

STIMA DELLA PRODUTTIVITÀ PRIMARIA LORDA A PARTIRE DA MISURE IPERSPETTRALI IN UNA RISAIA

Micol ROSSINI (*), Mirco MIGLIAVACCA (*), Michele MERONI (*), Giovanni MANCA (**),
Sergio COGLIATI (*), Lorenzo Busetto (*,***), Valentina PICCHI (****),
Roberto COLOMBO (*), Guenther SEUFERT (**)

(*) Lab. Telerilevamento delle Dinamiche Ambientali, DISAT, Università degli Studi di Milano-Bicocca,
piazza della Scienza 1, 20126 Milano, Italia. e-mail: micol.rossini@unimib.it

(**) Institute for Environment and Sustainability, Climate Change Unit, JRC, Ispra, Italia

(***) CNR, Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, Monterotondo Stazione (RM), Italia

(****) CNR, Istituto di Virologia Vegetale, Milano, Italia

Riassunto

In questo contributo sono presentati i risultati di un esperimento finalizzato al monitoraggio dei principali parametri biofisici e strutturali e degli scambi di CO₂ tra atmosfera ed un ecosistema terrestre (risaia) a partire da misure spettroradiometriche di prossimità ad elevata risoluzione spettrale.

Nell'estate 2007 è stata effettuata un'intensa campagna di misure in cui sono stati acquisiti dati relativi alle proprietà ottiche a livello di *canopy*, allo stadio fenologico di sviluppo del riso e misure dell'altezza delle piante e dell'indice di area fogliare (LAI).

I risultati ottenuti mostrano un'elevata correlazione tra indici ottici tradizionali (e.g. NDVI) e parametri biofisici della *canopy* (e.g. altezza delle piante, LAI).

L'utilizzo di indici spettrali innovativi legati a processi fisiologici quali l'attivazione di meccanismi di fotoprotezione e la dissipazione dell'energia in eccesso attraverso la fluorescenza indotta dal sole ha inoltre permesso la messa a punto di modelli semi-empirici tra misure radiometriche e produttività lorda di ecosistema (GEP, *Gross Ecosystem Production*). Questo risultato apre interessanti prospettive riguardo l'applicazione di questo tipo di tecniche per la stima spazializzata della produttività primaria lorda a partire da immagini iperspettrali aeree o satellitari.

Abstract

This paper shows the results obtained from an experiment aimed to monitor the main biophysical and structural parameters and the CO₂ exchanges between the atmosphere and a terrestrial ecosystem (rice field) from proximal high spectral resolution spectroradiometric measurements.

An intensive field campaign was conducted during summer 2007. Canopy optical properties, phenological stages of rice, plant heights and Leaf Area Index (LAI) were measured.

Results show high correlations between traditional optical indices (e.g. NDVI) and canopy biophysical parameters (e.g. plant heights, LAI).

Furthermore, the use of innovative spectral indices related to physiological processes such as the activation of photoprotective mechanisms and excess energy dissipation via sun-induced fluorescence allowed the development of semi-empirical models between radiometric measurements and Gross Ecosystem Production (GEP). This result opens up interesting perspectives related to the application of this kind of techniques for the spatialized estimation of gross primary production from aerial or spaceborne hyperspectral images.

Introduzione

Il telerilevamento ottico consente la misura a distanza delle proprietà ottiche della vegetazione, le quali variano in funzione delle sue caratteristiche biofisiche e dello stato fisiologico. In presenza di fattori di stress la vegetazione risponde mediante variazioni nelle caratteristiche biochimiche (concentrazione fogliare di pigmenti fotosintetici), strutturali (indice di area fogliare) e nei processi fisiologici (efficienza fotosintetica). Questo, a sua volta, comporta variazioni significative nelle proprietà ottiche della vegetazione (riflettanza e trasmittanza spettrale) che possono essere monitorate tramite osservazioni remote.

Il monitoraggio spaziale e temporale delle proprietà della vegetazione è un elemento chiave nella comprensione dei processi relativi al funzionamento della biosfera (per esempio il ciclo dell'acqua e del carbonio) e consente l'applicazione di modelli fisici ed ecologici che includono la vegetazione come componente dinamica.

Gli interessi di varie agenzie nazionali ed internazionali e gli sforzi compiuti nel misurare e studiare i processi legati al comportamento dinamico della vegetazione sono aumentati negli ultimi anni, anche a seguito dell'evidenza dei cambiamenti climatici in atto. Infatti, sia la composizione dell'atmosfera sia il clima sono influenzati dai processi che regolano gli scambi dei gas tra biosfera ed atmosfera e pertanto la comprensione dei processi di fotosintesi, respirazione ed evapotraspirazione della vegetazione è diventata di fondamentale importanza.

