

Valutazione del contributo delle stime satellitari di *evaporative fraction* nello studio della produzione dei pascoli in ambienti semiaridi

Francesco Nutini (*,**), Mirco Boschetti (*), Davide Cinquanta (**), Gabriele Candiani (*),
Alberto Crema (*), Stefano Bocchi (**), Pietro Alessandro Brivio (*)

(*) CNR-IREA, Via Bassini 15, 20133 Milano, 02-23699459, antoninetti.m@irea.cnr.it

(**) Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Produzione Vegetale, Via Celoria 2, 20133 Milano.

Riassunto

Da quando le prime immagini satellitari multispettrali sono state rese disponibili, queste sono state utilizzate per ottenerne *proxy* di variabili biofisiche di interesse agro-ambientale per lo studio di aree, come le regioni marginali semi-aride, dove le informazioni di campo sono difficilmente reperibili o le poche acquisibili non sono in grado di dare una rappresentazione della reale variabilità spatio-temporale dei fenomeni. Recenti lavori svolti su dati acquisiti da stazioni di *eddy covariance* in zone semi-aride hanno mostrato come l'*evaporative fraction* (EF), componente fondamentale per la risoluzione del bilancio energetico usata nella stima dell'evapotraspirazione, possa essere un buon indicatore dello stato idrico, utile nei modelli di stima della biomassa con dati remoti. In letteratura viene diffusamente proposto di sfruttare la relazione tra albedo e temperatura, stimati da telerilevamento, nel descrivere il contrasto tra aree umide e aride per risolvere l'equazione di stima dell'EF. A partire da queste osservazioni il presente lavoro intende testare l'utilizzo di prodotti MODIS, MOD43B3 e MOD11A2 rispettivamente per dati di albedo e temperatura, per stimare l'EF e valutarne l'utilità come contributo per la stima della biomassa pascoliva. L'area oggetto di studio è la fascia saheliana del Niger (Africa Occidentale) dove sono disponibili mappe di uso del suolo ad alta risoluzione e dati di produzione di biomassa pascoliva per 92 siti di misura lungo 12 anni (1998-2009). Stime di EF sono state prodotte per gli anni 2000-2009, i pattern spatio-temporali delle mappe sono stati valutati analizzando grazie a mappe di *Eco-Regions*. Infine, il contributo dell'EF stimato nella stima di biomassa pascoliva è stato valutato riscaldando il prodotto operativo *Dry Matter Productivity* (DMP) di GMES. I risultati dimostrano come le stime di EF da MODIS mostrino pattern di significato ecologico in funzione delle differenti coperture e siano correlate alla distribuzione spatio-temporale delle piogge. Inoltre, l'uso di EF come indicatore dello stato idrico ha permesso di produrre un miglior descrittore della biomassa pascoliva come da confronto con dati di campo. Tali promettenti risultati delineano la possibilità di produrre operativamente mappe di biomassa pascoliva in aree semi-aride.

Abstract

Rangeland monitoring services requires the capability to investigate vegetation behavior and to assess biomass production, especially in area where local livelihood depends on rangeland status. Remote sensing solution are strongly recommended where systematic acquisition of field data is not feasible and does not guarantee to properly describe wide areas spatio-temporal dynamics. Recent research works on semi-arid rangelands have focused their attention on the estimation of Evaporative Fraction (EF), a key factor in the Energy Balance algorithm adopted to estimate actual ecosystem evapotranspiration, since it is strongly linked to the vegetation water status. Water availability is in fact the major limiting factor of vegetation growing in semi-arid areas. Some works, conducted on eddy covariance stations, proposed to use EF to increase the performances of

biomass estimation via remote sensing. In this paper a method for estimating EF from low resolution satellite MODIS product of albedo (MOD43B3) and land surface temperature (MOD11A2), is tested and the contribution of EF in biomass estimation is discussed. The study area is located in the Sahelian region of Niger, where field measurements of savannah biomass over 92 sites for the period 1998-2009 are available. Results show that the EF estimation from low resolution remote sensing data is feasible and that the spatial and intra-annual dynamic of EF maps are in agreement with rainfall patterns, estimated using the FEWSNET-RFE data, and with the expected behaviors of different eco-regions. Moreover, preliminary analysis revealed that the use of EF as water stress indicator significantly improve the remote sensed Dry Matter Productivity (DMP) estimation. The adapted model outputs resulted more correlated to field data demonstrating that biomass monitoring from remote sensing over wide semi-arid is possible.

