

Modellizzazione dell'accumulo di carbonio in ecosistemi forestali: attività svolta nell'ambito dell'Osservatorio Kyoto della regione Toscana

M. Chiesi, L. Fibbi, L. Genesio, B. Gioli,
R. Magno, F. Maselli, M. Moriondo, F. Vaccari

IBIMET-CNR, via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI), tel. 0555226023, e-mail m.chiesi@ibimet.cnr.it

Riassunto

L'obiettivo principale di questo lavoro è presentare una metodologia messa a punto nell'ambito del progetto "Osservatorio Kyoto" finanziato dalla Regione Toscana e coordinato dall'Istituto di Biometeorologia del CNR di Firenze. Tra gli obiettivi di tale progetto vi è quello di quantificare i flussi netti di carbonio degli ecosistemi forestali regionali. L'area di studio infatti è costituita dal territorio della regione che, per circa metà della sua estensione, è coperto da foreste con specie sia decidue che sempreverdi. I principali dati utilizzati sono: dati meteorologici (temperatura minima e massima e precipitazione giornalieri) spazializzati su tutto il territorio regionale alla risoluzione spaziale di 1 km, informazioni relative alla stazione considerata (es. profondità e tessitura dei suoli, specie forestale dominante, volume, etc.) e dati telerilevati a media risoluzione. La metodologia applicata prevede l'uso integrato di un modello parametrico, C-Fix, e di uno biogeochimico, BIOME-BGC, per ottenere stime di flusso netto dell'ecosistema (NEE). I dati prodotti sono stati confrontati con misure di NEE raccolte con tecniche eddy-covariance da torri di misura a terra e da piattaforma aerea Sky-Arrow.

Abstract

The main objective of this work is to introduce a methodology developed in the framework of the project "Osservatorio Kyoto" which was supported by the Tuscany Region and coordinated by the Institute of Biometeorology of the National Research Council (IBIMET-CNR) of Florence. One of the objectives of the project is to quantify the net carbon fluxes of regional forest ecosystems. The study area therefore coincides with Tuscany, a region in Central Italy whose territory is covered for about half of its extent by forests. The main data utilized are: meteorological data (daily minimum and maximum temperature and precipitation) extended over the regional territory at a 1km spatial resolution, information about the considered forest site (e.g. soil depth and texture, forest type, volume, etc.) and remotely sensed data with a medium spatial resolution. The methodology is based on the integrated use of a parametric model, C-Fix, and a biogeochemical one, BIOME-BGC, to obtain estimates of net ecosystem exchange (NEE). These estimates are compared to eddy-covariance flux measurements collected by three flux towers and by the Sky-Arrow aircraft.

Introduzione

L'Istituto di Biometeorologia del Consiglio Nazionale delle Ricerche (IBIMET-CNR) di Firenze coordina un progetto promosso dalla Regione Toscana, denominato "Osservatorio Kyoto" (<http://www.osservatoriokyoto.it>), finalizzato al monitoraggio del bilancio della CO₂ sul territorio regionale; una componente del progetto è lo studio delle problematiche relative all'accumulo di carbonio negli ecosistemi terrestri di pertinenza regionale per fornire stime quantitative del flusso netto degli ecosistemi (NEE). Attualmente il progetto è nella sua seconda fase di attuazione e terminerà alla fine del 2010 quando verranno prodotte le mappe di monitoraggio a scala regionale.

Le finalità del progetto sono legate alla necessità di comprendere meglio quali siano gli impatti che le emissioni di CO₂ in atmosfera ed il cambiamento climatico che ne consegue, hanno sugli ecosistemi regionali. Gli ecosistemi forestali, che a livello globale coprono circa il 30 % delle terre emerse (FAO 2005), hanno un ruolo fondamentale per la loro potenziale capacità di assorbire carbonio nei suoli e nella vegetazione che li caratterizza (Waring and Running 2007); in Toscana questi ecosistemi si estendono su circa metà della superficie regionale (circa 1 milione di ha).

I termini del ciclo del carbonio che maggiormente interessano sono quelli relativi ai flussi netti, ovvero la produttività primaria netta (Net Primary Production, NPP) e lo scambio netto di tutto l'ecosistema (Net Ecosystem Exchange, NEE). La loro quantificazione è piuttosto complessa, perché, al contrario della produttività primaria lorda (Gross Primary Production, GPP), non possono essere misurati direttamente su vasta scala spaziale e temporale se non attraverso l'impiego di tecniche sofisticate e molto onerose sia in termini economici che operativi.

