

## **Monitoraggio integrato del bilancio della CO<sub>2</sub> a scala regionale: esperienze in Toscana**

L. Genesio, F. P. Vaccari, M. Chiesi, L. Fibbi, B. Gioli, V. Grasso, R. Magno,  
F. Maselli, M. Moriondo, L. Rocchi, T. De Filippis, F. Zabini

IBIMET-CNR, Via G. Caproni 8, 50145 - Firenze. Tel. 055 3033742, Fax 055 308910, e-mail l.genesio@ibimet.cnr.it

### **Riassunto**

La consapevolezza dei cambiamenti globali e dell'importanza delle risposte locali spingono oggi gli enti locali a giocare un ruolo attivo nella messa in opera delle strategie di adattamento e mitigazione dei cambiamenti climatici. Un requisito indispensabile per implementare politiche efficaci ed appropriate rispetto al territorio è quello di disporre di un quadro conoscitivo dettagliato. In questo contesto la Regione Toscana ha attivato, a partire dal 2004, il progetto Osservatorio Kyoto che ha come obiettivo il monitoraggio del bilancio della CO<sub>2</sub> a scala regionale. Il bilancio fornisce uscite periodiche delle emissioni dei principali settori produttivi e degli assorbimenti operati dagli ecosistemi forestali, questi ultimi anche con cadenza trimestrale. In particolare, la misura degli assorbimenti forestali si basa su un approccio multiscala che integra misure di flusso puntuali da torri *eddy covariance* e da piattaforma aerea, che vengono impiegate per calibrare e validare un modello biogeochimico a scala regionale. Nel progetto è stata applicata una metodologia di misura degli assorbimenti, integrando le tecnologie di misura *state-of-the-art* del mondo scientifico per trasferirle in modo operativo all'Amministrazione Regionale Toscana, attraverso la redazione di un bilancio a scala comunale, consultabile ed interrogabile attraverso un'applicazione *WebGIS*.

### **Abstract**

The awareness of global changes and the relevance of local actions encourage local agencies to play an active role in building strategies for Climate Change adaptation and mitigation.

The implementation of effective policies for a specific region requires a detailed knowledge of the territory, of its potentiality and problems. In this context Tuscany Region financed in 2004 the Kyoto Observatory project for monitoring carbon balance at regional and local scale. The balance provides periodical information about CO<sub>2</sub> emissions of main sectors and carbon sequestration by forest ecosystems. Measures of forest sink are based on a multi-scale approach, from towers and airborne flux measurements to the application of regional biogeochemical models. The methodology of sink measurement, developed integrating state-of-the-art science and technologies, has been transferred to the Tuscany Regional Administration, enabling a timely operational monitoring of carbon balance at municipal scale thanks to a WebGIS application.

### **Introduzione**

Il Protocollo di Kyoto e le misure ad esso collegate, come il pacchetto 20-20-20 dell'Unione Europea, identificano i governi nazionali come i principali interlocutori per la messa in opera delle azioni volte alla lotta ai Cambiamenti Climatici. Se è vero che l'esistenza di *framework* internazionali e nazionali è imprescindibile, è anche vero che un contributo cruciale per l'implementazione di misure efficaci nella direzione della sostenibilità in grado di modificare radicalmente tutti quei fattori sociali responsabili dell'aumento delle emissioni di gas serra può arrivare dal basso, da azioni e politiche regionali, provinciali e comunali mirate al territorio locale.

L'importanza delle politiche locali emerge fortemente dopo il vertice di Copenaghen, ma affonda le radici in tutte quelle iniziative e nei *network* sub-nazionali quali le Agende21 locali e il Patto dei Sindaci, che volontariamente si impegnano a portare avanti un piano d'azione per la riduzione della CO<sub>2</sub> del 20% entro il 2020, così come previsto dalla strategia dell'Unione Europea.

Efficienza energetica, sostituzione delle fonti fossili con energie alternative e mobilità sostenibile, insieme ad una più attenta gestione del suolo e del patrimonio forestale, sono gli obiettivi di una politica territoriale di protezione dell'ambiente e di lotta ai Cambiamenti Climatici. A tal fine il monitoraggio delle emissioni di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera e la redazione di un bilancio del carbonio assumono un valore strategico e diventano uno strumento importante di valutazione di cui tener conto nella programmazione e pianificazione locali e di verifica dell'efficacia delle azioni attuate. Ricerca e conoscenza approfondita del territorio sono indispensabili per le azioni e le politiche, perché non si può sapere 'come' se prima non si conosce 'quanto'.

