

Individuazione precoce dello stress idrico e nutrizionale in agricoltura da immagini iperspettrali

C. Panigada (*), C. Cilia (*), L. Busetto (*), R. Colombo (*), M. Meroni (**),
S. Amaducci (***), M. Rossini (*), S. Cogliati (*), M. Boschetti (****), V. Picchi (****),
A. Marchesi (*****), T. Julitta (*), M. Palladino (*****), G. D'Urso (*****)

(*) Laboratorio di telerilevamento delle dinamiche ambientali, DISAT, Università Statale Milano-Bicocca
Piazza della Scienza 1, 20126 Milano, Email: cinzia.panigada@unimib.it, chiara.cilia@gmail.com,
lorenzo.busetto@unimib.it, roberto.colombo@unimib.it, micol.rossini@unimib.it,
sergio.cogliati@unimib.it, tommaso.julitta@gmail.com

(**) Institute for the Environment and Sustainability, Joint Research Center (JRC), Via Fermi 2749
TP 266, 21027 ISPRA (VA), Email: michele.meroni@jrc.ec.europa.eu

(***) Istituto di Agronomia, Genetica e Coltivazioni erbacee, Facoltà di Agraria, Università cattolica del Sacro Cuore
Via Emilia Parmense 84, 29122 Piacenza, Email: stefano.amaducci@unicatt.it
(****) CNR-IREA, Via Bassini 15, Milano, Email: boschetti.m@irea.cnr.it

(*****) Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura – CRA, Research Unit for Agri-Food Processes
Via G. Venezian 26, 20133 Milano, Email: valentina.picchi@entecra.it

(*****) Laboratorio di Remote Sensing (L@RS), Dip. BEST, Politecnico di Milano
Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano Italy, Email: andrea.marchesi@polimi.it

(******) Dipartimento di Ingegneria Agraria e Agronomia del Territorio, Università degli Studi di Napoli Federico II
Corso Umberto I 40, 80138 Napoli, Email: mpalladi@unina.it, durso@unina.it

Riassunto

In questo contributo sono presentati i risultati preliminari di un esperimento condotto nell'ambito delle campagne *ESA fluorescence 2010*, parte del progetto EDOCROS (Early Detection Of CROp Stress) supportato dal programma europeo EUFAR (European Facility For Airborne Research project) e finanziato dal progetto AXiA (Università e Impresa per la ricerca) per l'individuazione dello stress idrico e nutrizionale in agricoltura mediante tecniche di telerilevamento iperspettrale. La ricerca ha previsto l'allestimento di un campo sperimentale di circa due ettari suddiviso in 48 parcelle di mais e sorgo con trattamenti irrigui e nutrizionali differenziati. Le colture sono state monitorate nel loro sviluppo fenologico fino ai sorvoli aerei effettuati il 19 e 20 luglio 2010 durante i quali sono state acquisite immagini iperspettrali con i sensori CASI 1500 (Itres, Canada), AHS-160 (Sensytech Inc., USA) e AISA Eagle (Specim, Finland). L'acquisizione delle immagini è avvenuta contemporaneamente ad una campagna a terra in cui sono state acquisite misure di parametri biofisici e fisiologici della vegetazione in ogni parcella sperimentale. Si presentano i risultati dell'analisi dell'immagine AISA in corrispondenza delle parcelle di mais. In particolare sono stati testati diversi indici ottici tra cui il PRI (Photochemical Reflectance Index) (Gamon et al., 1992), relazionato all'efficienza fotosintetica della vegetazione, e indici correlati al contenuto di clorofilla e alla biomassa, al fine di valutarne le potenzialità nell'individuazione di stati di stress idrico e nutrizionale delle colture. L'analisi statistica dei dati di campo e l'analisi di regressione tra dati di campo e indici ottici hanno permesso di individuare il TCARI/OSAVI (Haboudane et al., 2008a; Haboudane et al., 2002) quale indicatore di deficit nutrizionale e il PRI quale indicatore di deficit idrico. Sono state prodotte mappe di PRI e TCARI/OSAVI al fine di evidenziare le aree del campo sperimentale a maggiore criticità.

Abstract

In the framework of ESA Fluorescence campaigns 2010, the EDOCROS (Early Detection Of CROp Stress) campaign, supported by EUFAR (European Facility For Airborne Research project) was aimed to detect early crop stress due to water and nitrogen (N) deficit, by means of advanced hyperspectral remote sensing techniques. CASI 1500 (Itres, Canada), AISA Eagle (Specim, Finland) and AHS-160 (Sensytech Inc., USA) imageries were acquired contemporary to an intensive field campaign where vegetation biophysical and ecophysiological measurements were collected. Preliminary results of the analysis conducted on AISA Eagle imagery acquired on corn plots are presented and discussed. Different vegetation indices related to photosynthetic efficiency (i.e. Photochemical Reflectance Index – PRI) (Gamon et al., 1992), to leaf chlorophyll content and canopy biomass were calculated and tested in order to select best indicators of nutritional and water stress. It was shown that TCARI/OSAVI (Haboudane et al., 2008a; Haboudane et al., 2002) is the best indicator of nutritional stress while PRI is the best indicator of water stress. TCARI/OSAVI and PRI were mapped on the study area and critical stress situations were evidenced.