Per queste ragioni è stata recentemente proposta una metodologia per la simulazione dei flussi netti di carbonio negli ecosistemi forestali toscani che si basa sulla combinazione degli *outputs* di due modelli, uno biogeochimico, BIOME-BGC (Running and Hunt, 1993), ed uno parametrico, C-Fix (Veroustraete et al., 2002; Maselli et al., 2009a). Obiettivo del presente 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 confrontando le stime ottenute con misurazioni micro meteorologiche (eddy-covariance) prese da torri terra e da piattaforma aerea.

Area di studio

L'area di studio corrisponde al territorio di competenza della Regione Toscana (9°-12° long., 42°-44° lat.; Fig. 1), caratterizzato da una morfologia che passa gradatamente dalle zone costiere, generalmente piatte, ad 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.). Le attività del progetto si sono maggiormente concentrate su 4 diverse aree boscate della regione (Tab. 1), tre delle quali caratterizzate dalla presenza di una torre micrometeorologica finalizzata alla misurazione dei flussi di carbonio ed una che è stata sorvolata con lo Sky-Arrow, piattaforma aerea in grado di effettuare le stesse misure.

Area di Studio	Topografia	Vegetazione	Piattaforma per eddy-covariance	Periodo di misura
San Rossore	Zona costiera, pianeggiante	Pineta mediterranea	Terrestre	2000-2005
Lecceto	Zona collinare	Lecceta	Terrestre	2006-2007
Pianosa	Zona pianeggiante	Macchia mediterranea	Terrestre	2007-2008
Colline Metallifere	Zona collinare	Erbaceo, leccete, cerrete	Aerea	Luglio 2004-dicembre 2005

Tabella 1: Descrizione delle aree di studio utilizzate per la validazione delle metodologie utilizzate.

Dati utilizzati

Per caratterizzare dal punto di vista climatico la regione Toscana, sono state selezionate 74 stazioni per la temperatura minima e massima e 159 per la pioggia. Entrambe le variabili sono state raccolte per il periodo 1996-2008.

Un modello digitale del terreno (DEM) con una risoluzione spaziale 200 m è stato ottenuto dal Servizio Cartografico Regionale della Regione Toscana.

La mappa digitale relativa alla distribuzione delle foreste scala 1:250.000 (Arrigoni et al., 1998) è stata fornita dallo stesso ente mentre informazioni relative al volume forestale sono state ottenute dai dati dell'inventario forestale regionale e da una mappa di volume prodotta da Maselli e Chiesi (2006). 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>).

Le immagini NDVI per l'applicazione del modello C-Fix sono state ottenute dal satellite MODIS che fornisce immagini con risoluzione spaziale e temporale rispettivamente di 250 m e 16 giorni. Le immagini sono state scaricate gratuitamente dal sito della NASA in un formato pre-elaborato (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome>).

I dati eddy-covariance utilizzati sono stati prodotti sia da torri di misura che da piattaforma aerea. In particolare per le tre torri di San Rossore, Lecceto e Pianosa, le misure di GPP ed NEE utilizzate sono relative rispettivamente ai periodi 2000-2005, 2006-2007 e 2007-2008. Per quanto riguarda invece i dati raccolti con la piattaforma aerea, i voli sono stati effettuati in un periodo compreso tra luglio 2004 e dicembre 2005.

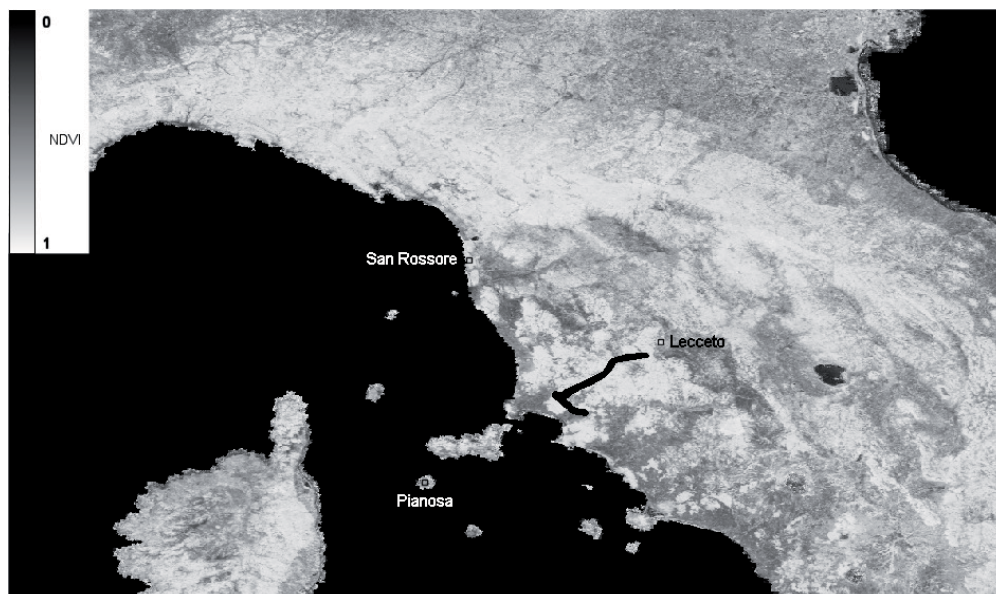


Figura 1 – Immagine NDVI MODIS di agosto 2004 con indicato la posizione delle tre torri di misurazione dei flussi in Toscana (San Rossore, Lecceto e Pianosa) ed il transetto (in nero) relativo ai voli SkyArrow effettuati durante la campagna di luglio 2004-dicembre 2005.