Con questo spirito la Regione Toscana ha avviato, nel 2004, il Progetto Osservatorio Kyoto in collaborazione con l'Istituto di Biometeorologia del CNR di Firenze, con la finalità di operare un vero e proprio trasferimento di conoscenze dal mondo scientifico e tecnologico agli Enti Locali, in un'ottica di *policy making* sostenibile. Ad oggi la Regione dispone di uno strumento operativo, sempre in evoluzione, basato su un approccio multiscala, in grado di fornire un bilancio della CO<sub>2</sub> al netto degli assorbimenti forestali, che sfrutta strumenti e metodologie avanzate quali le torri *eddy covariance* di misura dei flussi di carbonio (Aubinet et al., 2000; Baldocchi, 2003) ed i modelli C-Fix (Veroustraete et al., 2002; Maselli et al., 2009) e Biome-BGC (Running and Hunt, 1993). L'elevata risoluzione temporale delle uscite del modello permette, inoltre, un monitoraggio continuo della produttività delle foreste e degli effetti di eventi estremi, quali siccità intense o prolungate, sulla dinamica di crescita delle foreste.

### La catena operativa

La catena operativa messa a punto per la definizione del bilancio di carbonio ed il monitoraggio delle foreste si compone di una serie di fasi parallele e/o sequenziali (Figura 1):

- estrazione ed elaborazione geografica delle emissioni (*source*) di CO<sub>2</sub> dovute alle attività antropiche;
- stima ed elaborazione degli assorbimenti (*sink*) di CO<sub>2</sub>, ovvero la quantità di anidride carbonica atmosferica assorbita attraverso la fotosintesi da parte delle foreste;
- calcolo del bilancio come differenza fra emissioni ed assorbimenti;
- analisi stagionale della produttività e capacità di *sink* delle foreste toscane;
- inserimento dei dati georiferiti nel *geodatabase*;
- utilizzo di funzioni *WebGIS* per la consultazione ed interrogazione *on-line* dei dati regionali.

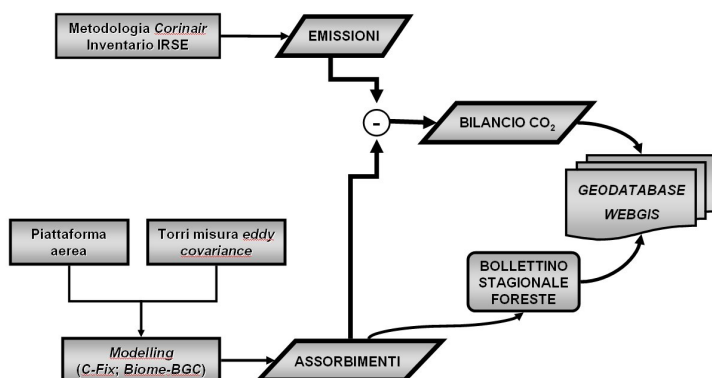


Figura 1 – Catena operativa per la redazione del bilancio di carbonio e monitoraggio delle foreste.

## Le emissioni

La stima delle emissioni si basa sulla metodologia internazionale EMEP/CORINAIR (EEA, 2007), opportunamente adattata alla realtà toscana. I dati, raccolti nell'Inventario Regionale Sorgenti Emissione (IRSE) si riferiscono agli anni 1995, 2000, 2003, 2005 e 2007 e sono forniti dalla scala comunale fino alla regionale con le sorgenti differenziate in lineari, legate alle principali arterie di comunicazione, puntuali, relative ai grandi impianti industriali, diffuse, inerenti le attività del terziario e domestiche. Ogni nuova uscita dell'inventario prevede un riaggiornamento degli anni precedenti con nuovi fattori di emissione.

## Gli assorbimenti forestali

Il sequestro di CO<sub>2</sub> atmosferica operato dagli ecosistemi forestali (*sink*) viene calcolato seguendo approccio multi-scala che utilizza le metodologie seguenti:

1 - Scala di *plot*: è la scala delle torri di misura dei flussi gassosi basate sulla tecnica *eddy covariance*, dove i valori semiorari di *Net Ecosystem Exchange* (NEE) registrati in continuo per tutto l'anno sono riferiti ad una porzione di territorio limitata ad alcune migliaia di m<sup>2</sup>. L'*eddy covariance* sfrutta la correlazione esistente fra componente verticale del vento e concentrazione del gas (in questo caso CO<sub>2</sub>) scambiato fra pianta e atmosfera. Le misure, effettuate su alcune tipologie di bosco rappresentative del clima mediterraneo (pinete costiere e leccete), sono in grado di evidenziare non solo il normale andamento del ciclo vegetativo giornaliero e stagionale, ma anche di mettere in evidenza tutte le anomalie di comportamento che possono essere legate a fattori di stress biotici (attacchi parassitari) ed abiotici (siccità o ondate di calore), com'è avvenuto per l'ondata di calore del Luglio 2006 (Genesio et al., 2007) o le scarse precipitazioni dei mesi estivi dello stesso anno, durante i quali la torre di misura installata all'interno del bosco di *Quercus ilex* L. presso Lecceto (SI), ha fatto registrare valori di anidride carbonica respirata, e quindi emessa, superiori a quella assorbita (Figura 2).

