

# UTILIZZO DI DATI TELERILEVATI DA DIVERSE FONTI PER LA STIMA DEI FLUSSI DI CARBONIO IN AREE COSTIERE MEDITERRANEE

Marta CHIESI (\*), Fabio MASELLI (\*), Paco BATTISTINI (\*\*), Luca ANGELI (\*\*\*)

(\*) IBIMET-CNR, via Madonna del Piano, 10 - 50019 Sesto Fiorentino, e-mail: m.chiesi@ibimet.cnr.it

(\*\*) DISAT-UNIFI, P.le delle Cascine, 18 - 50144 Firenze

(\*\*\*) LAMMA-CRES, via Cavour, 16 - 58100 Grosseto

## Riassunto

Il presente studio riguarda l'utilizzo di una metodologia che consenta di stimare i principali processi che caratterizzano gli ecosistemi terrestri utilizzando dati da satellite. Questa prevede l'impiego di un modello di tipo parametrico, C-FIX, che, nella sua configurazione originale, è guidato da dati di temperatura, radiazione e satellitari. In particolare sono state utilizzate immagini di sensori classici (NOAA-AVHRR, Spot-VEGETATION) e di sensori di nuova generazione (MODIS-Terra). Con tale modello è possibile arrivare ad una stima della produttività globale dell'ecosistema (GPP), mentre per giungere a flussi netti di carbonio (NPP, NEE) è necessario ricorrere ad approcci modellistici più complessi.

Il lavoro è stato condotto in una zona costiera della Toscana (Tenuta di San Rossore), caratterizzata dalla presenza di una pineta di origine artificiale. I risultati di GPP e NPP ottenuti con il modello parametrico semplificato sono stati poi confrontati con quelli derivati applicando un modello di tipo bio-geo-chimico (FOREST-BGC) precedentemente calibrato e validato per la medesima area di studio. I risultati ottenuti confermano la difficoltà nello stimare processi al netto della respirazione e l'importanza di disporre di sensori con caratteristiche radiometriche ottimali.

## Abstract

The current paper aims at applying a methodology which enables to estimate the main processes characterizing terrestrial ecosystems based on the use of remotely sensed data. Such a methodology relies on the use of a parametric model (C-FIX) which is able to estimate gross and net primary production, and net ecosystem exchange through the use of average air temperature, solar radiation and remotely sensed data. In particular, both standard low spatial resolution data (NOAA-AVHRR and Spot VEGETATION) and new satellite data with higher resolution (MODIS-Terra) have been used and their applicability has been tested.

The work has been carried out along the Tyrrhenian coast line, in a planted pine forest. The satellite based GPP and NPP data obtained have been compared to estimates produced by FOREST-BGC, a bio-geochemical model previously calibrated and validated in the area. The results obtained confirm the difficulty in estimating ecosystem respiration and the importance of using data with optimal spatial and radiometric features.

## Introduzione

Il protocollo di Kyoto siglato nel 1997 riconosce alle foreste un ruolo fondamentale nell'ambito del ciclo globale del carbonio e prevede che ciascuno dei paesi firmatari adotti un sistema di monitoraggio e quantificazione delle emissioni antropiche e dell'assorbimento di tutti i gas serra. È, quindi, di fondamentale importanza riuscire a monitorare i flussi di carbonio e gli *stock* accumulati nelle foreste e nelle piantagioni individuate per un loro computo. Inoltre, tali stime di produttività

possono essere utili nel fornire indicazioni di carattere generale per una gestione sostenibile delle risorse.

Negli ultimi anni si è andato diffondendo l'uso del telerilevamento per il monitoraggio della vegetazione. In conseguenza del crescente interesse riguardo alle stime di carbonio che ciascuno stato deve produrre, si è cercato di impiegare le immagini satellitari per stimare tali flussi. Ciò è stato possibile applicando un modello semplificato di tipo parametrico (C-FIX, Veroustraete et al., 2002) che, tramite uso di dati di NDVI e radiazione solare, è in grado di fornire stime di GPP, NPP e NEE. L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di confrontare stime di produttività ottenute attraverso l'uso di dati telerilevati da diversi sensori (NOAA-AVHRR, Spot- VEGETATION e MODIS-Terra) e con diversa risoluzione spaziale (1 km o 250 m). A tale scopo, come dati di riferimento sono state utilizzate le stime prodotte dal modello FOREST-BGC precedentemente calibrato e validato per la stessa area di studio (Chiesi et al., 2005).

