

L'uso della spettrometria di campo per il monitoraggio del contenuto d'azoto della pianta di riso

Daniela Stroppiana (*), Mirco Boschetti (*), Roberto Confalonieri (**), Stefano Bocchi (***), Pietro Alessandro Brivio (*) and Mauro Musanti (*)

(*) Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, CNR, Via Bassini 15, I-20133, Milano, Italia
Tel.: +390223699454, Fax: +390223699599, Email : stroppiana.d@irea.cnr.it

(**) Institute for the Protection and Security of the Citizens, EC-JRC, AGRIFISH Unit, MARS-STAT Sector, TP 268, I- 21020, Ispra (VA), Italia

(***) Dipartimento di Produzione Vegetale, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Milano, Via Celoria 2, I-20133, Milano, Italia

Abstract

Precision farming recently developed to optimally exploit resources in the context of sustainable agriculture. Fertilization is one of the most critical issues in agriculture due to its strong impact on soils and water resources. Precision agriculture provides the crop inputs on the basis of the actual crop requirements. This work focuses on the use of remotely sensing data for monitoring nitrogen content in rice crops. In particular, regression analysis has been performed in order to derive a spectral index that is correlated with plant nitrogen content.

Sommario

L'agricoltura di precisione si è sviluppata con il principale obiettivo di ottimizzare l'utilizzo delle risorse e minimizzare l'impatto ambientale delle attività agricole. Uno dei fattori più critici in agricoltura è la fertilizzazione che può essere fonte di contaminazione sia dei suoli sia delle acque. La fertilizzazione può essere applicata in modo sito-specifico cioè regolata sulla base delle reali esigenze della coltura. In questo lavoro si è analizzata la potenzialità dei dati telerilevati per la stima del contenuto d'azoto delle piante di riso. I dati di campo sono stati analizzati per derivare un indice spettrale che fosse correlato al contenuto d'azoto del riso.

Introduzione

L'agricoltura di precisione è definita come un insieme di tecniche di gestione della coltura applicate in modo puntuale e differenziato all'interno di un campo. Gli input, come per esempio irrigazione e fertilizzazione, possono essere forniti in funzione delle reali esigenze della coltura misurate in ogni punto dello spazio ed in ogni momento del ciclo di crescita. Oltre a produrre una diminuzione dei costi ed un'ottimizzazione dell'uso delle risorse, queste tecniche permettono di minimizzare l'impatto ambientale. Uno degli aspetti più critici delle attività agricole è proprio la fertilizzazione. Allo scopo di ridurre il rischio di una bassa produzione finale, si tende a fornire una quantità di fertilizzante spesso in eccesso rispetto alla reale necessità della pianta, pratica incentivata anche dai ridotti costi dei fertilizzanti rispetto al costo legato ad un deficit di resa. Nel caso della fertilizzazione azotata, l'azoto fornito in eccesso tende ad accumularsi nei suoli e ad essere disperso nelle acque superficiali e di falda. Nel caso della coltivazione di riso in sommersione, un ulteriore impatto significativo è costituito dalle emissioni di gas serra (NO_x) e metano. Per poter applicare una fertilizzazione sito-specifica, tuttavia, è necessario disporre di informazioni relative al contenuto di azoto della pianta in modo da stimare la dose necessaria per il raggiungimento delle

condizioni ottimali. Il contenuto d'azoto viene tradizionalmente misurato in laboratorio su un campione di piante rappresentativo dell'area di studio. Questi metodi di misura sono tuttavia onerosi nel caso di aree vaste e per studi di tipo regionali; in questi casi i metodi basati sulla misura delle proprietà ottiche della pianta costituiscono un'alternativa competitiva in termini di tempo e costi sostenuti per le misure.

Lo strumento SPAD (Soil-Plant Analyses Development), Minolta, può essere utilizzato per misurare il livello di pigmenti di clorofilla attraverso la stima della trasmittanza a livello fogliare. Sebbene questo tipo di misura sia più veloce rispetto alle estrazioni condotte in laboratorio, la caratterizzazione della coltura a livello regionale è ancora molto laboriosa (Xue et al., 2004).