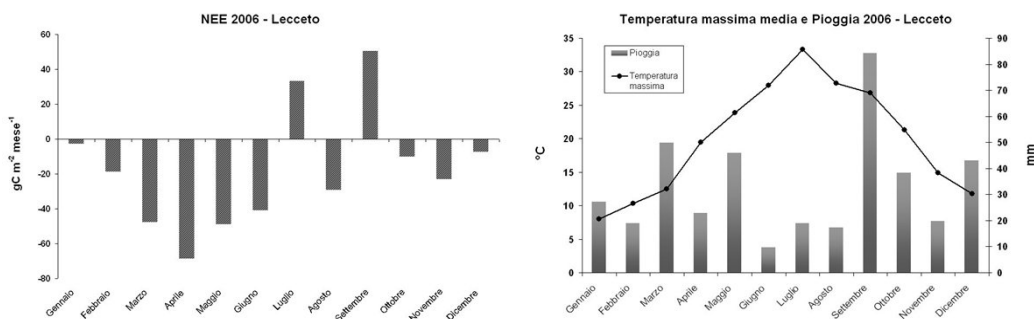


Figura 2 – Valori mensili di NEE del bosco di Lecceto (a sinistra) e relativo andamento di pioggia e temperatura massima media (a destra) nel 2006. Sono evidenti i picchi emissivi di CO<sub>2</sub> (barre positive) dovuti alla heat wave e alla siccità estiva.

2 - Scala di comprensorio: tramite l'applicazione della tecnica *eddy covariance* su piattaforma aerea *Sky Arrow ERA - Environmental Research Aircraft* (Gioli et al., 2004), è stato possibile estendere il dato registrato dalle torri a comprensori più ampi passando alla scala di alcuni km<sup>2</sup>. Durante il progetto sono state effettuate una serie di campagne di volo su porzioni significative del territorio toscano

3 - Scala regionale: è raggiunta attraverso l'uso integrato di un modello parametrico (C-Fix) e di un modello biogeochimico (Biome-BGC), che, a partire da celle di 1 km<sup>2</sup>, riportano le stime di NEE alla scala comunale.

La metodologia implementata richiede l'uso incrociato di dati NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) da satellite MODIS, dati meteorologici da stazioni a terra successivamente

spazializzati su tutta la regione, dati di tessitura e profondità del suolo e dati di composizione e distribuzione della vegetazione forestale e dei relativi volumi. Le elaborazioni di *Gross Primary Production* (GPP), *Net Primary Production* (NPP) e NEE si riferiscono ad un periodo che parte dal 1996 e che attualmente è a regime e fornisce mappe mensili con scala di 1 km<sup>2</sup>, utilizzate anche per redigere il bollettino stagionale delle foreste. L'approccio modellistico ha beneficiato di una calibrazione grazie alle misure effettuate dalle torri e dall'aereo.

### Il bilancio di CO<sub>2</sub>

Viene calcolato come semplice sottrazione algebrica fra le emissioni e gli assorbimenti riportati a scala comunale.

L'aggiornamento del bilancio è strettamente legato a quello dell'inventario delle emissioni IRSE che segue una dinamica temporale diversa da quella annuale, con cadenza minima biennale. L'ultima stima pubblicata nella primavera del 2010, infatti, si riferisce all'anno 2007.

### Il bollettino stagionale delle foreste

Alla fine di ogni stagione e su base annua vengono analizzate "in tempo reale" le mappe di GPP e NEE delle foreste toscane. I valori di produttività e accumulo di carbonio dei diversi ecosistemi forestali sono confrontati con quelli medi stagionali o annuali del periodo di riferimento 1996-2008 e con l'andamento climatico appena trascorso. È possibile, in questo modo, evidenziare eventuali anomalie, rilevarne l'estensione ad una o tutte le tipologie forestali ed individuare i fattori scatenanti, come si evince dalla Figura 3 dove, in risposta all'annata particolarmente seccata e calda del 2003, tutte le foreste toscane hanno nettamente ridotto la quantità di carbonio assorbito.