Il presente lavoro è strutturato come segue: dopo un breve inquadramento dell'area di studio e dei modelli utilizzati per la stima dei processi legati al ciclo del carbonio, vengono descritti i dati ancillari e telerilevati utilizzati. Segue la descrizione della metodologia adottata e l'esposizione dei risultati. L'ultima sezione riporta una breve discussione e le principali conclusioni.

### **Area di studio**

Il lavoro è stato condotto all'interno del Parco di Migliarino – Massaciuccoli - San Rossore, che si trova in Toscana (43.6-43.8° N, 10.4-10.6° E; fig. 1). Si tratta di una zona costiera, pianeggiante e con suoli prevalentemente sabbiosi. Il clima è caratterizzato da estati calde e siccitose e da inverni mitigati dalla presenza del mare; la temperatura media annua è, infatti, intorno ai 14.8°C e la piovosità, di circa 900 mm, è distribuita con due massimi (uno primaverile ed uno autunnale).

La vegetazione è costituita prevalentemente da una pineta mediterranea a pino marittimo (*Pinus pinaster* Ait.) e pino domestico (*Pinus pinea* L.), di origine artificiale: si tratta di un consorzio ottenuto mediante piantagioni effettuate nel secolo XVIII per consolidare il litorale alla foce dell'Arno (Pignatti, 1998). Accanto a questa, è presente un lembo di foresta planiziarica con latifoglie decidue quali l'ontano napoletano, la farnia ed i pioppi. Il sottobosco è caratterizzato dalla presenza di numerose specie accessorie tra cui dominano il leccio e specie tipiche della macchia mediterranea (DREAM, 2003).

### **Il modello FOREST-BGC**

Il modello è stato sviluppato presso l'università del Montana dal gruppo di ricerca guidato da S. Running (Running and Coughlan, 1988; Running and Gower, 1991). Il FOREST-BGC riesce a stimare i principali processi ecofisiologici (legati alla circolazione di carbonio, acqua e azoto) che avvengono all'interno di comprensori boschivi omogenei.

La logica del modello è quella di considerare le chiome degli alberi come fossero un'unica grande copertura il cui spessore è indicato dall'Indice di Area Fogliare (LAI). Tale generalizzazione favorisce l'applicazione del modello su vasta scala senza conoscere necessariamente le caratteristiche strutturali (diametri ed altezze degli alberi) della zona. Tra le caratteristiche principali del modello c'è anche la possibilità di usufruire di dati telerilevati che possono consentire un'applicazione su vasta scala spaziale.

Altra caratteristica del modello è quella di prevedere due step temporali: uno giornaliero, strettamente legato al bilancio idrico ed alla produttività primaria netta (PPN), ed uno annuale che interessa tutto il ciclo del carbonio e quello dell'azoto.

Ogni simulazione richiede informazioni di diverso genere caratterizzanti la zona investigata:

1. dati climatici giornalieri: temperature minime e massime, precipitazione, radiazione solare e deficit di pressione di vapore;
2. dati che descrivono la stazione tra i quali la posizione, le caratteristiche del suolo in essa presente, ecc.;

3. parametri ecofisiologici che descrivono invece il comportamento delle specie caratterizzanti la stazione esaminata.