Introduzione

Lo studio delle proprietà ottiche della vegetazione ed in particolare della sua firma spettrale, mediante tecniche di telerilevamento, rappresenta un metodo ormai consolidato di monitoraggio ambientale. La riflettanza spettrale della vegetazione è fonte di informazione sul suo stato chimico, fisico e sulle sue proprietà fisiologiche. Si osserva infatti che la riflettanza di foglie stressate ha caratteristiche diverse dalla riflettanza tipica di foglie sane. Recenti sviluppi nel campo del telerilevamento hanno permesso di individuare anomalie fisiologiche della vegetazione anche precedenti alla comparsa dei sintomi visivi, in una fase quindi precoce dello stress in cui è possibile intervenire per minimizzarne gli effetti dannosi (Meroni et al., 2009; Meroni et al., 2008). L'indice ottico Photochemical Reflectance Index (PRI) (Gamon et al., 1992) rappresenta una promettente tecnica di individuazione precoce di stati di stress essendo relazionato all'efficienza dei processi fotosintetici della pianta (Gamon et al., 1990) che generalmente viene alterata prima della comparsa di clorosi (i.e. depauperamento dei pigmenti fogliari) o della riduzione di biomassa (i.e. *Leaf Area Index* - LAI). Il PRI insieme a indici ottici iperspettrali relazionati ai parametri biochimici (i.e. concentrazione di pigmenti fogliari) e strutturali (i.e. LAI) della pianta permette il monitoraggio della vegetazione nelle sue fasi fenologiche in tempo reale e a scala di paesaggio (Chen et al., 2010; Panigada et al., 2010; Suarez et al., 2008).

L'obiettivo di questa ricerca è stato lo studio di questi indici ottici al fine di individuare un sistema di monitoraggio delle colture cerealicole che permetta un'ottimizzazione dell'utilizzo di acqua per le irrigazioni e di azoto per le concimazioni, mirando ad una gestione ecosostenibile delle risorse. A questo scopo è stata condotta una campagna aerea durante la quale sono state acquisite immagini mediante sensori iperspettrali ottici su un'area sperimentale dove *canopy* di mais sono state sottoposte a diversi trattamenti irrigui e di fertilizzazione. Nella finestra temporale di acquisizione delle immagini telerilevate è stata effettuata un'intensa campagna di misure a terra durante la quale sono stati misurati diversi parametri della vegetazione. In particolare sono stati misurati parametri strutturali, quali il LAI, parametri biochimici, quali il contenuto relativo di clorofilla, l'efficienza fotosintetica effettiva alla luce (i.e. $\Delta F/F_m'$) e l'indice PRI a livello fogliare (PRI_L). L'analisi di questi parametri misurati a terra ha permesso di descrivere lo stato di stress dell'area sperimentale al momento del sorvolo, oltre a fornire i dati necessari per la messa a punto dei modelli di stima dello stato di stress mediante le immagini riprese da aereo e loro validazione.

Materiali e metodi

Disegno sperimentale e misure a terra

Il sito sperimentale è localizzato nell'azienda sperimentale "Vittorio Tadini" a Gariga di Podenzano, Piacenza. Il sito è costituito da quattro blocchi (repliche sperimentali) per un totale di 2 ha circa.

Ogni blocco è costituito da 12 parcelle (6 parcelle di mais e 6 parcelle di sorgo) di dimensione 16.5 m x 15 m. Ciascun blocco è stato suddiviso in tre sotto-blocchi costituiti ciascuno da 4 parcelle contigue lungo la direzione N-S, di cui due coltivate a mais e due a sorgo, sottoposti a trattamenti di irrigazione differenti assegnati in modo casuale (non irrigato, irrigato ma con deficit idrico imposto in un breve intervallo temporale nella fase fenologica della levata, irrigato a piena capacità di campo, rispettivamente IRR0, IRR1, IRR2), utilizzando un sistema di irrigazione a goccia. La posizione dei tre trattamenti all'interno dei diversi blocchi è stata assegnata casualmente. Le due parcelle coltivate a mais e le due parcelle coltivate a sorgo presenti in ciascun sotto-blocco sono state a loro volta sottoposte a differente fertilizzazione (non fertilizzato e fertilizzato con 100 Kg ha⁻¹ di azoto (N), rispettivamente N0 e N1). La posizione dei due trattamenti di fertilizzazione all'interno del sotto-blocco è stata assegnata casualmente. Il disegno sperimentale utilizzato si configura come un tipico disegno di tipo *split plot* nel quale i trattamenti di irrigazione vengono applicati a livello di sotto-blocco, mentre i trattamenti di fertilizzazione vengono applicati a livello di singola parcella (*split plot*). Il mais ed il sorgo sono stati seminati in data 3 giugno 2010, posticipata rispetto alla normale semina di circa 3 settimane. Questo ha permesso la maturazione del mais e del sorgo nel mese di luglio, generalmente più caldo e a minor rischio di precipitazioni, consentendo di massimizzare la differenziazione dei diversi trattamenti irrigui.

