

Valutazione del prodotto satellitare DMP tramite misure in situ di produzione di biomassa nelle aree di savana saheliane

Francesco Nutini (*,**), Mirco Boschetti (*), Daniela Stroppiana (*),
Pietro Alessandro Brivio (*), Etienne Bartholomè (**), Gora Beyè (****)

(*) Consiglio Nazionale delle Ricerche-IREA, Via Bassini 15, 20133 Milano, +390223699297

boschetti.m@irea.cnr.it, stroppiana.d@irea.cnr.it, brivio.pa@irea.cnr.it

(**) Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Produzione Vegetale
Via Celoria 2, 20133 Milano, nutini.f@irea.cnr.it

(***) JRC-EC, Global Environmental Monitoring, Via E. Fermi 1, Ispra, Varese
etienne.bartholome@jrc.ec.europa.eu

(****) Centre de Suivi Ecologique, Dakar, Senegal

Riassunto

La presente ricerca ha lo scopo di valutare la qualità del prodotto satellitare *Dry Matter Productivity* (DMP), una stima spazializzata della produzione di biomassa vegetale ottenuta da dati remoti. Il prodotto DMP è basato sul modello di Monteith e combina immagini da satellite con dati meteorologici al fine di ottenere stime della produttività della vegetazione terrestre. Questo tipo di prodotto costituisce un dato quantitativo fondamentale per il monitoraggio delle zone pascolive della savana soprattutto in una regione come quella del Sahel caratterizzata da una cronica insicurezza alimentare e da una produzione delle risorse naturali fortemente dipendente dalle condizioni climatiche.

Il lavoro è stato condotto nell'ambito del progetto EU FP7 Geoland2, come contributo ai partner di ECOWAS (Economic Community Of West African States) del programma AMESD (African Monitoring of the Environment for Sustainable Development). La valutazione del DMP è stata svolta grazie ad una comparazione con dati di campo di produzione biomassa messi a disposizione dal Centre Suivi Ecologique di Dakar, Senegal, e dalla ONG ACF (Action Contre la Faim). I dati a terra forniscono una serie di misurazioni annuali tra il 2005 ed il 2009 in 33 siti nella regione di Matam (Senegal), e tra il 1998 ed il 2009 su 92 siti nelle zone pascolive del Niger.

L'articolo analizza la correlazione tra le stime DMP e la biomassa campionata misurata a terra, esaminando le differenze dell'andamento del prodotto satellitare tra i differenti siti di campionamento. E' inoltre presentata l'analisi dell'influenza delle piogge e della copertura del suolo sulla produzione di biomassa con lo scopo di individuare parametri significativi nel descrivere la variabilità della stima di biomassa.

Abstract

The Sahelian belt of West Africa is a region characterized by wide climate variations, which can in turn affect the survival of local populations especially in rangeland, as happened during the dramatic food crisis in the 70-80s caused by severe drought. This work has been carried out in the framework of the EU FP7 Geoland2 project as a contribution to the ECOWAS component (Economic Community Of West African States) of the AMESD (African Monitoring of the Environment for Sustainable Development) programme with the purpose of establishing the reliability of Dry Matter Productivity (DMP) developed by Flemish Institute for Technological Research (VITO), a spatial estimation of dry matter (DM) obtained from remotely sensed data. DMP can be of great help in monitoring savanna pasturelands in a region characterized by food insecurity and a significant variability of biomass production, linked to climate variations, which

can in turn affect the survival of local populations. The evaluation of DMP was carried out thanks to the Centre de Suivi Ecologique (CSE) and Action Contre la Fame (ACF), the partners who provided the field biomass measurements. The paper shows the correlation of DMP with field measurements of herbaceous biomass, and discusses the differences among the different sites where ground data were collected. Finally the analysis of eco-climatic variables related to biomass production (rainfall, land cover) allow to identify significant parameter that could describe the variability of biomass estimation.

Introduzione

La regione saheliana è stata interessata da un periodo di siccità cronica, dagli anni '60 fino alla fine degli anni '80, che ha provocato una diffusa crisi alimentare aggravata da condizioni geopolitiche particolarmente instabili. Queste problematiche hanno stimolato l'interesse scientifico verso l'identificazione dei fattori climatici e/o antropici come causa della siccità e nella valutazione dei suoi effetti (Herrmann e Anyamba, 2005). Riguardo alla cause scatenanti della siccità i lavori più recenti hanno dimostrato che esiste una forte correlazione tra le anomalie pluviometriche nell'Africa occidentale e le temperature anomale dell'oceano atlantico, fenomeno analogo a "El Niño" (Nicholson and Grist, 2001, Giannini et al., 2003).