Metodologia

La metodologia si basa sull'uso di dati meteorologici, satellitari ed ancillari prodotti come descritto da Maselli et al., (2009b). 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 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 regionale coperto da foreste, si è proceduto ad una loro validazione mediante confronto con i dati delle torri per i tre siti con postazione di misura fissa (Tabella 1) e per il transetto sorvolato durante la campagna 2004-2005. In particolare il confronto effettuato per i dati di NEE ottenuti con la piattaforma aerea ha richiesto un'ulteriore elaborazione per riportare le stime giornaliere prodotte dalla modellizzazione ad una situazione istantanea tipica delle misure da piattaforma aerea (Sky-Arrow) (Maselli et al., 2009c).

Risultati

Il confronto tra i valori di GPP ed NEE raccolti presso le tre torri di misurazione dei flussi e l'approccio integrato da noi utilizzato ha prodotto i risultati riportati in Tabella 2. In particolare per ciascuna torre si riportano i risultati relativi sia alla produttività lorda che a quella netta in termini di correlazione, RMSE e MBE. I risultati sono abbastanza accurati sia per la GPP ($r > 0.69$) che per la NEE ($r > 0.7$), anche se per quest'ultima la stima relativa al sito di Lecceto non è buona probabilmente per l'inaccuratezza dei dati ancillari utilizzati (vedi Chiesi et al., 2009).

	GPP				NEE			
	media (gC/m ² /a)	r	RMSE (gC/m ² /me)	MBE (gC/m ² /me)	media (gC/m ² /a)	r	RMSE (gC/m ² /me)	MBE (gC/m ² /me)
San Rossore	1600	0.857**	36.46	-13.32	440	0.789**	21.81	- 0.77
Lecceto	1300	0.699**	42.31	16.25	240	0.301	32.22	9.60
Pianosa	1050	0.794**	30.89	-4.64	230	0.702**	22.87	1.69

Tabella 2 – Confronto tra GPP (A) ed NEE (B) misurate e stimate per le tre aree di studio. La prima colonna si riferisce a dati misurati medi per il periodo di riferimento. Si riportano le stime ottenute con l'uso integrato di C-Fix e BIOME-BGC (** = r altamente significativo, $P < 0.01$).

In Figura 2 viene mostrato invece il confronto tra il profilo medio di NEE per tutta l'area di studio derivato dalle misure con lo Sky-Arrow e quello ricostruito con l'approccio modellistico integrato. In generale, i valori di NEE medi sono molto bassi vicino alla costa (punti 1 e 2) dove sono presenti anche aree agricole, raggiungono un massimo verso la zona centrale del transetto, dove sono presenti numerose foreste di querce, e decrescono spostandosi verso l'interno, dove oltre alle foreste sono presenti anche dei pascoli. Come riportato in Figura 2, l'accordo tra i dati stimati e misurati è molto buono. I valori di NEE misurati e simulati mostrano lo stesso andamento spaziale strettamente legato alle variazioni di uso suolo nei diversi punti, con le zone erbacee (punti 1 e 10) che hanno valori di NEE più bassi rispetto alle foreste.

In figura 3 si riporta una immagine della NEE stimata relativa alle foreste toscane per l'anno 2004. I valori medi oscillano intorno a 350-400 gC/m²/anno che corrispondono ad ecosistemi mediterranei non molto produttivi e, in generale, abbastanza lontani dalla condizione di equilibrio. Dalla mappa è possibile notare due gradienti: uno altitudinale, con valori di NEE più bassi in corrispondenza delle stazioni a quote più elevate, ed uno che segue la direzione nord-sud, con valori più bassi nelle aree meridionali che notoriamente corrispondono a quelle meno piovose della regione.