Durante i sorvoli effettuati per l'acquisizione delle immagini telerilevate è stata condotta una campagna di misure a terra durante la quale si sono acquisite diverse misure a livello di foglia e di *canopy*. A livello fogliare è stato misurato il contenuto relativo di clorofilla fogliare mediante un sensore SPAD-502 (Minolta, Japan) (Markwell et al., 1995) e l'indice PRI (Photochemical Reflectance Index) mediante il PlantPen 200 (PSI, Czech Republic), radiometro portatile che misura la radianza riflessa dalla foglia illuminata mediante due luci led aventi picco di emissione prossimo alle due lunghezze d'onda utilizzate per il calcolo dell'indice (i.e. 531 nm e 570 nm). Si sono inoltre effettuate misure di fluorescenza della clorofilla *a* mediante un fluorimetro portatile Photosynthesis Yield Analyzer Mini-PAM (Walz, Germany) che permette di valutare la funzionalità del fotosistema II. In particolare è stata calcolata l'efficienza quantica del trasporto di elettroni a livello del fotosistema II, ossia l'efficienza fotochimica effettiva alla luce $\Delta F/F_m'$. Tutte le misure effettuate a livello fogliare hanno interessato l'ultima foglia espansa di un campione significativo di piante consistente in 10, 15 e 20 piante rispettivamente per SPAD, PRI e $\Delta F/F_m'$, campionate casualmente nei centri parcella.

In ognuna delle parcelle sperimentali si sono inoltre misurati parametri della *canopy* quali il LAI calcolato a partire dalle misure di radiazione fotosinteticamente attiva intercettata dalla vegetazione mediante un ceptometro Delta-T SunScan System.

Acquisizione e pre-elaborazione dei dati telerilevati

Le immagini telerilevate da piattaforma aerea utilizzate nell'ambito di questo lavoro sono state acquisite in data 20/07/2010 alle ore 12:37 UTC (*Coordinated Universal Time*), volando in direzione del sole (piano principale), mediante il sensore AISA Eagle (Specim, Finland). Le principali caratteristiche delle immagini acquisite sono riassunte in tabella 1.

Sensore	Range Spettrale (nm)	N° Bande	FWHM (nm)	Risoluzione al suolo (m)	Ora di Volo (UTC)	Angolo di Zenith solare (°)	Direzione di volo
AISA Eagle	394-968	244	2.3	1.0	12:37	29	Piano solare principale

Tabella 1 – Principali caratteristiche delle immagini AISA Eagle; FWHM (Full Width at Half Maximum).

Le immagini sono state sottoposte ad un processo di calibrazione radiometrica, che ha permesso di convertire i valori di DN registrati in valori di radianza al sensore, espressi in $\mu\text{W cm}^{-2} \text{ste}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$. Successivamente, i dati sono stati georiferiti utilizzando il software CaliGeo (Spectral Imaging Ltd., Finland), che ha permesso di georeferenziare con grande precisione le immagini a partire dai dati acquisiti dal sensore GPS e dal sensore inerziale integrati nel sistema AISA. In figura 2 viene mostrata la porzione di immagine relativa al sito sperimentale così come appare sull'immagine originale (figura 2 a) e su quella georiferita (figura 2 b). La georeferenziazione ha inoltre permesso di identificare con notevole accuratezza i punti di misura delle variabili biochimiche misurate a terra durante il sorvolo aereo (i.e. croci verdi in figura 2 b).

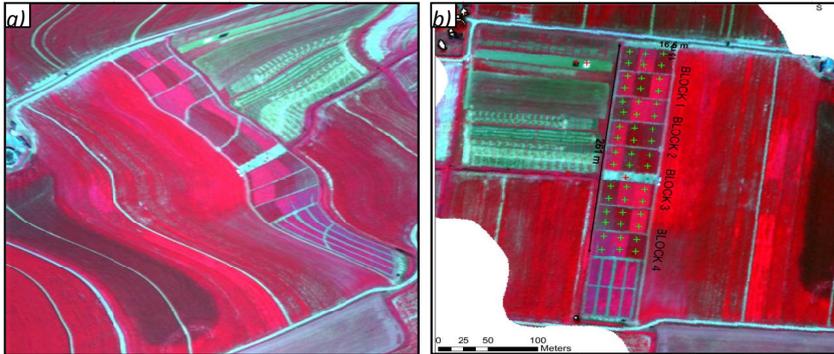


Figura 2 – a) Porzione dell'immagine AISA originale comprendente l'area di studio;
b) Porzione dell'immagine AISA georiferita. Le croci verdi rappresentano i centri parcella in corrispondenza dei quali sono state effettuate le misure di campo.

Le immagini georiferite sono state successivamente sottoposte ad un processo di calibrazione spettrale utilizzando il software SpecCal v.1.2 (Busetto et al. 2011; Meroni et al., 2010), al fine di determinare le reali lunghezze d'onda e ampiezze delle diverse bande di acquisizione. Infine, le immagini sono state corrette atmosfericamente utilizzando un approccio di tipo *empirical line* basato su firme di riflettanza acquisite a terra in corrispondenza di diversi target (i.e. pannello bianco, pannello nero, asfalto, suolo nudo). In figura 3 sono mostrate, a titolo di esempio, le firme spettrali relative ad una delle parcella coltivate a mais e ad un'area a suolo nudo, ricavata a partire dai dati AISA corretti atmosfericamente.