La grave siccità ha portato a classificare il Sahel come di un'area soggetta ad una "desertificazione irreversibile e progressiva" (Lamprey et al., 1988), sebbene studi più recenti, basati su dati satellitari, dimostrino che dalla metà degli anni 80' vi è stato un incremento dello sviluppo vegetazionale correlato ad un aumento delle piogge (Herrmann e Anyamba, 2005; Heumann et al., 2007). Questo fenomeno, comunemente indicato come *regreening* è stato interpretato come una ripresa dalla grande siccità del Sahel del secolo scorso (Anyamba e Tucker, 2005; Gianini et al., 2008; Olsson et al., 2005).

Nonostante questa ripresa permangono problematiche legate alla sicurezza alimentare e le conseguenti crisi umanitarie, che mantengono il sistema Sahel al centro di numerose iniziative internazionali. Infatti, come affermato da Hein et al. (2011), sono necessari ed urgenti dei programmi di monitoraggio delle risorse naturali che sappiano integrare i dati telerilevati con i dati in situ.

In questo contesto l'articolo mostra una valutazione del prodotto *Dry Matter Productivity*, una stima della biomassa vegetale basata su dati remoti, sfruttando dei dataset di produzione pascoliva raccolti in due diverse aree del Sahel. Il confronto tra i dati stimati e misurati nelle due aree test vuole contribuire all'identificazione del DMP come prodotto satellitare di supporto al monitoraggio delle risorse pascolive nella regione.

Materiali e metodi

Il Sahel è una zona di transizione eco-climatica tra il Sahara e le foreste tropicali sub-umide, secondo un gradiente nord-sud determinato dalle precipitazioni annuali. Il clima del Sahel è caratterizzato da una forte stagionalità delle precipitazioni, con una lunga stagione secca in inverno e un breve periodo delle piogge durante l'estate. Di conseguenza, la produzione di biomassa pascoliva è possibile solo durante la breve ed instabile stagione piovosa. Nel Sahel la maggior parte della popolazione vive in zone con piovosità superiore a circa 300 mm all'anno, al di sotto dei quali non è possibile sostenere un'agricoltura di sussistenza (Huber et al., 2011). Anche ove questa agricoltura è possibile, l'imprevedibilità delle precipitazioni, che variano del 30% da un anno all'altro (ECOWAS-SWAC, 2006), determina una condizione di permanente vulnerabilità alle crisi umanitarie e alla scarsità di derrate alimentari.

I dati satellitari sono particolarmente adatti per l'analisi dei fenomeni su larga scala come la produzione di biomassa e le variazioni climatiche del Sahel. In particolare, nel corso della ricerca sono state utilizzate serie temporali di dati satellitari riguardanti la stima della biomassa vegetale, la precipitazione e una mappa della copertura del suolo. Tutti questi dati sono stati resi disponibili dal progetto Geoland2-NARMA (*Natural Resource Monitoring in Africa*).

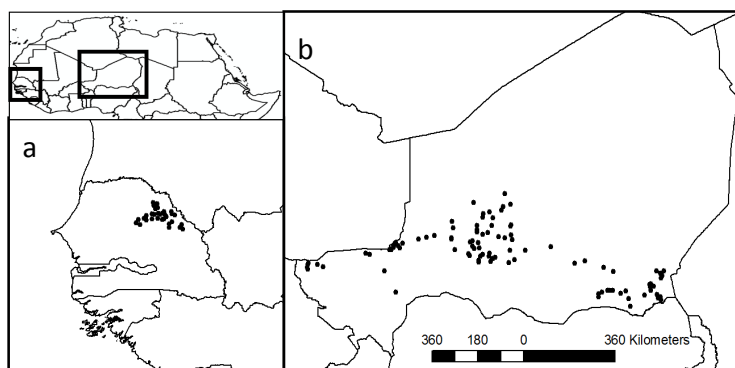


Figura 1 – Distribuzione dei siti di campionamento di biomassa in Senegal(a) e Niger(b).
Le immagini sono alla stessa scala.

I dataset di misure di campo di biomassa pascoliva [kg/ha] riguardano due aree test: una in Senegal e l'altra in Niger (Figura 1). Nella regione senegalese le piogge variano tra 200 mm a nord e 600 mm a sud (Sall, 2000), ed in particolare nella regione di Ferlo, che fa parte della medesima regione ecoclimatica delle zone in cui si trovano i siti di campionamento (Sala, 2011), le piogge sono comprese tra i 113 e i 321 mm all'anno (Tucker et al., 1985). Le misure di campo in Senegal sono state effettuate dal *Centre de Suivi Ecologique* (CSE) in un'area di 170 x 115 km dove 33 siti (Figura 1a) sono stati monitorati alla fine del periodo piovoso (Ottobre) tra il 2005 e il 2009. I dati di campo forniscono per ogni sito le produzioni annuali sia erbacee che arbustive/arboree in un'area di 1 km².

