

## Tecniche di geostatistica per la caratterizzazione di mappe di emissione di CO da osservazioni da satellite

Federica Migliaccio (\*), Cynthia Zambrano (\*\*), Elisa Torresani (\*\*\*)

DIAR, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano

(\*) Tel. 02 23996507, Fax 02 23996530, federica.migliaccio@polimi.it

(\*\*) Tel. 02 23996543, Fax 02 23996530 cynthia.zambrano@mail.polimi.it

(\*\*\*) elisa.torresani@mail.polimi.it

### Riassunto

Le emissioni di CO dovute al fenomeno di “biomass burning” sono rappresentate da mappe raster stimate a partire da osservazioni da satellite raccolte da sensori di diverso tipo montati su diverse piattaforme, utilizzando inoltre algoritmi in cui i dati di input sono combinati fra loro in diverso modo. Ciò comporta che siano disponibili diversi “prodotti” di emissione di CO, dei quali è importante delineare le caratteristiche e fra le quali risulta molto utile istituire confronti reciproci.

Nel corso degli ultimi anni, nell’ambito di un più ampio lavoro sull’analisi dei dati di emissione di CO, sono stati utilizzati diversi indicatori statistici sia per caratterizzare i singoli dataset di emissione sia per verificare quanto i diversi dataset, confrontati due a due, presentino comportamenti simili o invece forniscano risultati discordanti.

Un ulteriore approccio è stato recentemente implementato per delineare le caratteristiche della distribuzione spaziale dei valori delle mappe di emissione di CO, utilizzando tecniche di geostatistica. L’obiettivo è quello di caratterizzare in maniera sintetica la variabilità spaziale dei dataset attraverso la costruzione e modellazione di semivariogrammi empirici. L’ambito di lavoro è stato ristretto a tre prodotti satellitari (ATSR, MODIS e VGT) per i quali le emissioni di CO mensili sono disponibili in maniera differenziata per classi di *landcover* GLC2000. In particolare le analisi sono state svolte su due finestre geografiche sub-continentali nel continente africano, con risoluzione temporale mensile e semestrale.

Le analisi condotte hanno consentito di rilevare alcuni particolari pattern di variabilità spaziale indicativi delle differenze fra le due finestre sub-continentali e delle diversità fra i vari dataset e inoltre di evidenziare, rispetto agli indici statistici precedentemente calcolati, le componenti di informazione legati alla distribuzione della copertura vegetativa.

### Abstract

CO emissions due to biomass burning are represented in the form of raster maps derived from satellite observations collected by sensors of different types mounted on different platforms, applying algorithms where input data are combined in different ways. As a consequence several CO emission “products” are available: for each of them it is important to highlight its specific characteristics and to establish ways of comparing it with the other products.

During the last few years, in the frame of a more extensive research work on the analysis of CO emission data, several statistical indices have been computed both to characterize the single datasets and to verify at which level couples of datasets show similar or different behaviors.

Another approach has been recently studied and implemented in order to outline the features of the spatial distribution of CO emissions, exploiting techniques derived from geostatistics. The goal is always to describe the spatial variability of each dataset in a synthetic way, by means of the computation (and subsequent modeling) of empirical semi variograms. The analysis has been limited to three products obtained by remote sensing (namely: ATSR, MODIS and VGT) for which

the monthly CO emissions are available per GLC2000 land cover class. The study has been carried on for two sub-continental geographical windows located in Africa, both at monthly and half-year temporal resolution.

The results highlighted particular patterns of spatial variability, due to the different behavior of the CO emissions in the two sub-continental windows and to the differences between datasets. An additional advantage of this approach, with respect to statistical indices previously used, is that it allowed to separate the information component related to the vegetation distribution in the areas under study.

### **Introduzione: l'emissione di CO da incendi di biomassa**

Già dagli anni '70 gli incendi di vegetazione, noti come "Biomass Burning", sono stati riconosciuti come la fonte emissiva che più influenza la composizione dell'atmosfera ed i cambiamenti climatici (Crutzen et al. 1979). Gli incendi emettono composti gassosi che variano dai più comuni gas serra come CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> ai composti come la CO derivati da combustioni incomplete. In accordo con (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change 2001) circa il 40% delle emissioni globali di CO sono dovute agli incendi, i quali sono anche responsabili della variabilità interannuale (Novelli et al., 2003) (van der Werf et al., 2004). La stima delle emissioni di CO riveste particolare importanza perché spesso utilizzata come riferimento per il calcolo delle emissioni degli altri inquinanti durante il processo combustivo (Andreae, Merlet, 2001).

Il telerilevamento ha potenzialmente tutte le caratteristiche adatte a quantificare le emissioni da "Biomass Burning" grazie al fatto che garantisce un rilievo globale e quasi continuo nel tempo (Cooke, Koffi, Grégoire, 1996) (Generoso et al., 2003). Per composti come la CO è infatti richiesta una frequenza di acquisizione satellitare elevata visto che la vita media globale in atmosfera di questo gas è di circa due mesi (Stroppiana et al., 2010).

In letteratura esistono due approcci principali per la stima delle emissioni di CO a partire da incendi di biomassa: l'approccio bottom-up è basato sul modello di (Seiler, Crutzen, 1980) secondo il quale l'area bruciata è convertita nei quantitativi emissivi attraverso fattori moltiplicativi dipendenti dalla tipologia di *landcover*; l'approccio top-down, sviluppato a partire dagli anni '90, stima invece le emissioni con modelli di inversione a partire dai dati di concentrazione atmosferica (Stroppiana et al., 2010).

