

Stima dei flussi di carbonio degli ecosistemi forestali italiani attraverso dati telerilevati ed ancillari

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

(*) 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 Tuscia, Via San Camillo de Lellis, 01100 Viterbo, Italy

Riassunto

Le foreste rivestono un ruolo fondamentale nell'ambito dei cicli bio-geo-chimici di molti elementi quali, tra gli altri, azoto e carbonio. In particolare possono svolgere l'importante funzione di assorbitori di carbonio, sottraendo CO₂ dall'atmosfera. Per questo, ed in vista dei cambiamenti climatici in atto sul nostro pianeta, un obiettivo importante è quello di quantificare l'effettivo accumulo di carbonio stoccato nelle foreste italiane. A questo ambisce il progetto FIRB C_FORSAT finanziato dal MIUR fino al 2013.

Tra le metodologie proposte per raggiungere tale scopo (tecniche di eddy covariance, immagini da satellite e modelli bio-geo-chimici), quelle basate sull'impiego di 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 (GPP, NPP ed NEE) 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 tele rilevati.

A questo scopo il modello bio-geochimico BIOME-BGC opportunamente calibrato e validato per le principali classi forestali italiane appare particolarmente utile. L'utilizzo del modello in forma spazializzata su base nazionale richiede però la disponibilità di una vasta disponibilità di strati informativi. Tra questi i dati meteorologici giornalieri sono particolarmente critici, in quanto non risultano ancora disponibili sul territorio nazionale. Il contributo richiama brevemente la metodologia utilizzata nel progetto e si sofferma in particolare sull'approccio individuato per la generazione della banca dati meteo spazializzata ed il suo utilizzo per simulare il comportamento della macchia mediterranea.

Abstract

Forests play an important role within numerous bio-geo-chemical cycles among which those of nitrogen and carbon. In particular, forests can behave as carbon sink by removing CO₂ from the atmosphere. For this reason, and in view of global climate changes, it is important to quantify the amount of carbon stocked within Italian forest ecosystems. This is the objective of the FIRB project C_FORSAT financed by MIUR up to 2013.

Among the available methodologies (eddy-covariance, remote sensing and bio-geo-chemical models), those based on the combined use of ecosystem simulation model and remotely sensed data are the most promising. They in fact enable to estimate all ecosystem processes (GPP, NPP and NEE) based on the knowledge of the species and the environment in which these live. Moreover, they offer the possibility to obtain spatial information with a high temporal frequency.

The model BIOME-BGC is particularly useful to this aim after proper calibration and validation for the main Italian forest types. It requires numerous data layers, among which daily meteorological

data are the most difficult to obtain for the whole national territory. This contribution summarizes the main methodological steps and focuses on the creation of a daily meteorological database, which is utilized to drive the simulation of Mediterranean macchia.

Introduzione

Nonostante l'effetto limitante delle attività umane, gli ecosistemi forestali ricoprono ancora circa il 40% della superficie terrestre libera da ghiacci (Waring e Running, 2007). La loro importanza è legata ai numerosi servizi svolti: sociali, economici ed ecosistemici. Essi hanno un ruolo rilevante sia nel ciclo dell'acqua che in quello del carbonio e dell'azoto. La quantificazione ed il monitoraggio dei processi forestali legati al ciclo del carbonio è basata sulla stima o sulla modellizzazione di alcuni importanti variabili quali la produzione primaria lorda (*Gross Primary Production*, GPP), la produzione primaria netta (*Net Primary Production*, NPP) e lo scambio netto dell'ecosistema (*Net Ecosystem Exchange*, NEE).

Tradizionalmente, la NPP delle foreste viene stimata, su base campionaria, tramite gli inventari forestali. L'ultimo inventario forestale nazionale in Italia permette la stima dell'assorbimento di carbonio degli ecosistemi forestali ma fornisce statistiche aggregate a livello geografico (per Regioni) ed è valido staticamente solo per un determinato momento temporale. Al contrario, le tecniche di correlazione turbolenta (*eddy covariance*), da tempo applicate al monitoraggio della GPP (Aubinet et al., 2000), forniscono informazioni con una elevata frequenza temporale (in continuo) ma sono valide solo nelle immediate vicinanze delle torri di misurazione.