Tentativi di stimare la produttività primaria lorda da telerilevamento si basano sul modello "*light use efficiency*" (LUE, Monteith, 1972; 1977) in cui il tasso fotosintetico della vegetazione è espresso come il prodotto tra la radiazione fotosinteticamente attiva assorbita (APAR) e l'efficienza di conversione dell'energia assorbita (ϵ). L'APAR, determinata come prodotto della frazione di PAR assorbita (f_{APAR}) e della PAR incidente (PAR_i), rappresenta la quantità di energia luminosa assorbita dai pigmenti fogliari e quindi potenzialmente disponibile per i processi fotosintetici.

$$P = \epsilon \times f_{APAR} \times PAR_i = \epsilon \times APAR \quad [1]$$

dove, P è il carbonio fissato attraverso la fotosintesi, ϵ è l'efficienza di utilizzo della luce per fotosintesi, ossia l'efficienza con cui la radiazione assorbita viene convertita in biomassa (Monteith, 1977) e APAR è la PAR assorbita.

Dal punto di vista del telerilevamento, il modello LUE è molto promettente a causa della stretta relazione tra f_{APAR} e un indice di vegetazione ampiamente utilizzato, il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI, Rouse, Haas, 1973).

Sfortunatamente, NDVI può essere utilizzato per stimare la quantità di luce assorbita dalla pianta, ma non l'efficienza con cui la vegetazione la usa per fissare il carbonio. L'indice NDVI misura infatti la "*greenness*" della vegetazione ma non la fotosintesi stessa. Inoltre, il termine di efficienza nel modello LUE viene spesso assunto costante per tutti i tipi di vegetazione. Attualmente, numerose evidenze suggeriscono che l'efficienza con cui le piante fissano il carbonio possa variare al variare della specie e in risposta a cambiamenti delle condizioni ambientali.

L'obiettivo della presente ricerca è stato quindi l'utilizzo di metodi innovativi per la stima dell'efficienza fotosintetica da dati telerilevati, con particolare riferimento all'utilizzo di indici ottici innovativi quale il PRI (*Photochemical Reflectance Index*, Gamon et al., 1992) e la misura passiva della fluorescenza naturale della clorofilla (Plascyk, 1975).

Materiali e metodi

Lo studio è stato condotto in una risaia situata in provincia di Pavia. La risaia è un sito sperimentale dotato di una stazione micrometeorologica di misura degli scambi di CO₂ e H₂O attraverso la tecnica *eddy covariance* gestita dall'IES-JRC di Ispra.

La campagna di misura si è svolta nell'estate 2007 (23 aprile - 5 settembre). In ogni uscita di campo sono stati identificati lo stadio fenologico di sviluppo del riso mediante la scala BBCH (Biologische

Bundesanstalt, Bundessortenamt and CHEmical industry), l'altezza delle piante e l'indice di area fogliare (LAI).

Il LAI è stato misurato con una camera digitale (Nikon CoolPix) dotata di obiettivo *fisheye* orientata verso il basso. Le immagini sono state acquisite ad ogni data di campionamento in corrispondenza di 5 siti di misura. Tutte le fotografie sono state acquisite in condizioni di illuminazione omogenea per assicurare un buon contrasto tra *canopy* e suolo. Le immagini sono state analizzate in modo semi-automatico con il software Can_Eye 3.6 (http://www.avignon.inra.fr/can_eye/) per calcolare il valore di *gap fraction* a diversi angoli di vista zenitali e derivare le corrispondenti caratteristiche strutturali della *canopy* (LAI e angolo medio di inclinazione fogliare) (Jonckheere et al., 2004; Weiss et al., 2004).

L'altezza della *canopy* è stata determinata dalla media delle misure dell'altezza di 5 piante selezionate casualmente in ciascun sito di misura del LAI.

I flussi verticali turbolenti di CO₂, H₂O, calore latente e sensibile, sono stati misurati con la tecnica *eddy covariance*. I flussi di carbonio sono stati calcolati su un intervallo temporale di 30 minuti in accordo con la metodologia di EUROFLUX (Aubinet et al., 2000). I flussi di carbonio misurati con la tecnica *eddy covariance* rappresentano la produzione ecosistemica netta (NEP, *Net Ecosystem Production*), ovvero la quantità di CO₂ che l'ecosistema assorbe al netto delle perdite respirative.