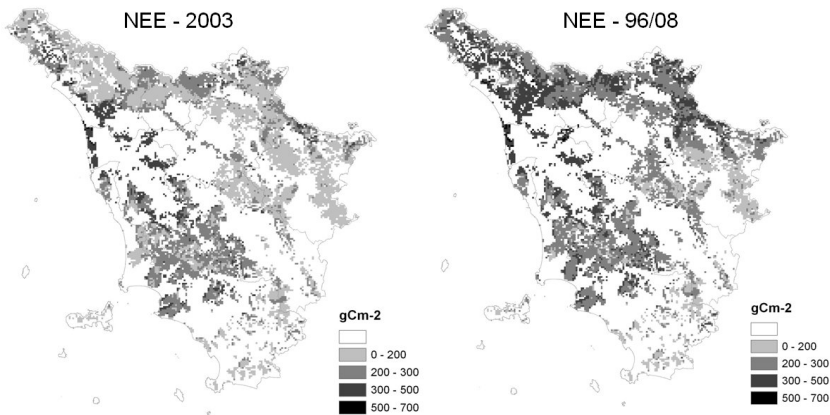


Figura 3 – Mappa di NEE prodotta da Biome-BGC relativa all'anno 2003 (a sinistra) e alla media del periodo 1996-2008 (a destra).

### La consultazione on-line

Perché i dati ed i risultati delle analisi possano essere utilizzati in maniera autonoma e semplice da parte dei decisori politici o di altri *stakeholders* è stata sviluppata un'applicazione *WebGIS* con strumenti *Open Source* per la visualizzazione ed interrogazione *on-line* di tutti gli strati informativi disponibili. L'applicazione permette sia la visualizzazione delle mappe vettoriali di emissione, assorbimento e bilancio a livello comunale per i diversi anni, con relativa vestizione grafica e possibilità di esportazione sottoforma di immagine, che la possibilità di caricare i file *grid* relativi ai *sink* di carbonio ottenuti da modello Biome-BGC con aggregazione stagionale ed annuale.

In base a particolari esigenze di progetto sono state anche implementate delle funzioni specifiche di interrogazione del database geografico sugli *shapefile* e, innovazione importante, sui *grid*. È possibile, infatti:

- visualizzare i dati tabellari relativi ai poligoni sottesi da una finestra tracciata manualmente;
- evidenziare le unità amministrative (Comuni) in base a *query* di selezione basate su soglie di valori di emissione, assorbimento o bilancio (Figura 4);

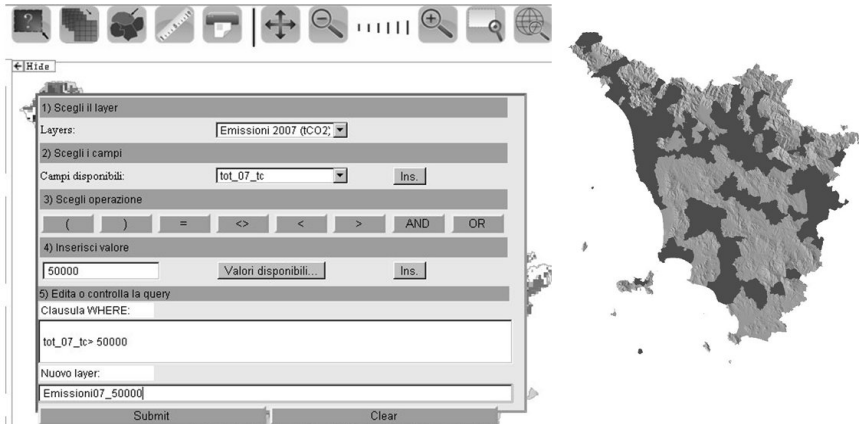


Figura 4 – Esempio di interrogazione WebGIS su dati vettoriali: selezione dei Comuni con emissioni superiori a 50.000tCO<sub>2</sub>, per l’anno 2007, con generazione di un nuovo layer.

- effettuare operazioni di estrazione dei *pixel* sui *grid* di *output* del modello Biome-BGC in funzione del poligono comunale selezionato per poi sommare i valori, sia sul piano x-y rispetto al poligono, che sull’asse z ed ottenere un unico valore su scala spaziale amministrativa di *grid*, relativi a diverse serie temporali (Figura 5).

