

**Università degli studi di Napoli Federico II**  
**Dipartimento di Agraria**



TESI DI DOTTORATO IN  
VALORIZZAZIONE E GESTIONE DELLE RISORSE AGRO-FORESTALI  
*Analisi e Modellistica dei Sistemi Agrari e Forestali*  
XXVI CICLO *Marzo 2014*

**INDIVIDUAZIONE DELLE AREE IRRIGATE IN ZONE SEMIARIDE.  
UN APPROCCIO SEMPLIFICATO A SCALA LOCALE UTILIZZANDO  
DATI DI OSSERVAZIONE DELLA TERRA.**

CARLO DE MICHELE

Tutor e Coordinatore del Dottorato

Prof. Ing. GUIDO D'URSO

*Alle mia famiglia,  
al futuro prossimo e remoto.*

## RINGRAZIAMENTI

Molte sono le persone a cui vanno i miei ringraziamenti. Gli elenchi rischiano, quasi sempre, di essere incompleti e mi scuso con chi avrò dimenticato. I miei più sentiti ringraziamenti vanno innanzitutto all'amico professor Guido D'Urso per i preziosi suggerimenti, il sostegno e, soprattutto, la sua capacità di vedere le cose sempre in un'ottica positiva. Ringrazio i miei soci e i colleghi e amici dello Spin off Accademico Ariespace srl (Francesco, Luigi, Marco, Gigi). Tra loro un particolare ringraziamento va all'amico ing. Salvatore Falanga Bolognesi per l'amicizia e la disponibilità ad aiutarmi a organizzare tutti i dati raccolti. Ringrazio anche il dott. Lombardi per il supporto nella raccolta dei dati di verità a terra. Ovviamente un ringraziamento va a tutto lo staff tecnico del Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano, in particolare al direttore ing. Natalizio. Ringrazio i coordinatori dei progetti PSR 2007-2013 IRRISAT e EU FP7 SIRIUS per i materiali messi a disposizione nell'ambito di questo lavoro.

Infine un ringraziamento speciale va alla mia famiglia che mi ha sostenuto dal primo all'ultimo minuto di tutto il tempo che ho sottratto loro.

## ABSTRACT

### *Italiano*

La mappatura delle aree irrigate è un'informazione di rilevante importanza per i gestori delle risorse idriche, sia al fine di pianificare un uso razionale quando le disponibilità sono limitate, sia per la prevenzione dei prelievi non autorizzati dalle reti irrigue. Molti studi dimostrano che i dati di osservazione della terra sono un efficace strumento per la mappatura delle aree irrigate in ogni parte del mondo e a differenti scale spaziali (globali, regionali, locali). Obiettivo di questa tesi è la definizione di un'innovativa metodologia basata su dati di osservazione della Terra per la mappatura delle aree irrigate a scala locale in ambiente semi-arido. L'assunzione di base è che, in condizione di deficit idrologico, tipiche degli ambienti semi-aridi, elevati trend di crescita colturale sono compatibili solo con il ricorso all'irrigazione. La metodologia utilizzata si basa su un innovativo approccio semi-automatico che utilizza due serie di acquisizioni multi-spettrali con differenti risoluzioni spaziali e temporali dei sensori DEIMOS e Rapid Eye. Il metodo è stato applicato per mappare le aree irrigate di una parte del comprensorio irriguo del consorzio di bonifica del Sannio Alifano situato nel sud Italia, caratterizzato da agricoltura irrigua (prevalenza di colture di mais, erba medica, alberi da frutta e colture orticole) e dimensione media delle parcelle di circa 2 ettari. I risultati hanno mostrato un'elevata accuratezza delle mappe ottenute. Le future applicazioni della metodologia proposta potranno avvantaggiarsi delle informazioni delle bande di infrarosso ad onde corte del nuovo sensore di Sentinel 2.

### *English*

Water managers need map of irrigated areas to plan a rational use of water under limited availability and to prevent the unauthorized withdrawals. Many authors have shown that the earth observation techniques are an effective tool for mapping irrigated areas worldwide and at different spatial scales (global , regional, local ). The goal of this work is the developing of new and innovative methodology based on Earth observation data for mapping irrigated areas in semi-arid environment. The methodology is based on two series of multi-spectral acquisitions from two sensors which have different spatial and temporal resolutions (DEIMOS, Rapid Eye). The irrigated area is identified based on growing patterns of NDVI under water deficit conditions. The method has been

applied in the irrigation district of the Sannio Alifano Consortium, located in the south of Italy. Here, agriculture needs irrigation: most crops are corn, alfalfa , fruit trees and vegetable crops; the average plot size is about 2 hectares. The accuracy assessment indicates that the map achieves good results. The future applications of the proposed methodology will be able to take advantage of the information of short wave infrared bands of the new sensor Sentinel 2.

## SOMMARIO

RINGRAZIAMENTI.....	I
ABSTRACT .....	II
SOMMARIO .....	IV
INDICE DELLE FIGURE .....	VI
1 . INTRODUZIONE .....	10
1.1 Vantaggi nell'utilizzo dei dati di osservazione della Terra .....	13
1.2 Rassegna della letteratura .....	17
1.2.1 Studi a scala Globale .....	19
1.2.2 Studi a scala Regionale.....	22
1.2.3 Studi a scala locale .....	26
1.3 Obiettivo della tesi.....	28
1.4 Organizzazione della tesi .....	29
2 INDIVIDUAZIONE DELLE AREE IRRIGATE: METODI UTILIZZATI .....	30
2.1 Introduzione: il telerilevamento per lo studio della vegetazione .....	30
2.2 Proposta metodologica per la mappatura delle aree irrigue.....	34
2.3 Scelta dei dati di osservazione della Terra .....	37
2.3.1 Requisiti di risoluzione Spaziale .....	37
2.3.2 Requisiti di Risoluzione Spettrale. Indici di vegetazione .....	39
2.3.3 Requisiti di risoluzione temporale.....	46
2.4 Pre-processamento delle immagini satellitari .....	48
2.5 Classificazione multi-temporale.....	48
2.5.1 Algoritmi di classificazione .....	48
2.5.2 Pre - Classificazione e estrazione dei pattern multi-temporali.....	54
2.5.3 Dai pattern temporali alle classi irrigue.....	56
2.5.4 Post – Classificazione supervisionata .....	60

3	CASO DI STUDIO .....	62
3.1	Inquadramento dell'area di studio.....	62
3.1.1	Applicazioni del Telerilevamento nell'area di studio: i progetti IRRISAT e SIRIUS. 64	
3.1.2	Sistema informativo geografico. ....	66
3.1.3	Stima dell'indice di aridità dell'area di studio .....	67
3.2	Scelta dei dati di osservazione della Terra .....	71
3.3	Serie multi-temporali di indici di vegetazione NDVI .....	78
3.3.1	Pre-processamento delle immagini satellitari .....	78
3.3.2	Calcolo dell'indice NDVI.....	79
3.3.3	Pre - Classificazione multi-temporale e estrazione dei pattern multi-temporali.....	79
3.3.4	Riconoscimento delle classi di colture irrigue .....	83
3.4	Classificazione assistita .....	88
3.5	Accuratezza. ....	90
3.6	Valutazione dei costi delle acquisizioni satellitari.....	92
4	SINTESI DEI RISULTATI .....	94
4.1	Metodologia proposta.....	94
4.2	Gestione irrigua consortile.....	96
5	SVILUPPI FUTURI .....	98
6	BIBLIOGRAFIA.....	100

## INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1.1 TECNICA DI DECOMPOSIZIONE DEI PIXEL (IAF-SPDT) NEL PIANO DELLE BANDE ROSSO (RED)E VICINO INFRAROSSO (NIR): LA FRAZIONE DI AREA IRRIGATA (IRRIGATED AREA FRACTION) VIENE DETERMINA A SECONDA DELLA POSIZIONE DEL PIXEL NEL PIANO. (DA THENKABAILC, BIRADAR, AND NOOJIPADY 2007) .....	21
FIGURA 1.2 – ANDAMENTO TEMPORALE DELL'INDICE NDVI E PROFILI DI PRECIPITAZIONE DI APPEZZAMENTI IRRIGATI E NON IRRIGATI; LE LINEE RAPPRESENTANO IL VALORE MEDIO DI RISPOSTA DI UN CAMPIONE DI CIRCA CINQUE SITI. (DA OZDOGAN AND GUTMAN 2008).....	23
FIGURA 1.3 – CURVE A SPIRALE SPAZIO-TEMPORALI (ST-SC) DEI CAMBIAMENTI DELLE CARTE DI USO DEL SUOLO E DI COPERTURA DEL SUOLO LULC MEDIANTE LA SEPARABILITÀ SPETTRALE DELLE DIVERSE CLASSI. LE RIFLETTANZA NELLE BANDE 1 (ROSSA) E 2 (NIR) DI MODIS SONO UTILIZZATE PER TRACCIARE L.(PRASAD S. THENKABAIL, SCHULL, AND TURRAL 2005) .....	24
FIGURA 1.4 VISTA DA SATELLITE IN FALSI COLORI (NIR, RED, GREEN) DI UN CAMPO DI MAIS E RELATIVA FOTO IN CAMPO.....	27
FIGURA 2.1 – ILLUSTRAZIONE SCHEMATICA DELLE RELAZIONI TRA RADIANZA RICEVUTA DAL SENSORE, RADIANZA RIFLESSA DALLA SUPERFICIE E RADIANZA INCIDENTE. ( <a href="http://auracle.ca/">HTTP://AURACLE.CA/</a> ). .....	31
FIGURA 2.2 – ILLUSTRAZIONE SCHEMATICA DI UN'IMMAGINE DIGITALE TELERILEVATA. ( <a href="http://auracle.ca/">HTTP://AURACLE.CA/</a> ). .....	32
FIGURA 2.3 – ANDAMENTI TIPICI DELLA RIFLETTANZA PER VEGETAZIONE VERDE, VEGETAZIONE SECCA E SUOLO.....	33
FIGURA 1.8 WORK FLOW DEL PROCESSO DI INDIVIDUAZIONE DELLE AREE IRRIGUE .....	36
FIGURA 2.5 – DATA UNA SORGENTE PUNIFORME LA RISOLUZIONE GEOMETRICA DIPENDE DALLA DISTANZA S DELLA FUNZIONE DI DISPERSIONE DEL SENSORE PSF.....	38
FIGURA 2.6 – LUNGHEZZE D'ONDA DEI SENSORI OLI E TIRS TRASPORTATI DAL LANDSAT 8. ( <a href="http://landsat.gsfc.nasa.gov/">HTTP://LANDSAT.GSFC.NASA.GOV/</a> ) .....	40
FIGURA 2.7. ANDAMENTO STAGIONALE TEORICO DELL'INDICE NDVI CON INDICAZIONE DEI LIMITI DELLE FASI FENOLOGICHE.....	43
FIGURA 2.8. RIFLETTANZA, NELLE DIVERSE LUNGHEZZE D'ONDA DI UNA VEGETAZIONE VERDE, VEGETAZIONE SECCA E SUOLO NUDO. IN ROSSO E AZZURRO SONO RIPORTATE RISPETTIVAMENTE LE BANDE CORRISPONDENTI AL NIR E LO SWIR TIPICI DEI SENSORI ATTUALMENTE OPERANTI (LE AMPIEZZE DELLE BANDE NON SONO RAPPRESENTATIVE DI UNO SPECIFICO SENSORE).....	46
FIGURA 2.9 – CALENDARIO DI ALCUNE COLTURE PRESENTI IN ITALIA.....	47
FIGURA 2.10 : ANDAMENTO DEL COEFFICIENTE COLTURALE $K_C$ PER IL MAIS E L'ERBA MEDICA IN REGIONE CAMPANIA. (ARIESPACE 2011).....	47
FIGURA 2.11 – SCHEMA CONCETTUALE DEL CLASSIFICATORE <i>MAXIMUM LIKEHOOD</i> .....	50
FIGURA 2.12 – CONFRONTO TRA IL CLASSIFICATORE <i>MAXIMUM LIKEHOOD</i> E DISTANZA PARALLELEPIPEDA.....	50