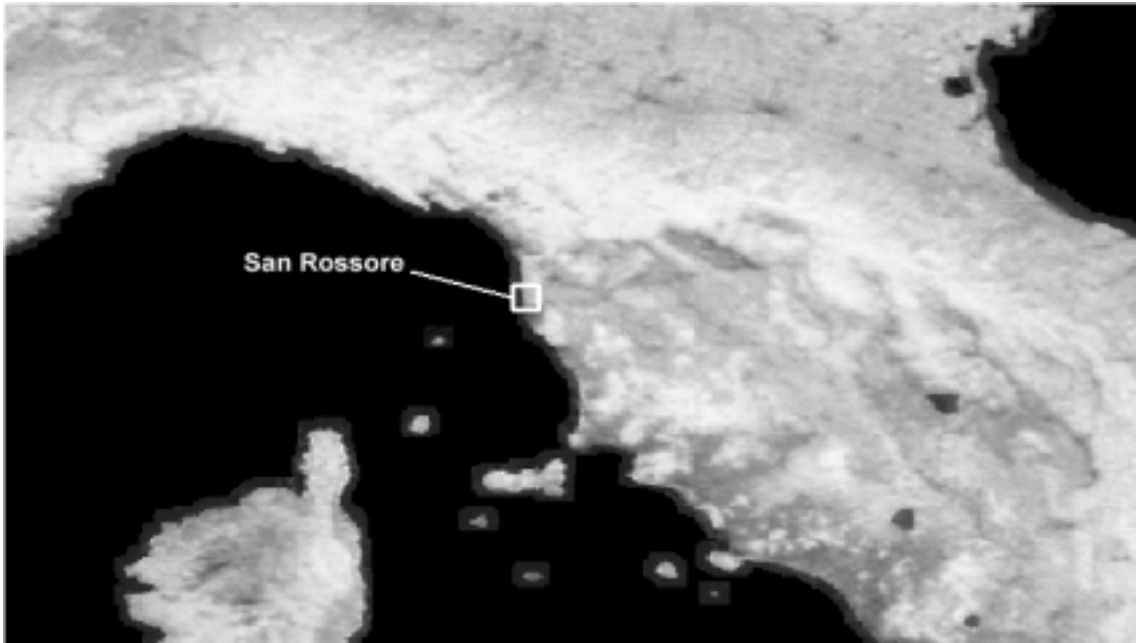


Figura 1- Immagine VEGETATION del mese di giugno 2002 con indicazione dell'area di studio.

### Il modello C-FIX

Il modello C-FIX (Carbon-FIXation), presentato Veroustraete et al., (2002), consente di ottenere stime di produttività primaria lorda (GPP), produttività primaria netta (NPP) e di scambio netto dell'ecosistema (NEE); esso è basato sulla relazione che lega l'NDVI alla Frazione di Radiazione Fotosinteticamente Attiva Assorbita (FAPAR) e richiede in ingresso, oltre ai dati telerilevati, anche parametri meteorologici (radiazione solare e temperatura media dell'aria).

Stime di FAPAR insieme a misure di radiazione solare e temperatura dell'aria sono necessarie per stimare la fotosintesi totale (GPP) dalla quale poi vengono tolte la respirazione autotrofa e quella eterotrofa per arrivare ad ottenere flussi netti di carbonio (rispettivamente, NPP ed NEE). In particolare, partendo dai dati di NDVI corretti per l'effetto atmosferico, dopo aver calcolato la FAPAR secondo quanto proposto da Myneni e Williams (1994):

$$FAPAR = 1.1638 * NDVI - 0.1426 \quad [1]$$

la produttività primaria lorda viene stimata calibrando solo pochi coefficienti secondo [2]:

$$GPP = \epsilon \sum_{i=1}^N T_{cor_i} FAPAR_i Rad_i \quad [2]$$

dove N è il numero di periodi considerati,  $T_{cor}$  è un fattore che prende in considerazione la dipendenza della fotosintesi dalla temperatura dell'aria, FAPAR viene calcolato secondo quanto proposto da Myneni and Williams, (1994) e  $Rad_i$  è la radiazione incidente fotosinteticamente attiva (PAR). Il coefficiente  $\epsilon$  rappresenta l'efficienza d'uso della radiazione che converte la radiazione assorbita in biomassa di carbonio ed assume valori compresi tra 1.0 e 2.0  $gC MJ(APAR)^{-1}$  per gli ecosistemi forestali (Waring e Running, 1998).