Introduzione

Area di interesse è la regione Saheliana, situata tra il deserto del Sahara a nord e le savane subtropicali a sud. La regione è caratterizzata da una elevata variabilità climatica stagionale, in cui le produzioni vegetali e le conseguenti attività di pastorizia transumante dipendono dalla breve stagione delle piogge tra Giugno e Ottobre. L'area è anche caratterizzata da una elevata variabilità climatica tra le annate (Tucker & Nicholson, 1999), tale instabilità rende l'intero sistema estremamente fragile e le capacità di sussistenza delle popolazioni estremamente dipendenti dall'imprevedibile andamento della stagione delle piogge.

La criticità del sistema ha stimolato lo sviluppo di diversi sistemami di monitoraggio prodotti da organizzazioni internazionali (UE-ARMA, FAO, US-AID) con lo scopo di fornire informazioni spazializzate sulle aree soggette a criticità o che andranno in stress nel corso della stagione. I bollettini periodici, forniscono informazioni per facilitare le autorità locali nell'attuare attività di contrasto alle crisi alimentari o di pianificazione attività in aree che mostrano criticità croniche. Tali informazioni fornite da questi bollettini necessitano di essere completati con le nuove evidenze risultanti dalle ricerche scientifiche per fornire informazioni più accurate sullo stato e sulle produzioni vegetazionali. In questo contesto, riveste particolare importanza nei programmi di monitoraggio la capacità di stimare su larga scala la biomassa vegetale presente al suolo per fornire un quadro della *carry capacity* dei sistemi naturali e quindi della sostenibilità delle attività umane che su queste risorse naturali sussistono.

Recentemente, diversi lavori scientifici volti alla stima della biomassa in corrispondenza di stazioni *eddy covariance* hanno proposto l'utilizzo dell'*Evaporative Fraction* (EF) come indice di stress idrico per correggere stime di produzione vegetale. Questi lavori effettuati su stazioni *eddy* in nord-America (Yuan et al., 2007) e nelle savane del nord Australia (Kanniah et al., 2009) sono stati recentemente testati anche nella regione saheliana (Sjöström et al., 2011). I risultati di questi lavori mostrano come l'EF sia in grado di aumentare la capacità di un modello di *Radiation Use Efficiency* di stimare la produzione degli ecosistemi vegetali. L'EF è una componente fondamentale per il calcolo dell'evapotraspirazione nell'equazione del bilancio energetico, e rappresenta il rapporto tra il flusso di calore latente e l'ammontare dell'energia arrivata alla pianta (Bastiaanssen et al., 1998). Questa variabile, legata alle condizioni di umidità al suolo, può anche essere stimata da remoto sfruttando la relazione tra temperature superficiale e albedo, in grado di descrivere la diversità tra aree umide e secche (Bastiaanssen et al., 1998; G.J Roerink et al., 2000). Scopo del presente lavoro è quindi di stimare da remoto l'*Evaporative Fraction* come indicatore della disponibilità idrica e valutare la possibilità di sfruttare questa variabile per incrementare l'accuratezza di un modello operativo di stima della biomassa.