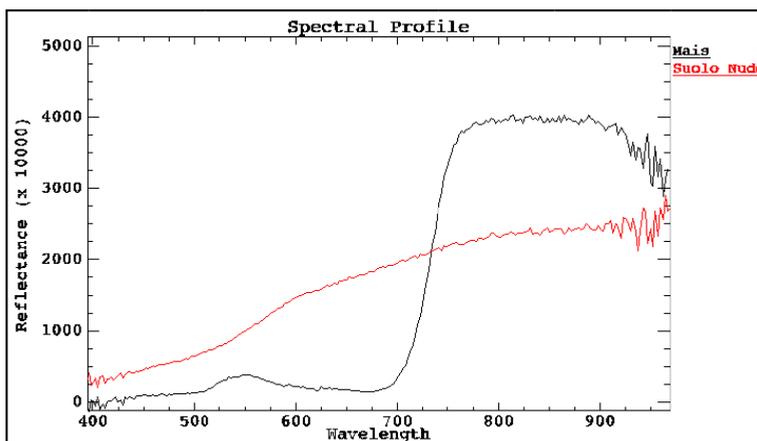


Figura 3 – Esempi di firme spettrali ricavate a partire dalle immagini AISA corrette atmosfericamente per una parcella coltivata a mais e per un suolo nudo.

Calcolo degli indici di vegetazione e analisi statistica

Le immagini acquisite e corrette sono state utilizzate per il calcolo di indici ottici iperspettrali noti in letteratura perché ben relazionati con diversi parametri strutturali e biochimici della vegetazione (Haboudane et al., 2008a). Per ogni parcella di mais sono stati estratti i valori di riflettanza ottenuti come media dei valori dei nove pixel del centro parcella (9 m²), corrispondenti all'area campionata nelle misure di campo. Le firme spettrali così ottenute sono state utilizzate per il calcolo degli indici di vegetazione riportati in tabella 4. Gli indici indagati comprendono indici relazionati alla biomassa verde (i.e. *greenness*), indici relazionati alla concentrazione di pigmenti fogliari e indici relazionati all'efficienza fotosintetica.

L'analisi statistica dei dati misurati a terra e dei dati telerilevati ha permesso di valutare la loro variabilità in funzione dello stress imposto (deficit idrico e nutrizionale). Essendo parzialmente violate le condizioni per l'analisi della varianza (ANOVA) (i.e. normalità dei dati ed omogeneità delle loro varianze) si è preferito procedere con analisi di tipo non parametrico. In particolare è stato utilizzato il test di Kruskal-Wallis, che stabilisce se esistono differenze tra i gruppi di dati divisi sulla base del trattamento applicato, seguito dal test U di Mann-Whitney con il quale è possibile stabilire quali gruppi sono diversi sulla base di un confronto degli stessi a coppie.

Un'analisi di regressione di tipo OLS (*ordinary least squares*) tra gli indici calcolati e il valore medio dei parametri vegetazionali misurati a terra (i.e. LAI, SPAD, PRI_L e $\Delta F/F_m'$) è stata condotta allo scopo di individuare gli indici maggiormente relazionati ai parametri influenzati dallo stress idrico e nutrizionale in piante di mais. La scelta degli indici è stata effettuata confrontando i coefficienti di determinazione (R²). Successivamente si è proceduto alla loro mappatura in corrispondenza di tutte le parcelle di mais del sito sperimentale.

Categoria	Indice	Formula	Riferimento
Efficienza fotosintetica	PRI	$(R_{531}-R_{570}) / (R_{531}+R_{570})$	(Gamon et al., 1992)
	SIPI	$(R_{800}-R_{445}) / (R_{800}-R_{680})$	(Penuelas et al., 1995)
Pigmenti fogliari	TCARI	$3 * [(R_{700}-R_{670}) - 0.2 * (R_{700}-R_{550}) * (R_{700}/R_{670})]$	(Haboudane et al., 2002)
	TCARI/OSAVI	TCARI/OSAVI	(Haboudane et al., 2002)
	TCARI/MSAVI	TCARI/MSAVI	(Haboudane et al., 2002)
	MTCI	$(R_{753.75}-R_{708.75}) / (R_{708.75}-R_{681.25})$	(Dash and Curran, 2004)
	MTCI/MSAVI	MTCI/MSAVI	(Haboudane et al., 2008)
	TCI	$1.2 * (R_{700}-R_{550}) - 1.5 * (R_{670}-R_{550}) * (R_{700}/R_{670})^{0.5}$	(Haboudane et al., 2008)
Greenness	TCI/OSAVI	TCI/OSAVI	(Haboudane et al., 2008)
	NDVI	$(R_{800}-R_{670}) / (R_{800}+R_{670})$	(Rouse et al., 1974)
	OSAVI	$(R_{800}-R_{670}) / (R_{800}+R_{670}+0.16)$	(Rondeaux et al., 1996)
	MSAVI	$0.5 * \{ 2 * R_{800} + 1 - [(2 * R_{800} + 1)^2 - 8 * (R_{800}-R_{670})]^{0.5} \}$	(Qi et al., 1994)

Tabella 4 – Formulazione e riferimento bibliografico degli indici ottici calcolati.