Nell'approccio bottom-up l'emissione di CO dagli incendi  $E(CO)$  è espressa dal prodotto per ogni classe  $i$ -esima di vegetazione dell'area bruciata  $BA_i$  (m<sup>2</sup>), della densità di biomassa  $BD_i$  (kg m<sup>-2</sup>), dell'efficienza di combustione  $BE_i$  (kg kg<sup>-1</sup>) e del fattore emissivo di CO della specie  $i$ -esima  $EF_i(CO)$  (kg (CO) kg<sup>-1</sup>) (Seiler, Crutzen, 1980):

$$E(CO) = \sum_{i=1}^N BA_i * BD_i * BE_i * EF_i(CO) \quad [1]$$

dove  $N$  è il numero di classi di vegetazione in esame. La densità di biomassa  $BD$ , chiamata anche carico di combustibile, è la disponibilità di biomassa per unità di superficie; l'efficienza di combustione  $BE$  corrisponde alla percentuale di biomassa che brucia realmente sul totale; il fattore emissivo  $EF(CO)$  indica l'ammontare di CO emessa dalla biomassa bruciata.

Nel primo fattore ( $BA$ ) sono racchiuse le principali differenze dei tre prodotti considerati nella presente ricerca: essi infatti, partendo da rilievi diversi, sottoposti a calibrazioni ed eventuali correzioni diverse, giungono a stime effettivamente differenti dell'area bruciata stessa nonché alla relativa localizzazione. Ciò che invece accomuna i tre prodotti è l'utilizzo degli stessi valori dei coefficienti  $BD$ ,  $BE$  ed  $EF$  per ognuna delle classi di *land cover* e l'utilizzo di una mappa di *landcover* omogenea. Una mappa globale della distribuzione della copertura del suolo è infatti evidentemente necessaria per determinare quale tipo di vegetazione stia bruciando una volta che l'incendio è stato rilevato (Mieville et al., 2010). In tutta la ricerca è stata utilizzata la mappa

GLC2000 (Bartholomé, Belward, 2005) derivata dal sistema SPOT-VEGETATION, che fornisce la percentuale di ogni classe vegetativa per ogni cella (Mieville et al., 2010) a risoluzione di  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ . Nel presente lavoro ci si propone come obiettivo l'analisi dei semivariogrammi empirici per caratterizzare e comparare dataset ricavati da prodotti satellitari per i quali sono disponibili le emissioni di CO suddivise per ogni tipologia di landcover. Tali prodotti sono chiamati con gli acronimi ATSR (Kasischke et al., 2003), MODIS (Giglio et al., 2006) e VGT (Michel et al., 2005), nomi derivanti dai sensori utilizzati per le misure satellitari), hanno risoluzione spaziale di  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  e sono costruiti con l'approccio bottom-up.

Per una descrizione più dettagliata dello scopo del progetto, dei dati analizzati e dei risultati della prima parte della ricerca, si veda (Carrion et al., 2009) e (Carrion et al., 2010b).

Il notevole livello di dettaglio, e quindi la numerosità di classi di landcover, presente in GLC2000 è stata ridotta utilizzando dati raggruppati secondo tre macroclassi principali: foresta, savana-prateria (di seguito chiamata semplicemente savana) e agricolo, come già definito per le analisi precedentemente svolte.

### Scelta delle finestre geografiche e temporali per le analisi

Nonostante la disponibilità globale dei tre prodotti di emissione di CO per tutti i mesi dell'anno 2003 (considerato come riferimento temporale per tutti i test dell'esperimento INTERMEDE BBSO, nel quale la presente ricerca è inquadrata), le analisi qui descritte si concentrano sull'Africa, continente di grandissimo interesse per lo studio delle emissioni di CO da *biomass burning*. I quantitativi riferiti a tale finestra geografica sono infatti molto rilevanti come mostrato nella Tabella 1 tratta da (Stroppiana et al., 2010): l'Africa è un continente chiave per il ciclo globale del carbonio nonostante vi viva soltanto il 14% della popolazione mondiale ed emetta soltanto il 3% delle emissioni globali dovuti all'utilizzo di combustibili fossili (Williams et al., 2007).

	CO totale [Tg]			Percentuale [%]		
	VGT	ATSR	MODIS	VGT	ATSR	MODIS
Nord America	277,6	48,1	19,2	19	9	2
Europa	87,8	7,3	13,2	6	1	2
Nord Asia	559,1	139,5	241,6	39	25	31
Sud America	121,7	93,1	35,6	9	17	5
Africa	302,7	201,7	367,4	21	37	48
Oceania	74,0	57,9	92,6	5	11	12
Globo	1422,0	574,5	769,6	100	100	100

Tabella 1 – Emissioni totali di CO [Tg] globali differenziate per finestre continentali e percentuale [%] rispetto ai valori globali.