Nell'ambito del progetto C_FORSAT, finanziato dal MIUR con fondi FIRB-Futuro in Ricerca, si è sviluppata una metodologia che possa fornire stime di produttività di tutti gli ecosistemi forestali a scala nazionale, con elevata frequenza temporale ed in modo spazialmente continuo. Il metodo proposto è indipendente dai dati inventariali ed è basato prevalentemente sul telerilevamento. La metodologia infatti integra dati telerilevati da fonti diverse e dati GIS con un approccio modellistico per produrre stime di flussi di carbonio lordo e netto delle foreste nazionali. Queste stime possono essere utili a supporto della pianificazione forestale, specialmente per valutare la produttività forestale di varie zone del paese nell'ambito del protocollo di Kyoto.

Questo contributo aggiorna quanto già anticipato in Maselli et al. (2010) ed introduce i dettagli della metodologia utilizzata, in particolare per quanto riguarda la metodologia utilizzata per la generazione dei dati meteo spazializzati a scala nazionale su base giornaliera e la calibrazione della metodologia per l'ecosistema a macchia mediterranea.

Materiali e metodi

La metodologia di stima della produttività degli ecosistemi forestali si basa sull'accoppiamento del modello bio-geo-chimico BIOME-BGC (White et al., 2000) con le informazioni derivanti da telerilevamento satellitare e quelle cartografiche ottenibili in ambiente GIS. In particolare viene utilizzato il modello parametrico C-Fix per stimare direttamente la GPP in funzione della radiazione fotosintetica assorbita dalla vegetazione (FAPAR) utilizzando i dati NDVI del sensore Spot-VEGETATION (<http://free.vgt.vito.be/>) (Veroustraete et al., 2002; Maselli et al., 2009). Il modello BIOME-BGC invece si basa invece sull'equazione di Farquhar (1980) per il calcolo della GPP a cui vengono sottratte le respirazioni autotrofe ed eterotrofa per derivare la NPP e la NEE. Dato che il modello ipotizza una condizione degli ecosistemi forestali di quasi-equilibrio si è reso necessario l'introduzione di un meccanismo di calibrazione basato sul rapporto tra provvigione reale e provvigione teorica nelle condizioni di quasi-equilibrio.

Il primo step è stato quello di preparare un dataset di dati meteorologici giornalieri con risoluzione spaziale di 1 km per tutto il territorio nazionale. Questi dati infatti sono necessari per inizializzare entrambi i modelli. A tale scopo sono stati impiegati i dati del dataset E-OBS (Haylock et al., 2008) disponibili per tutta Europa con risoluzione spaziale 0.1°. Questo database è stato prodotto dal progetto Europeo ENSEMBLES (<http://www.ensembles-eu.org/>) tramite la spazializzazione con Kriging dei dati di 2136 stazioni meteo Europee (Haylock et al., 2008). Il downscaling di questi dati

per arrivare al passo di 1 km del progetto è stato realizzato tramite regressione localizzata basata su l'utilizzo di un modello digitale del terreno (Papale, 2006). La metodologia utilizzata è descritta in dettaglio Maselli (2002) e Blasi et al. (2007).

Le stime giornaliere di temperatura minima, temperatura massima e precipitazioni ottenute per i 10 anni di studio sono state validate rispetto ai dati meteo misurati da un insieme di stazioni distribuite su tutto il territorio regionale e a quote diverse della Banca Dati Agrometeorologica Nazionale del Sistema Informativo Agricolo Nazionale (SIAN) disponibile on-line su <http://old.politicheagricole.it/ucea/forniture/index3.htm>.