Area studio e dati di campo

L'area di studio del lavoro è rappresentata dalle zone pascolive del Niger, consistente in una fascia che si estende per 1400 km chilometri da est a ovest compresa tra le isoiete di 200 mm a nord e 500 mm a sud. In questa regione si concentrano le attività di pastorizia transumante, mentre le attività

agricole sono collocate unicamente in aree con condizioni pedoclimatiche particolarmente favorevoli e solitamente prossime ai corsi d'acqua. In questa area sono disponibili dati di biomassa della savana erbacea raccolti 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 che va dal 1998 al 2009 su 92 siti (Figura 1); in media, considerando tutti i siti, sono disponibili circa 50 misure per ogni anno.

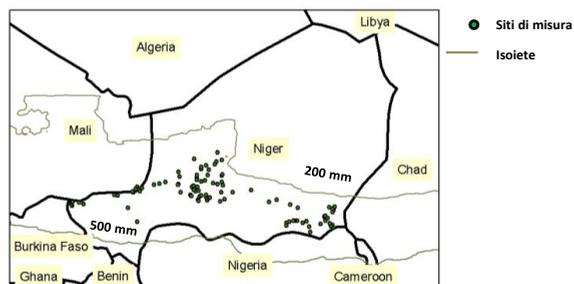


Figura 1. Area di studio (Niger) ove sono compresi i siti di misura di biomassa pascoliva.

Dati remoti

Prodotto di stima della biomassa - DMP

Il prodotto satellitare *Dry Matter Productivity* (DMP) stima il tasso di crescita della biomassa secca ed è espresso in chilogrammi di sostanza secca (kg DM) per ettaro per giorno. Questo prodotto è stato implementato presso il *Flemish Institute for Technological Research* (VITO), in Belgio, e formalizza il modello proposto da Monteith (1977), secondo il quale la quantità di biomassa vegetale prodotta in un intervallo di tempo è data dalla quantità di radiazione fotosinteticamente attiva intercettata dalla pianta, dall'efficienza d'uso della radiazione, *Radiation Use Efficiency* (RUE) considerando fattori di limitazione legati a condizioni non ottimali.

Nella sua attuale formulazione il DMP viene calcolato secondo l'equazione 1:

$$DMP_d = (0.45 \times Rad_d) \times fAPAR_d \times \varepsilon^* \times Tlim_d \quad [1]$$

dove

- DMP (Kg ha⁻²) è la biomassa secca totale prodotta nell'unità di tempo d (decade)
- ε^* è il massimo valore potenziale di RUE (Kg MJ⁻¹) non affetto da fattori limitanti
- Rad_d (MJ m⁻² day⁻¹) è la radiazione solare globale che moltiplicata per 0.45 fornisce una buona approssimazione della PAR (Photosynthetic Active Radiation, 400 - 700 nm) incidente;
- $fAPAR_d$ è il valore della frazione di PAR assorbita derivata dal sensore SPOT-VGT;
- $Tlim_d$ rappresenta il valore del fattore di limitazione per condizioni di temperature non ottimali.

I dati utilizzati e relativi al periodo tra il 2000 e il 2009 sono disponibili ad una risoluzione temporale decadale (10 giorni) e una risoluzione spaziale di 1x1 km per un totale di 360 immagini. I dati sono stati forniti dal progetto Geoland2-NARMA (Nutini et al., 2011).

Albedo e temperatura per la stima di EF

I dati necessari per la stima da remoto dell'EF sono stati ottenuti da prodotti MODIS. I prodotti di albedo (MCD43B3) e temperatura (MOD11A2) sono stati acquisiti per il periodo 2000-2009 sui due *tile* (h18v07 e h19v07) che permettono di coprire l'intera area interessata dai campionamenti al suolo per un totale di 920 (46 immagini anno * 10 anni * 2 data set) *8-days composite images*. Entrambi questi dati hanno la medesima risoluzione spaziale di 1x1 km e sono stati scaricati dal servizio EarthExplorer (earthexplorer.usgs.gov) dell'*U.S. Geological Survey*.