Per le analisi qui descritte il continente africano è stato diviso in due finestre sub continentali Africa\_Nord\_Equatore ed Africa\_Sud\_Equatore, delimitate dalle coordinate geografiche riportate nella Tabella 2. Tale suddivisione, suggerita dai ricercatori del CNR-IREA di Milano, dipende dalla stagionalità degli incendi che per il continente africano si inverte proprio sulla linea equatoriale. Infatti, mentre nelle regioni boreali gli incendi normalmente avvengono durante l'estate, in quelle tropicali avvengono durante i mesi invernali di ciascun emisfero con fasi di circa sei mesi (van der Werf et al., 2006).

Finestra	Lon min	Lon max	Lat max	Lat min
Africa Nord Equatore	-30	63	26	0
Africa Sud Equatore	-30	63	0	-50

Tabella 2 – Ampiezza delle finestre geografiche studiate.

Per quanto riguarda la scelta della cadenza temporale alla quale svolgere le analisi, si sono considerati i dataset mensili di emissioni di CO distinti nelle tre macroclassi di landcover, in particolare: per la finestra Africa\_Nord\_Equatore si sono considerati i mesi di Gennaio, Febbraio, Marzo, Aprile, Novembre, Dicembre e per la finestra Africa\_Sud\_Equatore i mesi da Maggio a Ottobre. La scelta è stata confermata anche tramite l'analisi visiva delle mappe dei fuochi attivi per ogni mese dell'anno 2003 per il sensore MODIS, disponibili sul sito Internet <http://earthobservatory.nasa.gov/>. Tali mappe indicano naturalmente una forte corrispondenza della stagione degli incendi con la stagione secca.

### **Analisi dei dataset di emissione di CO attraverso tecniche di geostatistica**

Le analisi qui presentate sono finalizzate alla caratterizzazione dei *dataset* disponibili di emissioni di CO da *biomass burning* cercando in particolare di quantificarne la proprietà di autocorrelazione spaziale, basata sul principio che punti tra loro vicini nello spazio abbiano un comportamento più simile e quindi valori più simili rispetto a punti tra loro lontani. E' possibile quantificare tale proprietà costruendo il semivariogramma empirico dei *dataset* e adattando un opportuno modello teorico. Solitamente l'analisi variografica viene utilizzata per una successiva interpolazione di un *set* di dati. Tuttavia, nel caso in esame non c'è la necessità di interpolare i dati di emissione, quindi i variogrammi sono sfruttati di per sé, come indicatori della variabilità spaziale del dato da studiare.

La geostatistica studia la variabilità spaziale dei fenomeni naturali estraendone le regole in un quadro modellistico di riferimento (Raspa, 1995). I modelli geostatistici sono in genere utilizzati per le interpolazioni spaziali con il metodo del *kriging*, metodo alternativo ai classici interpolatori deterministici. Tale metodo è applicabile in tutti quei settori in cui i fenomeni hanno carattere spaziale: scienze geologiche e minerarie, idrologia, scienze dei suoli, agronomia, geotecnica, geofisica, telerilevamento, climatologia, meteorologia, oceanografia, scienze forestali, zoologia, epidemiologia ed igiene ambientale (Raspa, 1995).

La geostatistica assume che i dati siano interpretabili come variabili regionalizzate e che la variazione spaziale possa essere espressa secondo tre componenti principali: componente strutturale (media costante o *trend*), componente *random* spazialmente correlata (variazione della variabile regionalizzata) ed errore residuo spazialmente incorrelato (Burrough, McDonnell, 1998).

L'autocorrelazione è una proprietà statistica del *dataset* stesso. Generalmente le statistiche sui dati e le loro incertezze possono essere derivate solamente se si hanno ripetizioni dell'esperimento e quindi più valori delle osservazioni. Nelle disposizioni spaziali questa proprietà viene garantita sotto l'ipotesi che il *dataset* rappresenti una realizzazione di un processo stocastico stazionario con stazionarietà della media, stazionarietà di secondo ordine per la covarianza e stazionarietà intrinseca per i semivariogrammi. Ciò significa che, una volta determinata la componente strutturale ed eventualmente rimosso il *trend*, le variazioni rimanenti tra i punti sono funzione della distanza ed eventualmente della direzione (autocorrelazione spaziale) e descrivibili dalla semivarianza  $\gamma(h)$ , che può essere stimata dai dati (Burrough, McDonnell, 1998) tramite l'equazione:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \{z(s_i) - z(s_i + h)\}^2 \quad [2]$$

Plottando il valore di  $\gamma(h)$  si ottiene il semivariogramma empirico, che in seguito deve essere interpolato tramite un'opportuna funzione teorica attraverso l'applicazione di tecniche di massima verosimiglianza o di minimi quadrati. I modelli teorici più utilizzati per interpolare i variogrammi empirici sono la funzione sferica, la funzione esponenziale e quella gaussiana (Burrough, McDonnell, 1998).

Un aspetto particolarmente importante nella costruzione dei semivariogrammi empirici è la componente direzionale: si noti infatti come in tutte le formule la distanza  $h$  non sia assunta come numero, ma come vettore. Le variabili regionalizzate sono quasi sempre riferite a fenomeni naturali

che, come tali, presentano delle direzioni principali. Per esempio può accadere che un fenomeno sia stazionario in una direzione mentre presenti un *trend* in un'altra. La deriva infatti si manifesta quasi sempre per sua natura secondo una determinata direzione. Nonostante la rimozione del *trend*, i semivariogrammi empirici possono comunque evidenziare ulteriori effetti direzionali e quindi avere andamenti diversi per direzioni diverse.