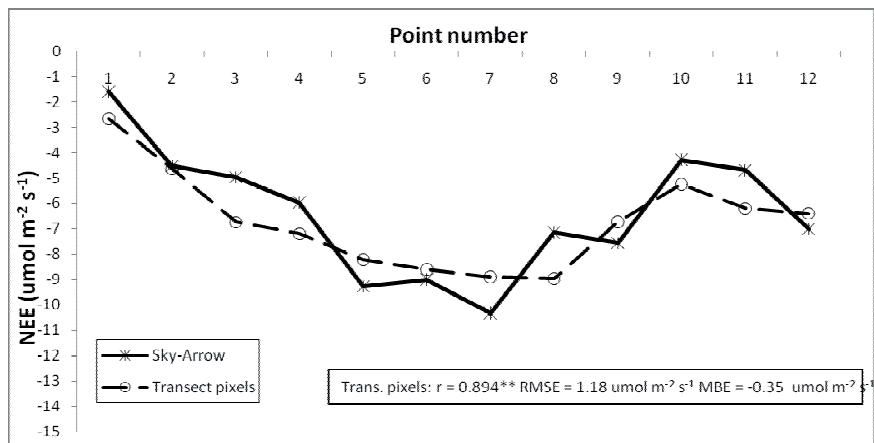


Figura 2 – Valori di NEE medi dei 12 punti misurati, dal mare verso l'interno, dallo SkyArrow e simulati con la strategia di modellizzazione integrata (** = r altamente significativo, $P < 0.01$).

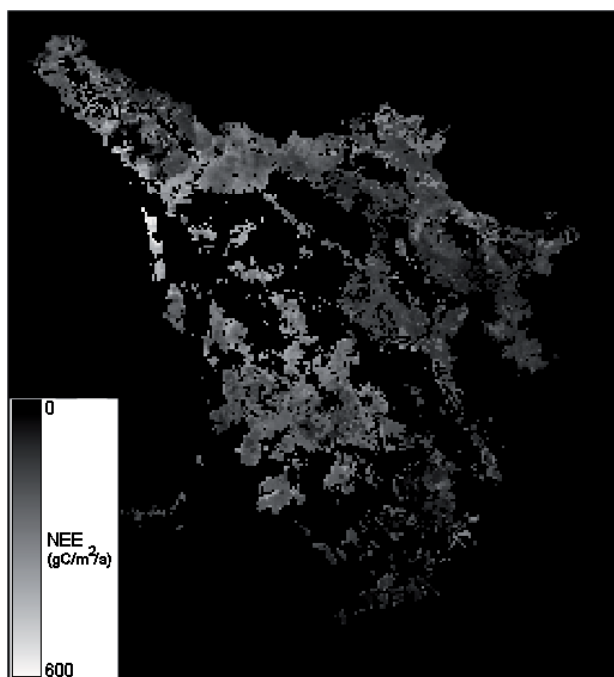


Figura 3 – Mappa di NEE delle foreste toscane relativa all'anno 2004.

Discussione e conclusioni

La metodologia messa a punto ed applicata nell'ambito del progetto di ricerca Osservatorio Kyoto ha permesso di ottenere stime accurate di flussi di carbonio degli ecosistemi forestali toscani, come mostrato dalla validazione effettuata con le misure da piattaforma fissa e mobile. Questi risultati offrono la possibilità di sviluppare una metodologia operativa di stima dei flussi netti che potrà essere applicata laddove sono disponibili tutti i dati ancillari necessari; questa inoltre consentirà di

effettuare sia un monitoraggio degli ecosistemi forestali ai fini di una loro gestione sostenibile, sia una valutazione degli effetti dovuti a cambiamenti climatici eventualmente ipotizzabili secondo gli scenari IPCC più probabili.

Bibliografia

- 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., F. Maselli, Moriondo M., Fibbi L., Bindi M., Running S.W. (2007). "Application of BIOME-BGC to simulate Mediterranean forest processes". *Ecological Modelling*, 206, 179-190.
- Chiesi, M., Fibbi L., Genesio L., Gioli B., Maselli F., magno R., Moriondo M., Vaccari F. (2009). "Testing of a strategy to model the carbon fluxes of Mediterranean forest ecosystems". Sottoposto a *Agricultural and Forest Meteorology*.
- FAO, 2005. Global Forest Resource Assessment. Progress towards sustainable forest management. Available on the web page <http://www.fao.org/docrep/008/a0400e/a0400e00.htm> (last access on June 10th 2009).
- 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., 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). "Integration of ground and satellite data to simulate the forest carbon budget of a Mediterranean region". *Ecological Modelling*, 220: 330-342.
- Maselli F., Gioli B., Chiesi M., Vaccari F., Zaldei A., Fibbi L., Bindi M., Miglietta F. (2009c). "Validating an integrated strategy to model net land carbon exchange against aircraft flux measurements". Sottoposto a *Remote Sensing of Environment*.
- Rapetti, F., and Vittorini, S., 1995. Carta climatica della Toscana. Pacini Editore, Pisa (Italy).
- 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.
- 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.
- Waring H.R., Running S.W. (2007), *Forest Ecosystems. Analysis at Multiples Scales.*, 3rd edition. Academic Press, San Diego.