FIGURA 2.13 – MATRICE D'ERRORE DELLA CLASSIFICAZIONE .....	51
FIGURA 2.14 : CLUSTER E FRONTIERA DELLE DIVERSE CLASSI SUDDIVISA IN BASE ALLE FUNZIONI DI DECISIONE .....	53
FIGURA 2.15 : CLASSIFICAZIONE ISODATA DELLA SERIE TEMPORALE DI MAPPE DI NDVI. CLUSTER E FRONTIERA DELLE DIVERSE CLASSI SUDDIVISA IN BASE ALLE FUNZIONI DI DECISIONE .....	55
FIGURA 2.16 : SCHEMA LOGICO ASSEGNAZIONE LABEL ALLE CLASSI/CLUSTER DELLA CLASSIFICAZIONE AUTOMATICA PER L'INDICE NDVI.....	57
FIGURA 2.17 – ANDAMENTI MULTI TEMPORALE SCHEMATICI DELL'INDICE NDVI. UN ANDAMENTO TIPO DELLA FIGURA A SINISTRA È DA CONSIDERARE NON IRRIGUO (NESSUN TREND DI CRESCITA DELLA COLTURA); UN ANDAMENTO TIPO DELLA FIGURA A DESTRA RIGUARDA UNA COLTURA CON VIGORE VEGETATIVO COSTANTE, TIPICO AD ESEMPIO DI ALCUNE COLTURE ARBOREE IRRIGUE (CLASSE C). .....	58
FIGURA 2.18 – ANDAMENTI MULTI TEMPORALE SCHEMATICI DELL'INDICE NDVI. UN ANDAMENTO TIPO DELLA FIGURA A SINISTRA È DA CONSIDERARE IRRIGUO (CLASSE A):SI NOTANO LA ZONA DI SVILUPPO, LA MATURITÀ E LA SENESCENZA; UN ANDAMENTO TIPO DELLA FIGURA A DESTRA PUÒ ESSERE INTERPRETATO COME QUELLO DI SINISTRA TRASLATO NEL TEMPO, PER CUI È DA CONSIDERARSI ANCORA IRRIGUO (CLASSE A). .....	58
FIGURA 2.19 – ANDAMENTI MULTI TEMPORALE SCHEMATICI DELL'INDICE NDVI. I DUE ANDAMENTI IN FIGURA SONO DA CONSIDERARSI TRASLAZIONI TEMPORALI (IN AVANTI, SEMINA TARDIVA A SINISTRA, INDIETRO, SEMINA PRECOCE, A DESTRA) DEL GRAFICO TIPICO DI UNA COLTURA CON VIGORE VEGETATIVO CRESCENTE CHE DEVE CONSIDERARSI IRRIGUO (CLASSE A). .....	59
FIGURA 2.20 – ANDAMENTI MULTI TEMPORALE SCHEMATICI DELL'INDICE NDVI. GLI ANDAMENTI TIPO RAPPRESENTATI SONO DA CONSIDERARE IRRIGUI (CLASSE B); SONO TIPICI DII UNA COLTURA SOGGETTA A PIÙ TAGLI DURANTE LA STAGIONE: .....	59
FIGURA 2.21 – PROCEDURA PER LA CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI AD ALTA RISOLUZIONE (SERIE CORTA) SCEGLIENDO I PIXEL DI TRAINING SULLA BASE DELLA CLASSIFICAZIONE MULTI-TEMPORALE DI INDICE NDVI EFFETTUATA SULLA SERIE LUNGA DI IMMAGINI A BASSA RISOLUZIONE .....	61
FIGURA 3.1- COROGRAFIA DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO.....	63
FIGURA 3.2- VISTA DEL WEB GIS CONSORTILE .....	66
FIGURA 3.3- FORM INSERIMENTO DATI COLTURALI DELL'APPEZZAMENTO .....	67
FIGURA 3.4 - VARIABILITÀ DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE DI RIFERIMENTO $ET_0$ CUMULATA NELL'AREA DI INTERESSE. DATI IN MM, PERIODO GIUGNO SETTEMBRE.....	69
FIGURA 3.5 – EVAPOTRASPIRAZIONE DI RIFERIMENTO $ET_0$ . (METODO FAO) E PIOGGIE RELATIVE ALLA STAZIONE DI ALIFE (GIUGNO SETTEMBRE 2013 – DATO GIORNALIERO) .....	70
FIGURA 3.6 – EVAPOTRASPIRAZIONE DI RIFERIMENTO $ET_0$ . (METODO FAO) E PIOGGIE RELATIVE ALLA STAZIONE DI ALIFE (GIUGNO SETTEMBRE 2013 – DATO SETTIMANALE E CUMULATO).....	70

FIGURA 3.7 – BANDE E LUNGHEZZE D’ONDA DEL LANDSAT 8 OLI E TIRS COMPARATI CON IL SENSORE ETM+ DI LANDSAT 7. IN GRIGIO È RIPORTATA LA TRASMISSIVITÀ DELL’ATMOSFERA (USGS 2013) .....	74
FIGURA 3.8 IMMAGINI A CONFRONTO: DIFFERENZA DI RISOLUZIONE SPAZIALE TRA L’IMMAGINE RAPIDEYE (SULLA SINISTRA) E DEIMOS (SULLA DESTRA) . IMMAGINI IN FALSI COLORI (NIR, RED, GREEN).....	77
FIGURA 3.9. MODELLO CALCOLO NDVI PER IL SENSORE DEIMOS.....	79
FIGURA 3.10 – ANDAMENTO TEMPORALE DI INDICE NDVI DI UNA PARCELLA IRRIGUA- SI NOTA IL TREND DI CRESCITA DELL’INDICE NDVI. PERIODO GIUGNO- SETTEMBRE 2013 (DATE: 13/6; 20/6; 3/7) .	81
FIGURA 3.11 – PIOGGE NETTE SETTIMANALI, IN MM, PER IL PERIODO DI ANALISI DEGLI ANDAMENTI TEMPORALI DI NDVI.....	84
FIGURA 3.12 – CLASSI DI ANDAMENTI TEMPORALI MEDI DI NDVI ESTRATTE MEDIANTE LA PROCEDURA NON SUPERVISIONATA. ....	85
FIGURA 3.13 – A) IN ALTO, STRALCIO DI MAPPA DELLA CLASSIFICAZIONE MULTI-TEMPORALE DI NDVI DI IMMAGINI DEIMOS. IN ROSSO LE AREE IRRIGATE DI CLASSE A, IN CIANO QUELLE DI CLASSE B, IN VERDE LE CLASSI C. B) IN BASSO, LA SOLA CLASSE A DOPO LA CLASSIFICAZIONE SUPERVISIONATA DELL’IMMAGINE RAPID EYE AD ALTA RISOLUZIONE SONO RAPPRESENTATE ANCHE LE PARCELLE DEL SISTEMA INFORMATIVO CONSORTILE CHE PERMETTONO DI VALUTARE UN SOSTANZIALE ACCORDO CON LA MAPPA PRODOTTO, SOPRATTUTTO CON AREE IRRIGATE DI CLASSE A .....	89
FIGURA 3.14 – SOPRALLUOGO SU UN CAMPO DI MAIS PER LA DEFINIZIONE DELLE VERITÀ A TERRA. ....	92
FIGURA 5.1 SENTINEL-2 10 M SPATIAL RESOLUTION BANDS: B2 (490 NM), B3 (560 NM), B4 (665 NM) AND B8 (842 NM); 20 M SPATIAL RESOLUTION BANDS: B5 (705 NM), B6 (740 NM), B7 (783 NM), B8B (865 NM), B11 (1610 NM) AND B12 (2190 NM); 60 M SPATIAL RESOLUTION BANDS: B1 (443 NM), B9 (940 NM) AND B10 (1375 NM).....	99

## INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1.1 : ANALISI DELLE PROCEDURE DI INDIVIDUAZIONE DELLE AREE IRRIGUE: PUNTI DI FORZA E PUNTI DI DEBOLEZZA .....	15
TABELLA 1.2. SENSORI OTTICI ATTIVI E LORO CARATTERISTICHE UTILI NELL'AMBITO DELL'INDIVIDUAZIONE INDIVIDUAZIONE DELLE AREE IRRIGATE, ADATTAMENTO DA OZDOGAN ET AL. (2010). .....	18
TABELLA 1.3. PRINCIPALI SENSORI E TECNICHE APPLICATE ALLE DIVERSE SCALE SPAZIALI. ....	18
TABELLA 2.1 SCALA DELLA MAPPA, MINIMA UNITÀ RICONOSCIBILE, RISOLUZIONE DEL RASTER CORRISPONDENTE (DA TOBLER 1988 RIDISEGNATA) .....	39
TABELLA 2.2 PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEI SENSORI SATELLITARI MULTISPETTRALI AD ALTA RISOLUZIONE OPERANTI NELLO SPETTRO DEL VISIBILE VIS E DELL'INFRAROSSO VICINO NIR+SWIR.(D'URSO 2011) .....	41
TABELLA 3.1 – CLASSIFICAZIONE INDICE DI ARIDITÀ.....	68
TABELLA 3.2 - EVAPOTRASPIRAZIONE DI RIFERIMENTO ET0. (METODO FAO) E PIOGGIE RELATIVE ALLA STAZIONE DI ALIFE(GIUGNO SETTEMBRE 2013 – DATO SETTIMANALE) .....	71
TABELLA 3.3 – SENSORI CANDIDATI PER LA MAPPATURA DELLE AREE IRRIGATE IN VALLE TELESINA....	73
TABELLA 3.4 – DEIMOS 1: CARATTERISTICHE DI ACQUISIZIONE (DATI DICHIARATI DELLA MISSIONE)..	75
TABELLA 3.5 – RAPIDĒYE: CARATTERISTICHE DI ACQUISIZIONE (DATI DICHIARATI DELLA MISSIONE). ...	77
TABELLA 3.6 – PROGRAMMAZIONE ACQUISIZIONI IMMAGINI .....	78
TABELLA 3.7 PARAMETRI UTILIZZATI PER LA CLASSIFICAZIONE.....	80
TABELLA 3.8 –VALORI MEDI DI INDICI NDVI DELLE VENTI CLASSI ESTRATTE CON IL CLASSIFICATORE ISODATA.....	83
TABELLA 3.9 –RICODIFICA DELLE CLASSI .....	84
TABELLA 3.10 - MATRICE DI ERRORE E VALORI DELLE MISURE DI ACCURATEZZA DELLA PROCEDURA..	90
TABELLA 3.11 CARATTERISTICHE E COSTI DI ACQUISIZIONE DEI DUE SENSORI DEIMOS E RAPIDĒYE. ...	93