Per ricavare la produzione lorda di ecosistema (GEP, *Gross Ecosystem Production*) è stato necessario calcolare la respirazione dell'ecosistema (Reco) per ogni intervallo di misurazione e sommarla alla NEP. La Reco è stata stimata utilizzando un metodo basato su *Look Up Table* (LUT) (Falge et al., 2001) che mette in relazione la temperatura notturna del suolo e la NEP notturna che coincide con Reco. Una volta definita la relazione tra Reco e temperatura notturna del suolo è stato quindi possibile ricavare GEP. Tali LUT sono state costruite considerando i dati acquisiti in finestre temporali di due mesi per tenere in considerazione variazioni stagionali della struttura della vegetazione.

Nel corso di ciascuna giornata di misura sono state inoltre misurate le proprietà ottiche della *canopy* con due spettrometri (OceanOptics, USA) a diversa risoluzione. Le caratteristiche principali dei due spettrometri sono riportate in Tabella 1.

	FWHM (nm)	Intervallo di campionamento (nm)	Range spettrale (nm)
Spettrometro 1	0.13	0.02	707 - 805
Spettrometro 2	2.8	0.24	350 - 1050

Tabella 1 - Caratteristiche spettrali dei due spettrometri utilizzati (FWHM: Full Width at Half Maximum).

Le misure spettrali sono state acquisite utilizzando la fibra ottica nuda come ottica (*field of view* = 25°), nadiralmente (angolo di vista zenitale = 0°), ad un'altezza di 80 cm sul piano medio della *canopy*. Questa geometria di ripresa permette di osservare un'area circolare della *canopy* di 36 cm di diametro.

L'utilizzo di uno spettrometro ad altissima risoluzione spettrale (spettrometro 1) ha consentito di misurare la fluorescenza passiva in corrispondenza della linea di Fraunhofer a 760 nm (Fs₇₆₀) e di calcolare un indice di efficienza della fluorescenza, la fluorescenza normalizzata (NFs₇₆₀) (Meroni, Colombo, 2006; Meroni et al., 2008a; 2008b), che corrisponde alla resa di fluorescenza per unità di radiazione incidente. I dati acquisiti con lo spettrometro 2 sono stati invece utilizzati per calcolare indici ottici tradizionali relazionati alla biomassa vegetale e al contenuto di pigmenti fotosintetici, quali NDVI, e l'indice PRI relazionati all'attività fotosintetica.

Risultati

Andamenti stagionali

I tipici andamenti temporali degli spettri di riflettanza della *canopy* di riso acquisiti a mezzogiorno sono mostrati in Figura 1. In corrispondenza dei DOY (*Day Of the Year*) 127 - 138 si osserva solo una minima transizione tra la regione spettrale del visibile e quella dell'infrarosso vicino a causa del contributo del suolo e dell'acqua sottostanti la vegetazione. Quando le piante di riso crescono (e.g. DOY 186, 193), il contributo delle piante aumenta gradualmente. Di conseguenza, la riflettanza nella regione dell'infrarosso vicino aumenta come risultato dell'aumento dello *scattering* da parte delle foglie, e la riflettanza nella regione del visibile diminuisce a causa dell'assorbimento da parte dei pigmenti e della clorofilla in particolare.

A partire dal DOY 208 si osserva una grande variazione delle proprietà ottiche dovuta allo sviluppo delle spighe: la riflettanza nella regione spettrale del verde diminuisce e aumenta nella regione del rosso a causa del colore dorato delle spighe. Si osserva inoltre un aumento nella regione dell'infrarosso vicino dovuto alla presenza dei grani che aumentano lo *scattering* della luce. Infine, durante la senescenza (DOY 248), le piante ingialliscono e appassiscono gradualmente. Quindi la riflettanza nella regione del visibile aumenta in seguito alla diminuzione della concentrazione di clorofilla e la riflettanza nell'infrarosso vicino diminuisce a causa dell'appassimento e dell'esposizione del suolo.

