

Immagini telerilevate integrate con un modello bio-geo-chimico per la stima a scala nazionale dei flussi di carbonio degli ecosistemi forestali

Gherardo Chirici (*), Anna Barbatì (**), Marta Chiesi (***), Piermaria Corona (****),
Fabio Lombardi (*), Marco Marchetti (*), Dario Papale (**), Massimiliano Pasqui (***),
Riccardo Salvati (**), Fabio Maselli (****)

(*) DiBT EcoGeoFor - Università del Molise, Contrada Fonte Lappone snc, 86090 Pesche (IS), Italy

(**) DIBAF, Università della Tuscia, via San Camillo de Lellis, 01100 Viterbo, Italy

(***) IBIMET-CNR, via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino, Italy

(****) Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura (CRA-SEL), Arezzo, Italy

Riassunto

Il progetto C_FORSAT, finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca nell'ambito dei bandi FIRB, ha lo scopo di sviluppare, testare ed applicare una metodologia di stima della produttività degli ecosistemi forestali a scala nazionale. Nell'ambito di tale progetto, giunto alla conclusione del terzo anno di attività, sono stati utilizzati dati telerilevati Spot-VEGETATION per stimare la produttività primaria lorda (GPP) delle foreste italiane; ciò è stato possibile applicando un modello parametrico, C-Fix, appositamente adattato all'ambiente mediterraneo. Si è poi impiegato il modello bio-geochimico BIOME-BGC che, opportunamente calibrato e validato per le principali categorie forestali italiane, ha consentito di stimare le respirazioni dei diversi ecosistemi. L'integrazione degli outputs dei due modelli ha permesso di ottenere anche la produzione primaria netta (NPP) ed il flusso netto degli ecosistemi forestali (NEE). Il contributo richiama brevemente la metodologia utilizzata nel progetto e presenta i risultati di confronti con i dati di torri *eddy covariance* e con misure di incremento corrente annuo (CAI) derivati dall'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio (INFC) a scala regionale.

Abstract

The C_FORSAT project, funded by the Italian Ministry of the University and Research within the FIRB programme, aims at developing, testing and applying a methodology to estimate the productivity of Italian forest ecosystems. Within this project, which is now at the end of its third year of activity, Spot-VEGETATION data have been used to estimate the gross primary production (GPP) of the forests; this was done applying a parametric model, C-Fix, specifically adapted to the Mediterranean environment. Additionally a calibrated version of the bio-geochemical model BIOME-BGC was applied to estimate all respiration and allocation properties of six different forest types. The integration of the outputs of these models enabled to produce maps of GPP, net primary production (NPP) and net ecosystem exchange (NEE). The current work briefly summarizes the methodology and shows the results comparisons with data of eddy covariance towers and measurements of current annual increment (CAI) derived from the Italian National Forest Inventory (INFC).

Introduzione

Uno dei maggiori sforzi della ricerca scientifica in campo ecologico è quello di quantificare e valutare l'impatto delle foreste sul ciclo del carbonio. Fra le numerose metodologie proposte per la valutazione dei flussi di carbonio (tecniche di *eddy covariance*, immagini da satellite e modelli biogeochimici), quelle basate sull'uso di modelli di simulazione dell'ecosistema si sono rivelate particolarmente promettenti. Questi, infatti, permettono di stimare tutte le componenti del ciclo del

carbonio a livello forestale (*Gross Primary Production*, *Net Primary Production*, e *Net Ecosystem Exchange*, GPP, NPP, NEE rispettivamente) sulla base delle condizioni ambientali (clima, suolo e tipo di vegetazione).

Il progetto C_FORSAT, finanziato dal MIUR con fondi FIRB-Futuro in Ricerca, è rivolto a sviluppare e testare una metodologia che consenta di integrare dati da diverse fonti informative al fine di modellizzare l'accumulo di carbonio negli ecosistemi forestali italiani e di analizzarne la produttività nel tempo anche sulla base di scenari di cambiamento sia climatico che di uso del suolo. A tale scopo vengono utilizzati dati convenzionali derivati da cartografia esistente, dati meteorologici multitemporali spazializzati, dati misurati con la tecnica dell'eddy covariance, dati inventariali georeferenziati e dati telerilevati da satelliti.