Senegal – Globcover	N. di siti (33)
- Closed to open (>15%) herbaceous vegetation (grassland, savannas or lichens/mosses)	4
- Mosaic cropland (50-70%) / vegetation (grassland/shrubland/forest) (20-50%)	4
- Mosaic vegetation (grassland/shrubland/forest) (50-70%) / cropland (20-50%)	14
- Rainfed herbaceous crops	11
Niger – Globcover	N. di siti (92)
- Bare areas	45
- Closed to open (>15%) herbaceous vegetation	45
- Mosaic forest or shrubland (50-70%) / grassland (20-50%)	2

Figura 2 – Classi di land cover per i siti di campionamento senegalesi e nigerini.

La mappa di copertura del suolo GlobCover, individua quest'area come caratterizzata da savana mista ad arbusti e colture non irrigue. In Niger la pluviometria è di soli 160 mm annui a nord (a parte nelle zone desertiche dove non piove affatto) mentre a sud cadono circa 600 mm/anno tra i mesi di luglio e settembre (Geesing e Djibo, 2001). I dati raccolti in Niger sono stati forniti da *Action Against Hunger* (ACF), un'organizzazione umanitaria internazionale impegnata nella lotta alla malnutrizione (<http://www.actionagainsthunger.org>). Queste misurazioni coprono un periodo di undici anni (1998-2009) su 92 siti (Figura 1b) distribuiti in un'area di 1300 km x 400 km dove il

pascolo è la più importante fonte di approvvigionamento alimentare. Le misurazioni non sono state effettuate con cadenza annuale per ogni sito, ma comunque sono disponibili in media 50 misure per ogni anno. La carta tematica Globcover indica che la gran parte dei siti sono caratterizzati da una copertura vegetale meno rigogliosa rispetto alle zone campionate in Senegal (Figura 2).

Serie temporali di dati satellitari: DMP e RFE

Il prodotto satellitare *Dry Matter Productivity* è basato sul modello sviluppato da Monteith nel 1972, secondo il quale la quantità di biomassa vegetale può essere stimata conoscendo la radiazione che viene assorbita dalle piante e applicando un modello moltiplicativo di fattori di conversione della radiazione in biomassa e fattori limitanti della crescita dovuti a sfavorevoli condizioni ecologiche.

Il modello di Monteith è stato implementato presso il *Flemish Institute for Technological Research* (VITO), in Belgio, con la collaborazione di altri istituti europei come il JRC (*Joint Research Centre*) e l'INRA (*National Institute for Agronomic Research*). Il DMP stima il tasso di crescita della biomassa secca ed è espresso in chilogrammi di sostanza secca (kg DM) per ettaro per giorno. I dati utilizzati e relativi al periodo tra il 1999 e il 2009 sono disponibili ad una risoluzione temporale decadale (10 giorni) e spaziale di 1 km. I dati sono stati forniti dal progetto Geoland2-NRMA (Combal et al., 2010).

I dati pluviometrici RFE (*RainFall Estimate*) sono stati forniti da *Famine Early Warning System Network* (FEWSNET) della *United States Agency for International Development* (USAID) e rappresentano delle stime da satellite che permettono di sopperire alla mancanza di informazioni a terra e forniscono una informazione indispensabile dato che nell'area saheliana la pioggia è il primario fattore limitante allo sviluppo vegetazionale (Huber et al., 2011).

I dati RFE sono disponibili ad una risoluzione spaziale di 8 km, che verrà ricampionata a 1 km, e risoluzione temporale di 10 giorni a partire dal 1996. Attualmente rappresentano il dataset pluviometrico più accurato per l'area di studio. L'algoritmo utilizzato per la stima pluviometrica è stato modificato nel 2001, ma le due serie di dati (prima e dopo il 2001) sono perfettamente comparabili come dimostrato da Haas (2010).

Infine è stata utilizzata un'informazione cartografica di copertura del suolo (GlobCover) ottenuta da dati telerilevati, acquisiti dal sensore *ENVISAT Medium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS) con una risoluzione spaziale di 300 metri (Arino et al., 2008).

Analisi dei dati

Dalle immagini satellitari sono state estratti i valori di DMP e RFE per delle aree di 2x2 pixel centrate sulle coordinate dei siti di campionamento. I dati di DMP decadal sono stati cumulati sul periodo di interesse per lo sviluppo dei pascoli (da Luglio ad Ottobre), anche se l'inizio e la fine della stagione possono variare leggermente da un anno all'altro (Anyamba e Tucker, 2005), ottenendo una stima della produzione di biomassa annuale (DMP_{JASO}) (Fensholt e Rasmussen, 2011; Fensholt et al., 2006; Seaquist et al., 2009) confrontabile con i dati di campo.