Risultati

L'analisi dei dati biochimici, strutturali e fisiologici misurati a terra nelle parcelle sperimentali ha permesso di individuare gli effetti dello stress idrico e nutrizionale sullo sviluppo delle piante di mais. In tabella 5a vengono riportate le statistiche dei diversi parametri raggruppati per livello di concimazione, in tabella 5b per livello di irrigazione. Dall'analisi statistica risulta che lo stress idrico e lo stress nutrizionale influenzano tutti i parametri misurati, sebbene non sempre in modo significativo. In particolare si osserva che, con l'aumentare del livello di irrigazione, i parametri LAI e SPAD aumentano in modo significativo solo in parcelle concimate (N1). In tali parcelle il LAI presenta valori maggiori in IRR1 e IRR2 rispetto a IRR0. I dati di SPAD mostrano invece valori maggiori in IRR2 rispetto a IRR1 e IRR0. Questo fa presupporre che parcelle IRR1, sebbene simili alle IRR2 dal punto di vista del LAI, si differenzino da queste ultime nel contenuto di clorofilla, nonostante la differenza percentuale sia minima (i.e. riduzione del contenuto relativo di

clorofilla del 3.6% in IRR1). Differenze percentuali maggiori si osservano nelle misure di PRI_L che rilevano variazioni significative anche nel caso di parcelle non concimate (N0). Essendo i valori di PRI relazionati in modo inversamente proporzionale al rapporto tra carotenoidi e clorofilla (Garbulsky et al., 2011; Stylinski et al., 2002), si può ipotizzare che il differenziamento nel valore dell'indice in piante appartenenti a parcelle non concimate - in cui il contenuto di clorofilla non si differenzia - sia dovuto alla presenza di un *pool* maggiore di pigmenti fotoprotettivi. Come previsto i valori minimi dell'indice si rilevano in parcelle sottoposte a forte stress idrico e nutrizionale (i.e. IRR0 N0). Analogamente al PRI_L , la fluorescenza $\Delta F/Fm'$ mostra variazioni significative in parcelle N0, confermando il loro potenziale utilizzo quali indicatori precoci di stress idrico in una fase precedente la diminuzione di biomassa e la clorosi fogliare.

Per quanto riguarda gli effetti del livello di concimazione si osserva che le misure di SPAD e di LAI sono le più coerenti con il trattamento imposto, mostrando valori più bassi in parcelle N0 in tutti i trattamenti irrigui. Il parametro SPAD risulta il più sensibile allo stress nutrizionale mostrando significatività statistica tra i due trattamenti in piante IRR2. La mancanza di significatività statistica in IRR0 e IRR1 viene spiegata con il fatto che la disponibilità di azoto è determinante nell'incremento di clorofilla totale soltanto in presenza di buona irrigazione, essendo la disponibilità di acqua il principale fattore limitante per il mais (Di Paolo and Rinaldi 2008).

(a) Parametro	N0			N1		
	IRR0	IRR1	IRR2	IRR0	IRR1	IRR2
LAI	1.44	2.27	2.67	1.56 b (-48%)	2.77 a (-8%)	3.00 a
SPAD	48.26	46.43	49.12	50.43 b (-7.4%)	52.86 b (-3.6%)	54.45 a
PRI_L (* 10 ³) ⁽¹⁾	2.609 b (-67%)	7.942 a (+1%)	7.857 a	0.436 b (-92%)	3.133 a (-45%)	5.662 a
$\Delta F/Fm'$ (* 10 ³) ⁽¹⁾	365.188 b (-16%)	401.787 b (-7%)	433.690 a	412.285	388.620	395.433

(b) Parametro	IRR0		IRR1		IRR2	
	N0	N1	N0	N1	N0	N1
LAI	1.44	1.56	2.27	2.77	2.67	3.00
SPAD	48.26	50.43	46.43	52.86	49.12 b (-9%)	54.45 a
PRI_L (* 10 ³) ⁽¹⁾	2.609	0.436	7.942	3.133	7.857	5.662
$\Delta F/Fm'$ (* 10 ³) ⁽¹⁾	365.188 b (-11%)	412.285 a	401.787	388.620	433.690 a (+9%)	395.433 b

Tabella 5 – Statistiche dei parametri misurati in campo su parcelle di mais. a) Suddivisione in base al livello di irrigazione. b) Suddivisione in base al livello di concimazione. I valori riportati corrispondono alla mediana, il valore di p al risultato del test di Kruskal-Wallis. In caso di significatività statistica ($p \leq 0.10$) il test di Mann-Whitney ha permesso di stabilire come si differenziano i gruppi, come indicato dalle lettere. Viene inoltre riportata la differenza percentuale rispetto al trattamento condotto in assenza di stress (IRR2, per quanto riguarda lo stress idrico e N1 per quanto riguarda lo stress nutrizionale). ⁽¹⁾ Misure effettuate alle 14.30 UTC

L'analisi di regressione tra gli indici di vegetazione calcolati a partire dall'immagine AISA e i parametri misurati a terra ha permesso di individuare l'indice meglio relazionato a PRI_L e $\Delta F/Fm'$ quale indicatore di stress idrico e quello meglio relazionato ai valori di SPAD quale indicatore di stress nutrizionale. I risultati dell'analisi di regressione sono mostrati in tabella 6. L'indice PRI si è dimostrato ben relazionato al PRI_L ($R^2 = 0.43$) e alla fluorescenza $\Delta F/Fm'$ ($R^2 = 0.49$). Sebbene altri indici analizzati (i.e. OSAVI, NDVI, MSAVI) presentino prestazioni simili al PRI, quest'ultimo comunque ha mostrato migliori correlazioni con $\Delta F/Fm'$ nel caso di parcelle N0 (PRI $R^2 = 0.61$,