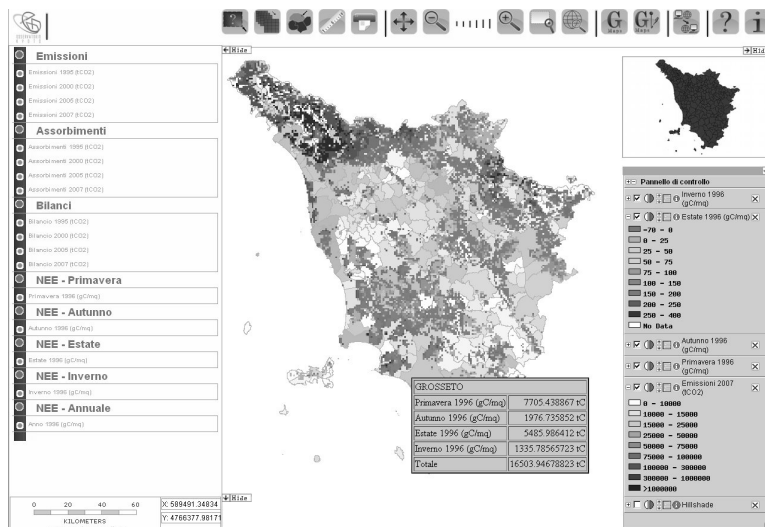


Figura 5 – Esempio di analisi WebGIS su *grid*: estrazione dei valori di emissioni stagionali per l’anno 1996 sul Comune di Grosseto.

## Conclusioni

L'Osservatorio di Kyoto ha realizzato un trasferimento di metodologie scientifiche presso le amministrazioni regionali che possono così disporre, oggi, di uno strumento operativo che consente di monitorare in continuo il “respiro” della regione Toscana. L'esistenza di un tale quadro

conoscitivo offre la possibilità ai decisori politici ed alle amministrazioni locali di pianificare azioni mirate sulla base di dati certi e di verificare al tempo stesso l'efficacia delle misure intraprese.

Oggi il monitoraggio del bilancio della CO<sub>2</sub> rappresenta uno degli aspetti in cui è possibile declinare le politiche di sostenibilità legate agli ecosistemi forestali. Va infatti ricordato che la *carbon sequestration* è da considerarsi come una parte di quella molteplicità di servizi che gli ecosistemi rendono alla collettività e che, essendo "naturali", sono troppo spesso considerati gratuiti, quindi privi di valore. Le ricerche degli ultimi anni hanno messo in evidenza che approcci come quello degli *ecosystem services* legato all'economia ecologica (Costanza et al., 1997), che mirano a fornire una quantificazione di tali servizi al fine di una loro valutazione economica, sono fondamentali per indirizzare i decisori verso una pianificazione territoriale più sostenibile; quando non si riconosce un valore ai servizi naturali resi dagli ecosistemi, o tale valore non viene sufficientemente riconosciuto nel processo di presa di decisione, soprattutto a livello regionale o locale, le politiche risultanti tendono a sovrastimare i valori del mercato e falsano il processo di presa di decisione verso scelte nella direzione dello sviluppo e della produzione (Bingham et. al., 1995).

### **Bibliografia**

Aubinet M., Grelle A., Ibrom A. et al. (2000). "Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX methodology". *Advances in Ecological Research*. 30: 113-175.

Baldocchi D. (2003). "Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future". *Global Change Biology*. 9: 479-492.

Bingham G., Bishop R., Brody M., Bromley D., Clark E., Cooper W., Costanza R., Hale T., Hayden G., Kellert S., Norgaard R., Norton B., Payne J., Russell C., Suter G. (1995). "Issues in Ecosystem Valuation: Improving Information for Decision Making". *Ecological Economics*. 14: 73-90.

Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Naeem S., Limburg K., Paruelo J., O'Neill R.V., Raskin R., Sutton P., van den Belt M. (1997). "The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital", *Nature* 387: 253-260.

European Environment Agency (EEA) (2007). *EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook*.

Genesio L., Vaccari F.P., Miglietta F., Magno R., Toscano P. (2007). "Ondata di calore 2006 in Toscana: il circolo vizioso dell'effetto serra". *Clima e Cambiamenti Climatici - le attività di ricerca del CNR*. Consiglio Nazionale delle Ricerche - Dipartimento Terra e Ambiente, Roma, 789-792.

Gioli B., Miglietta F., De Martino B., Hutjes R.W.A., Dolman A. J., Lindroth A., Schumacher M., Sanz M.J., Manca G., Peressotti A., Dumas E. (2004). "Comparison between tower and aircraft-based eddy covariance fluxes in five European regions". *Agricultural and Forest Meteorology*. 127: 1-2, 1-16.

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.

Running S.W., Hunt E.R. (1993). "Generalization of a forest eco system process model for other biomes, BIOME-BGC, and application for global-scale models". In: Ehleringer J.R. and Field C.B. (eds.), *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. Academic Press, San Diego, 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.