La seguente equazione restituisce il valore annuale del DMP espresso in kg/ha, comparabile con i dati di campo disponibili:

$$DMP_{JASO} = \sum_{i=1,12} \frac{10 * DMP_{10}(i)}{k} \quad (1)$$

Dove:

JASO	- è il periodo delle piogge tra luglio ed ottobre.
DMP ₁₀	- è la stima decadale
12	- è il numero di decadi in un periodo JASO
<i>k</i>	- fattore di conversione (kg/ha) = 100

I dati di biomassa così ottenuti sono stati confrontati con la mappa di Globcover con lo scopo di individuare come le medie di DMP si distribuiscano nell'Africa Occidentale per classi di copertura vegetazionale.

Successivamente è stata condotta una analisi della correlazione tra i dati di campo ed i dati stimati con lo scopo di identificare l'accuratezza del DMP in Niger e Senegal, grazie a diversi indici statistici (Loague e Green, 1991) riassunti in Figura 3.

La radice dell'errore quadratico medio (RMSE) e il relativo RRMSE, forniscono informazioni sulla differenza assoluta e relativa tra le stime del modello e le misure a terra. Il Modeling Efficiency (EF) quantifica la capacità del modello di riprodurre l'andamento dei valori osservati ed il coefficiente di massa residua (CRM) quantifica la sovrastima (CRM <0) o la sottostima (CRM > 0) dell'output del modello.

E' stata condotta una analisi della covarianza (ANCOVA) per identificare se le variabili di copertura vegetale, variabilità annuale e piogge influenzino la regressione lineare tra dati di campo e satellitari. L'ANCOVA permette di introdurre nell'analisi dei dati delle variabili categoriche di particolare interesse che potrebbero contribuire a spiegare la varianza del modello di regressione.

Nome ed acronimo	Min	Max	Best
Root mean square error (RMSE)	0	+∞	0
Relative Root mean square error (RRMSE)	0	+∞	0
Modeling efficiency (EF)	-∞	1	1
Coefficient of Residual Mass (CRM)	-∞	+∞	0
Coefficient of Determination (R ²)	0	1	1

Figura 3 – Indici statistici utilizzati per descrivere la corrispondenza tra i dati simulati e misurati.

Risultati e discussione

La Figura 4 mostra come sono distribuite le medie di DMP in Africa Occidentale per la finestra temporale interessata dalle misure di campo. Si nota che le medie seguono il tipico andamento nord-sud determinato dalle piogge, variando da 100 kg/ha per le zone di suolo nudo a oltre 10000 kg/ha per le foreste della Costa d'Avorio. La fascia saheliana di interesse per la nostra ricerca, che corre dal nord del Senegal sino al Darfur, mostra una stima della produzione media variabile tra valori vicino allo zero (aree marginali con un ecosistema desertico, colorazione chiara) a valori superiori a 4000 Kg/ha (colorazione blu-azzurra), tipici di savane arborate di confine tra la zona saheliana semi-arida e le regioni sudaniane dove l'approvvigionamento idrico non è più il maggiore fattore limitante allo sviluppo vegetazionale (Geesing, Djibo, 2001).

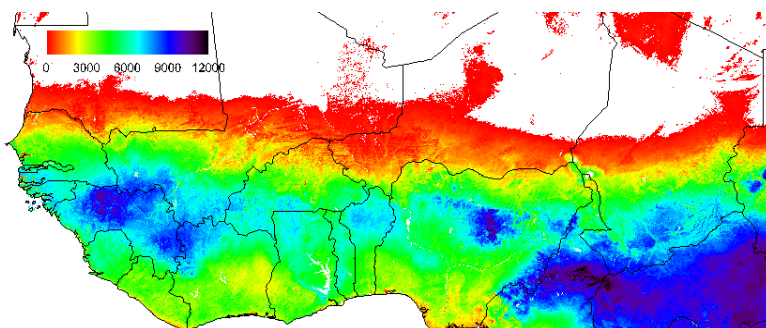


Figura 4 – Mappa della media di Dry Matter Productivity tra il 1999 e il 2009. In blu-azzurro i valori più elevati (>7000 kg/ha) in giallo-rosso i più bassi (<5000 kg/ha).

Per meglio interpretare e valutare la distribuzione del DMP in base alle caratteristiche vegetazionali e ecologiche di questa porzione d’Africa, è presentata la media di DMP per le classi di copertura del suolo del GlobCover (Figura 6). È possibile individuare quelle che sono i tipi di copertura vegetazionale caratteristici della fascia saheliana (*rainfed croplands, sparse vegetation*) con la tipica disposizione stratificata latitudinalmente dovuta alle precipitazioni annuali (figura5). Le classi di copertura del suolo che formano la fascia saheliana hanno valori di DMP vicini ai dati riportati in letteratura per quelle aree mentre per le classi di copertura tendenzialmente più arborate e più settentrionali vi sono delle significative differenze rispetto ai valori attesi. In particolare le classi di GLOBcover in corrispondenza delle foreste sempreverdi del Golfo di Guinea e della Liberia (*Closed (>40%) broadleaved deciduous forest*) dove la presenza di biomassa vegetazionale è notevole, hanno valori di DMP vicini a quelli delle savane tropicali più settentrionali.