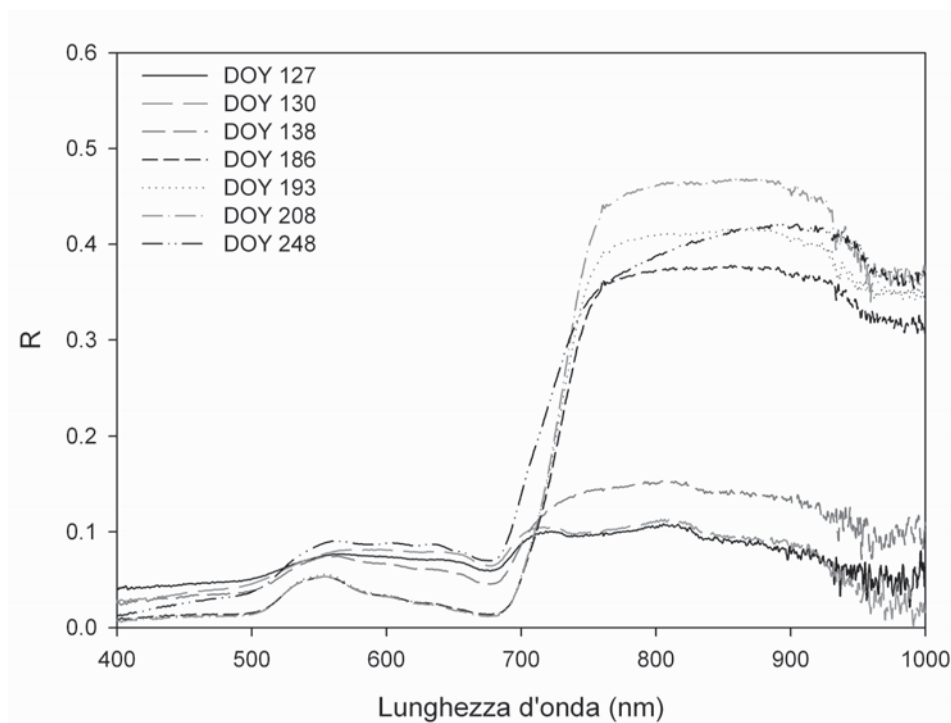


Figura 1 - Andamenti temporali degli spettri di riflettanza della *canopy* di riso acquisiti a mezzogiorno durante il ciclo vegetativo. DOY (*Day Of the Year*) corrisponde al giorno progressivo dell'anno.

Individuazione di relazioni empiriche tra indici ottici e parametri biofisici

Gli indici di vegetazione calcolati a partire dalle misure spettrali acquisite in campo sono stati correlati con parametri biofisici della *canopy*, quali il LAI e l'altezza delle piante.

L'analisi di regressione tra indici di vegetazione e variabili biofisiche della *canopy* (i.e. LAI e altezze) mostra che sia i valori di LAI che quelli dell'altezza della pianta sono correlati in modo logaritmico con l'indice NDVI. Tali regressioni hanno un coefficiente di determinazione molto alto

durante le fasi di accrescimento e fioritura: $R^2 = 0.96$ e $R^2 = 0.88$, per LAI e altezze della pianta, rispettivamente. Le correlazioni diminuiscono se si considera anche la fase di maturazione ($R^2 = 0.6$ e $R^2 = 0.44$, per LAI e altezze della pianta, rispettivamente).

Stima della produttività primaria da dati telerilevati con modello LUE

È stato applicato un metodo sviluppato recentemente che relaziona i valori degli indici ottici calcolati dai dati iperspettrali con i dati di flussi misurati con la tecnica di *eddy covariance* (Rahman et al., 2001). Siccome i flussi di CO₂ da ecosistemi agricoli dipendono sia dalla copertura della coltura che dallo stato fisiologico, è stato sperimentato un modello basato sia sull'NDVI relazionato alla biomassa che sul PRI relazionato alla fisiologia del riso. I dati *eddy* relativi alla produttività lorda di ecosistema acquisiti un'ora prima e un'ora dopo mezzogiorno sono stati relazionati con i valori di NDVI e PRI contemporaneamente acquisiti con gli spettrometri.

I risultati ottenuti mostrano un alto coefficiente di determinazione ($R^2 = 0.95$) tra GEP e il prodotto dei due indici di vegetazione (sPRI x NDVI) (dove sPRI è un valore scalato di PRI nel range tra 0 e 1), confermando la validità del metodo impiegato. Molta della variazione in GEP è spiegata da NDVI piuttosto che da PRI. Questo risultato può essere spiegato dal fatto che in un campo allagato, le piante di riso sono poco influenzate da condizioni di stress (in particolare stress idrico) durante la stagione di crescita e quindi l'efficienza con cui le piante di riso fissano il carbonio ha piccole variazioni in risposta a cambiamenti nelle condizioni ambientali (e.g. variazioni di temperatura e deficit di pressione di vapore).

In una seconda fase, i flussi di CO₂ sono stati relazionati con i dati di fluorescenza normalizzata (NF_{S760}). L'analisi di regressione tra GEP e il prodotto (NF_{S760} x NDVI) ha mostrato un alto coefficiente di determinazione ($R^2 = 0.97$), dimostrando come la fluorescenza naturale della clorofilla sia strettamente relazionata all'attività fotosintetica.