Successivamente i dati meteorologici sono stati impiegati per calibrare e validare la simulazione dei flussi bio-geo-chimici per l'ecosistema a macchia mediterranea presente sul territorio nazionale, la cui distribuzione è stata derivata dal progetto Corine Land Cover 2006 (Sambucini et al., 2010). Questa operazione è stata eseguita previa calibrazione di BIOME-BGC sulle stime di GPP ottenute da C-Fix per diversi punti selezionati sul territorio nazionale (Chiesi et al., 2007). La validazione del modello è stata poi effettuata confrontando le stime di GPP prodotte con i dati disponibili grazie alla tecnica *eddy-covariance* per il sito Arca di Noè (Sardegna). Il confronto è stato effettuato per gli anni 2004-2008.

Risultati

La metodologia di downscaling dei dati ENSEMBLES ha consentito la stima di dati meteorologici giornalieri per il territorio nazionale ad 1 km di risoluzione con buona accuratezza. A titolo esemplificativo si riportano in Figura 1 due esempi di mappe giornaliere di temperatura massima e precipitazioni: per la temperatura è possibile rilevare i gradienti latitudinali, altitudinali e di distanza dal mare mentre per le precipitazioni si nota il carattere locale.

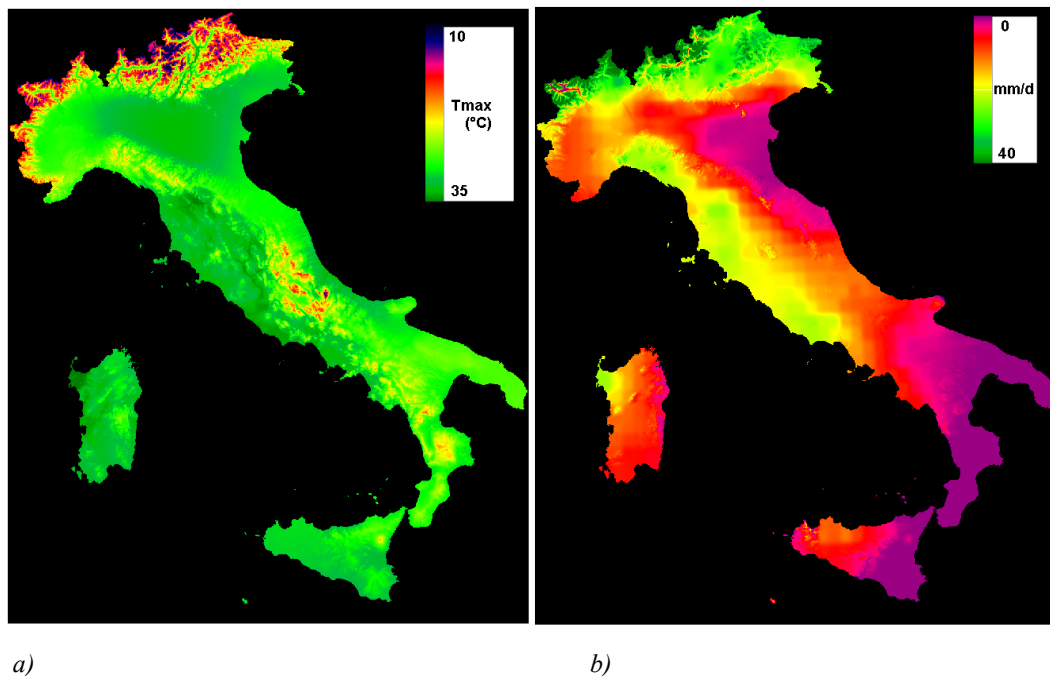


Figura 1 – Risultato della spazializzazione con passo di 1 km della temperatura massima del giorno 15 agosto 2009 (a) e della precipitazione del 30 novembre 2009 (b).

La valutazione dell'accuratezza ottenuta ha prodotto i risultati mostrati in Tabella 1. Rispetto a 10 stazioni della rete SIAN è stato ottenuta una correlazione altamente significativa tra dati stimati e dati misurati (r di 0.916 per la temperatura minima, di 0.946 per la temperatura massima e di 0.637 per le precipitazioni). In generale le temperature minime sono variabilmente sovrastimate, mentre le massime non presentano chiare alterazioni. Le piogge sono invece generalmente sottostimate.