Dopo aver calcolato la GPP, C-FIX può stimare NPP tenendo conto delle perdite dovute alla respirazione autotrofa, ritenuta dipendente solo dalla temperatura media dell'aria ( $T_i$ ):

$$NPP = GPP * (1 - (7.825 - 1.145 * T_i)/100) \quad [3]$$

## **Dati utilizzati**

Per poter applicare i due metodi di stima della produttività della pineta di San Rossore sono stati raccolti dati meteorologici e dati telerilevati. In particolare, i dati meteo sono stati raccolti presso la stazione di Pisa Facoltà di Agraria gestita dall'Istituto Idrografico; il database raccolto comprende temperature minime e massime e precipitazioni giornaliere per il periodo 2001-2004. La radiazione reale giornaliera è stata ricavata con un metodo che sfrutta le temperature e le precipitazioni per correggere la radiazione teorica calcolata su base astronomica (Bindi e Miglietta, 1991).

Per quanto riguarda invece i dati telerilevati, sono stati utilizzate immagini NDVI ad alta e media risoluzione spaziale. In particolare sono state utilizzate immagini decadali NOAA-AVHRR NDVI ricavate dall'archivio dell'Università di Berlino ed immagini NDVI Spot-VEGETATION (VGT) gratuitamente distribuite sul web. Queste ultime vengono fornite corrette geometricamente e per disturbi dovuti agli effetti atmosferici (Maisongrande et al., 2004). Sono state inoltre raccolte immagini NDVI del sensore MODIS con risoluzione spaziale di 250 m e temporale di 16 giorni, anch'esse già fornite corrette come le Spot-VGT. Tutte le immagini impiegate coprono il periodo di studio 2001-2004.

## **Metodologia**

Dopo aver raccolto i dati meteorologici della stazione di Pisa (Facoltà di Agraria), questi sono stati adattati alle condizioni locali della pineta come proposto in Chiesi et al., 2005. Successivamente sono stati utilizzati per far girare il modello FOREST-BGC precedentemente calibrato e validato per la stessa area di studio (Chiesi et al., 2005) e sono state prodotte stime di GPP ed NPP su base mensile.

Le immagini NDVI dei sensori AVHRR, VGT e MODIS sono state utilizzate per determinare, secondo la metodologia proposta da Veroustraete et al., (2002) sopra descritta, la produttività primaria lorda e netta della pineta di San Rossore. La scala spaziale adottata, non essendo sempre uguale per i vari sensori, è quella mensile; il primo passo quindi è stato quello di calcolare immagini Maximum Value Composite mensili. In aggiunta a ciò, limitatamente ai dati AVHRR che non erano corretti per l'effetto atmosferico, è stato necessario effettuare una loro ricalibrazione utilizzando i dati VGT degli anni 2002-2003 (Maselli et al., 2005). Dalle immagini sono quindi stati estratti i valori medi di NDVI relativi alla pineta oggetto di studio. Imponendo ai dati AVHRR le stesse variazioni del sensore VGT sono state attenuate le alterazioni del segnale dovute ad effetti atmosferici. Si è poi proceduto al calcolo dell'FAPAR (eq. 1), della GPP [2] e della NPP [3]. A differenza di quanto riportato in [2], il fattore di correzione per la temperatura  $T_{cor}$  non è stato applicato perché, sulla base di altre indagini (Chiesi et al., 2005), è risultato non adatto all'area oggetto di studio.

Le stime di GPP ed NPP ottenute con i due diversi approcci modellistica e con i diversi sensori sono state poi confrontate utilizzando le statistiche  $r$  ed RMSE.

## **Risultati**

In Figura 2 a-b si riporta il confronto tra le stime di GPP ed NPP prodotte su base mensile mediante il modello FOREST-BGC e quelle ottenute utilizzando i dati NDVI dei diversi sensori mediante C-FIX. È possibile apprezzare il buon accordo esistente tra i diversi andamenti temporali della produttività primaria lorda (Fig. 2 a); fa eccezione il 2003 durante il quale, soprattutto il sensore AVHRR, ha registrato una forte diminuzione della produttività. Per quanto riguarda invece i dati di NPP (Fig. 2 b), si sono registrate difficoltà sia nel riprodurre una stima totale (media annua stimata con FOREST-BGC pari a  $-736.47 \text{ gC/m}^2/\text{mese}$  contro  $-1073.39$ ,  $-1325.97$  e  $-1686.38 \text{ gC/m}^2/\text{mese}$  rispettivamente ottenuti con AVHRR, VGT e MODIS) sia nel descriverne l'andamento temporale.