Un'alternativa competitiva è costituita dall'uso dei dati telerilevati (Hansen, Schjoerring, 2003; Haboudane et al., 2002).

In questo lavoro le firme acquisite con uno spettroradiometro di campo FieldSpecFR® (Analytical Spectral Device Inc., US) sono state analizzate per identificare le regioni dello spettro elettromagnetico più adatte al monitoraggio del contenuto d'azoto della coltura di riso. In particolare, le analisi si sono indirizzate all'individuazione della coppia di lunghezze d'onda che forniscono la correlazione massima tra un indice spettrale di differenza normalizzata (NDI: Normalized Difference Index) e il contenuto d'azoto ([N]).

Dati e metodi

Le misure sperimentali sono state condotte in un'area di studio (Figura 1) situata nel comune di Opera, Milano. In questa regione dell'Italia settentrionale, che si estende dalla provincia di Milano a Vercelli, si è sviluppata una intensa attività agricola caratterizzata soprattutto da una coltivazione intensiva del riso. Questa regione, infatti, contribuisce in modo consistente sia alla produzione nazionale (95%) sia a quella europea (~60%, statistiche relative a EU-15).

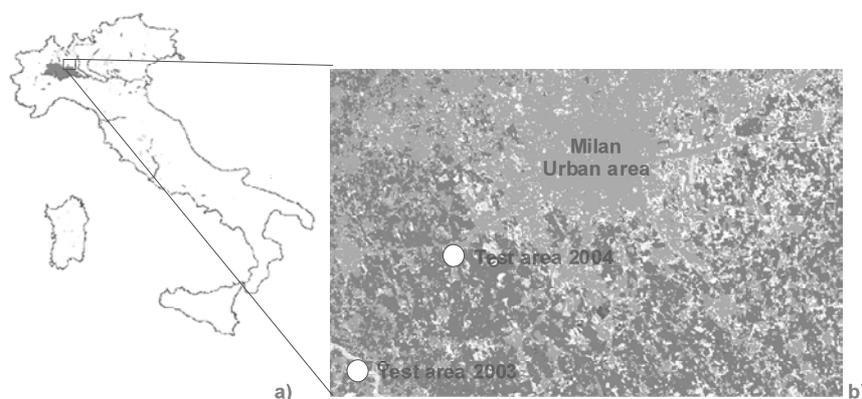


Figura 1. Localizzazione dell'area di studio a sud della città di Milano.

Il campo sperimentale oggetto di studio era composto da 40 parcelle di $7 \times 5 \text{ m}^2$ (35 m^2). I fattori di variazione erano la varietà (Volano, Gladio) e la concimazione azotata, disposti secondo uno schema sperimentale a blocchi completamente randomizzati con quattro repliche.

Le due varietà di riso sono state seminate a spaglio il 24 maggio 2004 e cresciute in condizioni di sommersione. Nel campo sperimentale sono stati applicati cinque diversi trattamenti di fertilizzazione azotata (urea) in due momenti diversi del ciclo di crescita (accestimento e inizio levata), come riassunto nella tabella 2.

Tabella 2. Trattamenti di fertilizzazione applicati nel campo sperimentale. Le quantità sono espresse in kg ha⁻¹.

	Data 1 (22 Giugno)	Data 2 (20 Luglio)
N0	0	0
N1	40	40
N2	80	80
N3	40	0
N4	0	80

Da aprile ad agosto sono state condotte una serie di misure volte alla caratterizzazione della coltura durante il ciclo di crescita, dalla germinazione al momento di massimo indice di area fogliare (LAI). Per tutte le parcelle e con una frequenza quasi settimanale sono state acquisite misure di LAI utilizzando lo strumento Licor LAI-2000 e misure spettroradiometriche con lo strumento FieldSpec (FS) (range spettrale: 350-2500nm; risoluzione spettrale: 4nm; passo di ricampionamento: 1nm). Per ogni parcella sono state acquisite cinque firme da cui è stata derivata una firma media. La figura 3 presenta un esempio di firma spettrale acquisita per due parcelle sperimentali (varietà Gladio) e non fertilizzate durante il periodo di crescita (trattamento di fertilizzazione: N0).