	T. minima		T. massima		Pioggia	
	r	MBE (°C day ⁻¹)	r	MBE (°C day ⁻¹)	r	%MBE
Sibari	0.948	3.41	0.962	-0.74	0.533	-8.61
Santa Fista	0.940	3.57	0.977	-0.09	0.548	-14.97
Carpeneto	0.974	1.54	0.980	0.78	0.670	3.85
Castel di Sangro	0.860	6.20	0.985	-1.44	0.660	-31.84
San Piero a Grado	0.947	2.23	0.979	-0.06	0.700	-5.73
Moena	0.908	4.00	0.931	-1.96	0.778	-32.50
Chilivani	0.923	3.79	0.977	-1.91	0.583	4.66
Turi	0.958	1.75	0.965	-0.85	0.670	-27.48
Piubega	0.976	1.94	0.991	0.38	0.706	-16.20
Santo Pietro	0.966	1.26	0.972	-0.75	0.581	-7.88

Tabella 1 – Statistiche di accuratezza ottenute confrontando i dati ENSEMBLES con i rispettivi raccolti da 10 stazioni di misura distribuite sul territorio nazionale.

L'applicazione di BIOME-BGC alla stazione di Arca di Noè ha riportato i risultati mostrati in Figura 2. Questo sito è caratterizzato dalla presenza di macchia mediterranea, che presenta un netto sviluppo bimodale della GPP, con un massimo primario in primavera ed uno secondario in autunno. I flussi di carbonio misurati con la tecnica *eddy-covariance* sono riprodotti in maniera abbastanza precisa a livello annuale (1110 misurati contro 1044 g C m⁻² anno⁻¹ stimati). Gli andamenti giornalieri sono ovviamente riprodotti con accuratezza più bassa ($r = 0.50$ ed RMSE = 1.59 g C m⁻² giorno⁻¹). In particolare, restano alcuni picchi di produzione primaverili che vengono chiaramente sottostimati, mentre l'effetto della siccità estiva è simulato con accuratezza variabile nei diversi anni.

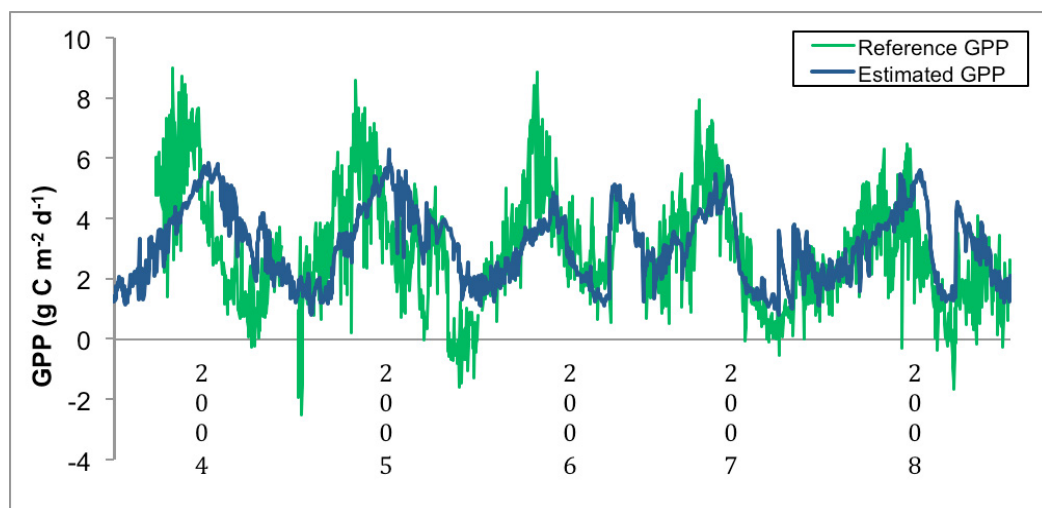


Figura 2 – Confronto tra la GPP rilevata con la tecnica di eddy-covariance per la macchia di Arca di Noè (SS) e quella ottenuta utilizzando il modello BIOME-BGC calibrato ed inizializzato con i dati meteorologici del dataset ENSEMBLES.