Il presente lavoro riporta le fasi del progetto che riguardano lo sviluppo della metodologia per valutare la quantità di carbonio effettivamente accumulato nelle foreste italiane alla risoluzione spaziale di 1 km². I modelli utilizzati a questo scopo sono di due tipologie: un modello parametrico basato su dati telerilevati ed efficienza di uso della radiazione (C-Fix) (Veroustraete et al., 2002; Maselli et al., 2009a), ed un modello biogeochimico (BIOME-BGC) (Running and Hunt, 1993) capace di riprodurre i processi di fotosintesi e respirazione dell'ecosistema. Brevemente, dopo aver richiamato la metodologia, vengono esposti i risultati di confronti con i dati di torri eddy covariance e con misure di incremento corrente annuo (CAI) derivati dall'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio (INFC) a scala regionale.

Area di studio

L'indagine ha interessato tutto il territorio italiano (36°-47°30' latitudine Nord, 5°30'-18°30' longitudine Est) che si presenta assai diversificato sia per le caratteristiche climatiche delle diverse zone che per quelle orografiche. Conseguentemente la vegetazione che copre questa vasta penisola è molto eterogenea. In particolare le foreste coprono circa un terzo della superficie totale e le formazioni maggiormente rappresentate sono dominate dalle querce e dal faggio. Tra le conifere, la specie più diffusa è l'abete rosso (*Picea abies* (L.) Karst), seguito da diverse specie di pino (es. *Pinus nigra* Arnold, *P. pinaster* Ait. e *P. pinea* L.) (<http://www.infoc.it>).

Dati di studio

I dati giornalieri di temperatura (sia minima che massima) e precipitazione necessari a caratterizzare dal punto di vista meteorologico il territorio italiano, sono stati forniti dal dataset europeo E-OBS (Haylock et al., 2008). Questo database è stato prodotto nell'ambito del progetto ENSEMBLES e fornisce dati per tutta Europa alla risoluzione spaziale di 0.1° (<http://www.ensembles-eu.org/>). Nell'ambito del progetto C_FORSAT tali dati sono stati riportati alla risoluzione spaziale di 1 km utilizzando le regressioni localizzate (Maselli et al., 2012).

La mappa digitale relativa alla distribuzione delle foreste su tutto il territorio nazionale è stata ottenuta dal CORINE *Land Cover* 2006 alla scala di 1:100000 (ISPRA, 2010). Le classi originali sono state raggruppate in 6 gruppi diversi seguendo considerazioni eco fisiologiche al fine di poter applicare il modello BIOME-BGC (Maselli et al., 2009b).

Le immagini *Normalised Difference Vegetation Index* (NDVI) per l'applicazione del modello C-Fix modificato sono state ottenute dal satellite Spot-VEGETATION. Anch'esse hanno una risoluzione spaziale di 1 km e sono state scaricate in formato pre-elaborato per il periodo 1998-2009 (<http://free.vgt.vito.be/>) (Figura 1).

I dati di riferimento utilizzati per una validazione delle stime prodotte derivano da fonti diverse. Per la GPP e NEE, sono stati utilizzati dati raccolti con la tecnica dell'eddy-covariance presso le stazioni di misura di San Rossore (IT-SRo) e di Roccarespanpani (IT-Ro2) (vedere anche <http://fluxnet.ornl.gov>). Per la NPP sono stati invece utilizzati i valori regionali di CAI raccolti durante lo svolgimento dell'INFC.