Dati ancillari: RFE e mappe tematiche

I dati pluviometrici RFE (*RainFall Estimate*) sono stati derivati dal *Famine Early Warning System Network* (FEWSNET) della *United States Agency for International Development* (USAID). Sono disponibili ad una risoluzione spaziale di 8 km, ricampionata a 1 km, e risoluzione temporale di 10 giorni a partire dal 1996. Attualmente rappresentano il dataset pluviometrico più accurato per questa area di studio. Inoltre è stato utilizzato il prodotto cartografico *Ecoregion* (Olson et al., 2001) disponibile presso il sito <http://worldwildlife.org/publications/terrestrial-ecoregions-of-the-world> per distinguere differenti regioni in termini di copertura vegetale e clima – Eco-Regioni.

Metodi

Stima dell'Evaporative Fraction

Le stime di *Evaporative Fraction* sono state ottenute in base alla relazione albedo-temperatura secondo le indicazioni metodologiche presenti in letteratura (Galleguillos et al., 2011; Sobrino et al., 2007; Verstraeten et al., 2005). Del prodotto di albedo (MCD43B3) è stato utilizzato il *layer* informativo di *black-sky* rappresentante la riflettanza emisferica, mentre per il prodotto di temperatura (MOD11A2) è stato utilizzato il *layer* relativo alla *Land Surface Temperature* (LST) ovvero di temperatura superficiale. Per ognuna delle date in cui entrambi i dati sono disponibili è stato formato un correlogramma tra le variabili di albedo e temperatura, in cui ogni punto del grafico rappresenta un pixel con le sue informazioni di stato termico e di albedo (Figura 2).

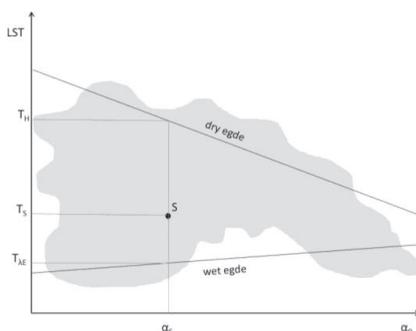


Figura 2. Correlogramma tra albedo e temperature per una data. S rappresenta un pixel con le relative intercette sulle rette dry e wet edge. TH e TAE rappresentano i valori utilizzati nel calcolo dell'EF secondo l'equazione [3] ($n \sim 1440000$).

Da questo calcolo sono stati eliminati i valori nulli di temperatura e albedo come indicato nelle descrizioni dei due prodotti (rispettivamente con valori pari 0 e 32767). I valori di albedo sono stati suddivisi in classi (Sturges, 1926) e per ogni classe sono stati calcolati i valori massimi e minimi di temperatura. Sulla serie di valori massimi di temperatura e minimi di albedo sono state poi estrapolate le rette che costituiscono il *dry edge* e *wet edge*:

$$\text{dry edge: } T_H = m_{dry} \alpha_0 + q_{dry} \quad [2]$$

$$\text{wet edge: } T_{AE} = m_{wet} \alpha_0 + q_{wet} \quad [3]$$

dove m e q rappresentano i parametri delle due rette.

Per il calcolo del *dry edge* non sono stati presi in considerazione i pixel per quelle classi di albedo che indicano una situazione così detta di "*evaporation controlled*" (Gomez et al., 2005; Mallick et al., 2009), scegliendo come valore soglia di albedo 0.2 (Galleguillos et al., 2011).

La definizione delle due rette permette di calcolare l'EF per ogni pixel in base alla seguente formula:

$$EF \approx \frac{T_H - T_S}{T_H - T_{\lambda E}} \quad [4]$$

in cui T_S è la temperatura del pixel, T_H e $T_{\lambda E}$ le temperature in corrispondenza rispettivamente delle intercette con le rette di *dry edge* e *wet edge*. Esplicitando i termini che derivano dall'equazione delle rette ne deriva:

$$EF = \frac{(m_{dry}\alpha_0 + q_{dry}) - T_S}{(m_{dry}\alpha_0 + q_{dry}) - (m_{wet}\alpha_0 + q_{wet})} \quad [5]$$

dove T_H e $T_{\lambda E}$ dipendono dall'equazione delle due rette a seconda del valore assunto dalla variabile indipendente nota (la temperatura del pixel T_S). Il procedimento, automatizzato scrivendo un opportuno codice in IDL versione 8.2 (<http://www.exelisvis.com>), è stato applicato iterativamente per ogni data e per entrambi i *tile* MODIS di interesse, successivamente mosaicati insieme.