OSAVI $R^2 = 0.51$, NDVI $R^2 = 0.52$, MSAVI $R^2 = 0.51$). Questo conferma la maggiore capacità del PRI di rilevare variazioni dello stato fisiologico della vegetazione sottoposta a stress idrico, che precedono variazioni biochimiche o strutturali, cosa che lo rende più adatto rispetto agli altri indici nell'individuazione precoce di stati di stress, confermando recenti risultati in letteratura (Sarlikioti et al., 2010; Suarez et al., 2010). Per quanto riguarda la relazione con il contenuto relativo di clorofilla (i.e. SPAD) sono stati testati diversi indici. In tutti i casi si è osservato un notevole miglioramento nelle regressioni se tali indici sono combinati in rapporti con indici di tipo SAVI, che normalizzano per l'effetto del suolo, confermando i risultati di Haboudane et al. (2008a; b). L'indice TCARI/OSAVI ha mostrato allo stesso tempo la migliore relazione con il parametro SPAD ($R^2 = 0.66$) minimizzando l'influenza del LAI ($R^2 = 0.21$), rivelandosi il più adatto indicatore per individuare stati di stress nutrizionale come evidenziato nella più recente letteratura (Chen et al., 2010).

Categoria	Indice	LAI	SPAD	PRI _L	$\Delta F/F_m'$
Efficienza fotosintetica	PRI	0.65***	n.s.	0.43***	0.49***
	SIPI	0.62***	n.s.	0.44***	0.45***
Pigmenti fogliari	TCARI	n.s.	0.43***	n.s.	n.s.
	TCARI/OSAVI	0.21*	0.66***	n.s.	n.s.
	TCARI/MSAVI	0.37**	0.58***	0.17*	0.27**
	MTCI	0.50	0.48***	0.23*	0.38**
	MTCI/MSAVI	n.s.	0.50***	n.s.	n.s.
	TCI	0.23**	0.21**	0.18*	0.16*
Greenness	TCI/OSAVI	n.s.	0.56***	n.s.	n.s.
	NDVI	0.69***	n.s.	0.45***	0.48***
	OSAVI	0.68***	n.s.	0.44***	0.48***
	MSAVI	0.67***	n.s.	0.42***	0.48***

Tabella 6 – Coefficienti di determinazione (R^2) e significatività (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, n.s. = non significativa) delle regressioni tra parametri misurati in campo (i.e. LAI, SPAD, PRI_L, $\Delta F/F_m'$) e indici di vegetazione calcolati dall'immagine.

In figura 7 vengono mostrate le mappe di PRI e di TCARI/OSAVI prodotte in corrispondenza del sito sperimentale. L'indice TCARI/OSAVI è stato moltiplicato per (-1) al fine di rendere il suo valore direttamente proporzionale al contenuto relativo di clorofilla. L'intervallo dei valori di ogni mappa prodotta è stato suddiviso in otto classi di uguale ampiezza, visualizzate con colori dal rosso al verde scuro per valori crescenti dell'indice. Bassi valori dell'indice, corrispondenti ai colori rosso, arancione e giallo, rappresentano quindi le situazioni di maggiore criticità. La mappa dell'indice PRI (Figura 7 b) ben evidenzia le parcelle sottoposte a stress idrico cronico (i.e. IRR0) che assumono valori bassi dell'indice, identificati dalla prevalenza di classi in arancio e giallo. Si osserva che anche le parcelle IRR1 presentano valori dell'indice minori rispetto alle parcelle irrigate a piena capacità di campo (IRR2). Sebbene nelle regressioni l'indice mostri una relazione significativa con il LAI ($R^2 = 0.65$), dalla mappa di PRI si osservano diversi casi in cui a parità di LAI le parcelle si differenziano per valore di PRI e tali differenze sono imputabili alla carenza di irrigazione: è il caso ad esempio delle parcelle 6 e 36 (LAI = 1.4 m²m⁻²), 4 e 22 (LAI = 2.6 m²m⁻²), 8 e 19 (LAI = 3.1 m²m⁻²). Questo conferma la bontà del PRI come indicatore precoce di stati di stress idrico. La mappa dell'indice TCARI/OSAVI (figura 7 c) risulta ben relazionata alla carenza di azoto. In parcelle non irrigate la mappa non mostra differenze tra le concimazioni in accordo con l'analisi statistica sui dati a terra.