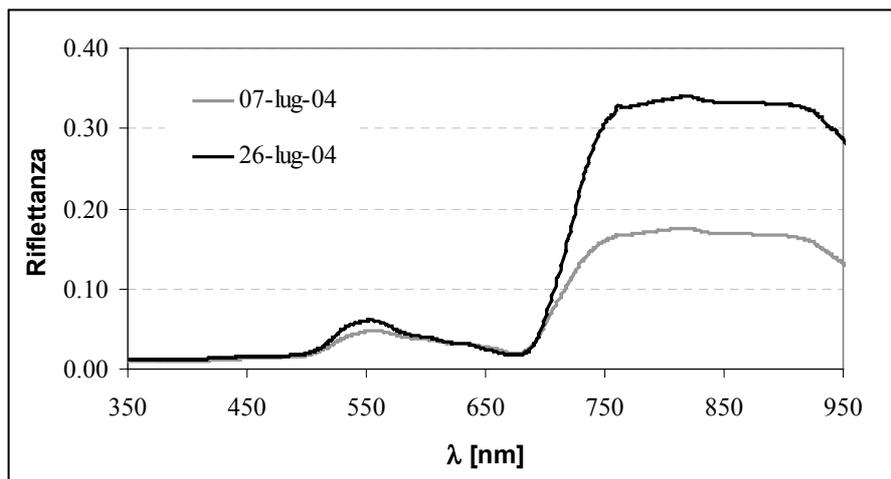


Figura 3. Esempio di firme spettrali acquisite in campo con lo strumento FS (varietà: Gladio; fertilizzazione: N0).

In aggiunta alle misure spettroradiometriche e di LAI-2000, per un sottocampione di otto parcelle seminate a Gladio, sono state misurate con una frequenza quasi settimanale: biomassa, contenuto di azoto delle piante, LAI con metodo distruttivo planimetrico, e concentrazione di azoto (N-NO₃- e N-NH₄⁺) nei suoli (0-10 cm). Le misure di biomassa, contenuto di azoto delle piante [N] e LAI distruttivo sono state effettuate su un campione rappresentativo di piante la cui dimensione è stata determinata tramite pre-campionamento (Confalonieri, 2004). La biomassa secca è stata misurata tramite essiccazione delle piante in stufa fino al raggiungimento di un peso costante alla temperatura di 105°C. Il contenuto d'azoto è stato misurato con un analizzatore elementare (CE 1500 NA, Carlo Erba, Milano). La tabella 4 riassume le variabili monitorate ed il metodo utilizzato.

Tabella 4. Variabili misurate nel campo sperimentale.

Variabile	Strumento/metodo
LAI	Licor LAI-2000
Firme Spettrali	FieldSpecFR
LAI	Distruttivo
Biomassa secca	Distruttivo
Contenuto d'azoto (N)	Distruttivo (analizzatore elementare)
Azoto suolo (N-NO ₃ - and N-NH ₄ +))	Analizzatore a flusso continuo

In particolare, in questo lavoro sono state analizzate le misure spettroradiometriche ed le misure di contenuto d'azoto delle piante; l'attenzione si è quindi focalizzata su una sola varietà di riso, Gladio, e due diversi trattamenti di fertilizzazione (N0 e N2).

La metodologia utilizzata si basa sull'analisi di regressione. Innanzitutto è stata analizzata la correlazione tra la riflettanza misurata dallo spettroradiometro per ogni lunghezza d'onda λ ed il contenuto d'azoto [N]. Successivamente le firme spettrali sono state ricampionate sulla base degli intervalli di lunghezza d'onda relativi alle bande del sensore MIVIS (Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer). Il sensore iper-spettrale aviotrasportato MIVIS, di proprietà del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR, <http://www.lara.iaa.cnr.it>), è caratterizzato da un numero elevato di bande che nel range del visibile-vicino infrarosso (VIS-NIR) si riducono a 20. La scelta di ricampionare le firme di campo è stata dettata dalla necessità di simulare le firme acquisite da un sensore largamente utilizzato in Italia per il monitoraggio del territorio. La figura 5 presenta un esempio di firma spettrale di campo con lo strumento FieldSpec e la riflettanza simulata nelle bande VIS-NIR del MIVIS.