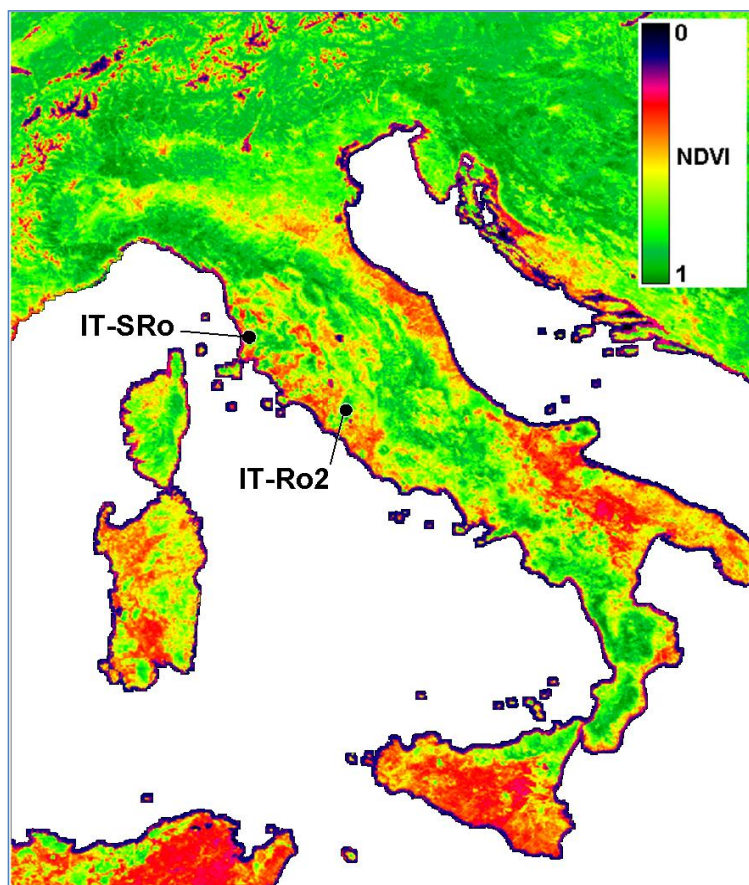


Figura 1. Immagine NDVI del sensore Spot-VEGETATION relativa al mese di agosto 2009. Le sigle IT-SRo e IT-Ro2 corrispondono rispettivamente alla denominazione delle stazioni di misura dei flussi di carbonio di San Rossore e Roccaespanpani2.

Metodologia

La metodologia adottata è basata sull'impiego di dati satellitari ed ancillari (vedi Maselli et al., 2009b). I dati meteorologici, dovendo lavorare a scala nazionale ed alla risoluzione temporale di un giorno, sono derivati dal dataset europeo E-OBS sopra descritto. Le temperature e precipitazioni sono state riportate alla risoluzione spaziale di 1 km applicando la tecnica delle regressioni multivariate calibrate localmente (Maselli et al., 2012). La radiazione solare è stata successivamente stimata a partire dagli stessi dati applicando l'algoritmo MT-Clim (Thornton et al., 2000).

I due modelli, BIOME-BGC opportunamente calibrato per caratterizzare 6 diversi tipi di foresta (FT1, querce decidue; FT2 querce sempreverdi; FT3, castagno; FT4, faggio; FT5, conifere del piano basale/collinare; FT6, conifere del piano montano) (Chiesi et al., 2007), e C-Fix, nella versione modificata per meglio adattarlo alle regioni mediterranee (Maselli et al., 2009a), vengono utilizzati per stimare la GPP e le respirazioni degli ecosistemi in equilibrio con l'ambiente circostante. I risultati che producono sono poi integrati per sfruttare i vantaggi di entrambi i modelli, ovvero la maggior accuratezza del primo nello stimare la produttività primaria lorda e la capacità del secondo di simulare tutti i processi di respirazione (sia autotrofa che eterotrofa) ed allocazione. La simulazione delle condizioni reali della foresta viene successivamente ottenuta utilizzando come

indicatore della distanza dalla condizione di equilibrio simulata da BIOME-BGC il volume legnoso presente nell'ecosistema (Maselli et al., 2009b).