### Risultati delle analisi sui dati di emissione di CO

Le analisi sui dati di emissione di CO sono state condotte in ambiente ESRI ArcGIS, utilizzando in particolare l'estensione *Geostatistical Analyst*. Questa estensione contiene un insieme di *tool* per le analisi spaziali dei dati e fornisce un adeguato supporto geostatistico per l'interpolazione dei dati stessi. *Geostatistical Analyst* raggruppa i *tool* in due sezioni: *Exploratory Spatial Data Analysis* (ESDA) e *Geostatistical Wizard*.

Esempi di semivariogrammi ottenuti sono riportati nella Fig. 1.

In particolare, è importante sottolineare che è stata eseguita una selezione sui semivariogrammi, utilizzando per la successiva interpretazione dei risultati solo quelli per i quali era stato calcolato un indice di errore (appositamente definito) inferiore a un valore di soglia posto empiricamente pari a 0.1. L'indice di errore è stato definito in base alla formula:

$$E_{ij} = \frac{EM_{ij}}{VM_{ij}} \quad [3]$$

dove:

*i* indica uno specifico *dataset* (combinazione prodotto-*landcover*-mese);

*j* indica il modello utilizzato per l'interpolazione del semivariogramma empirico (sferico, esponenziale o gaussiano).

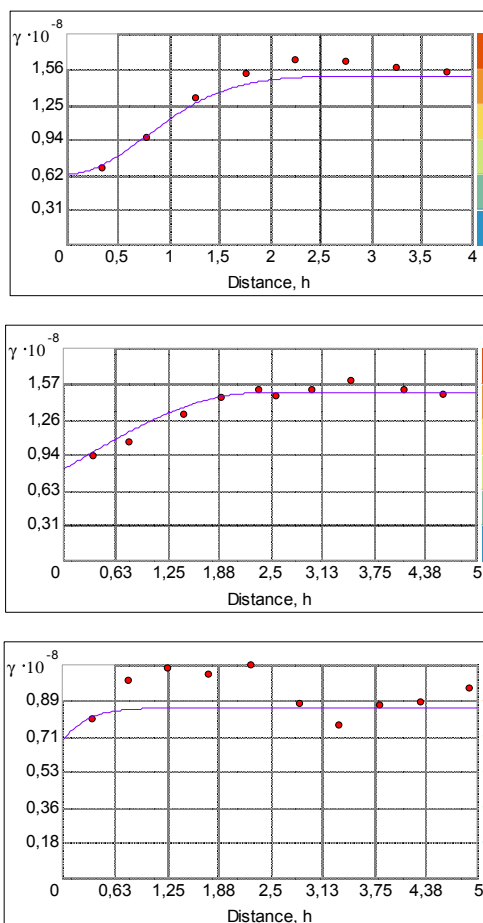
Inoltre:

$$EM_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{iR}} |v_{Rk} - \hat{\theta}_{Rk}| + \sum_{h=1}^{M_{iF}} |v_{r,h} - \hat{\theta}_{r,h}|}{n_{iR} + m_{iF}} \quad [4]$$

rappresenta la media dello scostamento dei valori teorici della semivarianza dai valori empirici;

$$VM_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{iR}} (v_{Rk}) + \sum_{h=1}^{M_{iF}} (v_{r,h})}{n_{iR} + m_{iF}} \quad [5]$$

rappresenta la media dei valori empirici della semivarianza.



*Figura 1 – Esempi di semivariogrammi empirici interpolati con modelli teorici:  
 in alto: MODIS, landcover savana, modello gaussiano, gennaio 2003;  
 al centro: VGT, landcover savana, modello sferico, giugno 2003;  
 in basso: ATSR, landcover savana, modello esponenziale, agosto 2003.*

I risultati del calcolo dell'indice di errore hanno dimostrato che in generale non esiste un modello che interpreti meglio di qualunque altro il comportamento dei semivariogrammi. Si è comunque verificato che l'errore di modellizzazione decresce all'aumentare del numero di punti del dataset (dataset di sole celle attive, a emissione di CO positiva), come si vede nell'esempio riportato nella Fig. 2.

Basandosi sullo studio dei semivariogrammi, i parametri più significativi presi in considerazione sono stati i seguenti:

- rapporto di anisotropia: indica quanto gli effetti direzionali siano significativi; valori prossimi all'unità rendono l'anisotropia poco rilevante;
- direzione di minima variabilità: direzione lungo la quale la variabilità tra i punti è minore a parità di distanza;
- variabilità spazialmente correlata: percentuale di variabilità spiegata dal modello di autocorrelazione spaziale (percentuale di semivarianza dipendente dalla distanza ed, eventualmente, dalla direzione).

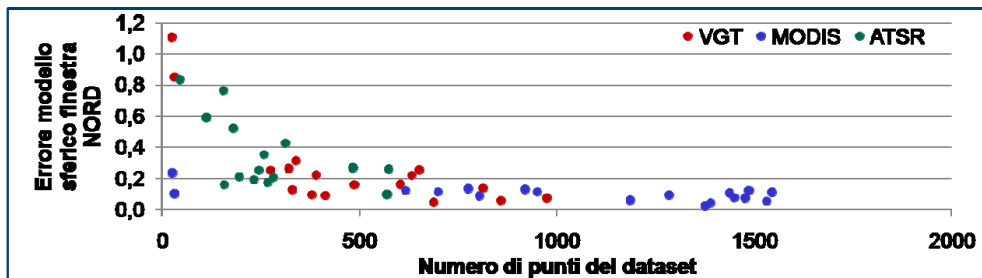


Figura 2 – Esempio di valutazione dell'errore di interpolazione del semivariogramma empirico in funzione del numero di punti del dataset.

