

Utilizzo di modelli bio-geo-chimici guidati da immagini telerilevate per stimare a scala nazionale i flussi di carbonio in ecosistemi forestali

Gherardo Chirici (*), Marta Chiesi (**), Massimiliano Pasqui (**), Piermaria Corona (***), Riccardo Salvati (***), Anna Barbati (***), Fabio Lombardi (*), Fabio Maselli (**)

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

(**) IBIMET-CNR, via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino. Tel. 055 5226024

(***) DIBAF, Università della Toscana, Via San Camillo de Lellis, 01100 Viterbo, Italy

Riassunto

Nel 2008 il Ministero dell'Università e della Ricerca ha finanziato il progetto FIRB C_FORSAT che ha lo scopo di sviluppare, applicare e validare un modello di stima regionalizzato della produttività degli ecosistemi forestali. A questo scopo il modello bio-geochimico BIOME-BGC è stato opportunamente calibrato e validato per le principali categorie forestali italiane anche grazie all'ausilio del modello C-Fix. Questo infatti è capace di stimare in maniera diretta la fotosintesi (GPP) attraverso l'uso di immagini tele rilevate di *Normalised Difference Vegetation Index* (NDVI). Per lo stesso periodo di studio sono stati acquisiti tutti gli strati informativi utili al funzionamento dei modelli, ivi inclusa una innovativa copertura di dati meteorologici giornalieri spazializzati. Il contributo richiama brevemente la metodologia utilizzata nel progetto e presenta i risultati dei primi test di validazione realizzati tramite torri *eddy covariance*.

Abstract

In 2008 the Italian Ministry of Education, University and Research funded the FIRB C_FORSAT project with the aim of developing, applying and validating an integrated modelling approach to estimate regional forest ecosystem productivity for the study period 1999-2010. To this aim the bio-geochemical model BIOME-BGC has been calibrated and validated to be applied for the main Italian biome-types; this operation was carried out by using the parametric model C-Fix. This is in fact capable to directly measure GPP and is based on the use of remotely sensed NDVI data. All layers required to initialise both models were acquired including a daily dataset of meteorological data. The current paper briefly describes the adopted methodology and shows the first tests carried out using data collected by the eddy correlation technique.

Introduzione

Gli ecosistemi forestali sono uno dei principali serbatoi di carbonio e la quantificazione della CO₂ sottratta all'atmosfera è una delle attività previste dal protocollo di Kyoto (Waring e Running, 2007). Attualmente tali informazioni sono desunte in Italia dall'Inventario Forestale Nazionale che, basandosi su una vasta campagna di rilievi a terra, ha un elevato costo di realizzazione. Per questo, ed in vista dei cambiamenti climatici in atto sul nostro pianeta, un importante obiettivo di ricerca è quello di sviluppare metodologie atte alla stima ed alla modellizzazione dell'effettivo accumulo di carbonio stoccato nelle foreste italiane.

Tra le metodologie proposte in letteratura per raggiungere tale scopo (tecniche di *eddy covariance*, immagini da satellite e modelli bio-geochimici), quelle basate sull'impiego dei modelli di simulazione dell'ecosistema unite all'utilizzo di dati telerilevati risultano le più promettenti. Esse infatti uniscono la possibilità offerta dai modelli di stimare tutti i processi dell'ecosistema basandosi sulla conoscenza delle specie analizzate e dell'ambiente in cui si trovano con quella di ottenere informazioni su vasta scala spaziale e con alto grado di ripetizione grazie all'uso di dati telerilevati.

Nel 2008 il Ministero dell'Università e della Ricerca ha finanziato il progetto FIRB C_FORSAT che ha lo scopo di sviluppare, applicare e validare un modello di stima regionalizzato della produttività degli ecosistemi forestali. Nello specifico si è adattato all'ambiente mediterraneo un modello parametrico, C-Fix, basato sull'uso di dati telerilevati e capace di fornire una stima diretta della produttività primaria lorda (GPP) (Maselli et al., 2009a). In aggiunta a questo è stato impiegato il modello bio-geochimico BIOME-BGC capace di simulare le respirazioni, sia autotrofe che eterotrofa ed e le diverse allocazioni (Running and Hunt, 1993). Dall'integrazione tra i due modelli, effettuata seguendo Maselli et al. (2009b), è possibile poi ottenere anche produttività primaria netta (NPP) e flusso netto dell'ecosistema (NEE). Il presente lavoro, dopo una breve descrizione dei dati, dell'area di studio e della metodologia (per maggiori dettagli si rimanda a lavori specifici), mostra le stime di GPP su base territoriale ed un preliminare confronto tra dati di riferimento di GPP ed NEE giornalieri ottenuti con tecniche di *eddy-covariance* per due siti nazionali e le stime prodotte con la procedura di integrazione.