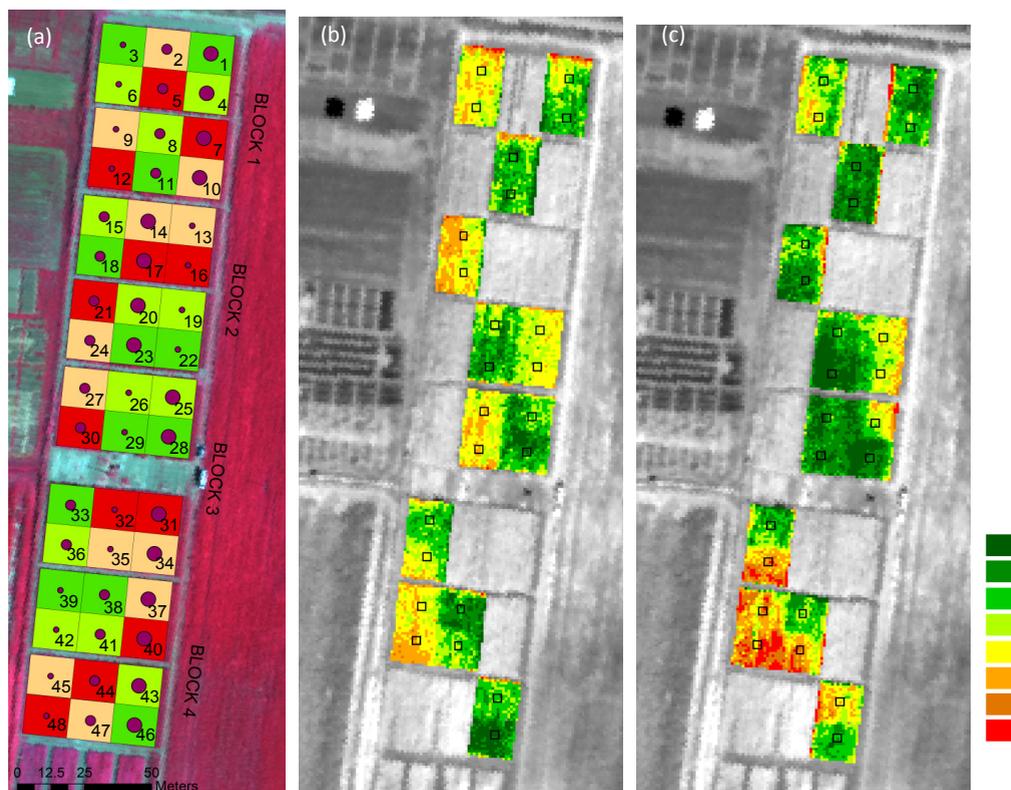


Figura 7 – (a) Schema sperimentale, in verde chiaro e scuro parcelle di mais N0 e N1, rispettivamente. I cerchi di diverso diametro rappresentano il livello di irrigazione, dal più piccolo al più grande, indicando irrigazione crescente, IRR0, IRR1 e IRR2. (b) Mappa di PRI. (c) Mappa di TCARI/OSAVI.

Il confronto visivo delle mappe di PRI e di TCARI/OSAVI evidenzia la diversa informazione contenuta nei due indici. Questa è confermata dall'analisi statistica effettuata sui valori delle mediane degli indici PRI e TCARI/OSAVI calcolati a livello di intera parcella (tabella 8). L'indice PRI fornisce un ottimo risultato dal momento che rileva differenze nei trattamenti irrigui all'interno di entrambi i livelli di concimazione (tabella 8 a). L'indice TCARI/OSAVI si conferma invece relazionata allo stress nutrizionale. Si osserva che in tutti i casi le mediane dell'indice assumono valori minori in corrispondenza di parcelle non concimate (N0). Le differenze sono significative solo nel caso di parcelle irrigate (IRR2), in accordo con i dati di campo di SPAD (tabella 8 b).

(a)	N0			N1		
	IRR0	IRR1	IRR2	IRR0	IRR1	IRR2
Indice PRI	-0.064 b	-0.044 ab	-0.029 a	-0.066 b	-0.025 a	-0.007 a
-(TCARI/OSAVI)	-0.123	-0.125	-0.116	-0.119	-0.102	-0.094

(b)	IRR0		IRR1		IRR2	
	N0	N1	N0	N1	N0	N1
Indice PRI	-0.064	-0.066	-0.044	-0.025	-0.024	-0.010
-(TCARI/OSAVI)	-0.123	-0.119	-0.125	-0.102	-0.116 b	-0.094 a

Tabella 8 – Analisi statistica effettuata sui valori di PRI e TCARI/OSAVI sulle parcelle di mais. a) Suddivisione in base al livello di irrigazione. b) Suddivisione in base al livello di concimazione. In entrambi i casi i valori riportati corrispondono alla mediana. In caso di significatività statistica ($p \leq 0.10$) il test di Mann-Whitney ha permesso di stabilire come si differenziano i gruppi, come indicato dalle lettere.

Conclusioni

In questo lavoro sono state indagate le potenzialità del telerilevamento iperspettrale per il monitoraggio di situazioni di deficit idrico e/o nutrizionale in colture cerealicole quali il mais. In particolare sono stati testati diversi indici iperspettrali relazionati a parametri biochimici, strutturali e fisiologici della vegetazione. L'acquisizione di immagini iperspettrali su un campo sperimentale costituito da parcelle di mais cresciute con diversi trattamenti irrigui e nutrizionali ha permesso lo studio ed il confronto delle diverse tecniche indagate al fine di produrre mappe di deficit di acqua e nutrienti. L'analisi statistica delle misure di campo è stata effettuata al fine di relazionare la loro variabilità ai fattori di stress imposti. L'analisi di regressione tra misure di campo e indici ottici iperspettrali ha permesso di individuare il PRI quale indicatore più sensibile allo stress idrico e il TCARI/OSAVI allo stress nutrizionale, che si manifesta solo in caso di adeguato apporto di acqua nel campo, confermando che lo stress idrico è il fattore più limitante nella crescita del mais. Le mappe prodotte sono il primo passo verso la creazione di mappe di prescrizione di acqua e di azoto, obiettivo principale in un contesto di agricoltura di precisione. La metodologia messa a punto e validata nel sito sperimentale rappresenta un innovativo approccio verso un utilizzo più razionale ed ecosostenibile della risorsa idrica e delle concimazioni azotate.

