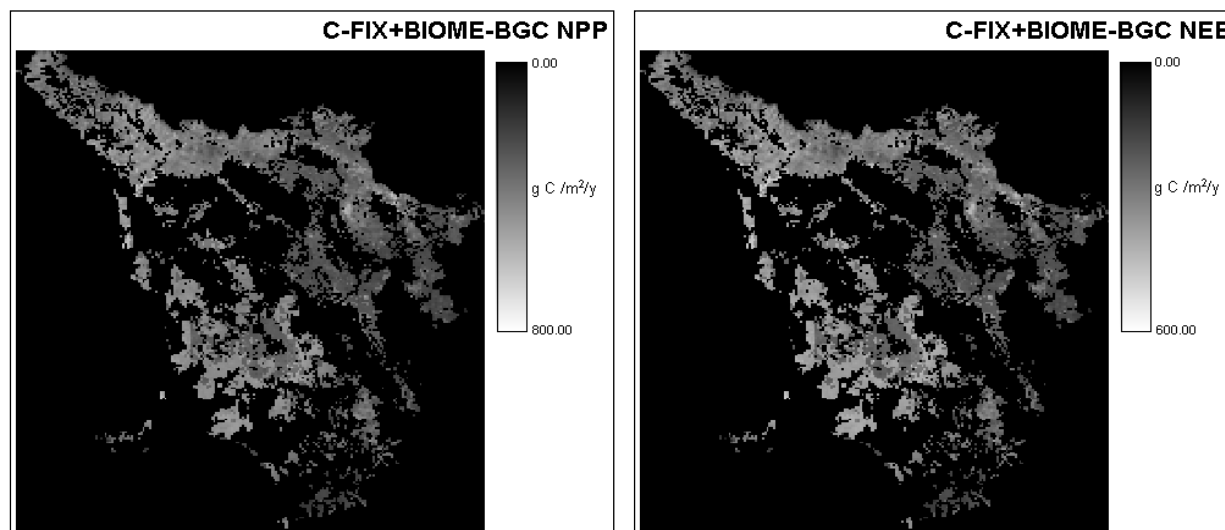


Figura 3 – Mappe di NPP (sinistra) e NEE (destra) media delle foreste toscane ottenute integrando C-Fix e BIOME -BGC.

Ecosistema	C-Fix + BIOME-BGC	
	NPP <sub>A</sub>	NEE <sub>A</sub>
<i>Leccio</i>	419	350
<i>Querce decidue</i>	280	222
<i>Castagno</i>	358	277
<i>Faggio</i>	328	252
<i>Conifere non montane</i>	316	265
<i>Conifere montane</i>	313	253

Tabella 1: Stima dei valori medi NPP e NEE per i vari ecosistemi in cui sono state suddivise le foreste toscane (i valori sono espressi in g C/ m<sup>2</sup>/anno).

### Discussione e conclusioni

I primi risultati ottenuti integrando i modelli C-Fix e BIOME-BGC hanno mostrato che la metodologia è abbastanza accurata. Uno dei suoi principali vantaggi è che non si tratta di una semplice elaborazione di dati da diverse fonti ma è una simulazione basata su solidi concetti eco-fisiologici. Questa caratteristica consente di ottenere stime abbastanza accurate e di utilizzarla anche per il monitoraggio globale della vegetazione. La tecnica può pertanto essere applicata in altre regioni qualora siano disponibili i dati necessari (per esempio, oltre alle immagini telerilevate, dati meteorologici, carte della vegetazione, etc.).

La metodologia è aperta a possibili miglioramenti in quanto si possono considerare anche informazioni riguardanti i suoli ed allungare la serie di dati in modo da avere una migliore caratterizzazione della variabilità interannuale dei processi considerati.

### Bibliografia

Arrigoni P.V., Raffaelli M., Rizzotto M., Selvi F., Vicini D., Lombardi L., Foggi B., Melillo C., Benesperi 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.
- 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., Moriondo M., Fibbi L., Bindi M., Running S. W. (2007), "Integration of ground and satellite data to simulate the forest carbon budget of a Mediterranean region", sottoposto a *Global Biogeochemical Cycles*.
- Myneni R.B. and Williams D.L. (1994), "On the relationship between FAPAR and NDVI", *Remote Sensing of Environment*, 49: 200-211.
- Rapetti F., and Vittorini S. (1995), *Carta climatica della Toscana*, Pacini Editore, Pisa (Italy).
- 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.
- Veroustraete F., Sabbe H., and Eerens H. (2002), "Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data", *Remote Sensing of Environment*, 83: 376-399.
- 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.