È possibile che l’influenza della copertura nuvolosa nell’area a ridosso del Golfo di Guinea, particolarmente persistente a quelle latitudini, non permette di avere prodotti satellitari affidabili (Boschetti et al., 2008). Questo dato conferma che il monitoraggio per le risorse naturali in Africa occidentale trova più facile applicazione nelle regioni più settentrionali a ridosso del Sahara. Secondo le stime RFE, le precipitazioni medie in Senegal sono comprese tra i 350 e i 550 mm all’anno, un dato tipico per le zone della fascia saheliana più meridionale (Geesing, Djibo, 2001) mentre i dati pluviometrici nigerini presentano una maggiore variabilità a causa della maggiore estensione longitudinale dell’area di studio e variano da 200 mm a nord (l’apporto minimo per lo sviluppo pascolivo) e 550 mm a sud (limite superiore della steppa Sudaniana).

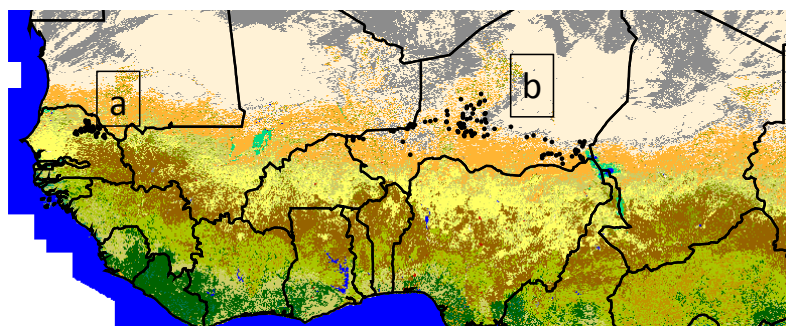


Figura 5 – Mappa di GlobCover dell’Africa occidentale. In nero figura l’ubicazione dei siti di misura senegalesi (a) e nigerini (b).

GC_code	Descrizione	DMP [kg/ha]
11	Post-flooding or irrigated croplands	4007
14	Rainfed croplands	2267
20	Mosaic cropland (50-70%) / vegetation (grassland/shrubland/forest) (20-50%)	5807
32	Mosaic vegetation (grassland/shrubland/forest) (50-70%) / cropland (20-50%)	4243
41	Closed to open (>15%) broadleaved evergreen or semi-deciduous forest (>5m)	5203
50	Closed (>40%) broadleaved deciduous forest (>5m)	2899
60	Open (15-40%) broadleaved deciduous forest/woodland (>5m)	7774
70	Closed (>40%) needleleaved evergreen forest (>5m)	3990
110	Mosaic forest or shrubland (50-70%) / grassland (20-50%)	4388
120	Mosaic grassland (50-70%) / forest or shrubland (20-50%)	8711
136	Closed to open (>15%) shrubland (<5m)	3431
144	Closed to open (>15%) herbaceous vegetation	2085
151	Sparse (<15%) vegetation	839
162	Closed to open (>15%) broadleaved forest regularly flooded	8515
170	Closed (>40%) broadleaved forest or shrubland permanently flooded	3800
180	Closed to open (>15%) grassland or woody on regularly flooded soil	3468
190	Artificial surfaces and associated areas (Urban areas >50%)	2245
203	Bare areas	240
210	Water bodies	23

Figura 6 – Media di DMP[hg/ha]tra il 199 e il 2009 per la classi di GlobCover in africa occidentale.

Le statistiche descrittive dei dati di campo ed il corrispettivo DMP, sono riportate in Figura 7. Anche i valori di biomassa campionati risultano comparabili con i valori riportati in letteratura. Tra questi Tucker et al. (1985), riporta che la produzione annua di biomassa nel nord del Senegal varia tra i 55 ei 1093 kg/ha, e Campbell e Stafford (2000) indicano che la produzione media in pascolo Saheliano è compresa tra 500 e 2500 kg/ha annui. Infine, Coulibaly (2001) in un rapporto edito dalla FAO, dichiara che nelle savane saheliane le aree con maggiore performance hanno una produttività media che varia da nord a sud tra 1000 e 2000 kg/ha.

Niger (n=546)	DMP [kg/ha]	Biomassa totale [kg/ha]	
mean	815	699	
st.dev	503	486	
mode	735	600	
min	59	17	
max	2822	2717	
Senegal (n=139)	DMP [kg/ha]	Biomassa totale [kg/ha]	Biomassa erbacea [kg/ha]
mean	3046	2158	1059
st.dev	1175	1180	575
mode	2846	1890	918
min	1111	323	109
max	6247	6028	2767

Figura 7 – Statistiche descrittive delle misure di campo e dei dati satellitari espresse in chilogrammi per ettaro [kg/ha]. Tra parentesi il numero di siti disponibili per il Niger e Senegal.