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 dai pini montani (*Pinus sylvestris*, *P. nigra* Arnold) e da quelli mediterranei (*P. halepensis* Mill, *P. pinaster* Ait., *P. pinea* L.) (<http://www.infoc.it>).

Dati di studio

Per caratterizzare dal punto di vista meteorologico il territorio italiano, sono stati impiegati i dati giornalieri forniti dal dataset 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/>).

Il modello digitale del terreno (DEM) con una risoluzione spaziale di 1 km è stato ottenuto da un lavoro precedente (Blasi, 2005), mentre la mappa digitale relativa alla distribuzione delle foreste italiane è stata ottenuta dal CORINE Land Cover 2000 alla scala di 1:100000 (Maricchiolo et al., 2004). Le classi originali sono state raggruppate in 6 gruppi diversi basandosi su considerazioni eco fisiologiche al fine di poter applicare BIOME-BGC (Maselli et al., 2009b).

Le immagini NDVI per l'applicazione del modello C-Fix modificato sono state ottenute dal satellite SPOT-VEGETATION. Le immagini, che hanno una risoluzione spaziale di 1 km, sono state scaricate in formato pre-elaborato per il periodo 1998-2006 (<http://free.vgt.vito.be/>) (Figura 1).

I dati di riferimento utilizzati per una preliminare validazione sono stati raccolti applicando la tecnica di *eddy covariance* presso le torri di misura di San Rossore e Roccarespampani. Le loro caratteristiche sono riassunte in Tabella 1 (vedere anche <http://fluxnet.ornl.gov>).

Tabella 1. Principali caratteristiche delle due aree di studio impiegate per la validazione.

Area di studio	Posizione	Orografia (altitudine)	Specie prevalente	Volume (m ³ /ha)	Periodo di misura
San Rossore	43.7° N, 10.5° E	Pianura costiera (10 m)	<i>Pinus pinaster</i> Ait.	390	2001-2005
Roccarespampani	42.39° N, 11.92° E	Colline interne (178 m)	<i>Quercus cerris</i> L.	75	2001-2005

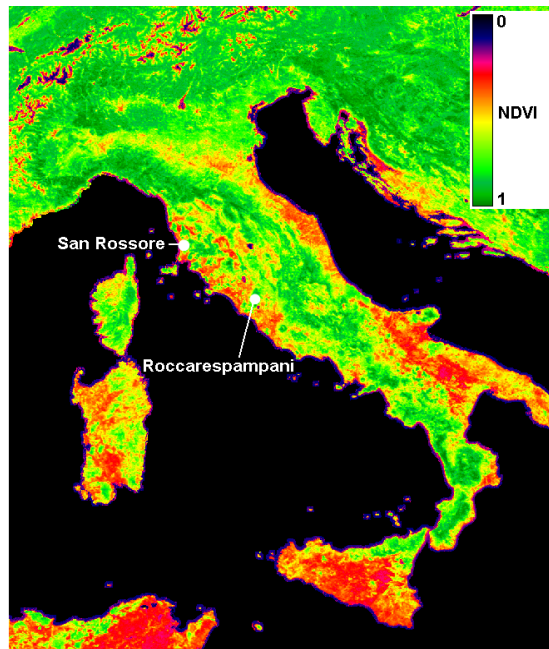


Figura 1. Immagine NDVI del sensore SPOT-VGT relativa al mese di agosto 2003 con indicazione delle due aree per le quali si dispone di misure di flusso giornaliera.

Metodologia

La metodologia adottata è basata sull'impiego di dati satellitari ed ancillari prodotti come descritto da Maselli et al., (2009b). Fanno eccezione i dati meteorologici che, in questo caso, sono derivati dal dataset europeo E-OBS sopra descritto. Le temperature e precipitazioni giornaliere sono state riportate alla risoluzione spaziale di 1 km applicando la tecnica delle regressioni multivariate calibrate localmente (Maselli et al., 2012); successivamente è stata stimata la radiazione solare con l'algoritmo MT-Clim (Thornton et al., 2000).

I due modelli, BIOME-BGC opportunamente calibrato (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. I risultati che producono sono poi integrati tramite un metodo che tende ad unire 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 (Maselli et al., 2009b). Vengono poi utilizzate stime di volume come *proxy* della distanza degli ecosistemi dalla condizione di equilibrio simulata da BIOME-BGC.

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. Il confronto è stato effettuato riportando il valore dei principali parametri statistici (coefficiente di correlazione, r , scarto quadratico medio, RMSE ed errore medio percentuale, MBE%).