## 1 INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, grazie ai notevoli progressi tecnologici, vi è stato un forte incremento produttività dei terreni agricoli. In particolare si stima che, negli ultimi 40 anni, a fronte di una produzione agricola mondiale più che raddoppiata, la superficie dei terreni utilizzati è cresciuta solo del 12 %. Tale risultato è stato dovuto, in parte, ad un miglioramento dei sistemi di irrigazione (Gleick 2003). L'acqua è uno dei fattori più importanti per le produzioni agricole, tanto che oltre il 70 per cento delle acque dolci prelevate dai corpi idrici superficiali e dalle falde sotterranee è utilizzato in agricoltura (Cai and Rosegrant 2002). Sull'intero pianeta, circa 2.800 km<sup>3</sup> di acqua vengono prelevati ogni anno per irrigare quasi il 24% dei terreni coltivati, che da soli rappresentano circa il 34% della produzione agricola mondiale. Solo per fare qualche esempio, senza irrigazione, la produzione cerealicola mondiale diminuirebbe di circa il 20% (Foley, Ramankutty, & Brauman, 2011). Recenti proiezioni stimano che il continuo aumento della necessità mondiale di cibo e di altri prodotti agricoli, comporterà un aumento di almeno il 50 per cento delle risorse idriche utilizzate in agricoltura, localizzato prevalentemente nelle regioni aride e semi-aride del mondo (Cai & Rosegrant, 2002). Il clima, infatti, gioca un ruolo importante nella distribuzione dell'agricoltura irrigua poiché influisce sulla disponibilità di risorse naturali, sulla scelta dell'alternanza dei diversi sistemi colturali e sulle richieste idriche delle colture. Infatti, mentre nei climi umidi, l'irrigazione assume spesso la forma di una fornitura supplementare rispetto alle precipitazioni naturali, nei climi aridi e semi-aridi, invece, essa rappresenta l'unico modo per garantire le produzioni agricole. Le modalità di approvvigionamento delle risorse idriche necessarie a irrigare dipendono fortemente dai diversi contesti naturali e climatici. Le acque sotterranee rappresentano circa il 30% del totale delle acque utilizzate in agricoltura in Cina, Pakistan e Messico. In tali regioni, in cui i prelievi superano i tassi di ricarica delle falde, la quantità e la qualità delle acque sotterranee si deteriorano rapidamente, mettendo a repentaglio la sostenibilità delle pratiche irrigue. A ciò si aggiungono spesso le tensioni dovute all'utilizzo concorrente dei settori domestico e industriale. Le difficoltà non sono minori quando si fa

riferimento all'utilizzo delle acque superficiali. Sebbene il loro utilizzo possa apparire più sostenibile, ciò non è del tutto vero. Infatti, per utilizzare le acque provenienti dai grandi bacini naturali, sono spesso necessarie grandi strutture di ingegneria quali dighe, opere di adduzione e reti di distribuzione. Anche il loro utilizzo è, molte volte, fonte di tensioni e conflitti, soprattutto nel caso di utilizzazione di acque di grandi bacini fluviali sovranazionali, come avvenuto in Medio Oriente ed in Asia centrale.

Anche in Europa l'agricoltura è di gran lunga la maggiore utilizzatrice di acqua: ad esempio, in Spagna, Grecia e Portogallo, rispettivamente il 64%, 88% e 80% del totale delle risorse idriche sono destinate all'agricoltura, con impatti significativi ambientali ed economici (OCSE 2006). Tale aspetto è ancora più critico se si osserva che in Europa, circa il 75% dei 16 milioni di ettari di terreni agricoli attrezzati è concentrato nei paesi mediterranei (Francia, Grecia, Italia, Portogallo e Spagna), esposti periodicamente a periodi di crisi nella disponibilità d'acqua. In questi Paesi, la corretta gestione dell'irrigazione è un obiettivo strategico per rendere più efficiente l'utilizzo delle risorse idriche. Dopo una prima fase di ingenti investimenti, basati sul concetto che la modernizzazione dell'irrigazione richiedesse innanzitutto nuove infrastrutture irrigue, oggi si guarda con molta più attenzione alla ricerca di nuovi sistemi e tecnologie per la migliore gestione delle opere derivanti da tali investimenti.

Una delle criticità è legata alla disponibilità di dati aggiornati sull'effettiva estensione delle aree irrigate e sulla valutazione dei fabbisogni idrici delle colture. Allo stato attuale, infatti, le metodologie applicate negli Stati membri dell'UE per la stima dei volumi idrici destinati ad uso irriguo sono prevalentemente di tipo conoscitivo, amministrativo o comunque indiretti: essi includono questionari, coefficienti d'uso dell'acqua, diritti d'acqua, ore di funzionamento degli impianti di sollevamento e altri metodi di stima empirici (Nagy, M and Lenz, K and Windhofer, G and Fuerst, J and Fribourg-Blanc 2007). Nonostante la direttiva acqua (2000/60 CE) preveda che per ogni distretto idrico si debba conoscere la qualità e la quantità delle acque impiegate per i diversi utilizzi, non vi è, ad oggi, un sistema che possa garantire l'effettiva misurazione delle acque utilizzate per scopi irrigui (Wriedt et al. 2009). Un caso

emblematico è quello della Spagna dove il World Wildlife Fund stima che il 45% delle estrazioni dalle falde acquifere sia illegale o comunque non registrato (García-Mollá 2013). La disponibilità e la conoscenza di dati obiettivi in questo campo è particolarmente carente anche Italia. Infatti, nel nostro Paese, la frammentarietà e la complessità dell'organizzazione degli enti di gestione dell'irrigazione, unitamente alla scarsa conoscenza degli approvvigionamenti di privati che spesso sfuggono al controllo pubblico, rendono in sostanza impossibile una determinazione precisa dei volumi utilizzati per uso irriguo.(Zucaro and Pontrandolfi 2006).

In conclusione, nonostante diverse direttive europee mettano in evidenza l'importanza di una valutazione accurata dell'estensione delle aree irrigate per la gestione sostenibile delle risorse naturali (Alexandridis, Zalidis, and Silleos 2008), un quadro esauriente sia sulla localizzazione sia sulle quantità dei consumi irrigui è ancora lontano da venire. In particolare, l'estensione e la distribuzione delle aree irrigate rimane ancora incerta, nonostante l'importanza che tali informazioni avrebbero sulla sicurezza alimentare, sul ciclo delle acque e dell'energia, (Vörösmarty 2002). Ad esempio alcuni autori rilevano che molte delle statistiche utilizzate sia a scala nazionale sia sovranazionale riguardanti le superfici investite ad agricoltura irrigua, come ad esempio quelle della FAO hanno una natura prevalentemente "politica" (Vörösmarty and Sahagian 2000). Ancor meno si conosce dell'esatta localizzazione di tali superfici che è basata per lo più su studi di tipo bibliografico o su dati spesso obsoleti e incompleti forniti dagli enti gestori, quasi sempre, privi di una precisa posizione geografica, mentre praticamente non esistono dati degli approvvigionamenti privati. In tale contesto, una metodologia replicabile ed aggiornabile che permetta l'individuazione delle aree irrigate potrebbe essere un valido supporto al monitoraggio dell'utilizzo delle risorse idriche a scopo irriguo. Diversi autori sottolineano come le tecnologie satellitari, in particolare quelle legate all'osservazione della Terra, siano uno strumento di notevole potenza per l'individuazione delle aree irrigate (Ozdogan et al. 2010); (D'Urso et al. 2010). Tuttavia, non è stata ancora definita una metodologia univoca e affidabile per questo scopo, la cui soluzione presenta ancora una serie di criticità. . Infatti, la localizzazione delle aree irrigate è, determinata da una combinazione di fattori che includono il clima,

la disponibilità di risorse idriche, il tipo e i modelli colturali e - non ultime - le tecniche irrigue adottate. Operativamente, ciò significa che la localizzazione delle aree irrigate non è semplicemente l'individuazione di una particolare mappa delle coperture (*land cover*) ma occorre tenere conto anche delle tecniche di management e di gestione del territorio e delle colture praticate (*land use*). Ricordiamo che le carte di uso del suolo distinguono le diverse aree in base alla loro funzione per i diversi scopi umani o attività economiche (ad esempio: aree residenziali, aree a uso industriale, trasporti, uso ricreativo, aree naturali, aree agricole). Viceversa, le carte di copertura del suolo rappresentano le differenti coperture bio-fisiche della superficie terrestre. Quando si considera la copertura del suolo, a rigore, bisognerebbe limitarsi a descrivere la vegetazione e le aree artificiali non includendo le superfici non coperte (roccia nuda, terreno nudo e aree umide).

L'individuazione delle aree irrigate è un processo complesso. Per capire se e quando l'irrigazione è necessaria, se tale intervento sia integrativo rispetto agli apporti naturali (ad esempio in presenza di una falda acquifera poco profonda) o debba soddisfare l'intero fabbisogno idrico colturale, occorre costruire un modello logico che riesca non solo a "osservare" ma anche a "interpretare" il territorio.

## **1.1 Vantaggi nell'utilizzo dei dati di osservazione della Terra**

In letteratura scientifica sono molti gli esempi che dimostrano come i dati di osservazione della Terra sono uno strumento efficace per la mappatura del territorio, in particolare di quello rurale, in ogni parte del mondo e nelle diverse condizioni ambientali e climatiche (Prasad S. Thenkabail et al. 2009; Prasad S. Thenkabail, Schull, and Turrall 2005; Martínez-Casasnovas, Martín-Montero, and Auxiliadora Casterad 2005; Alexandridis, Zalidis, and Silleos 2008). Il vantaggio fondamentale delle immagini satellitari multispettrali risiede nella possibilità di riconoscere e seguire lo sviluppo della vegetazione grazie all'osservazione in diverse regioni dello spettro

elettromagnetico (bande spettrali), alla elevata frequenza di acquisizione e alla ormai adeguata risoluzione spaziale. Caratteristica fondamentale dei dati satellitari è che, data la loro natura digitale, l'interpretazione dei dati può essere anche automatizzata. Tipici approcci sono quelli che prevedono classificazioni supervisionate e non supervisionate, utilizzo di soglie degli indici di vegetazione e alberi di decisione (Alexandridis, Zalidis, and Silleos 2008). Tra gli indici di vegetazione, quello più comunemente usato è l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), la cui forte correlazione con le coperture vegetate ed in particolare irrigue è stata dimostrata innumerevoli studi (Silleos and Alexandridis 2006).

Tecniche concorrenti sono le indagini in pieno campo e le acquisizioni da aereo. In Tabella 1.1 sono sinteticamente confrontati i vantaggi e gli svantaggi offerti da ciascuna metodologia.