Nel caso del Senegal, il dataset fornito ha permesso la partizione della biomassa misurata nelle componenti erbacea e arbustiva, in Figura 7 i valori di biomassa totale tengono conto del contributo della componente arboreo-arbustiva e di quella erbacea. Tra le due componenti quest'ultima è indubbiamente la più importante per il sostentamento della pastorizia (gli arbusti vengono saltuariamente utilizzati come foraggio solo nei periodi di siccità) e per questo mostrata separatamente. I dati di produzione erbacea nigerini risultano di due volte inferiori a quelli senegalesi a causa dell'ubicazione meridionale (quindi con maggiori precipitazioni) di questi ultimi. Infatti prendendo in considerazione solo i siti nigerini meridionali la loro produzione media si avvicina molto a quella del dataset senegalese.

Per quanto riguarda il DMP, i valori delle statistiche descrittive per il Niger sono dello stesso ordine di grandezza dei dati di campo, con un minimo di zero (aree di suolo nudo) e un massimo di 2822 kg/ha (equivalente ad un pascolo con una produttività elevata). Diversamente i valori stimati DMP in corrispondenza dei siti senegalesi è volte significativamente superiore rispetto ai dati di campo (sia erbacei e arbustivi).

Una volta visualizzata la statistica dei dataset si è indagata la correlazione tra i dati, come mostrato in Figura 8. La sovrastima del DMP in Senegal è confermata dai valori negativi di CRM. Il DMP sovrastima anche in Niger (CRM <0) ma in misura decisamente minore essendo CRM vicino al valore ottimale che è zero.

Il valore negativo di EF in Niger indica che una semplice regressione lineare tra i dati di campo e le stime rappresenta uno stimatore migliore della biomassa rispetto al modello DMP, ma si tratta di un dato da prendere con cautela poiché questo indice risulta essere molto sensibile anche a singoli errori di misura. Vale a dire che anche un modello molto accurato che restituisce un solo valore molto lontano dal misurato risulterà avere un valore di EF inferiore a zero. Nel caso specifico è possibile che un dato di campo equivalente a zero raccolto subito dopo il passaggio di una mandria ma in una zona dove la vegetazione si era sviluppata per tutti i mesi precedenti (risultando quindi in un alto valore di DMP) abbia inficiato sull'output di questo indice.

Parametri	RRMSE	EF	CRM	R ²	Significatività ^α
Range	[0, +∞]	[-∞,1]	[-∞,+∞]	[0, 1]	NS
Best	0	1	0	1	***
Niger	72.7	-0.1	-0.2	0.2	***
Senegal (a)	209.7	0.0	-1.9	0.3	***
Senegal (b)	81.1	0.0	-0.4	0,0	NS

^α *** < 0.001; ** < 0.01; * < 0.05; NS non significativa;

Figura 8 – Correlazione tra i dati misurati e la stima satellitare. Per il Senegal (a) è il dato di biomassa erbacea, (b) di biomassa totale. In grassetto i valori migliori.

Il coefficiente di determinazione R² mostra che non vi è alcuna correlazione tra le stime e le misurazioni della biomassa totale raccolta in Senegal, tuttavia la correlazione aumenta quando si considera unicamente la componente erbacea, tanto che in questo caso la correlazione risulta avere una alta significatività. Questo risultato ci ha suggerito di incorporare la componente arbustiva/arborea dalle analisi condotte successivamente, in quanto non correlato con le stime del DMP.

L'ampia variabilità dei dati mostrata dalla deviazione standard in Figura 7 e la bassa correlazione mostrata da R² hanno suggerito di condurre una analisi della covarianza (ANCOVA) in modo da poter introdurre nel modello di regressione delle variabili categoriche di interesse per lo sviluppo dei pascoli.

I risultati riguardanti il Niger mostrano che la variabile categorica ‘sito’, che indica la diversa ubicazione dei siti di misura, dà un contributo significativo nello spiegare la varianza della regressione tra dati stimati e misurati (d.f. = 176 / 369, $F = 4.263$, $***P < 0.001$). La correlazione tra i dati è inoltre influenzata in maniera statisticamente significativa dalla variabile ‘anno’, che indica la variabilità inter-annuale (d.f. = 21/524, $F = 17.29$, $***P < 0.01$) e dalle precipitazioni (d.f. = 11/534, $F = 23.16$, $***P < 0.01$).

Tra i vari fattori considerati, nessuno ha un effetto significativo sul modello di regressione in Senegal. Poiché i dati senegalesi coprono un’area più piccola rispetto a quelli del Niger (Figura 1), è probabile che la variabilità spaziale non sia tale da risultare in una significatività nell’analisi dell’ANCOVA. Per un motivo simile il fattore temporale (‘anno’) non ha alcuna influenza, poiché il set di dati copre solo cinque anni, mentre in Niger 11.

	fattori:	sito α	anno α	land cover α	isoieta α
Niger	Significatività	***	***	NS	***
	R ²	0.67	0.41	-	0.32
Senegal	Significatività	NS	NS	NS	NS
	R ²	-	-	-	-

α *** < 0.001; ** < 0.01; * < 0.05; NS non significativa;

Figura 9 – Test dell’ANCOVA. In grassetto i valori significativi.