Conclusioni

Uno dei principali fattori limitanti per simulare i processi bio-geo-chimici delle foreste a livello nazionale nell'ambito del progetto C_FORSAT era costituito dalla disponibilità di dati meteo giornalieri spazializzati per un periodo sufficiente. Attraverso la procedura di downscaling della banca dati Europea ENSEMBLES questo problema appare risolto.

La disponibilità dei dati meteo spazializzati ha consentito l'impiego dei modelli C-Fix e BIOME-BGC per la simulazione dei flussi di carbonio in ecosistemi terrestri caratterizzati dalla presenza della macchia mediterranea. Questa categoria inventariale viene aggiunta a quelle già disponibili (querreti sempreverdi, querreti decidui, castagneti, faggeti, conifere del piano basale/collinare, conifere del piano montano) e consentirà l'applicazione della metodologia di stima ad una più estesa porzione del territorio nazionale. La procedura messa a punto permette inoltre di poter introdurre scenari di cambiamento climatico globale e di verificarne l'impatto sulla produttività degli ecosistemi forestali.

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 il P.I. della torre di Arca di Noé, Dr. Pier Paolo Duce, per la disponibilità dei dati *eddy-covariance*.

Bibliografia

Aubinet M., Grelle A., Ibrom A., Rannik Ü., Moncrieff J., Foken T., Kowalski A.S., Martin P.H., Berbigier P., Bernhofer Ch., Clement R., Elbers J., Granier A., Grünwald T., Morgenstern K., Pilegaard K., Rebmann C., Snijders W., Valentini R., Vesala T. (2000), "Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology", *Advances in Ecological Research*, 30: 113-175.

- Blasi C., Chirici G., Corona P., Marchetti M., Maselli F., and Puletti N. (2007), "Spazializzazione di dati climatici a livello nazionale tramite modelli regressivi localizzati", *FOREST@*, 4(2): 213-219.
- 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.
- Farquhar G.D., von Caemmerer S., Berry J.A. (1980), "A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species", *Planta*, 149: 78-90.
- 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.
- Maselli F. (2002), "Improved estimation of environmental parameters through locally calibrated multivariate regression analysis", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(11): 1163-1171.
- Maselli F., Papale D., Puletti N., Chirici G., Corona P. (2009), "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., Barbati A., Chiesi M., Corona P., Papale D., Pasqui M., and Chirici G. (2010), "Integrazione di dati telerilevati e raccolti a terra per la stima della produttività lorda e netta delle foreste italiane", in 14ª Conferenza Nazionale ASITA.
- Maselli F., Pasqui M., Chirici G., Chiesi M., Fibbi L., Salvati R., Corona P. (2011), "Evaluation of a 1-km daily meteorological dataset for modelling vegetation production in Italy", *Agricultural and Forest Meteorology*, sottoposto.
- Papale, D. (2006), "Il Progetto CARBOITALY: una rete nazionale per la misura dei sink forestali e agricoli italiani e lo sviluppo di un sistema di previsione dell'assorbimento dei gas serra", *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 3(1):165-167.
- Sambucini V., Marinosci I., Bonora N., Chirici G., Corona P., Bologna S., Morgante L., Oradini O., Bagnoli M., Papini F., and Marchetti M. (2010), La realizzazione in Italia del progetto Corine Land Cover 2006: uno strumento di monitoraggio delle dinamiche di uso e copertura del suolo. in 14ª Conferenza Nazionale ASITA.
- 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.
- Waring H.R. and Running S.W. (2007), *Forest Ecosystems. Analysis at Multiples Scales*. 2nd edition. Academic Press, San Diego, p. 55.
- White M.A., Thornton P.E., Running S.W., Nemani R.R. (2000), "Parameterisation and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls", *Earth Interactions*, 4: 1-85.