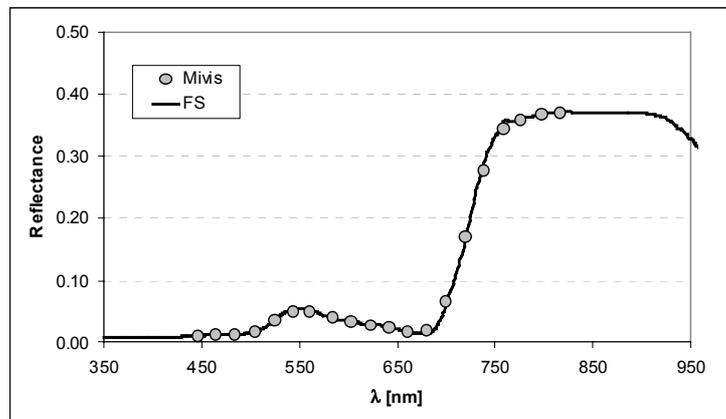


Figura 5. Firma acquisita per una parcella sperimentale di riso con lo strumento FieldSpec (linea continua nera) e riflettanza simulata nelle bande MIVIS tramite ricampionamento.

A partire dalla riflettanza simulata, è stata analizzata la correlazione tra i valori assunti da un indice spettrale NDI (Eq. 1) ed il contenuto d'azoto. Il dataset di misure disponibili è stato preventivamente ed in modo casuale suddiviso in due sotto-campioni da utilizzare per la calibrazione (n=36) e per la validazione (n=12).

$$NDI = \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \right) \quad (\text{Eq.1})$$

Allo scopo di trovare la coppia di bande che restituisse l'indice migliore per il monitoraggio d'azoto nelle piante, tutte le possibili combinazioni di lunghezze d'onda delle bande simulate sono state correlate alle misure di [N] tramite regressione logaritmica per calcolare il valore del coefficiente di determinazione (R^2). La coppia di bande a cui corrisponde il valore massimo di R^2 è stata scelta per la stima dell'indice e la successiva validazione.

Risultati

La figura 6 presenta i risultati dell'analisi di correlazione tra la riflettanza misurata per ogni lunghezza d'onda dallo strumento FS e [N], LAI e biomassa. Nonostante lo strumento permetta misure di riflettanza fino a lunghezze d'onda dell'ordine di 2500 nm, in questo lavoro si è limitato l'intervallo di analisi alla porzione dello spettro VIS/NIR.

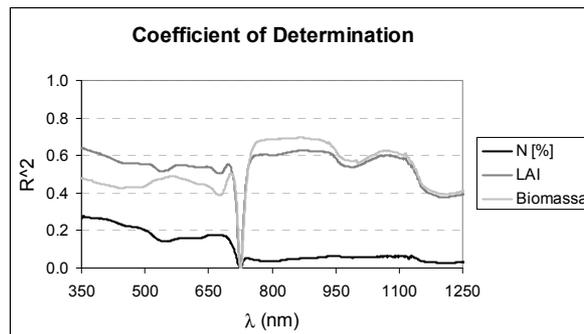


Figura 6. Correlazione (R^2) tra la riflettanza misurata per ogni lunghezza d'onda (λ [nm]) VIS-NIR e contenuto d'azoto ([N]), indice di area fogliare (LAI) e biomassa.