Ringraziamenti

Questo progetto è stato finanziato da Axia (CRUI-Nestlé - Università e Impresa per la ricerca). La campagna di misure a terra è parte del progetto EDOCROS sponsorizzato da EUFAR (European Facility For Airborne Research project) Transnational Access project. Si desidera ringraziare D. Bigogno, B. Di Mauro, M. Ferretti (DISAT-UNIMIB, Milano), M. Musanti (IREA-CNR, Milano) e M. Bergonti (Università Cattolica di Piacenza) per il supporto nella campagna di misura a terra.

Bibliografia

- Busetto L., Meroni M., Crosta G.F., Guanter L., Colombo R. (2011), "SpecCal: Novel software for in-field spectral characterization of high-resolution spectrometers", *Computers & Geosciences*, In Press, Corrected Proof.
- Chen P., Haboudane D., Tremblay N., Wang J., Vigneault P., Li B. (2010), "New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat", *Remote Sensing of Environment*, 114:1987-1997.
- Dash J., Curran P.J. (2004), "The MERIS terrestrial chlorophyll index", *International Journal of Remote Sensing*, 25:5403-5413.
- Di Paolo E., Rinaldi M. (2008), "Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment", *Field Crops Research*, 105:202-210.
- Gamon J.A., Penuelas J., Field C.B. (1992), "A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency", *Remote Sensing of Environment*, 41:35-44.
- Gamon J.A., Field C.B., Bilger W., Bjorkman O., Fredeen A.L., Penuelas J. (1990), "Remote-Sensing of the Xanthophyll Cycle and Chlorophyll Fluorescence in Sunflower Leaves and Canopies", *Oecologia*, 85:1-7.
- Garbulsky M.F., Penuelas J., Gamon J., Inoue Y., Filella I. (2011), "The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies A review and meta-analysis", *Remote Sensing of Environment*, 115:281-297.
- Haboudane D., Tremblay N., Miller J.R., Vigneault P. (2008a), "Remote estimation of crop chlorophyll content using spectral indices derived from hyperspectral data", *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46:423-437.
- Haboudane D., Tremblay N., Miller J.R., Vigneault P. (2008b) Estimation of plant chlorophyll using hyperspectral observations and radiative transfer models: Spectral indices sensitivity and crop-type effects, *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Ieee, Boston, MA., pp. III:569-III:572.

- Haboudane D., Miller J.R., Tremblay N., Zarco-Tejada P.J., 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.
- Markwell J., Osterman J.C., Mitchell J.L. (1995), "Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter", *Photosynthesis Research*, 46:467-472.
- Meroni M., Panigada C., Rossini M., Picchi V., Cogliati S., Colombo R. (2009), "Using optical remote sensing techniques to track the development of ozone-induced stress", *Environmental Pollution*, 157:1413-1420.
- Meroni M., Picchi V., Rossini M., Cogliati S., Panigada C., Nali C., Lorenzini G., Colombo R. (2008), "Leaf level early assessment of ozone injuries by passive fluorescence and photochemical reflectance index", *International Journal of Remote Sensing*, 29:5409-5422.
- Meroni M., Busetto L., Guanter L., Cogliati S., Crosta G.F., Migliavacca M., Panigada C., Rossini M., Colombo R. (2010), "Characterization of fine resolution field spectrometers using solar Fraunhofer lines and atmospheric absorption features", *Applied Optics*, 49:2858-2871.
- Panigada C., Rossini M., Busetto L., Meroni M., Fava F., Colombo R. (2010), "Chlorophyll concentration mapping with MIVIS data to assess crown discoloration in the Ticino Park oak forest", *International Journal of Remote Sensing*, 31-12: 3307-3332.
- Penuelas J., Baret F., Filella I. (1995), "Semiempirical Indexes to Assess Carotenoids Chlorophyll-a Ratio from Leaf Spectral Reflectance", *Photosynthetica*, 31:221-230.
- Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., Sorooshian S. (1994), "A Modified Soil Adjusted Vegetation Index", *Remote Sensing of Environment*, 48:119-126.
- Rondeaux G., Steven M., Baret F. (1996), "Optimization of soil-adjusted vegetation indices", *Remote Sensing of Environment*, 55:95-107.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C. (1974) *Monitoring the Vernal Advancements and Retro Gradation of Natural Vegetation*, NASA/GSFC Final Report Greenbelt, MD, USA. pp. 371.
- Sarlikioti V., Driever S.M., Marcelis L.F.M. (2010), "Photochemical reflectance index as a mean of monitoring early water stress", *Annals of Applied Biology*, 157:81-89.
- Stylinski C.D., Gamon J.A., Oechel W.C. (2002), "Seasonal patterns of reflectance indices, carotenoid pigments and photosynthesis of evergreen chaparral species", *Oecologia*, 131:366-374.
- Suarez L., Zarco-Tejada P.J., Sepulcre-Canto G., Perez-Priego O., Miller J.R., Jimenez-Munoz J.C., Sobrino J. (2008), "Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery", *Remote Sensing of Environment*, 112:560-575.
- Suarez L., Zarco-Tejada P.J., Gonzalez-Dugo V., Berni J.A.J., Sagardoy R., Morales F., Fereres E. (2010), "Detecting water stress effects on fruit quality in orchards with time-series PRI airborne imagery", *Remote Sensing of Environment*, 114:286-298.