Osservando i valori dei parametri calcolati nella finestra Africa\_Nord\_Equatore, si è constatato che l'autocorrelazione spaziale spiega buona parte della variabilità spaziale di MODIS, mentre i valori di emissione di ATSR sono interpretabili per grandi percentuali come errori spazialmente incorrelati; a VGT corrisponde infine una situazione intermedia (tranne che per il caso del *landcover* "agricolo" nel mese di dicembre).

Inoltre, si è evidenziato un *pattern* di variabilità spaziale comune ai tre prodotti esaminati. Per tutti e tre infatti il rapporto di anisotropia è quasi sempre risultato maggiore di 1.8 e mai inferiore a 1.6, mentre la direzione di minima variabilità è quasi sempre compresa tra  $\lambda = 70^\circ$  e  $\lambda = 110^\circ$  (direzione Est-Ovest).

Ciò significa che nell'Africa a nord dell'equatore la variabilità spaziale delle emissioni di CO varia, all'aumentare della distanza fra i punti, più velocemente al variare della latitudine, come si vede ad esempio nella Fig. 3. La spiegazione può essere rappresentata dal fatto che le emissioni di CO da incendio di biomassa sono fortemente correlate alla distribuzione della vegetazione, che per questa zona si presenta secondo fasce caratteristiche in direzione longitudinale (Fig. 4).

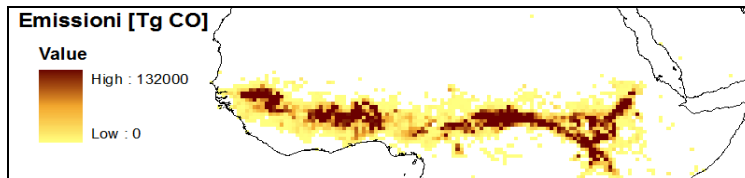


Figura 3 – Emissioni mensili di CO rappresentate dal prodotto MODIS per la finestra Africa\_Nord\_Equatore (*landcover* "savana", mese dicembre 2003).

Per quanto riguarda la finestra Africa\_Sud\_Equatore, si è verificato che il rapporto di anisotropia risulta essere per gran parte dei dataset minore di 1.6, e spesso è compreso fra 1.1 e 1.4.

In questo caso però non si è evidenziata una direzione sistematica di minima variabilità. La conclusione è stata dunque che l'area a Sud dell'Equatore presenta un comportamento più isotropo, non evidenziandosi direzioni sistematiche di variabilità spaziale per i diversi dataset esaminati.

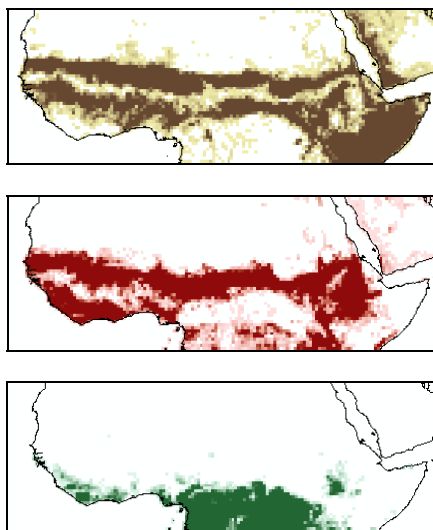


Figura 4 – Distribuzione della vegetazione GLC2000 per le macroclassi savana, agricolo, foresta nella finestra Africa\_Nord\_Equatore.

Le uniche anisotropie piuttosto marcate corrispondevano a casi particolari, quali il *landcover* savana per il mese di Agosto, per il quale VGT e MODIS presentano entrambi tendenze anisotrope ma sempre con direzioni opposte per i due dataset, e il caso di ATSR (tutti i *dataset*) e VGT (solo per la macroclasse savana per il mese di Ottobre) che indicano forti rapporti di anisotropia probabilmente riconducibili a oscillazioni casuali del semivariogramma.

Nella Fig. 5 è riportato un esempio di mappa di emissioni mensili di CO rappresentate dal prodotto MODIS per la finestra Africa\_Sud\_Equatore, mentre nella Fig. 6 è mostrata la distribuzione della vegetazione GLC2000 per le macroclassi savana, agricolo, foresta.

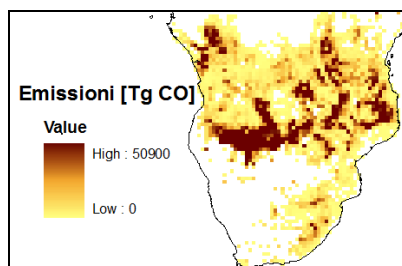


Figura 5 – Emissioni mensili di CO rappresentate dal prodotto MODIS per la finestra Africa\_Sud\_Equatore (*landcover* "savana", mese ottobre 2003).