Risultati

L'applicazione dei dati meteo giornalieri riportati alla 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 2. I valori di GPP medi sono compresi tra 700 e 1800 g C/m²/anno. In generale le foreste di tipo mediterraneo riportano i valori più alti: esse crescono in zone temperate e la loro attività è limitata prevalentemente dalla stagione secca. Gli ecosistemi di ambiente montano invece, la cui attività foto sintetica è limitata dal fattore termico durante buona parte dell'anno, producono meno. Complessivamente la prevalenza di limitazioni termiche determina un andamento decrescente dei valori di GPP dalle zone pianeggianti e meridionali, verso quelle in zone montuose e settentrionali, seguendo i principali gradienti altitudinali e latitudinali.

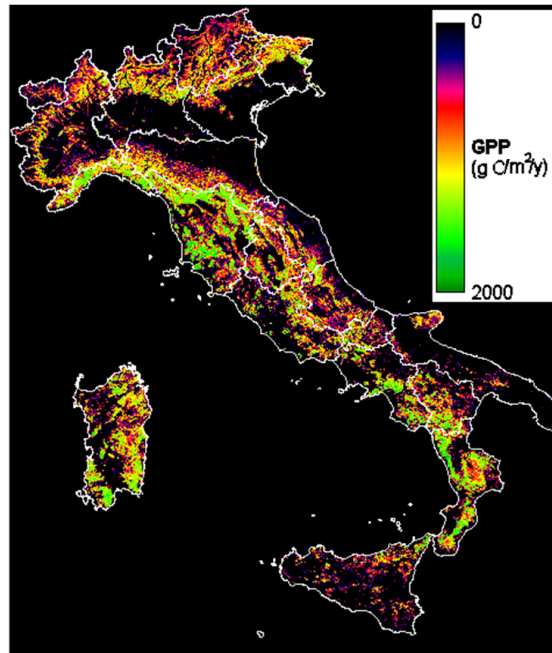


Figura 2. GPP annuale media delle foreste italiane e relativa al periodo 1998-2006. In bianco sono riportati i confini delle regioni.

Per quanto riguarda la valutazione dell'accuratezza delle stime ottenute, il confronto con dati indipendenti viene riportato nelle Figure 3-4. In figura 3A si riporta il confronto tra i valori di GPP simulati e le misure *eddy covariance* disponibili per San Rossore. Qui il valore medio annuale della GPP è circa 1800 g C/m²/anno, che corrisponde ad una foresta produttiva senza evidenti limitazioni termiche o da siccità estiva. Il valore medio stimato è invece pari a circa 1450 g C/m²/anno. Il confronto su base giornaliera evidenzia il buon accordo tra i dati in termini di correlazione ($r = 0.943$) ed evidenzia la sovrastima (RMSE = 1.30 g C/m²/giorno, MBE% = 22.4). La NEE annuale è intorno a 450 g C/m²/anno sia per il misurato che lo stimato e dal confronto effettuato su base giornaliera si ottiene un buon accordo sia in termini di correlazione ($r = 0.861$) che di errore (RMSE = 0.68 g C/m²/giorno, MBE% = -7.5). Si evidenzia solo una lieve sottostima più marcata a valori alti di NEE (figura 3 B).

Per quanto riguarda Roccarespampani (Figura 4), l'accordo è buono e si registra solo una lieve sovrastima ($r = 0.934$, RMSE = 1.03 g C/m²/giorno, MBE% = 1.37).

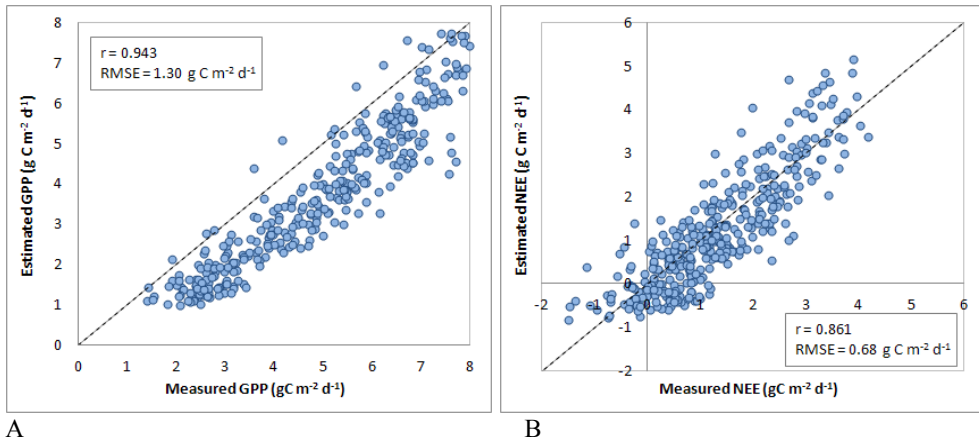


Figura 3. Confronto tra i valori medi giornalieri di GPP (A) ed NEE (B) misurata e stimata per San Rossore (dati relativi al periodo 2001-2005). Tutte le correlazioni sono altamente significative ($P < 0.001$).