Tabella 1.1 : Analisi delle procedure di individuazione delle aree irrigue: punti di forza e punti di debolezza

PROCEDURA DI INDIVIDUAZIONE	PUNTI DI FORZA	PUNTI DI DEBOLEZZA
<b>Controlli in campo</b>	Riscontro diretto.	<p>La ricerca direttamente in campo con controlli senza alcuna informazione “a priori” necessita di notevoli risorse umane;</p> <p>Individuare il momento giusto per il controllo.</p> <p>Costi elevati;</p> <p>Tempi molto lunghi;</p> <p>Difficoltà di effettuare tutte le verifiche durante la stagione irrigua.</p>
<b>Foto da Aereo</b>	<p>Elevata risoluzione delle immagini;</p> <p>Facile interpretazione per i non tecnici ma con scarse informazioni quantitative.</p>	<p>Nessuna informazione sugli effettivi andamenti e lo stato di crescita delle colture a meno di non allestire una camera ad hoc (camera multispettrale);</p> <p>Elevati costi di acquisizione;</p> <p>Tempi lunghi per la programmazione di un numero sufficiente di voli;</p> <p>Difficoltà di elaborazione in tempi rapidi;</p> <p>Elevato numero di immagini per coprire l’intera area di studio;</p> <p>Impossibilità di elaborazione automatica.</p>
<b>Immagini da Satellite</b>	<p>Informazione quali/quantitative sugli effettivi andamenti e lo stato di crescita delle colture;</p> <p>Facilità di programmare più acquisizioni durante l’intera stagione irrigua;</p> <p>Copertura di aree vaste con una sola immagine;</p> <p>Tempi rapidi di elaborazione (le immagini vengono in genere fornite già pre-processate);</p> <p>Supporto ai controlli a terra. Permette di effettuare controlli mirati con informazioni “a priori” riducendo l’utilizzo di risorse umane;</p> <p>Possibilità di automatizzazione delle procedure;</p> <p>Costi accessibili.</p>	<p>Costi elevati per immagini ad elevata risoluzione a terra;</p> <p>Necessità di organizzare una campagna di riscontro, seppur minima, di verità a terra.</p>

In estrema sintesi i vantaggi nell'utilizzo dei dati di osservazione della Terra nella mappatura delle aree irrigate possono così essere riassunti:

- forniscono una visione sinottica e spazializzata delle coperture vegetate irrigue;
- permettono di indagare l'andamento temporale delle colture sufficiente a stimarne la crescita, il momento di semina e di raccolta;
- sono dati facilmente integrabili in un GIS permettendone un facile georiferimento;
- permettono una riduzione dei costi e dei tempi necessari alle ispezioni di campo;
- permettono di aggregare i dati non risentendo delle limitazioni dovute ai limiti amministrativi e politici;
- permettono considerazioni oggettive non influenzate da valutazioni "politiche".

Le criticità che limitano tale applicazione, alla cui risoluzione il presente lavoro cerca di contribuire, sono:

*La risoluzione spaziale talvolta non è adeguata per permettere di distinguere appezzamenti irrigui di piccole dimensioni*

In realtà tale svantaggio è ormai ampiamente superato dalla risoluzione degli ultimi sensori (Geoeye, Worldview2, ecc.). Si tratta ovviamente di fare un'adeguata valutazione dei benefici e dei costi che il ricorso a tali tipi di immagini possano effettivamente comportare.

*In aree umide talvolta non è possibile distinguere correttamente le aree irrigate da quelle non irrigate a causa di una sostanziale sovrapposizione delle loro risposta spettrale.*

Tale problema può essere ridotto utilizzando informazioni ausiliari e dati ancillari, accoppiando modelli di crescita colturale per migliorare il bilancio idrologico delle colture presenti, migliorando l'analisi multi-temporale.

*Possibile presenza di nubi durante la stagione irrigua che non permette di mappare correttamente le aree*

Con riferimento ad una tipica stagione irrigua estiva mediterranea, la risoluzione temporale delle acquisizioni (tempo di rivisitazione del dato satellite su una stessa area) è ormai tale che un passaggio coperto da nuvole può essere facilmente replicato da uno con cielo sereno. Un'ulteriore possibilità è quella di utilizzare il concetto di costellazione virtuale di satelliti in modo da ottenere dei tempi di rivisitazione minori (Beltran, C. M., Calera, A., & Jochum 2004).

## **1.2 Rassegna della letteratura**

La rassegna degli studi esistenti sulla mappatura delle aree irrigate è abbastanza copiosa e diverse sono le metodologie utilizzate. Come suggerito in letteratura (Ozdogan et al. 2010), si possono individuare metodologie diverse in base alla scala spaziale intesa come ambito di studio. Tale scelta, mette ben in evidenza le differenze sia in termini di obiettivi che di tecniche utilizzate. Nello specifico possiamo individuare:

- *studi a scala globale*, sono quelli relativi alla mappatura delle aree irrigate sull'intero pianeta;
- *studi a scala regionale*, riguardano sia i grandi bacini fluviali fino a studi a carattere nazionale o sovranazionale;
- *studi a scala locale*, riguardano uno o più bacini di irrigazione.

Una rassegna dei principali sensori utilizzati nei differenti studi è riportata in Tabella 1.2.

Tabella 1.2. Sensori ottici attivi e loro caratteristiche utili nell'ambito dell'individuazione delle aree irrigate, adattamento da Ozdogan et al. (2010).

Sensore	Caratteristiche utili per la mappatura delle aree irrigate	Accesso alle informazioni worldwide	Copertura dei dati worldwide	Dataset preprocessati disponibili	Costo dei dati	Difficoltà nel processamento	Frequenza di utilizzo in studi irrigui
RapidEYE	si	no	si	si	alto	media	bassa
Landsat	si	si	si	si	basso	media	alta
SPOT	si	si	si	si	alto	media	media
AWiFS	si	no	no	si	alto	media	bassa
LISS	si	no	no	si	alto	media	bassa
ASTER	si	si	no	si	basso	media	bassa
CBERS	no	no	no	no	basso	media	bassa
THEOS	si	no	no	si	medio	media	bassa
MODIS	si	si	si	si	basso	alta	media
MERIS	si	si	si	si	basso	alta	bassa
AVHRR	si	si	si	si	basso	alta	media
SPOT VEG.	si	no/si	si	-	basso	media	bassa

Tabella 1.3. Principali sensori e tecniche applicate alle diverse scale spaziali.

Scale Spaziale	Sensore utilizzato	Metodo di mapping
globale	MODIS, MERIS, AVHRR, SPOT VGT	Unsupervised clustering, machine learning algorithms applicato alle serie multitemporali, anche utilizzando altri dati ancillari data(statistici, verità a terra...)
regionale continentale	Landsat TM/ETM+, MODIS, MERIS, AVHRR, SPOT VGT	Analisi di serie multitemporali, Classificazione Supervised/unsupervised, masking, Analisi di serie multitemporali con altri dati ancillari, data fusion
locale	Landsat TM/ETM+, SPOT, LISS, ASTER, AWiFS, CBERS, THEOS	Fotointerpretazione, Image arithmetic, Image classification, segmentation, image fusion

### 1.2.1 Studi a scala Globale

I primi studi a scala globale presenti in letteratura, sono tentativi di determinare mappe mondiali di coperture del suolo (Land Cover) che riportano in legenda anche le superfici irrigate. I primi tentativi sono da ricondursi a Matthews (1983), Olson and Watts (1982), Wilson and Henderson-Sellers (1985). Si tratta di database globali, utilizzati prevalentemente per studi di tipo ambientale, ottenuti combinando le informazioni provenienti da diverse sorgenti di dati, tra cui mappe già esistenti. Le informazioni sono inserite in una griglia di risoluzione spaziale a scala globale, variabile tra 0.5 e 1.0 gradi. I database così ottenuti sono spesso poco omogenei e fanno riferimento a informazioni molto spesso già obsolete nel momento della stesura dei lavori. (Loveland and Reed 2000). Il primo vero tentativo di ottenere una mappa globale di *land cover* utilizzando dati satellitari è, invece, stato realizzato nel 1994 da DeFries & Townshend, (DeFries and Townshend 1994).

Successivamente, un altro tentativo di particolare interesse per la mappatura delle aree irrigate, basato su dati di osservazione della Terra, è stato condotto dall'United States Geological Survey (USGS). La Global Land Cover Map prodotta dall'USGS è stata realizzata utilizzando acquisizioni del sensore AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer – 1 km di risoluzione) trasportato a bordo dei satelliti NOAA nel periodo aprile 1992 – settembre 1993 (Loveland and Reed 2000). In questa mappa, tra le altre, sono identificate quattro classi di aree irrigate: prati irrigati, risaie e campi di riso, colture irrigue estive ed invernali. In tempi più recenti, l'Agenzia Spaziale Europea ha prodotto una mappa delle coperture globale denominata GlobCover (Arino, Gross, and Ranera 2007) basato sul sensore Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS 300 m di risoluzione) trasportato a bordo della piattaforma ENVISAT (la cui missione è terminata nell'aprile 2012, a causa di una "black out" del satellite.). Il processo di produzione del GlobCover presenta innovazioni sia dal punto di vista metodologico che delle informazioni per l'identificazione delle aree irrigate. In particolare, è stato migliorato sia il geo-posizionamento dei dati (accuratezza di circa 77 m) sia il pre-processamento (correzioni radiometriche, atmosferiche), sia la

classificazione dei dati. Il metodo di classificazione utilizza, in una prima fase, algoritmi non supervisionati di *clustering* dei dati multi-temporali che tengono conto anche dei parametri fenologici delle colture. Successivamente, con l'aiuto di esperti, sono individuate regole per il riconoscimento semiautomatico delle risposte multi-temporali delle singole classi categoriche .

Un altro importante studio è quello condotto da Thenkabail et al. (P S Thenkabail et al. 2007) i quali hanno definito una procedura per determinare l'uso del suolo e le coperture del suolo (LULC) relative alle aree irrigate utilizzando tecniche di *spectral matching* applicate a dati AVHRR. Essi hanno dimostrato come l'uso di tecniche quantitative e qualitative applicate alle serie temporali delle risposte spettrali della vegetazione (similarità spettrale) rappresenti il metodo migliore per l'individuazione delle aree irrigate.

Con tecniche simili è stato realizzato il primo vero tentativo di produrre una mappa che avesse per obiettivo principale l'individuazione delle aree irrigate, la cosiddetta Global Irrigated Area Map (GIAM). Per la sua realizzazione sono stati utilizzati dati multi-temporali provenienti da differenti sensori (AVHRR 3 band and NDVI; SPOT VGT NDVI) e altri dati ancillari quali dati di precipitazione, di temperature mensili, oltre a piani quotati e mappe di aree forestate ricavati anche da dati ottenuti con radar ad apertura sintetica (P. Thenkabail and Biradar 2008).

Per la realizzazione di GIAM, le diverse aree sono state preventivamente segmentate in base a quota, precipitazioni e temperature medie mensili. In una seconda fase, è stata eseguita una classificazione non supervisionata, utilizzando librerie standard di risposta spettrale. Infine, è stato applicato un albero delle decisioni per risolvere le classi che, allo stadio precedente, risultavano ancora non definite o miste.