Conclusioni

In questo studio è stata valutata la possibilità di monitorare i principali parametri biofisici e strutturali e la produttività di un campo di riso a partire da misure spettroradiometriche di prossimità ad elevata risoluzione spettrale. I risultati ottenuti mostrano che i dati telerilevati possono fornire stime accurate delle variabili biofisiche, come evidenziato dall'alto coefficiente di determinazione ottenuto per le regressioni tra LAI e altezze delle piante e NDVI. L'impiego di un indice ottico a banda stretta legato al ciclo delle xantofille e all'attivazione di meccanismi di fotoprotezione e la risposta in fluorescenza indotta dal sole (misurata in maniera passiva e remota) sono invece risultati validi indicatori dell'efficienza fotosintetica. I modelli semi-empirici sviluppati tra parametri ottenuti da telerilevamento di prossimità e flussi di CO₂ misurati con la tecnica *eddy covariance* hanno mostrato infatti ottime correlazioni, aprendo nuove possibilità per l'applicazione di modelli semi-empirici per la stima spazializzata di GEP basata sull'analisi di immagini acquisite da sensori aerei o satellitari.

Ringraziamenti

Questo studio è stato condotto nell'ambito del progetto MIUR-PRIN 2005 "Verso il telerilevamento del bilancio del carbonio della vegetazione: sviluppo di metodi innovativi" e del progetto JRC-Kyoto experiment dell'IES-JRC di Ispra (VA) (2005/S 166-164944 del 30/08/05 "Technical assistance for the characterisation and up-scaling of terrestrial greenhouse gas fluxes in the frame of the JRC Kyoto experiment").

Gli autori desiderano ringraziare M. Galvagno (ARPA Valle d'Aosta), L. Colombo, F. Fava e A. Marchesi (DISAT-UNIMIB) per il supporto alla raccolta dati e alle misure; I. Goded-Ballarín (IES-JRC) per il supporto nella gestione del sito sperimentale.

Bibliografia

- Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, Rannik Ü, Moncrieff J, Foken T, Kowalski AS, Martin PH, Berbigier P, Bernhofer C, Clement R, Elbers J, Granier A, Grünwald T, Morgenstern K, Pilegaard K, Rebmann C, Snijders W, Valentini R, Vesala T. (2000), "Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology", *Advances in Ecological Research*, 30: 113–175.
- Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. (2001), "Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange", *Agricultural and Forest Meteorology*, 107: 43-69.
- Gamon JA, Peñuelas J, Field CB. (1992), "A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency", *Remote Sensing of Environment*, 41: 35-44.
- Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, Muys B, Coppin P, Weiss M, Baret F, (2004), "Review of methods for in situ leaf area index determination - Part I. Theories, sensors and hemispherical photography", *Agricultural and Forest Meteorology*, 121: 19-35.
- Meroni M, Colombo R. (2006), "Leaf level detection of solar induced chlorophyll fluorescence by means of a subnanometer resolution spectroradiometer", *Remote Sensing of Environment*, 103: 438-448.
- Meroni M, Picchi V, Rossini M, Cogliati S, Panigada C, Nali C, Lorenzini G, Colombo R. (2008a), "Leaf level early assessment of ozone injuries by passive fluorescence and PRI", *International Journal of Remote Sensing*, 29: 5409-5422.
- Meroni M, Rossini M, Picchi V, Panigada C, Cogliati S, Nali C, Colombo R. (2008b), "Assessing Steady-state Fluorescence and PRI from Hyperspectral Proximal Sensing as Early Indicators of Plant Stress: The Case of Ozone Exposure." *Sensors*, 8: 1740-1754.
- Monteith JL. (1972), "Solar radiation and productivity in tropical ecosystems", *Journal of Applied Ecology*, 9: 747-766.
- Monteith JL. (1977), "Climate and the efficiency of crop production in Britain". *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 281: 277–294.
- Plascyk JA. (1975), "The MK II Fraunhofer line discriminator (FLD-II) for airborne and orbital remote sensing of solar-stimulated luminescence", *Optical Engineering*, 14: 339-346.
- Rahman AF, Gamon JA, Fuentes DA, Roberts DA, Prentiss D. (2001), "Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery", *Journal of Geophysical Research*, 106: 33579-33591.
- Rouse JW, Haas RH. (1973), "Monitoring vegetation systems in the great plain with ERTS", *Third ERTS Symposium*, vol. 1: 309-317. Washington, DC: NASA.
- Weiss M, Baret F, Smith GJ, Jonckheere I, Coppin P. (2004), "Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling", *Agricultural and Forest Meteorology*, 121: 37-53.