La figura mette in evidenza come la porzione dello spettro più adatta per la stima di [N] sia quella del visibile ($\lambda < 700$ nm). Per lunghezze d'onda superiori, infatti, la correlazione tra riflettanza e [N] diminuisce drasticamente. La riflettanza nella regione del NIR ($\lambda > 750$ nm) è fortemente correlata sia alla biomassa sia al LAI. Tuttavia, i valori molto bassi del coefficiente di correlazione ($R^2 < 0.3$) suggeriscono che la riflettanza di una singola banda potrebbe non essere il migliore indicatore di [N] e che l'utilizzo di due o più bande (indice spettrale) potrebbe migliorare l'accuratezza dei risultati.

La figura 7 presenta i risultati dell'analisi di correlazione tra l'indice (NDI) e le misure di [N]: per ogni combinazione di lunghezze d'onda la figura mostra il corrispondente valore del coefficiente di determinazione.

Questi risultati confermano che la regione del visibile è adatta alla stima di [N]; la massima correlazione si ottiene, infatti, combinando le lunghezze d'onda $\lambda_1=465$ nm e $\lambda_2=505$ nm ($R^2=0.55$). La relazione regressiva è rappresentata nella Figura 8.

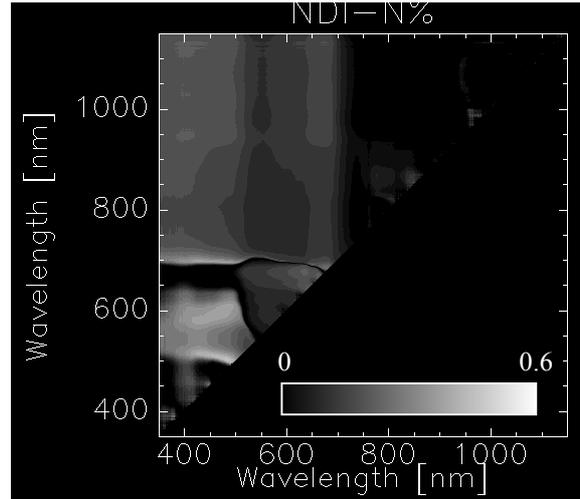


Figura 7. Correlazione tra l'indice NDI e N (R^2) per ogni coppia di lunghezze d'onda ($350\text{nm} < \lambda < 1150\text{nm}$).

Studi precedenti confermano come questa regione dello spettro sia più adatta per la stima di $[N]$, rispetto a quella del vicino infrarosso, dove la quantità di biomassa e il LAI influenzano in modo significativo la riflettanza della canopy (Tarpley et al., 2000).

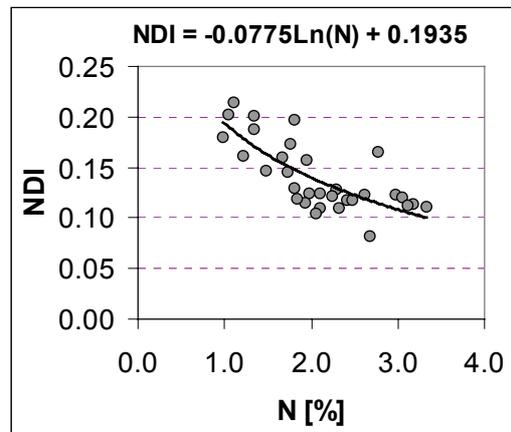


Figura 8. Regressione tra le misure di N [%] ed i valori dell'indice spettrale NDI ($\lambda_1=465\text{nm}$, $\lambda_2=505\text{nm}$).

L'equazione 2 descrive il modello derivato dall'inversione dell'equazione riportata in figura, ove la concentrazione di azoto è stimata a partire dal valore misurato di NDI.

$$N = \exp\left(\frac{0.194 - NDI}{0.078}\right) \quad (\text{Eq. 2a})$$

$$NDI = \left(\frac{\rho_{505} - \rho_{465}}{\rho_{505} + \rho_{465}}\right) \quad (\text{Eq. 2b})$$

La validazione del modello regressivo ha portato ai risultati riassunti in tabella 9; il confronto dei valori di concentrazione di azoto previsti e misurati (dataset di validazione) è presentato in figura 10.

La figura mostra una buona correlazione tra valori stimati e misurati ($R^2=0.55$, $p<0.01$ ++); l'errore medio commesso dal modello nella stima di [N] è inferiore al 30%.