Il limite principale della GIAM, così come della maggior parte degli studi a scala globale, è la bassa risoluzione spaziale dei dati utilizzati. Ciò comporta talvolta una sovrastima e altre una o sottostima delle aree irrigate (errore di commissione o di omissione). Infatti, a causa della bassa risoluzione, i pixel sono, spesso, misti, cioè

comprendono sia aree irrigate che non irrigate. Tali “errori” sono in genere ridotti utilizzando tecniche di frazionamento (IAF *irrigated area fraction*). Un interessante studio propone diversi metodi per “risolvere” i pixel misti dovuti alla bassa risoluzione spaziale dei dati utilizzati, implementando tecniche di “*sub-pixel decomposition*”, che integrano l’analisi con immagini a più alta risoluzione (Thenkabail, Biradar, & Noojipady, 2007). L’ elemento innovativo è costituito dal tener conto della posizione di ciascun pixel di ciascuna classe nel piano delle caratteristiche ottenuto plottando i valori nelle bande del rosso (red) e vicino infrarosso (NIR).

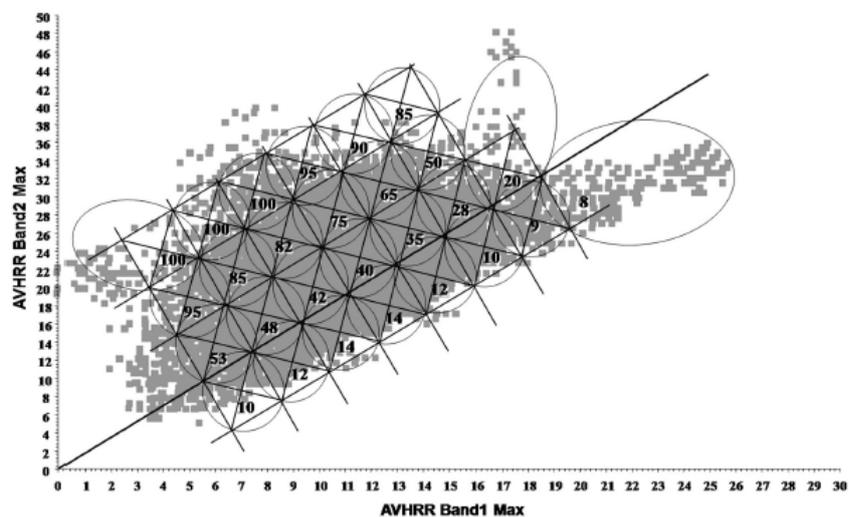


Figura 1.1 Tecnica di decomposizione dei pixel (IAF-SPDT) nel piano delle bande rosso (RED) e vicino infrarosso (NIR): la frazione di area irrigata (irrigated area fraction) viene determinata a seconda della posizione del pixel nel piano. (da Thenkabail, Biradar, and Noojipady 2007)

Altri autori (Thenkabail, Biradar, and Noojipady 2007), invece risolvono il problema della stima della frazione di area irrigata all’interno del singolo pixel, utilizzando le differenze tra massima temperatura diurna e la minima temperatura notturna stimata con dati MODIS. Il concetto alla base di tale tecnica è che a minori differenze tra temperatura diurna e notturna corrispondono percentuali maggiori di aree irrigate. Ciò è

dovuto evidentemente alla presenza di una maggiore percentuale di umidità e di vegetazione.

### 1.2.2 Studi a scala Regionale

Il metodo più utilizzato per la mappatura delle aree irrigate negli studi a scala regionale è basato su osservazioni multi-temporali a media e a bassa risoluzione spaziale. Tale metodo utilizza, nel dominio del tempo i valori delle bande spettrali e dei relativi indici di vegetazione in funzione dell'evoluzione delle colture durante la stagione di crescita. Tale approccio richiede la conoscenza a priori delle colture presenti nella zona da monitorare e dei loro possibili andamenti di crescita (periodo di semina, fasi fenologiche, periodo di raccolta) (Zhang et al. 2003) . E' comune, nelle analisi multi-temporali, il ricorso a mappe di NDVI direttamente disponibili da parte dei diversi fornitori di dati di Osservazione della Terra. In sostanza, il metodo proposto da diversi autori da cui parte anche la procedura proposta in questo lavoro) si basa sul fatto che in zone aride la crescita delle colture può essere associata solo a un intervento irriguo. Ad esempio l'analisi dell'andamento temporale dell'indice NDVI comparato con le precipitazioni può consentire di distinguere più facilmente una coltura irrigata da una non irrigata, come illustrato in uno studio condotto nello stato di Washington (Ozdogan and Gutman 2008) mostrato in Figura 1.2. Questi metodi sono stati applicati alla scala regionale utilizzando mappe di indici vegetazione già elaborate e disponibili dalle missioni AVHRR e MODIS (Alexandridis, Zalidis, and Silleos 2008; Toomanian, Gieske, and Akbary 2004). Come detto, le analisi a scala regionale sono, in genere, condotte con sensori a media o bassa risoluzione in quanto, coprendo vaste aree hanno uno scopo prevalentemente di pianificazione e statistico, per cui si accetta un livello di accuratezza più basso.

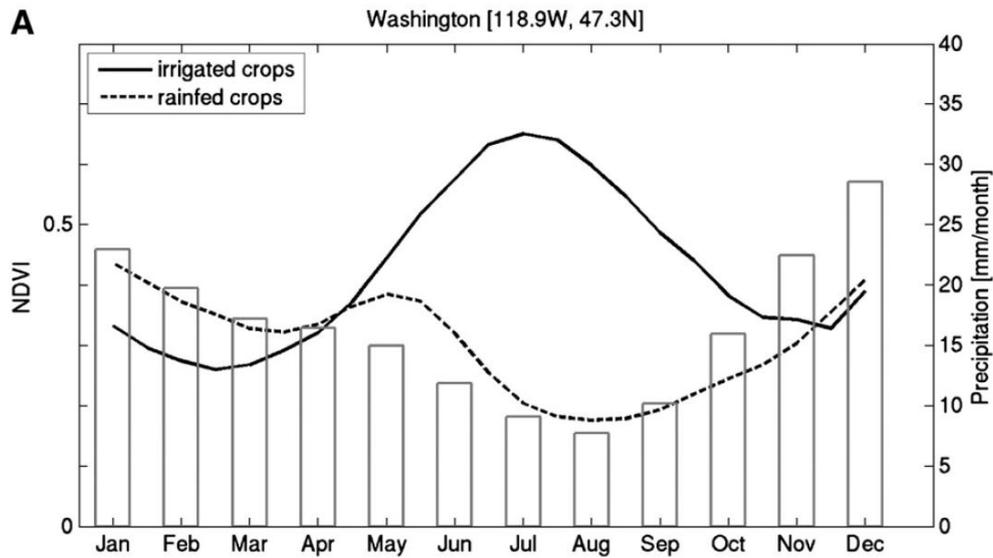


Figura 1.2 – Andamento temporale dell'indice NDVI e profili di precipitazione di appezzamenti irrigati e non irrigati; le linee rappresentano il valore medio di risposta di un campione di circa cinque siti. (da Ozdogan and Gutman 2008)

L'utilizzo di dati a bassa risoluzione spaziale ha anche diversi vantaggi: il primo è, come già detto quello di utilizzare dei prodotti già rilasciati invece di dover elaborare dati grezzi, con una notevole riduzione di lavoro. Ma oltre a questo gli ulteriori vantaggi sono legati alla possibilità di coprire vaste aree con un tempo di rivisitazione molto basso e alla maggiore risoluzione spettrale dei sensori. In sostanza è possibile ottenere dati già corretti e elaborati, informazioni spettrali più dettagliate e un numero maggiore di immagini ravvicinate nel tempo. Questo significa poter riconoscere meglio le diverse coperture vegetali e i loro andamenti temporali. Ad esempio, alcuni ricercatori (Arino, Gross, and Ranera 2007) hanno sviluppato approcci innovativi per ottenere informazioni precise sulla fase di emergenza, il picco, la senescenza e la durata di ciascuna classe di uso del suolo irriguo e pluviale.



precipitazione e il picco di NDVI . I loro risultati mostrano che nel caso del riso non irrigato (pluviale) c'è un ritardo di circa 40-50 giorni tra picco delle precipitazioni e un solo picco di NDVI, mentre nel caso del riso irriguo ci sono più picchi con valori più bassi per almeno 90 giorni dopo la pioggia di picco .

Ovviamente, come descritto nel paragrafo precedente, utilizzando dati a bassa risoluzione, persiste il problema legato alla stima delle superfici legato ai pixel misti. A questa scala, il metodo più utilizzato è quello di utilizzare alcune acquisizioni a più alta risoluzione spaziale per definire la frazione di area irrigata di ogni pixel.

#### 1.2.2.1 La situazione italiana: SIGRIAN

Sebbene in Italia vi sia un'ampia base conoscitiva relativa all'irrigazione, non esiste, attualmente, una vera mappa delle aree irrigate. Non è noto al momento, nessun tentativo di produrre una mappa delle aree irrigate con una procedura aggiornabile e ripetibile, come sarebbe possibile con i dati di osservazione della Terra. Esiste tuttavia un'ampia mole di dati riguardanti l'irrigazione consortile basata su una capillare raccolta di dati in tutti gli enti coinvolti. Storicamente, la prima carta nazionale dell'irrigazione italiana è stata prodotta dall'INEA nel 1965. La Carta delle irrigazioni d'Italia si basava su monografie regionali, ed era costituita da carte dell'irrigazione in scala 1:750.000 e da una carta riassuntiva nazionale in scala 1:2.500.000. A partire dal 1994, l'INEA ha raccolto numerosi dati sull'irrigazione, dapprima nelle regioni meridionali e successivamente anche in quelle centrali e settentrionali. Le informazioni raccolte sono confluite in un unico geodatabase denominato SIGRIA (Sistema Informativo per la Gestione delle Risorse Idriche in Agricoltura) finanziato dal Ministero per le Politiche Agricole e Forestali nell'ambito dei Programmi Interregionali previsti dalla Legge 499/99 "Razionalizzazione degli interventi nei settori agricolo, agroalimentare, agroindustriale e forestale". Tale sistema è stato recentemente rinominato SIGRIAN – "Sistema informativo nazionale per la gestione delle risorse idriche in agricoltura".

Il sistema informativo è strutturato in 4 sezioni: gli enti irrigui, le fonti, gli schemi irrigui e le informazioni varie. Al suo interno sono riportati esclusivamente i dati riguardanti l'irrigazione consortile gestita da circa 500 Enti irrigui sul territorio nazionale, coprendo una superficie amministrativa di oltre 19 milioni di ettari, una superficie attrezzata di oltre 3 milioni di ettari e circa 1.400 schemi irrigui, di cui una decina con importante rilevanza inter-consortile e interregionale. Sono raccolte in esso, i dati relativi a circa 5.000 opere di presa e oltre 23.000 km di reti irrigue principali . Sono anche riportate le descrizioni degli ordinamenti colturali irrigui e i relativi volumi irrigui medi, sebbene, per ammissione stessa degli autori, tali informazioni il SIGRIAN, per quanto importanti, presentano ancora notevoli carenze conoscitive, legate alle lacune di base presenti a livello di Enti irrigui e di Regioni (Zucaro 2011).