La significatività delle piogge nella regressione tra i dati di campo e il DMP in Niger conferma l’importanza delle precipitazioni nello studio delle risorse naturali nell’area saheliana. I grafici in Figura 10 mostrano come varia la bontà della stima del DMP a seconda dell’isoieta. Le zone dove mediamente piove di meno hanno una maggiore correlazione ($R^2 = 0.6$) anche se presentano una sottostima del dato simulato rispetto al misurato. Viceversa, per le altre isoiete, oltre a diminuire la correlazione ad aumentare la dispersione dei dati, si osserva una sovrastima del DMP. Questo risultato conferma quanto osservato dall’ indice CRM. L’ultima isoietta (450-500 mm) coprende un solo sito di misura, con sette dati in totale, e può essere considerata un outlier.

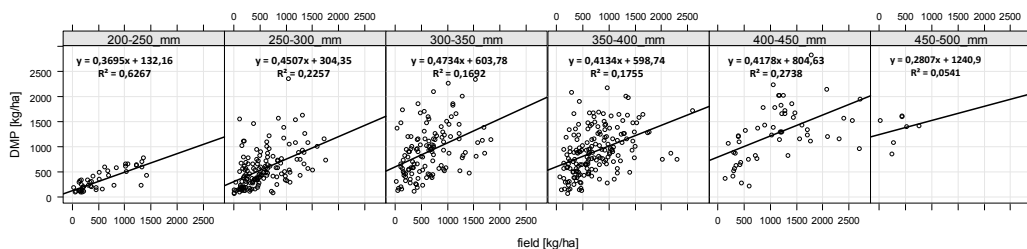


Figura 10 – Correlazione tra i dati misurati e DMP in Niger per le diverse isoiete.

La significatività degli altri due fattori nella correlazione tra i dati nigerini, i siti e gli anni, sono semplicemente un altro punto di vista per osservare la significatività delle piogge. Infatti i siti con maggiore correlazione sono quelli situati più a nord e gli anni in cui è maggiore la correlazione tra i dati sono quelli in cui è più alta la presenza di siti settentrionali.

Conclusioni

Questo lavoro è stato focalizzato sullo studio dei pascoli del Sahel, con la finalità di valutare l’affidabilità del Dry Matter Productivity (DMP) in una regione semi-arida caratterizzata da ampie variazioni climatiche e problemi di insicurezza alimentare. La visualizzazione delle medie di DMP per il periodo di interesse ed il confronto con una carta tematica di uso del suolo mostra come

globalmente la stima del DMP inquadra quelle che sono le produzioni di biomassa in Africa occidentale, con la differenza delle regioni tropicali dove la copertura nuvolosa inficia l'affidabilità delle misurazioni satellitari. Nel dettaglio, l'analisi statistica si è concentrata su due aree test, in Senegal e Niger, dove sono disponibili le misurazioni di campo della biomassa vegetale. L'accordo tra i dati di campo e le stime di DMP è piuttosto basso ($R^2 < 0,3$) ed è stata messa in evidenza una assenza di correlazione nell'area test senegalese in cui al termine della stagione delle piogge sono state campionate sia la biomassa erbacea che l'arbustiva/arborea. Tuttavia scorrendo quest'ultima componente dall'analisi di correlazione e tenendo conto unicamente della produzione erbacea la correlazione risulta significativa. Questa osservazione sottolinea la necessità di conoscere quale tipo di biomassa viene "osservata" e stimata dal satellite e trova conferma in Tucker et al. (1985) il quale affermò che il monitoraggio della produzione di biomassa pascoliva nel Senegal settentrionale è possibile solo dove la copertura arborea è inferiore al 10%.

L'analisi dell'ANCOVA sottolinea che il modello implementato da VITO può essere migliorato appositamente per le regioni saheliane, includendo parametri empirici dipendenti dalla disponibilità idrica e delle caratteristiche vegetazionali (componenti erbacee e arbustive).

In conclusione, il prodotto satellitare *Dry Matter Productivity* può sicuramente essere un'utile strumento di supporto al monitoraggio delle risorse naturali in un'area problematica come quella saheliana in cui sono carenti le informazioni locali.