Da ultimo sono state svolte analisi su periodi semestrali corrispondenti ai mesi invernali dei due emisferi, che ai tropici rappresentano la stagione durante i quali si concentrano gli incendi (con fasi appunto di circa sei mesi) (van der Werf et al., 2006). I risultati sono riportati in Tabella 3 e confermano sostanzialmente quanto già riscontrato durante le analisi a cadenza mensile.



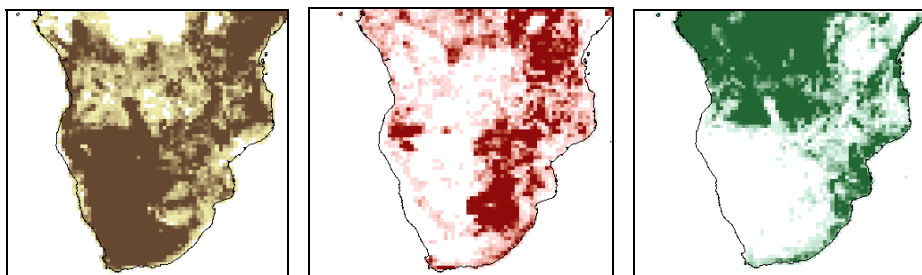


Figura 6 – Distribuzione della vegetazione GLC2000 per le macroclassi savana, agricolo, foresta nella finestra Africa\_Sud\_Equatore.

Finestra	Africa Nord Equatore	Africa Sud Equatore
Semestre	Nov-Dic-Gen-Feb-Mar-Apr	Mag-Giu-Lug-Ago-Set-Ott
Rapporto di anisotropia	Per tutti i prodotti > 1.5	Per MODIS e VGT < 1.5 (prevalentemente fra 1.1 e 1.3)  Per ATSR > 1.8  (Nota: i modelli spiegano in realtà solo una piccola porzione della variabilità spaziale dei dati: la percentuale di variabilità spazialmente correlata è bassa)
Direzione di minima variabilità	$80^\circ < \lambda < 115^\circ$ (est – ovest)	Non sistematica
Variabilità spazialmente correlata	MODIS > VGT > ATSR Ad es. per il mod. gaussiano: MODIS 60-75% VGT 50-60% ATSR 25-30%	Per savana ed agricolo: MODIS > VGT > ATSR  Per foresta: MODIS $\approx$ VGT > ATSR

Tabella 3 – Risultati delle analisi semestrali per le due finestre geografiche analizzate.

## Conclusioni

Il lavoro presentato si poneva lo scopo specifico di caratterizzare in maniera sintetica la variabilità spaziale dei dataset di emissione di CO attraverso un approccio geostatistico, tramite la modellizzazione dei semivariogrammi empirici.

L'ambito di lavoro è stato ristretto alla comparazione dei *dataset* dei prodotti MODIS, VGT ed ATSR che sono disponibili per macroclassi di *landcover* ed utilizzano un set di parametri comuni legati alla vegetazione. Questi parametri sono utilizzati per la stima delle emissioni come fattori moltiplicativi dell'area bruciata rilevata direttamente dai sensori o ricavata da misure di fuochi attivi per *fire pixel*.

Le analisi si sono concentrate sull'Africa, continente chiave per lo studio del fenomeno di *biomass burning* perché in esso si concentrano una grande percentuale delle emissioni globali di CO. Si sono

definite due finestre sub-continentali relative agli emisferi Nord e Sud, per le quali le analisi sono state condotte a scala mensile e su medie semestrali.

La modellizzazione dei semivariogrammi tramite ArcGIS è stata valutata grazie alla definizione di un indice di errore. I casi di migliore adattamento delle funzioni teoriche ai punti empirici dei semivariogrammi sono stati selezionati per le analisi effettive dei parametri derivanti dai modelli, secondo un criterio di soglia.

Uno dei principali risultati è rappresentato dal fatto che si è evidenziato un *pattern* di variabilità spaziale differente per le due finestre geografiche studiate. Per l'Emisfero Nord, la variabilità spaziale delle emissioni di CO è infatti generalmente molto spiccata in direzione Nord-Sud per tutti i prodotti analizzati. Si è evidenziata la dipendenza di questo risultato dalla distribuzione della vegetazione la cui densità, in questa finestra sub-continentale, aumenta e diminuisce in maniera molto marcata al variare della latitudine. A Sud dell'Equatore invece la variabilità spaziale risente mediamente molto meno degli effetti direzionali e non si registrano direzioni preferenziali sistematiche. L'analisi degli effetti direzionali sulla variabilità spaziale ha permesso inoltre di individuare immediatamente casi di stima anomala in cui un prodotto satellitare, per un particolare mese e/o *landcover*, si differenzia da questi pattern sistematici di variabilità.

Per quanto riguarda la differenza tra i prodotti, si è notata una migliore modellizzazione geostatistica dei dataset riferiti al prodotto MODIS. Essi infatti presentano generalmente un errore spazialmente incorrelato minore e quindi una più spiccata dipendenza della variabilità spaziale dalla distanza fra i punti ed, eventualmente, dalle direzioni lungo le quali essa è calcolata. Al prodotto ATSR corrisponde invece una maggiore discontinuità spaziale e la possibilità di verificare la proprietà di autocorrelazione spaziale soltanto per una piccola porzione della variabilità spaziale stessa dei dati. VGT presenta infine, nella maggior parte dei casi, una situazione intermedia tra gli altri due prodotti.