### **1.2.3 Studi a scala locale**

Gli studi a scala locale possono basarsi sia su analisi multi-temporali di immagini multi-spettrali, sia su singole acquisizioni. Le risoluzioni spaziali utilizzate sono in genere elevate (si va generalmente dai 5 m di Rapid Eye fino ai 30 di Landsat). L'alta risoluzione permette di fare considerazioni anche sulla forma degli appezzamenti, e ciò aiuta a distinguere gli appezzamenti produttivi (Conrad et al. 2010). In genere l'alta risoluzione spaziale riduce il numero di acquisizioni multi-temporali, sia per i limiti intrinseci dei sistemi di osservazione sia per i costi di acquisizione. I primi lavori di mappatura delle aree irrigate a scala locale si basavano su tecniche prevalentemente di interpretazione a video, analoghe alla fotointerpretazione. Inizialmente si usavano immagini Landsat e i confini dei singoli appezzamenti irrigati erano disegnati a mano. L'utilizzo dei dati multi-spettrali, con bande nel vicino e medio infrarosso, ha permesso di impiegare combinazioni di bande utili per distinguere i singoli appezzamenti (Alexandridis, Zalidis, and Silleos 2008).

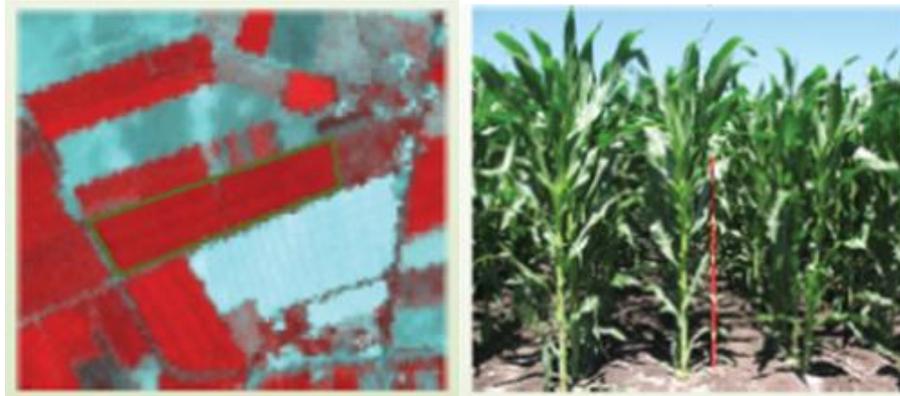


Figura 1.4 Vista da satellite in falsi colori (NIR, Red, Green) di un campo di Mais e relativa foto in campo.

Nel caso di singole acquisizioni, è importante che l'immagine corrisponda al periodo di picco vegetativo e quindi di irrigazione. La scelta della data dipende dalle informazioni a disposizione. Nel caso di una o di poche colture i cui andamenti fenologici e periodi di semina sono noti, è possibile stimare qual è il momento migliore per acquisire l'immagine. Negli altri casi può essere di aiuto utilizzare delle serie temporali più fitte con sensori a più bassa risoluzione spaziale per identificare il momento di picco. È chiaro che, soprattutto in questa seconda ipotesi, sono utili studi e acquisizioni delle stagioni precedenti.

### 1.3 Obiettivo della tesi

La mappatura delle aree irrigate è un'informazione di rilevante importanza per i gestori delle risorse idriche, sia al fine di pianificare un uso razionale in presenza di disponibilità limitate, sia per la prevenzione di prelievi non autorizzati dalle reti irrigue. Attualmente, in Italia non esistono mappe aggiornate delle aree irrigate, e, come già accennato, l'unico esempio è quello del geo-database SIGRIAN che raccoglie i dati storici, di progetto e di gestione di tutti gli enti gestori.

Obiettivo del presente lavoro è l'individuazione di una procedura innovativa per la mappatura delle aree irrigate a scala locale (comprensorio irriguo, bacino idrografico) in ambiente semiarido. L'assunzione di base è che, in condizioni di deficit idrico tipiche degli ambienti semiaridi, elevati trend di crescita colturale siano compatibili solo con apporti irrigui esterni. La procedura proposta utilizza una doppia serie multi-spettrale di dati di osservazione della Terra (*Double Series Irrigation Mapping - DSIM*). La prima serie di dati, con elevata frequenza di acquisizione e più bassa risoluzione spaziale, è utilizzata per studiare l'andamento temporale della vegetazione irrigua mediante indici di vegetazione; la seconda serie, più corta e di maggior dettaglio spaziale, è utilizzata per migliorare la mappatura delle singole parcelle irrigue. Sono illustrate le procedure automatiche e le regole di decisione per ottenere una mappa suddivisa in aree irrigate e non irrigate.

I principali vantaggi di tale approccio sono:

- non necessita di una mappa delle colture: le aree irrigate sono intese come aree dove si evidenziano trend di crescita di vegetazione in condizioni di deficit idrico, indipendentemente dal tipo di coltura effettivamente praticata;
- ridotti costi computazionali e di acquisto dei dati: le immagini a più alta risoluzione sono limitate in numero perché occorrono solo poche acquisizioni in periodi specifici determinati mediante l'analisi condotta sui dati a più bassa risoluzione;

Tale procedura, come sarà più chiaro nei prossimi capitoli, si avvantaggia della crescente offerta a costi ridotti di dati satellitari multispettrali a media risoluzione spaziale (10-30 metri) e con elevata frequenza temporale (5-10 giorni). Tali dati permettono di ottenere un monitoraggio continuo della vegetazione con un dettaglio precedentemente non raggiungibile.

## 1.4 Organizzazione della tesi

Nei prossimi capitoli sono mostrati i metodi e le tecniche utilizzate per l'elaborazione delle mappe delle aree irrigate (capitolo 2), l'applicazione a un caso di studio (capitolo 3) una sintesi dei maggiori risultati (capitolo 4); le conclusioni e gli eventuali sviluppi futuri (capitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**)

## 2 INDIVIDUAZIONE DELLE AREE IRRIGATE: METODI UTILIZZATI

### 2.1 Introduzione: il telerilevamento per lo studio della vegetazione

Il Telerilevamento o “*Remote Sensing*,” è la scienza che si occupa di ricavare informazioni utili su un oggetto attraverso l'analisi dei dati acquisiti da un dispositivo che non è in contatto diretto con esso. In particolare, in questo lavoro faremo riferimento alla cosiddetta *Earth Observation*, ovvero a tecniche di osservazione sulla superficie terrestre, in particolare mediante sensori ottici della radiazione elettromagnetica riflessa regioni nel dominio solare (0.4-1.0 micron). Storicamente, lo sviluppo del telerilevamento per l'osservazione della Terra, si è basato sullo studio della riflessione della radiazione solare da parte delle superfici investigate nelle regioni del visibile e del vicino e medio infrarosso; ci si riferisce, quindi, al cosiddetto telerilevamento ottico con sensori passivi (Jones and Vaughan 2010). Per comprendere l'utilizzo di tali tecniche in ambito agrario, è centrale la comprensione delle interazioni tra la luce solare, la struttura e la composizione delle coperture vegetate e i sistemi di acquisizione. Rimandando per l'approfondimento di tali aspetti alle numerose pubblicazioni e manuali sull'argomento vogliamo qui solo accennare ai principali concetti del telerilevamento di immagini per uso agrario.

Innanzitutto, occorre precisare che le caratteristiche delle immagini osservate dai satelliti, e quindi dai sensori trasportati, dipendono dalla configurazione complessiva (intesa come angoli e distanze) della sorgente di energia (tipicamente il sole per i sensori passivi), dell'oggetto target e del sensore stesso. In pratica quella che arriva al sensore è la parte di energia che, partita dal Sole, è riflessa dall'oggetto target. Ovviamente questa è un'estrema semplificazione. In realtà il problema è di notevole complessità perchè durante il proprio tragitto il flusso di energia proveniente dal sole e

riflesso dalla superficie, prima di arrivare al sensore del satellite, attraversa l'atmosfera per ben due volte subendo una serie di fenomeni che alterano il segnale.

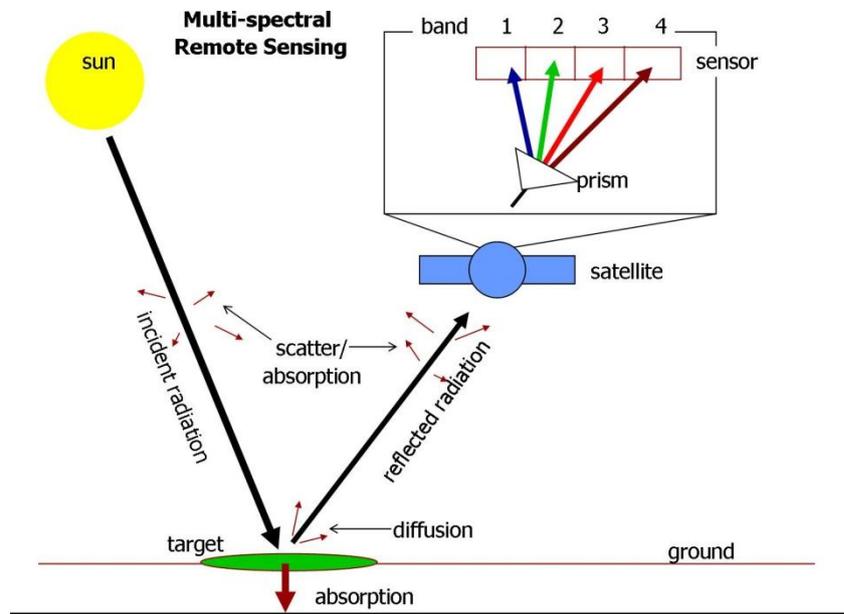


Figura 2.1 – Illustrazione schematica delle relazioni tra radianza ricevuta dal sensore, radianza riflessa dalla superficie e radianza incidente. (<http://auracle.ca/>).

Una tipica immagine derivata da un sensore ottico è costituita da piccole aree uguali indicate come elementi di immagine, o "pixel", disposti in righe e colonne regolari. Ogni pixel ha un valore numerico chiamato "digital number" (DN) che registra l'intensità di energia elettromagnetica riflessa dalla superficie al sensore lungo la direttrice di osservazione. I valori che assume il digital number DN dipendono dalla "sensibilità" del sensore e vengono tipicamente rappresentati con differenti livelli di grigio (tipicamente una scala di rappresentazione immagazzinata in 8 bit ha 256 livelli, una a 16 bit ne ha 65536). Ogni pixel è facilmente riferibile in un sistema di coordinate geografiche, una volta nota la proiezione e la posizione dei vertici. Il singolo rilevatore del sensore non registra in modo omogeneo la radiazione che proviene dal corrispondente porzione di superficie, ma in genere è più sensibile in corrispondenza del

centro del pixel e meno ai bordi. La dimensione del pixel è quella per cui si ha una sensibilità dell'elemento pari a circa il 50% , definendo così la risoluzione spaziale dell'immagine. L'angolo sotteso da ciascun pixel è chiamato angolo istantaneo di vista (*IFOV instantaneous field of view*) mentre quello totale che sottende l'intera larghezza della scansione viene detto campo di vista (*FOV field of view*) o con termine inglese *swath* (“falcia”).