Una volta ottenute stime di produttività a 1 km di risoluzione spaziale per tutto il territorio nazionale coperto da foreste, si è proceduto ad una loro validazione mediante confronto con i dati delle torri per due siti, San Rossore e Roccarespampani, per i quali disponiamo di dati di GPP ed NEE di riferimento. Successivamente, a partire dalla NPP, sono stati derivati valori di CAI per le diverse regioni e per i diversi tipi forestali; questi sono stati confrontati con i dati raccolti dall'INFC. L'accuratezza è stata valutata riportando il valore dei principali parametri statistici (coefficiente di correlazione, r , scarto quadratico medio, RMSE ed errore medio percentuale, MBE%).

Risultati

La disponibilità di dati meteo giornalieri con risoluzione spaziale di 1 km ha permesso di applicare i modelli per tutto il territorio nazionale (per approfondimenti vedere Maselli et al., 2012).

La mappa di GPP media ottenuta utilizzando le immagini SPOT-VGT è mostrata in Figura 2A. I valori di GPP medi sono compresi tra 700 e 1800 g C/m²/anno. In generale le foreste di tipo mediterraneo sub-umido riportano i valori più alti: esse crescono in zone temperate e la loro attività è limitata solo marginalmente dal fattore termico ed idrico. Gli ecosistemi di ambiente montano invece, la cui attività foto sintetica è limitata dal fattore termico durante buona parte dell'anno, producono meno. Lo stress idrico estivo determina invece una diminuzione di GPP nelle zone più aride del Sud Italia e delle isole maggiori.

L'integrazione delle respirazioni simulate dal modello BIOME-BGC con la mappa di GPP derivata da C-Fix consente di ottenere anche le mappe di NPP (Fig. 2B) e di NEE (Fig. 2C). In entrambi i casi i valori simulati paiono verosimili; sono evidenti le zone limitate dallo stress idrico e quelle invece dove il fattore limitante è la temperatura. I valori di NEE indicano che le foreste possono comportarsi sia da *sink* che da *source*.

In Tabella 1 sono riportate le accuratèzze derivate dal confronto tra i dati delle torri e le stime ottenute. In entrambi gli ecosistemi, una pineta mediterranea costiera ed un querceto, l'accordo tra i dati giornalieri è buono e sempre altamente significativo. Maggiori dettagli sono riportati in Chirici et al. (2012).

Tabella 1. Confronto tra dati giornalieri di GPP ed NEE per le stazioni di San Rossore (ITSRo) e Roccarespampani (IT-Ro1). Le statistiche RMSE e MBE sono riportate in g C m⁻² d⁻¹.

Stazione di misura	Specie prevalente	GPP			NEE		
		r	RMSE	MBE	r	RMSE	MBE
IT-SRo	<i>Pinus pinaster</i> Ait.	0.943	1.30	1.13	0.861	0.676	-0.09
IT-Ro1	<i>Quercus cerris</i> L.	0.934	1.03	0.05	0.823	1.19	0.01