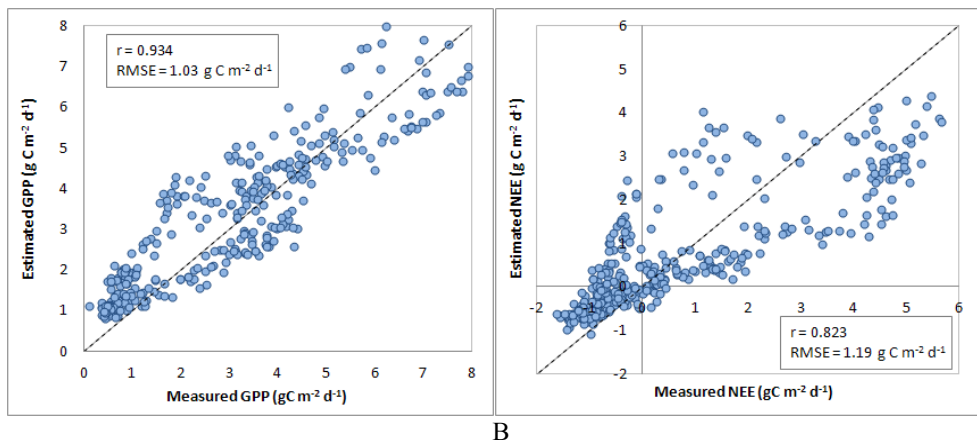


Figura 4. Confronto tra i valori medi giornalieri di GPP (A) ed NEE (B) misurata e stimata per Roccarespampani (dati relativi agli anni 2001-2007). Tutte le correlazioni sono altamente significative ($P < 0.001$).

I valori di GPP giornalieri simulati per Roccarespampani vengono confrontati con quelli misurati in Figura 4A. Il valore annuale medio, che è pari a circa 1350 g C/m²/anno, è indice di ecosistema abbastanza produttivo senza forti stress termici o idrici; tale valore è abbastanza ben riprodotto dalla stima effettuata utilizzando i dati Spot-VGT. Su base giornaliera l'accuratezza ottenuta è buona sia in termini di correlazione che di errore ($r = 0.934$, $RMSE = 1.03$ g C/m²/giorno, $MBE\% = 1.37$). Per quanto riguarda il valore medio annuo di NEE misurato dalla torre ($NEE = 271$ g C/m²/anno), valore medio-basso, questo viene riprodotto bene applicando la metodologia di integrazione; su base giornaliera però si evidenziano alcune differenze e l'accordo risulta moderato ($r = 0.823$, $RMSE = 1.19$ g C/m²/giorno e $MBE\% = 1.66$) (Figura 4B).

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 NEE (ottenuta attraverso il processo di integrazione brevemente richiamato).

Il confronto preliminare mostrato tra dati raccolti con tecniche eddy-covariance e le stime prodotte sono incoraggianti. L'applicazione su base nazionale 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. Gli autori ringraziano i responsabili delle torri di San Rossore e Roccarespanpani nelle persone di Dr. G. Seufert e Dr. D. Papale, per la disponibilità dei dati *eddy covariance*.

Bibliografia

- Blasi, C., (2005). "Spazializzazione di variabili climatiche su base nazionale". Manuscript. Ministero dell'Ambiente e del Territorio, Roma, Italy.
- 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.
- 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.
- Marchetti M., Barbati A., 2007. Land use changes. In: Blasi C., Boitani L., La Posta S., Manes F., Marchetti M. (eds.), "Biodiversity in Italy", Ministry for the Environment, Land and Sea Protection, Roma, Italy, pp. 108-114.
- Maricchiolo, C., Sambucini, V., Pugliese, A., Blasi, C., Marchetti, M., Chirici, G., Corona, P., (2004). "La realizzazione in Italia del progetto europeo I&CLC2000: metodologie operative e risultati", Proceedings, 8th National Conference ASITA "GEOMATICA: Standardizzazione, interoperabilità e nuove tecnologie", Roma, Italy, vol. 1, pp. CXIII-CXXVIII.
- 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*, accepted.
- 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.
- Waring H.R. and Running S.W. (2007), *Forest Ecosystems. Analysis at Multiples Scales*. 2nd edition. Academic Press, San Diego, p. 55.