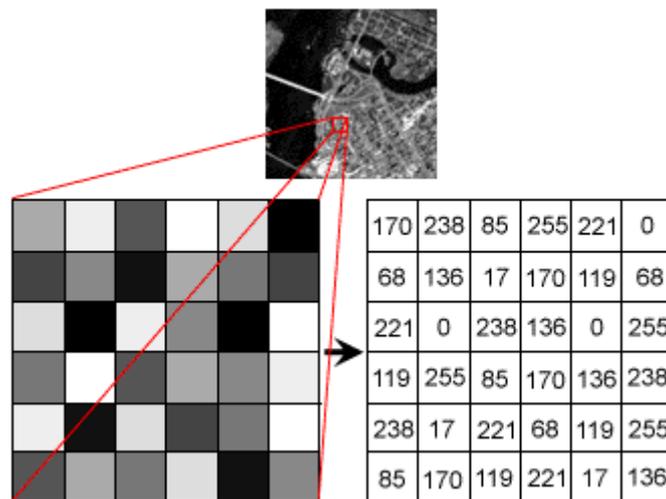


Figura 2.2 – Illustrazione schematica di un'immagine digitale telerilevata. (<http://auracle.ca/>).

I sensori utilizzati permettono di estendere la capacità di visione dell'occhio umano oltre il visibile, in particolare nelle regioni dell'infrarosso che sono molto utili per il riconoscimento delle caratteristiche della vegetazione. Attraverso le misure di radianza al sensore è possibile risalire alle caratteristiche dell'oggetto e in particolare alla sua riflettanza  $\rho(\lambda)$ , cioè la frazione di energia riflessa per ciascuna lunghezza d'onda  $\lambda$ . La riflettanza di una superficie varia in funzione della lunghezza d'onda lungo tutto lo spettro e rappresenta la sua “firma spettrale”. Tutte le tipologie di superfici, comprese le rocce, la vegetazione, i suoli, l'acqua e la neve hanno una firma di riflettanza spettrale caratteristica. Quindi, per lo studio della vegetazione mediante il telerilevamento,

occorre conoscere le proprietà radiative delle coperture vegetate sia nel loro insieme e sia di quelle delle diverse parti osservate (foglie, suolo, acqua). L'interazione della radiazione solare con la vegetazione e, quindi, la frazione di energia riflessa (riflettanza  $\rho_\lambda$ ), assorbita (assorbanza  $\alpha_\lambda$ ) e trasmessa (trasmissanza  $\tau_\lambda$ ) per ciascuna lunghezza d'onda  $\lambda$  dipendono dalla struttura e dalle caratteristiche chimiche della vegetazione, dall'età delle foglie, dal loro spessore, dal loro contenuto d'acqua, ecc. Un tipico e noto diagramma che mostra la riflettanza spettrale delle vegetazioni e del suolo è riportato in Figura 2.3 dove si notano i diversi picchi nel vicino infrarosso NIR e nell'infrarosso a onde corte SWIR.

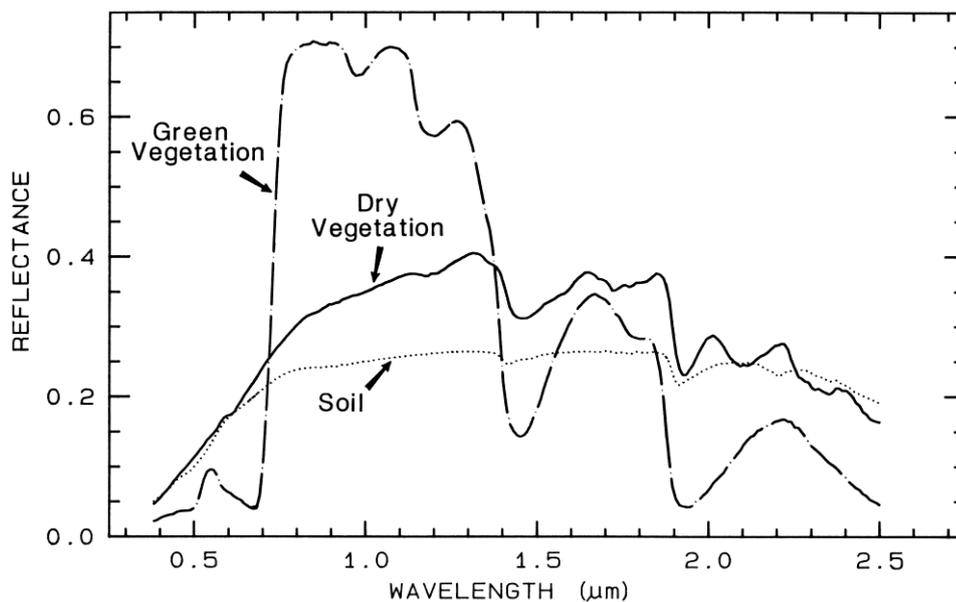


Figura 2.3 – Andamenti tipici della riflettanza per vegetazione verde, vegetazione secca e suolo.

La maggior parte dei sensori remoti multi-spettrali registrano l'energia riflessa nelle regioni del visibile (blu, verde e rosso) e del vicino infrarosso (NIR) e nell'infrarosso a onde corte SWIR dello spettro. In pratica la firma spettrale di un oggetto e viene ricostruita in maniera discreta in una serie di intervalli dello spettro. Il numero di bande disponibili per l'intero spettro coperto rappresenta la *risoluzione spettrale* del sensore. Se il numero di bande è inferiore a dieci si parla tipicamente di sensori multispettrali.

## 2.2 Proposta metodologica per la mappatura delle aree irrigue

Viene proposto un nuovo approccio per individuare le aree irrigate, basato sull'impiego di due serie temporali di immagini satellitari multispettrali (*Double Series Irrigation Mapping - DSIM*) acquisite dall'inizio alla fine di una singola stagione irrigua: la prima serie, più numerosa, costituita da dati aventi risoluzione spaziale moderata ed elevata frequenza temporale, al fine di seguire l'andamento fenologico della colture; la seconda, costituita da 1 o 2 immagini ad alta risoluzione spaziale, acquisite in coincidenza del picco di crescita, al fine di ottenere una migliore segmentazione dei singoli appezzamenti. Il criterio proposto si basa sull'ipotesi che in ambiente mediterraneo semi-arido le superfici che mostrano trend positivi nella crescita della vegetazione in condizioni di deficit idrico (apporti naturali insufficienti a soddisfare i fabbisogni delle colture) siano compatibili solo con applicazioni di adacquamenti con mezzi artificiali.

Da un punto di vista operativo la procedura utilizzata è costituita dalle seguenti fasi (Figura 2.4):

- **Scelta dei dati ed elaborazioni preliminari:** in questa fase vengono scelti i tipi di sensori più adatti allo studio in base ai requisiti in termini di risoluzioni spaziali, temporali e spettrali.
- **Produzione di serie multi-temporali di mappe di indice di vegetazione NDVI:** in questa fase per ciascuna delle acquisizioni della serie a bassa risoluzione spaziale viene prodotta una mappa dell'indice spettrale NDVI e successivamente creata una pila temporale (layer stack); si procede anche al mascheramento manuale di aree di non interesse quali zone urbane, quelle montane e le zone umide quali fiumi, laghi e bacini di raccolta idrici.
- **Classificazione non assistita** di tipo ISODATA serie temporali di mappe di NDVI;
- **Estrazione automatica dei pattern temporali di indici NDVI** e dei periodi di picco della vegetazione;

- **“Labeled”**: individuazione delle classi categoriche di vegetazione che, date le condizioni di deficit idrico, presentano pattern di NDVI compatibili solo con il ricorso all’irrigazione;
- **Classificazione assistita** dell’immagine ad alta risoluzione utilizzando quali pixel di training le aree irrigate individuate tramite la classificazione multitemporale; tale fase ha lo scopo di migliorare la risoluzione spaziale dei dati
- **Mappatura delle aree irrigate ed** eventuale integrazione con dati GIS

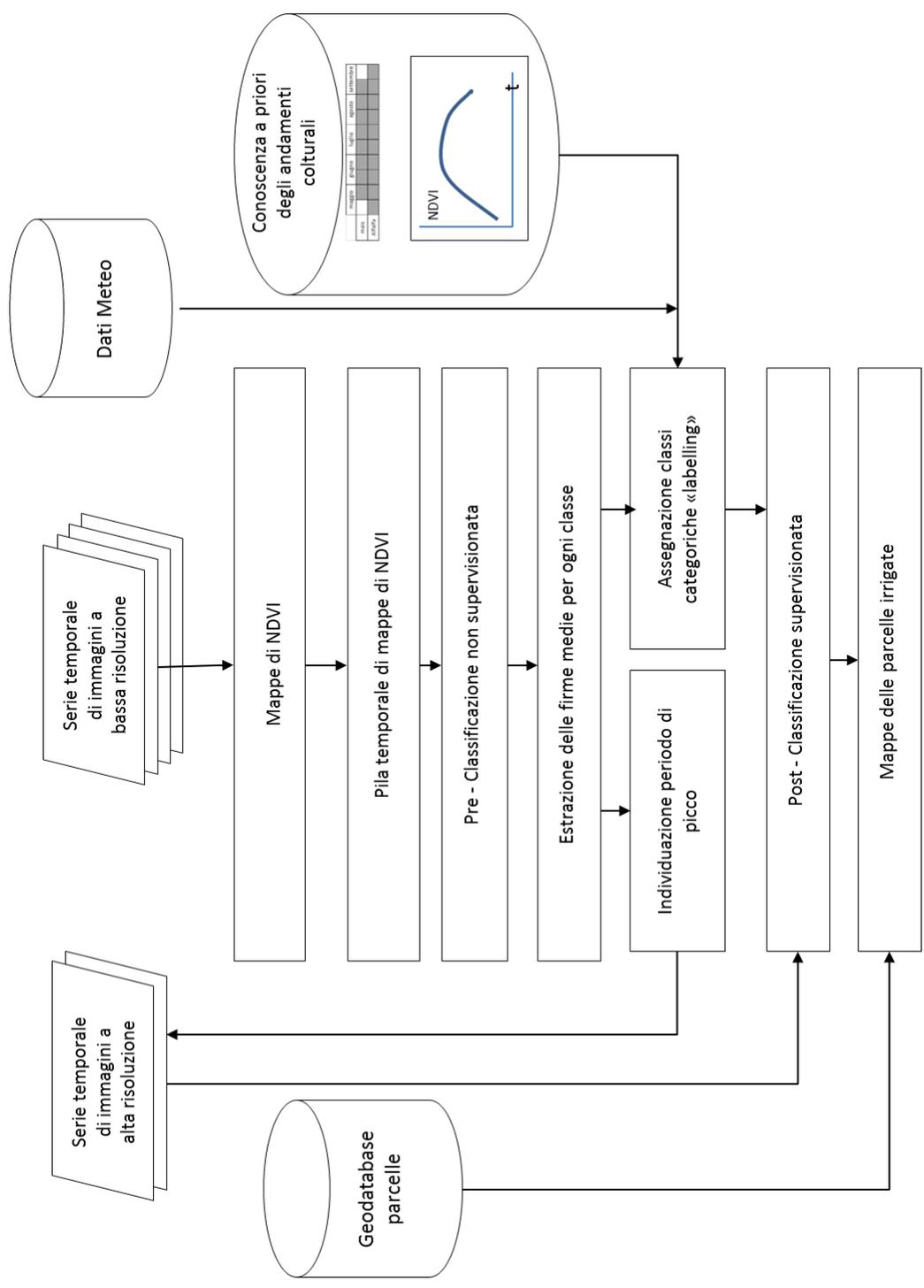


Figura 2.4 Work flow del processo di individuazione delle aree irrigue

## 2.3 Scelta dei dati di osservazione della Terra

### 2.3.1 Requisiti di risoluzione Spaziale

Tutti gli studi consultati mostrano che “*the finer the spatial resolution, the greater the accuracy of irrigated area class designation*” (Ozdogan et al. 2006). Questa semplice affermazione porterebbe a scegliere sempre il sensore con la migliore risoluzione spaziale disponibile. In generale, per mappare le aree irrigate con precisione, la risoluzione spaziale del sensore deve essere pari o inferiore alla dimensione dei campi di interesse. La risoluzione geometrica delle immagini rilevate dipende ovviamente dalla distanza del sensore dall’oggetto. Essa esprime la distanza minima necessaria per mantenere distinti due oggetti contigui di date dimensioni. Un sistema che acquisisce un’immagine trasforma un segnale in ingresso, corrispondente alla radianza della scena osservata, in un segnale in uscita che rappresenta la distribuzione dell’irradianza dell’immagine ottenuta. Il concetto di risoluzione geometrica dipende dalle dimensioni degli oggetti rilevabili in una scena ed esprime il dettaglio raggiungibile da un sistema di ripresa. La dimensione di campionamento a terra dell’acquisizione (GIFOV) dipende dalla dimensione  $d$  dei rilevatori del CCD del sensore, dalla distanza focale  $f$  e dalla quota  $H$  a cui vola il sensore. L’espressione è la seguente :