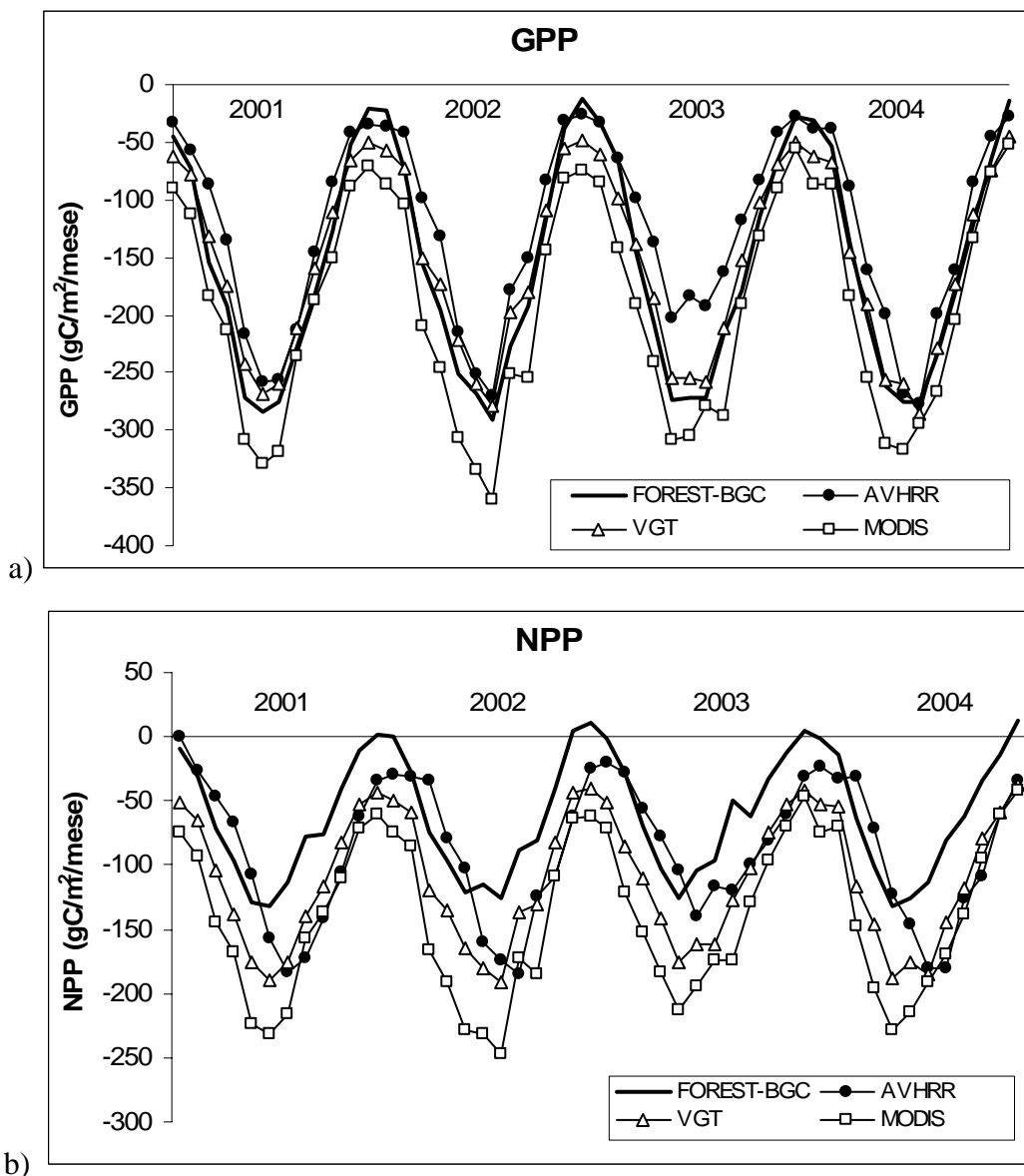


Figura 2 a-b - Confronto tra stime di GPP (a) ed NPP (b) ottenute con i diversi satelliti (AVHRR, VGT e MODIS) rispetto a quelle ottenute con il modello FOREST-BGC.