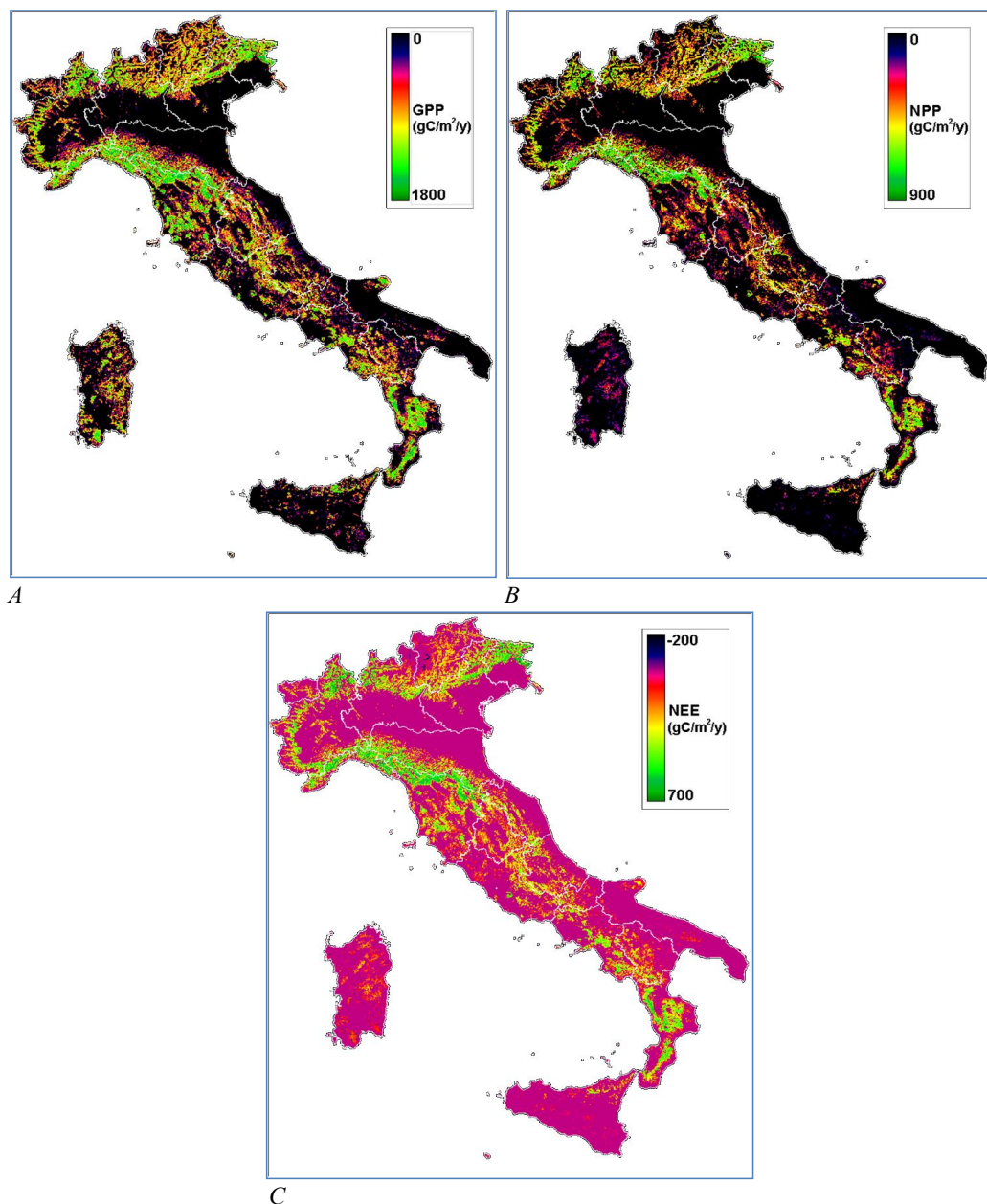


Figura 2. GPP (A), NPP (B) ed NEE (C) annuale media delle foreste italiane; entrambe le mappe sono riferite al periodo 1999-2009. In bianco sono riportati i confini delle regioni.

Il confronto tra i dati di CAI stimati e quelli misurati è riportato in Figura 3. In generale l'accuratezza è buona sia in termini di correlazione che di errore; si nota una tendenza alla sovrastima che deriva soprattutto dalle specie decidue (querce decidue, castagno e faggio).