Valutazione dell'EF e implementazione della stima di biomassa

Le stime di EF dal 2000 al 2009 sono state valutate nei suoi pattern spaziali e temporali per le maggiori ecoregioni presenti nell'area di studio con lo scopo di verificare che la variabile stimata mostri andamenti con opportuno significato ecologico. Le stime di EF, una volta valutate, sono state utilizzate per modificare il prodotto di DMP introducendo un ulteriore fattore limitante in grado di descrivere la disponibilità idrica. Le sommatorie mensili di DMP sono state moltiplicate per le medie mensili pesate di EF, permettendo così di correggere stime mensili di produzione di biomassa per quello che è stato lo stato idrico medio del pixel nel medesimo periodo. Per il calcolo della media mensile, il peso di ogni stima di EF è stato dedotto dal *layer* informativo dei *Quality Flag* del prodotto MODIS di temperatura (MOD11A2) e quantificato in 3 livelli di qualità: Bit 00-alta, Bit 01 media, Bit 10 e 11 bassa.

Le serie temporali di stima della biomassa prodotte tenendo conto anche della disponibilità idrica sono state confrontate con produzioni annuali di biomassa campionate a terra. Essendo il dato di stima della biomassa prodotto per ogni mese, questo è stato cumulato nel periodo delle piogge, che nella fascia saheliana va da Luglio a Ottobre, per ottenere un valore stagionale.

Risultati e discussione

Le stime di EF, prima di essere utilizzate nella stima di biomassa, sono state valutate negli andamenti spaziali e temporali. I valori di EF variano tra 0 e 1 per le 448 immagini prodotte, come atteso. La Figura 4 mostra a titolo di esempio 4 mappe relative all'anno 2009, rappresentanti una data nella stagione secca (Figura 3a) e 3 date a inizio metà e fine della stagione umida (rispettivamente Figura 3b, Figura 3c e Figura 3d). Le mappe presentano diffuse condizioni di aridità nel periodo secco fatta eccezione per le savana subtropicali più meridionali (Figura 3a) ed alta disponibilità idrica nel periodo delle piogge (Figura 3b-d). Le aree situate oltre i 17° N, corrispondenti alle zone aride del Sahara, mostrano valori bassi di EF anche durante la stagione delle piogge ($EF < 0.5$). Le aree mascherate nella Figura 3c, rappresentano zone prive di dati a causa della copertura nuvolosa al momento dell'acquisizione del dato.

Le zone di savana circostanti il lago Chad, a est delle mappe, presentano alti valori di EF durante tutto l'anno ($EF > 0.7$), e sono circondate da aree che invece presentano una evidente stagionalità tra la stagione secca e quella umida. La presenza del lago Ciad, delle savane subtropicali e del Sahara fa sì che in ogni data processata siano presenti sia aree umide che completamente secche. Si tratta questa di una delle condizioni necessarie per l'applicazione della metodologia (Bastiaanssen et al., 1998; Gomez et al., 2005).