Bibliografia

- Anyamba A., Tucker C.J. (2005), " Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003", *Journal of Arid Environments* 63 (3), 596-614
- Boschetti M., Stroppiana D., Brivio P.A., Combal B. and Batholomé E. (2008), "La qualità delle osservazioni nelle analisi di serie temporali di dati NDVI a scala regionale in Africa". Atti 13a Conferenza Nazionale ASITA, 1 – 4 dicembre 2009, Fiera del Levante Bari Arino, O., Gross, D., Ranera, F., Bourg, L., Leroy, M., Bicheron, P., Latham, J., Di Gregorio, A., Brockman, C., Witt, R., Defourny, P., Vancutsem, C., Herold, M., Sambale, J., Achard, F., Durieux, L., Plummer, S., Weber, J.L., GlobCover. ESA service for global land cover from MERIS. [IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium], IGARSS 2007, pp. 2412-2415, Barcelona, Spain
- Campbell B.D., & Stafford Smith D.M. (2000) , "A synthesis of recent global change research on pasture and rangeland production: reduced uncertainties and their management implications", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82, 39-55.
- Combal B., Bartholomé E., Brivio P.A., Boschetti M., Stroppiana D., Martini, M. (2010), "The NARMA-geoland2 e-station an Earth Observation based decision support system tool for real time environmental monitoring in Africa", ISPRS GI4DM, Torino (Italy), 2-4 February 2010, CD, ISBN 978-88-903132-3-3.
- Coulibaly A. (2001), "Country pasture profiles. Pasture Profile for Mali", See: <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Counprof/Mali/mali.htm> last access 2011.
- ECOWAS-SWAC, (2006), *The Ecologically vulnerable zone of Sahelian countries*. Atlas on Regional Integration in West Africa, <http://www.oecd.org/dataoecd/41/49/38409502.pdf>.
- Fensholt R., Rasmussen, K. (2011), "Analysis of trends in the Sahelian 'rain-use efficiency' using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data", *Remote Sensing of Environment*, 115, 438-451.
- Fensholt R., Sandholt I., Stisen S. (2006), "Evaluating MODIS, MERIS, and Vegetation - vegetation indices using in situ measurements in a semiarid environment" *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (44), 1774-1786.
- Geesing D., Djibo H. (2001), "Country pasture profiles. Pasture Profile for Niger", See: <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Counprof/niger.htm>. last access 2011.
- Giannini A., Biasutti M., Verstraete M.M. (2008), A climate model-based review of drought in the Sahel: Desertification, the re-greening and climate change. *Global and Planetary Change* 64, 119-128.

- Haas E.M. (2010), *Temporal water bodies as ecological indicators in West African drylands*, Phd thesis Université Catholique de Louvain, Belgium.
- Hein L., de Ridder N. , Hiernaux P., Leemans R. , de Witd A. , Schaepman M. (2011), "Desertification in the Sahel: Towards better accounting for ecosystem dynamics in the interpretation of remote sensing images", *Journal of Arid Environments*, 75 1164-1172.
- Herrmann S.M., Anyamba A. (2005), "Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate", *Global Environmental Change Part A* 15(4), 394-404.
- Heumann B.W., Seaquist J.W., Eklundh L., Jönsson P. (2007), "AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982-2005", *Remote Sensing of Environment* 108, 385-392.
- Huber S., Fensholt R., Rasmussen K. (2011), "Water availability as the driver of vegetation dynamics in the African Sahel from 1982 to 2007", *Global and Planetary Change*, 76, 186-195.
- Lamprey H.F. (1988), "Report on desert encroachment reconnaissance in Northern Sudan: 21 October to 10 November 1975", *Desertification Control Bulletin* 17, 1-7.
- Loague K.M., Green, R.E. (1991), "Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application", *J. Contam. Hydrol.* (7), 51-73.
- Monteith J.L. (1972), "Solar radiation and productivity in tropical ecosystems", *Journal of Applied Ecology*, (9), 747-766.
- Nicholson S.E., Grist J.P. (2001), "A conceptual model for understanding rainfall variability in the West African Sahel on interannual and interdecadal timescales", *International Journal of Climatology* 21, 1733-1757.
- Olsson L., Eklundh L., Ardö J. (2005), "A recent greening of the Sahel: trends, patterns and potential causes". *Journal of Arid Environments* 63, 556-566.
- Sala S. (2011), "Information methods and technologies for climate change adaption and food security in south asia and Sahel", Doctoral thesis Department of Crop Production, Faculty of Agriculture, Milan, Italy
- Sall, M.M. (2000), *Les atlas de l'Afrique—Sénégal*, Les Editions J.A., Paris, France.
- Seaquist J.W., Hickler T., Eklundh L., Ardo J., Heumann, B.W. (2009), "Disentangling the effects of climate and people on Sahel vegetation dynamics", *Biogeosciences*, 6, 469-477.
- Tucker C.J., Vanpraet C.L., Sharman M.J., Van Ittersum G. (1985), "Satellite Remote Sensing of Total Herbaceous Biomass Production in the Senegalese Sahel: 1980-1984", *Remote Sensing of Environment*, 17, 233-249.