Tabella 9. Risultati della validazione del modello regressivo (Eq.2) per la stima di N%.

Validazione modello	R^2	RRMSE (%)	EF	Media misure	Media stime
	0.55 ($p<0.01$)	29.4	0.43	1.94	1.91

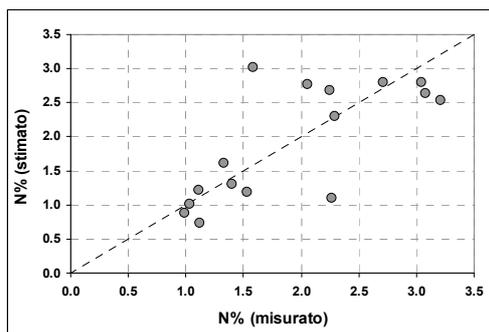


Figura 10. Validazione: confronto tra valori misurati e stimati (Eq. 2) di azoto. La linea tratteggiata rappresenta la bisettrice $y=x$.

Conclusioni

L'obiettivo del presente lavoro è l'analisi delle firme spettrali di campo per la stima della concentrazione di azoto nella pianta di riso. Per poter raggiungere questo obiettivo, sono stati analizzati i dati raccolti durante una campagna di misure condotta a Opera, Milano, nel 2004. Nella campagna sono state misurate una serie di variabili (e.g. LAI, biomassa, contenuto d'azoto delle piante) per la varietà di riso Gladio coltivata in condizioni di sommersione e soggetta a due diversi trattamenti di fertilizzazione. Inoltre, sono state acquisite misure spettro radiometriche con uno strumento FieldSpec (FS). Un approccio di tipo regressivo è stato applicato ai dati per poter valutare l'utilità delle firme spettrali per la stima del contenuto d'azoto. In particolare, l'analisi della correlazione tra la riflettanza misurata nelle lunghezze d'onda della porzione VIS/NIR dello spettro e [N], ha dimostrato che un approccio basato sulla riflettanza di una singola banda potrebbe non portare risultati accurati ($R^2<0.3$). L'utilizzo di un indice permette di combinare le misure di risposta spettrale in due o più bande. Le firme continue (passo di campionamento=1nm) acquisite con lo strumento FieldSpec sono state ricampionate per simulare la risposta spettrale delle bande caratteristiche del sensore MIVIS. L'analisi di regressione ha evidenziato che la massima correlazione tra l'indice NDI (differenza normalizzata) e [N] si ottiene combinando misure di riflettanza nelle bande della regione del visibile: $\lambda_1=465\text{nm}$ e $\lambda_2=505\text{nm}$. La validazione dell'indice derivato, su un dataset indipendente, non utilizzato nell'analisi di regressione, ha evidenziato che il modello predice in modo accurato il contenuto di azoto ($R^2=0.55$; RRMSE=29.4%, $p<0.01$). Questi risultati sono promettenti per lo sviluppo di metodi per la stima di [N] delle colture da immagini telerilevate. Tuttavia, ulteriori campagne di raccolta dati sono necessarie per poter generalizzare i risultati ad altre varietà di riso e condizioni di crescita (caratteristiche dei suoli, fertilizzazione, condizioni meteo).

Bibliografia

Confalonieri, R. (2004), A jackknife-derived visual approach for sample size determination, *Rivista Italiana di Agrometeorologia*, 1: 9-13.

Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J., e Dextraze, L. (2002), Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture, *Remote Sensing of Environment*, 81: 416-426.

Hansen, P.M., e Schjoerring, J.K. (2003), Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression, *Remote Sensing of Environment*, 86: 542-553.

Tarpley, L., Raja Reddy, K., e Sassenrath-Cole, G. F. (2000), Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration, *Crop Science*, 40: 1814–1819.

Xue, L., Cao, W., Lou, W., Dai, T. and Zhu, Y. (2004), Monitoring Leaf Nitrogen Status in Rice with Canopy Spectral Reflectance, *Agronomy Journal*, 69: 138-142.