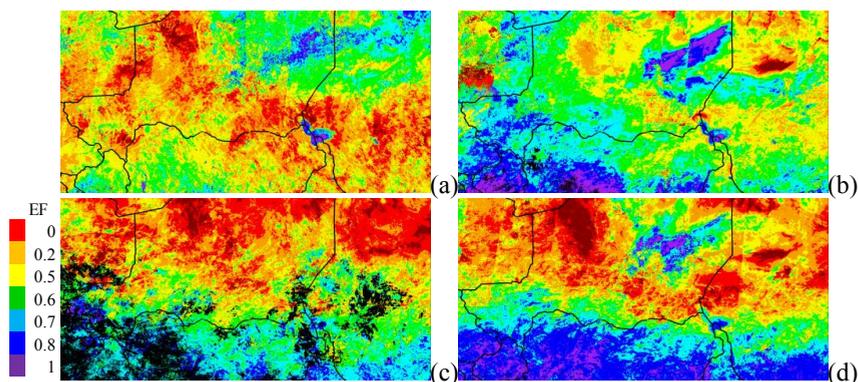


Figura 3. Selezione di 4 mappe di EF stimata per l'anno 2009, stagione secca-Marzo (a), inizio stagione delle piogge Luglio (b), piena stagione delle piogge-Agosto (c), fine stagione umida-Ottobre (d).

La mappa delle *Ecoregion* ha permesso di analizzare sistematicamente gli andamenti mensili dell'EF lungo 10 anni. I *boxplot* in Figura 4 mostrano che l'andamento dell'EF sulle zone di savana saheliana è coerente con quello delle piogge (Figura 4a), con valori che crescono nei mesi delle piogge (EF~0.5, Giugno-Agosto) per poi calare con la stagione secca (EF~0.3, Ottobre-Dicembre). Tra le *Ecoregion* di savana quelle più arborate, in cui mediamente piovono più di 900 mm all'anno (Figura 4b) presentano picchi di EF più elevati (EF=0.8). La zona del lago Ciad (Figura 4d) non mostra stagionalità a causa dell'effetto tampone del lago (EF perennemente superiore a 0.5) mentre le zone forestate tropicali (Figura 4c) mostrano una doppia stagionalità coerentemente con le piogge in quelle aree che si dividono in una breve stagione in Marzo ed una più prolungata tra settembre-ottobre (Boschetti et al., 2010).

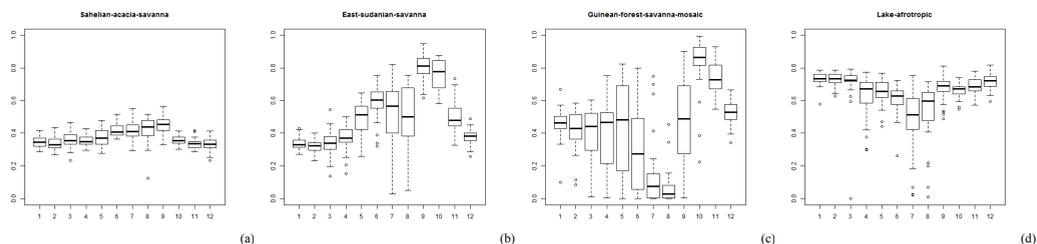


Figura 4. Statistica dell'andamento medio mensile di EF(2000-2009) per le 4 maggiori ecoregioni dell'area: savanna saheliana (a), savanna subtropicale (b), foreste tropicali (c), lago Chad (d).

Tra le *Ecoregion* analizzate quella di interesse per lo studio delle produzioni di biomassa pascoliva è la zona di "savanna saheliana" (Figura 4a). In questa sono compresi tutti i siti di misura resi disponibili. Dei 98 siti di misura sono stati esclusi quelli aventi unicamente misurazioni ove non sono disponibili dati MODIS (1998-1999), ottenendo quindi 87 siti riportanti produzioni annuali di biomassa pascoliva. Come mostrato in precedenti lavori (Nutini et al., 2011) le stime di DMP presentano valori assoluti nello stesso ordine di grandezza di quelli misurati.