Per ATSR si sono potuti analizzare soltanto i parametri derivanti dai modelli di pochi dataset mensili perché, essendo questi ultimi generalmente formati da un ridotto numero di celle, l'errore di modellizzazione è risultato mediamente molto elevato. In particolare la scarsità di celle attive del prodotto ATSR, che rende le mappe emissive più "frammentate", deriva dal fatto che le misure satellitari di fuochi attivi, sulle quali si costruisce questo inventario, sono condotte soltanto di notte. Da ciò dipende anche la sottostima nei totali mensili di emissione di CO di questo prodotto.

Rispetto ai risultati ottenuti durante i precedenti studi (Carrion et al., 2009), (Carrion et al., 2010a), (Carrion et al., 2010b), queste analisi hanno consentito di scindere, per i confronti, la componente derivante dall'utilizzo dei parametri legati alla vegetazione (uguali per i diversi prodotti) da quella invece dipendente dalla stima dell'area bruciata (differente per ciascun prodotto). Si evidenzia infatti come il *pattern* spaziale sistematico della finestra a Nord dell'Equatore dipenda in realtà dalla distribuzione della vegetazione e si presenti quindi in tutti i prodotti poiché costruiti sulla stessa mappa di *landcover*.

Nonostante questo, è da sottolineare il fatto che lo scopo di caratterizzazione sintetica e comparazione dei dataset di emissione di CO sia stato raggiunto soltanto parzialmente. L'analisi della variabilità spaziale è stata infatti ristretta soltanto ad un livello locale, vista la grande diversità esistente nelle estensioni spaziali dei dataset mensili. La scarsa numerosità di celle ad emissione positiva di alcuni dataset ha inoltre limitato fortemente le possibilità di confronto, in quanto i semivariogrammi empirici di molti dataset sono stati "scartati" in base al criterio di soglia dell'errore. La modellizzazione dei semivariogrammi rappresenta uno strumento particolarmente complesso e, per questo, non completamente adatto al trattamento di così tante combinazioni di dati (finestra geografica, *dataset*, mese, *landcover*). L'analisi variografica richiede infatti di definire i valori di molti parametri che, teoricamente, andrebbero adattati ad hoc caso per caso.

L'applicativo *software* utilizzato nelle analisi è stato ESRI ArcGIS, già utilizzato in una fase precedente della ricerca per altre analisi statistiche sui dati di emissione di CO. Il pacchetto di *tool* di ArcGIS dedicato alle analisi geostatistiche ha il limite di essere volto sostanzialmente al *kriging* e non ad una vera analisi variografica: non permette l'utilizzo di funzioni teoriche prive di *sill*, non

consente di modellizzare in maniera completamente diversa le varie direzioni considerate e non consente di quantificare anisotropie di tipo zonale. Nonostante questo la definizione automatica di una direzione di minima e massima variabilità è stata molto utile ai fini dell'analisi, vista la numerosità dei casi.

Ciò che infine emerge dai risultati ottenuti, così come dai risultati precedenti, è la necessità di svolgere dei confronti fra i *dataset* delle aree bruciate e non delle emissioni di CO. Escludendo infatti i parametri comuni relativi alla vegetazione, le analisi si focalizzerebbero meglio sulle effettive differenze di rilievo dei diversi sensori e potrebbero quindi consentire di raggiungere più efficacemente lo scopo di comparazione necessario agli studi in questo campo, anche ai fini di un possibile miglioramento tecnologico degli strumenti disponibili per il monitoraggio delle emissioni di CO.

### Riferimenti bibliografici

- Andreae M. O. e Merlet P. (2001), "Emission of trace gases and aerosols from biomass burning", *Global Biogeochemical Cycles* 15 (4): 955–966
- Bartholomé E. e Belward A. S. (2005), "GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data». *International Journal of Remote Sensing* 26 (9): 1959. doi:10.1080/01431160412331291297.
- Boschetti L., Brivio P. A., Eva H. D. e Grégoire J. M. (2004), "Lessons to be learned from the comparison of three satellite-derived biomass burning products", *Geophysical Research Letters* 31-L21501.
- Burrough P. A. e McDonnell R. A. (1998), *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford.
- Carrion D., Migliaccio F., Zambrano C. (2009), "Strumenti GIS per l'analisi di dati ambientali da satellite", *Atti della 13ª Conferenza Nazionale ASITA*, 1 – 4 Dicembre 2009, Bari, pp. 625 – 630, ISBN 978-88-903132-2-6.
- Carrion D., Migliaccio F., Zambrano C. (2010a), "A comparison between free/open-source and commercial geospatial software tools, based on a case study", *Proceedings of the FOSS4G 2010 Conference*, September 6<sup>th</sup> – 9<sup>th</sup>, Barcelona (Spain), ISBN: 978-84-693-2403-5.
- Carrion D., Migliaccio F., Zambrano C. (2010b), "Mappe di emissione di CO da osservazioni da satellite: confronti fra diversi dataset in ambiente GIS", *Atti 14ª Conferenza Nazionale ASITA*, 9 – 12 Novembre 2010, Brescia, pp. 497 - 502, ISBN 978-88-903132-5-7.
- Cooke W. F., Koffi B. e Grégoire J.-M. (1996), "Seasonality of vegetation fires in Africa from remote sensing data and application to a global chemistry model", *Journal of Geophysical Research* 101 (D15): pp. 21,051-21,065. doi:199610.1029/96JD01835.
- Crutzen P.J., Heidt L.E., Krasnec J.P., Pollock W.H. and Seiler W. (1979), "Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, CH<sub>3</sub>Cl and COS", *Nature*, 282, pp. 253 – 256
- Generoso S., Bréon F.-M., Balkanski Y., Boucher O. e Schulz M. (2003), "Improving the seasonal cycle and interannual variations of biomass burning aerosol sources", *Atmospheric Chemistry and Physics* 3 (4): 1211-1222.
- Giglio L., Van der Werf G.R., Randerson J.T., Collatz G.J., e Kasibhata P. (2006), "Global estimation of burned area using MODIS active fire observations", *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 6, pp. 957-974.
- Ito A., Penner J. E. (2004), "Global estimates of biomass burning emissions based on satellite imagery for the year 2000", *Journal of Geophysical Research.*, 109, D14S05, doi:10.1029/2003JD004423.
- Jain A. K. (2007), "Global estimation of CO emissions using three sets of satellite data for burned area", *Atmospheric Environment* 41- 6931-6940.
- Ji L. e Gallo K. (2006), "An agreement coefficient for image comparison", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 72, N. 7, pp.823 – 833.