Le migliori stime della produttività, come riportato dalla Tabella 1 a-b, sono state ottenute con le immagini VGT ( $r = 0.989$  e  $RMSE = 19.37 \text{ gC/m}^2/\text{mese}$  per la GPP e  $r = 0.982$  e  $RMSE = 50.15 \text{ gC/m}^2/\text{mese}$  per la NPP), anche se la correlazione è in generale abbastanza alta anche per AVHRR e MODIS.

SENSORE	r	RMSE ( $\text{gC/m}^2/\text{mese}$ )
AVHRR	0.964	40.41
VGT	0.989	19.37
MODIS	0.982	42.23

SENSORE	r	RMSE ( $\text{gC/m}^2/\text{mese}$ )
AVHRR	0.947	32.92
VGT	0.982	50.15
MODIS	0.976	81.25

a)

b)

Tabella 1 a-b: Statistiche ( $r$  ed  $RMSE$ ) ottenute confrontando le stime di GPP (a) ed NPP (b) ottenute dai diversi sensori con quelle prodotte dal modello FOREST-BGC.

## Discussione e conclusioni

Il presente lavoro ha portato alle seguenti considerazioni:

1. il modello C-FIX sembra essere facilmente applicabile per ottenere stime speditive di GPP di una certa affidabilità;
2. per contro il modello non consente di ottenere altrettanto accurate stime di NPP: ciò, probabilmente, è dovuto al fatto che la respirazione autotrofa viene stimata tenendo in considerazione solo la temperatura dell'aria e non è presente nessuna relazione con la biomassa esistente;
3. il confronto tra i diversi sensori ha evidenziato migliori prestazioni per il VGT mentre, come atteso, i dati AVHRR sono risultati i meno precisi, probabilmente anche a causa della mancanza di una loro completa correzione atmosferica. Il MODIS presenta dei buoni indici di correlazione ( $r$  leggermente inferiore al VGT), ma alti RMSE.

Le maggiori difficoltà nell'effettuare tali confronti sono legati a problemi di scala spaziale e temporale. I diversi sensori, infatti, hanno risoluzioni spaziali diverse e tempi di rivisitazione variabili, che possono aver almeno parzialmente causato le loro diverse prestazioni.

## Bibliografia

- Bindi M. and Miglietta F., (1991), "Estimating daily global radiation from air temperature and rainfall measurements", *Climate Research*, Vol. 1: 117-124.
- Chiesi M., Maselli F., Bindi M., Fibbi L., Cherubini P., Arlotta E., Tirone G., Matteucci G., Seufert G., (2005), "Modelling carbon budget of Mediterranean forests using ground and remote sensing measurements", *Agricultural and Forest Meteorology*, in stampa.
- DREAM, (2003), "Tenuta di San Rossore. Note illustrative della carte forestale e della fruizione turistica", S.E.L.C.A. Firenze, Italy.
- Maisongrand P., Duchemin B., Dedieu G., (2004), "VEGETATION/SPOT: an operational mission for the Earth monitoring; presentation of new standard products", *International Journal of Remote Sensing*, 25:9-14.
- Maselli F., Barbati A, Chiesi M., Chirici G., Corona P., (2005), "Processing of remotely sensed and ancillary data for estimating forest productivity in Italy", *Remote Sensing of Environment*, sottoposto.
- Myneni R. B., Williams D. L., (1994), "On the relationship between fAPAR and NDVI", *Remote Sensing of Environment*, 49: 200-211.
- Pignatti S., (1998), *I boschi d'Italia. Sinecologia e biodiversità*. UTET, Torino, p. 440.
- Running S. W., Coughlan J. C., (1988), "A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes", *Ecological Modelling*, 42: 125-154.
- Running, S.W., Gower S.T., (1991), "FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications, II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets", *Tree Physiology*, 9: 147-160.
- 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. and Running, S.W., (1998), *Forest Ecosystems. Analysis at Multiple Scales*. 2<sup>a</sup> edizione, Academic Press, San Diego, p. 55.