Gli scatterogrammi in Figura 5 mostrano per 3 siti la correlazione tra le biomasse stimate da remoto, *DMP product* originale e con fattore di correzione, e i dati misurati. Questi mostrano un sito in cui il DMP è altamente correlato con 9 dati di campo ($r^2=0.7$, Lat 13.7 Lon 13.1, Figura 5a1), uno con correlazione media con 8 dati di campo ($r^2=0.5$, Lat 13.95 Lon12.77, Figura 5b1) ed uno in cui la stima non è correlata con i 7 campionamenti effettuati ($r^2=0.2$, Lat 14.7 Lon 0.62, Figura 5c1). Nei casi mostrati vi è un incremento generale da parte del modello di spiegare la

variabilità dei dati misurati in campo nel caso in cui le stime tengano conto del fattore di stress idrico. In particolare in Figura 5c si mostra un sito in cui la stima da remoto passa dal non essere correlata (Figura 5c1) ad avere correlazione significativa ($r^2=0.5$, Figura 5c2) con le biomasse campionate. In tutti i casi è ridotta la sovrastima del modello per annate scarsamente produttive, visualizzabile dalle intercette delle rette, in cui a dispetto di basse produzioni di biomassa (<200 kg/ha) la stima da remoto fornisce valori superiori ai 600 kg/ha (Figura 5a1 e b1). I risultati mostrati in questi siti campione sono generalizzati agli altri siti per i quali siano disponibili un numero sufficiente di dati di biomassa (>4), con incrementi di correlazioni sino al 20%.

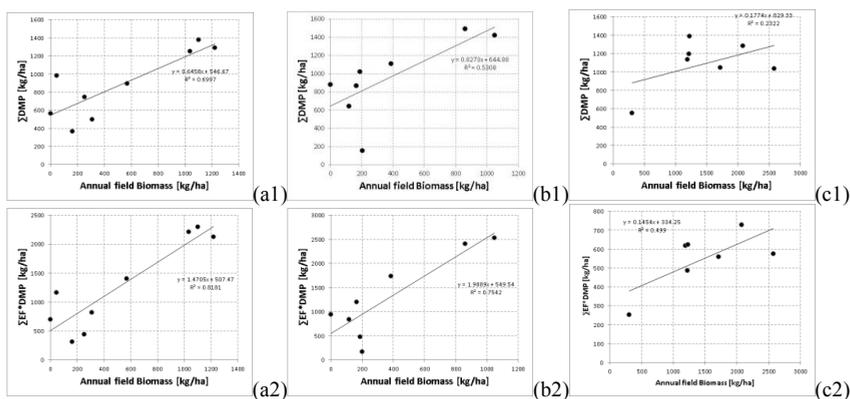


Figura 5. Correlazione tra produzioni annuali di biomassa e stime da remoto di DMP e DMP implementato con EF per un siti in cui il DMP ha alta (a), media (b) e nulla (c) correlazione tra le variabili.

Conclusioni

Il presente lavoro ha avuto come oggetto la stima, la valutazione e l'utilizzo di una variabile di disponibilità idrica, che su studi delle produzioni in corrispondenza di stazioni *eddy covariance* ha dimostrato di incrementare le capacità di stimare la biomassa prodotta da modellistica basata su dati telerilevati. La variabile dell'*Evaporative Fraction*, stimata seguendo la metodologia presente in letteratura basata sulla relazione tra albedo e temperatura superficiale, risulta avere andamenti spaziali e temporali con significato ecologico, differenti e coerenti con diversi eco-climi analizzati. I primi risultati condotti sull'utilizzo dell'EF come fattore di disponibilità idrica in un modello RUE ha mostrato l'incremento delle performance sito-specifiche della stima da remoto della biomassa. La motivazione risiede nel fatto che il DMP tiene conto degli stress tramite l'input dell'fAPAR, che mostra l'effetto degli stress solo sul lungo periodo. Viceversa l'EF, sensibile agli stress idrici istantanei, è in grado di dare informazioni precoci sugli stress in atto. Questi risultati mostrano che un modello di RUE implementato con l'EF è un miglior descrittore della biomassa pascoliva come da confronto con dati di campo e tali promettenti osservazioni delineano la possibilità di produrre operativamente mappe di biomassa pascoliva in aree semi-aride, come contributo a strumenti di monitoraggio delle produzioni pascolive.