- Kasischke E. S., Hewson J. H., Stocks B., van der Werf G., Randerson J. (2003), "The use of ATSR active fire counts for estimating relative patterns of biomass burning - a study from the boreal forest region", *Geophysical Research Letters*, 30, doi:10.1029/2003GL017859.
- Michel C., Liosse C., Grégoire J. M., Tansey K., Carmichael G. R. e Woo J. H. (2005), "Biomass burning emission inventory from burnt area data given by the SPOT-VEGETATION system in the frame of TRACE-P and ACE-Asia campaigns", *Journal of Geophysical Research* 110-D09304.
- Mieville A., Granier C., Liousse C., Guillaume B., Mouillot F., Lamarque J.-F., Grégoire J.-M. e Petron G. (2010) "Emissions of gases and particles from biomass burning during the 20th century using satellite data and an historical reconstruction", *Atmospheric Environment* 44 (11) (Aprile): 1469-1477. doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.01.011.
- Migliaccio F., Pinto L. (2009), "Experiences in the automatic validation and cross-validation of spatial datasets and raster maps", *Proceedings of the International Workshop on validation of geoinformation products for crisis management - Valgeo 2009*, pp. 121 – 126. (JRC, Ispra, Italy, Nov. 23 – 25, 2009), ISBN 978-92-79-14069-3.
- Mood A.M., Graybill F.A. e Boes D.C. (1974), "Introduction to the theory of statistics", McGraw Hill, Auckland, New Zealand, 564 pp.
- Novelli P. C., Masarie K. A., Lang P. M., Hall B. D., Myers R. C. e Elkins J. W. (2003), "Reanalysis of tropospheric CO trends: Effects of the 1997–1998 wildfires", *Journal of Geophysical Research* 108 (Agosto 9): pp 14. doi:200310.1029/2002JD003031.
- Pétron G., Granier C., Khatatov B., Yudin V., Lamarque J.-F., Emmons L., Gille J. e Edwards D. P. (2004), "Monthly CO surface sources inventory based on the 2000-2001 MOPITT satellite data", *Geophys. Res. Lett.*, 31, L21107, doi:10.1029/2004GL020560.
- Raspa G. (1995), "Dispense di Geostatistica per il corso di Laurea Specialistica in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio" <http://w3.uniroma1.it/geostatistica/Geostatistica/Geostatistica.htm>.
- Seiler W. e Crutzen P. J. (1980), "Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning", *Climatic Change* 2: 207-247.
- Stroppiana D., Brivio P. A., Grégoire J. -M, Liousse C., Guillaume B., Granier C., Mieville A., Chin M. e Pétron G. (2010), "Comparison of global inventories of CO emissions from biomass burning derived from remotely sensed data", *Atmospheric Chemistry and Physics* 10 (24): 12173–12189. doi:10.5194/acp-10-12173-2010.
- Tansey K., Grégoire J.M., Defourny P., Leigh R., Pekel J.F., Van Bogaert E. e Bartholomé E. (2008), "A new, global, multi-annual (2000–2007) burnt area product at 1 km resolution", *Geophys. Res. Lett.*, 35-L01401.
- van der Werf G. R., Randerson J. T., Collatz G. J., Giglio L., Kasibhatla P. S., Arellano A. F., Olsen S. C. e Kasischke E. S. (2004), "Continental-Scale Partitioning of Fire Emissions During the 1997 to 2001 El Niño/La Niña Period", *Science* 303 (5654) (Gennaio 2): 73 -76. doi:10.1126/science.1090753.
- van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L., Collatz G. J., Kasibhatla P. S. e Arellano Jr. A. F. (2006), "Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004". *Atmospheric Chemistry and Physics* 6 (11): 3423-3441.
- Williams C. A., Hanan N. P., Neff J. C., Scholes R. J., Berry J. A., Denning A. S. e Baker D. F. (2007), "Africa and the global carbon cycle", *Carbon Balance and Management* 2: 3-3. doi:10.1186/1750-0680-2-3.