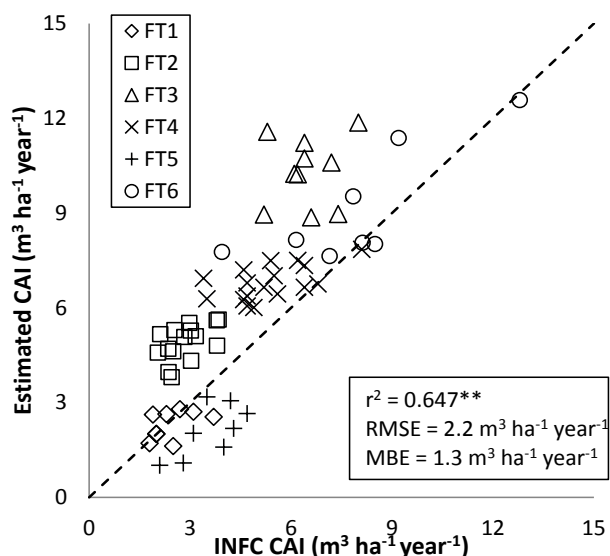


Figura 3. Valori di CAI medio per le regioni italiane e per i diversi ecosistemi forestali derivato dall'inventario nazionale e dall'applicazione della metodologia d'integrazione tra C-Fix e BIOME-BGC. Le correlazione è altamente significativa ($P < 0.001$). I diversi tipi forestali corrispondono a boschi dominati da querce sempreverdi (FT1), querce decidue (FT2), castagni (FT3), faggi FT4, conifere del piano basale/collinare (FT5), e conifere montane (FT6).

Conclusioni

La metodologia messa a punto ed applicata nell'ambito del progetto di ricerca C_FORSAT consente di ottenere stime accurate di carbonio prodotto dagli ecosistemi forestali italiani sia in termini di GPP (stimata direttamente attraverso l'uso dei dati tele rilevati) che di NPP ed NEE (entrambe ottenute attraverso il processo di integrazione brevemente richiamato).

I risultati della validazione sono buoni, sia per quanto riguarda la GPP che per la NEE. Per i CAI invece, che sono stati utilizzati per testare l'efficacia della stima dell'NPP, è evidenziata una certa sovrastima.

L'applicazione su base nazionale della metodologia d'integrazione brevemente richiamata potrà consentire di effettuare sia un monitoraggio degli ecosistemi forestali ai fini di una loro gestione sostenibile, sia una valutazione degli effetti dovuti a cambiamenti climatici e/o gestionali eventualmente ipotizzabili secondo gli scenari più probabili.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato parzialmente finanziato dal progetto MIUR FIRB-Futuro in Ricerca 2008 C_FORSAT - Modellizzazione dell'accumulo di carbonio negli ecosistemi forestali nazionali tramite integrazione di dati convenzionali, dati telerilevati e modelli di produttività.

Bibliografia

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.

Chirici G., Chiesi M., Pasqui M., Corona P., Salvati R., Barbati A., Lombardi F., Maselli F. (2012). Utilizzo di modelli bio-geo-chimici guidati da immagini telerilevate per la stima a scala nazionale dei flussi di carbonio degli ecosistemi forestali. Atti della XVI Conferenza ASITA. Vicenza, 6-9 novembre 2012.

Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G., Klok E.J., Jones P.D., New M. (2008), “A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation”, *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201.

ISPRA, 2010. La realizzazione in Italia del Progetto Corine Land Cover 2006: Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. Volume 131, 50 pp.

Maselli F., Papale D., Puletti N., Chirici G., Corona P. (2009a) “Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems”, *Remote Sensing of Environment*, 113: 657-667.

Maselli, F., Chiesi, M., Moriondo, M., Fibbi, L., Bindi, M., Running, S.W. (2009b). “Modelling the forest carbon budget of a Mediterranean region through the integration of ground and satellite data”, *Ecological Modelling*, 220, 330–342.

Maselli, F., Pasqui, M., Chirici, G., Chiesi, M., Fibbi, L., Salvati, R., Corona, P. (2012). “Evaluation of a 1-km daily meteorological dataset for modelling vegetation production in Italy”. *Climate Research*, 54, 271–285.

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 JR and Field CB. (Eds) *Scaling physiological processes: leaf to globe* Academic Press, San Diego, USA, pp. 141-158

Thornton, P.E., Hasenauer, H., White, M.A. (2000). “Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 104, 255–271.

Veroustraete, F., Sabbe, H., 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.