Bibliografia

- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. a., & Holtslag, A. a. M. (1998). "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation", *Journal of Hydrology*, 212-213, 198–212.
- Boschetti, M., Nutini, F., Brivio, P. a., Bartholomè, E., & Stroppiana, D. (2010). "Contribution of earth observation data to Congo River basin hydrology understanding", *Proc. of SPIE* (Vol. 7824), 78241C–78241C–9.

- Galleguillos, M., Jacob, F., Prévot, L., French, A., & Lagacherie, P. (2011). "Comparison of two temperature differencing methods to estimate daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed from ASTER data". *Remote Sensing of Environment*, 115(6), 1326–1340.
- Gomez, M., Oliso, A., Sobrino, J., & Jacob, F. (2005). "Retrieval of evapotranspiration over the Alpillles/ReSeDA experimental site using airborne POLDER sensor and a thermal camera". *Remote Sensing of Environment*, 96(3-4), 399–408.
- Kanniah, K. D., Beringer, J., Hutley, L. B., Tapper, N. J., & Zhu, X. (2009). "Evaluation of Collections 4 and 5 of the MODIS Gross Primary Productivity product and algorithm improvement at a tropical savanna site in northern Australia". *Remote Sensing of Environment*, 113(9), 1808–1822.
- Mallick, K., Bhattacharya, B. K., Rao, V. U. M., Reddy, D. R., Banerjee, S., Venkatesh, H., Patel, N. K. (2009). "Latent heat flux estimation in clear sky days over Indian agroecosystems using noontime satellite remote sensing data". *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(10), 1646–1665.
- Monteith J.L. (1977) "Climate and crop efficiency of crop production in Britain", *Phil. Trans. Res. Soc. London Ser. B* 281: 277-329.
- Nutini, F., Stroppiana, D., Boschetti, M., Brivio, P. a., Bartholome, E., & Beye, G. (2011). "Evaluation of remotely sensed DMP product using multi-year field measurements of biomass in West Africa". In C. M. U. Neale & A. Maltese (Eds.), *Proc. of SPIE* (Vol. 8174, p. 81740V–81740V–9).
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., Kassem, K. R. (2001). "Terrestrial Ecoregions of the World : A New Map of Life", *Earth BioScience*, 51(11), 933–938.
- Roerink, G. ., Su, Z., & Menenti, M. (2000). "S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance", *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2), 147–157. doi:10.1016/S1464-1909(99)00128-8
- Sjöström, M., Ardö, J., Arneth, A., Boulain, N., Cappelaere, B., Eklundh, L., Nouvellon, Y. (2011). "Exploring the potential of MODIS EVI for modeling gross primary production across African ecosystems", *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 1081–1089.
- Sobrino, J. a., Gómez, M., Jiménez-Muñoz, J. C., & Oliso, A. (2007). "Application of a simple algorithm to estimate daily evapotranspiration from NOAA–AVHRR images for the Iberian Peninsula", *Remote Sensing of Environment*, 110(2), 139–148. doi:10.1016/j.rse.2007.02.017
- Sturges, H. (1926). "The choice of a class interval", *Journal of the American Statistical Association*, 21(153), 65–66.
- Tucker, C. J., & Nicholson, (1999). "Variations in the size of the Sahara Desert from 1980 to 1997", *Ambio*, 28(7), 587–591.
- Verstraeten, W. W., Veroustraete, F., Feyen, J. (2005). "Estimating evapotranspiration of European forests from NOAA-imagery at satellite overpass time: Towards an operational processing chain for integrated optical and thermal sensor data products", *Remote Sensing of Environment*, 96(2), 256–276. doi:10.1016/j.rse.2005.03.004
- Yuan, W., Liu, S., Zhou, G., Zhou, G., Tieszen, L. L., Baldocchi, D., Wofsy, S. C. (2007). "Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes", *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(3-4), 189–207.