$$GIFOV = \frac{d H}{f} = \frac{d}{S_{rip}}$$

Ad esempio per un sistema di ripresa (Landsat 7) con  $d= 0.010363$  cm con distanza focale di 243.84 cm che vola ad una quota di circa 705 km si ottiene un GIFOV di circa 30 metri. Dal punto di vista geometrico, l’oggetto più piccolo rappresentabile dipende dalla sensibilità del sensore e coincide con la sorgente puntiforme, assimilabile a un segnale in ingresso con un solo impulso. Posto in questi termini, l’immagine del pixel risultante non sarà mai un punto, ma un’area più o meno definita di dimensioni ridotte. La sezione di tale area dipende dalle caratteristiche del sensore e l’associata funzione di dispersione è nota come PSF (*Point Spread Function*) (Williams and Becklund 1989).

Dimensione e forma della PSF, che in genere è modellata come una gaussiana, rappresentano la misura della bontà del sistema di acquisizione: più la PSF è stretta migliore è la risoluzione geometrica del sistema. Ciò corrisponde a poter distinguere oggetti di dimensioni minori. La risoluzione geometrica è data dalla distanza alla quale la PSF raggiunge circa il 50% della risposta. Nella pratica tecnica le dimensioni del minimo oggetto rilevabile non dovrebbero superare  $\frac{1}{4}$  della risoluzione geometrica del sistema. Quindi con una risoluzione a terra di 20 m ogni oggetto più piccolo di 5 metri avrà un contenuto informativo pari a una sorgente puntiforme.

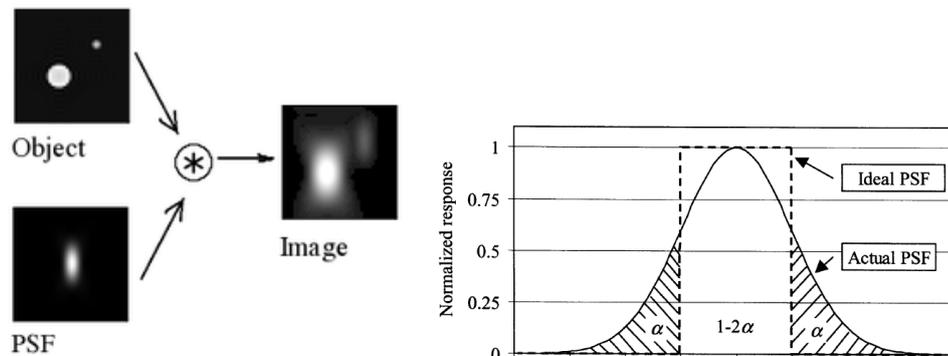


Figura 2.5 – Data una sorgente puntiforme la risoluzione geometrica dipende dalla distanza  $\sigma$  della funzione di dispersione del sensore PSF.

Dal punto di vista operativo la scelta della risoluzione spaziale più adeguata dipende ovviamente dalla minima unità cartografabile. Nella pratica tecnica si è soliti far riferimento a quanto riportato nella Tabella 2.1. In generale, sebbene una maggiore informazione fornita da dati ad alta risoluzione spaziale sia auspicabile, una procedura basata esclusivamente su tali dati presenterebbe anche degli svantaggi:

- ridotta disponibilità dei dati;
- elevato costo;
- elevati tempi di processamento e difficoltà di aggregazione dei dati (classificazione automatica).

Una soluzione di compromesso, proposta in questo lavoro, è quella di utilizzare dati a più bassa risoluzione spaziale, ma con elevata frequenza di acquisizione, per individuare l'andamento temporale delle colture, accoppiando una serie più corta e a più alta risoluzione, per definire in maniera più precisa le singole parcelle irrigate nel periodo di picco di crescita.

Tabella 2.1 Scala della mappa, minima unità riconoscibile, risoluzione del raster corrispondente (da Tobler 1988 ridisegnata)

denominatore scala	minima entità riconoscibile (m)	risoluzione del raster (m)
250.000	250	125
100.000	100	50
50.000	50	25
25.000	25	12,5
10.000	10	5

### 2.3.2 Requisiti di Risoluzione Spettrale. Indici di vegetazione

Il passo di lunghezza d'onda di campionamento  $d\lambda$  è strettamente legato alla capacità risolvente spettrale che permettere di distinguere le differenze tra due lunghezze d'onda contigue. La radianza spettrale riflessa  $L_s(\lambda)$  da una superficie è data dal prodotto della radianza incidente  $L_i(\lambda)$  per la riflettanza  $\rho(\lambda)$  della stessa superficie riflessa.

La sensibilità del sensore all'interno di ciascuna banda non è in genere omogenea: è tipicamente massima al centro della banda mentre diminuisce verso i limiti. Nello studio della vegetazione, è molto importante che i sensori siano in grado di rilevare i picchi della firma spettrale da riconoscere. È il caso del sensore Landsat 8, di recente introduzione, le cui bande sono riportate in Figura 2.6

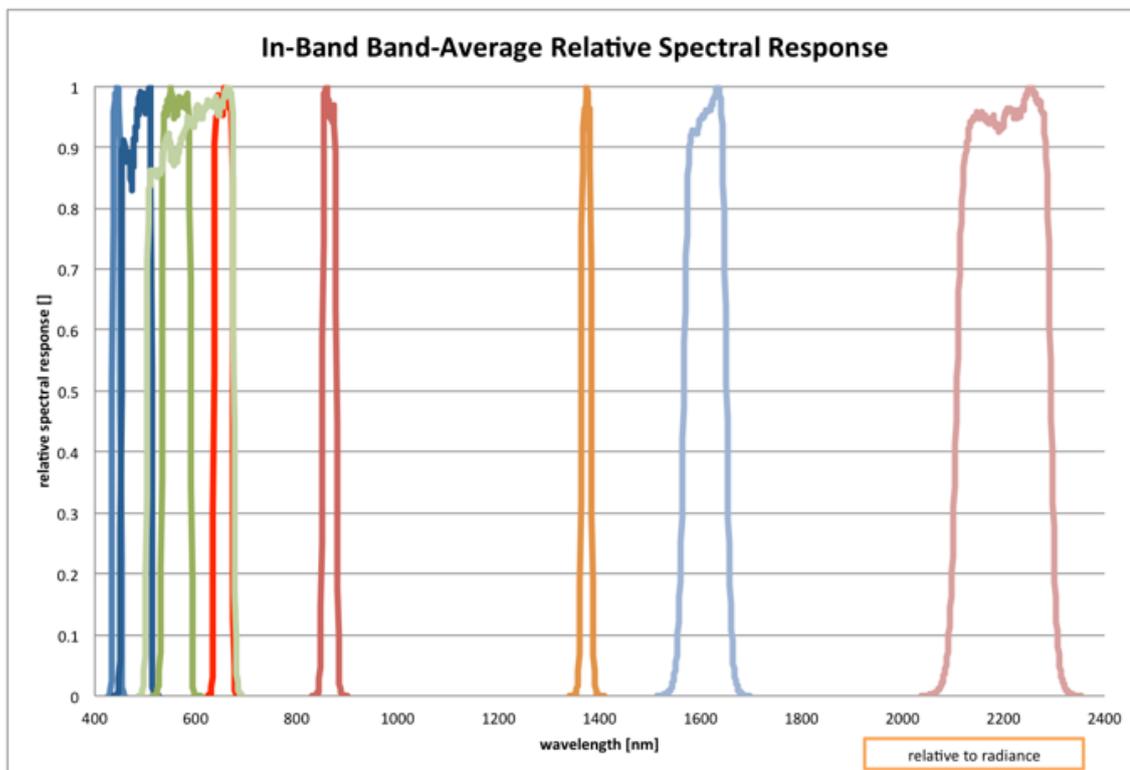


Figura 2.6 – Lunghezze d'onda dei sensori OLI e TIRS trasportati dal Landsat 8. (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>)

Nelle piante in fase di sviluppo, la quantità di luce riflessa in lunghezze d'onda specifiche può essere associata al contenuto di clorofilla o allo stato di salute delle colture. Le piante appaiono verdi perché la clorofilla delle foglie assorbe gran parte della luce incidente nelle lunghezze d'onda del visibile VIS, in particolare nel blu e nel rosso, mentre il colore verde viene riflesso. Ad esempio, una foglia verde e con elevato contenuto di clorofilla presenta maggiore riflettanza nelle lunghezze d'onda del vicino infrarosso (NIR) e del verde. Al contrario, una foglia in condizioni di stress idrico ha una più bassa riflettanza nelle lunghezze d'onda del vicino infrarosso NIR (750-1100 nm). Quindi, la misurazione della differenza di radiazione elettromagnetica riflessa nelle varie lunghezze d'onda dello spettro permette, in teoria, di distinguere la vegetazione dal suolo, la vegetazione verde da quella senescente, le specie vegetali ecc. Anche le lunghezze d'onda dell'infrarosso a onde corte SWIR sono importanti per il riconoscimento della vegetazione. Infatti, nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso

tra 1550 e 1750 nm la riflessione della vegetazione è fortemente dipendente dal contenuto di umidità delle foglie. Queste lunghezze d'onda sono talvolta utilizzate per distinguere i suoli asciutti da quelli umidi o per distinguere la neve dalle nuvole. In Tabella 2.2 sono riportate le principali caratteristiche dei sensori operanti nel visibile VIS e nell'infrarosso vicino NIR e infrarosso.

Tabella 2.2 Principali caratteristiche dei sensori satellitari multispettrali ad alta risoluzione operanti nello spettro del visibile VIS e dell'infrarosso vicino NIR+SWIR.(D'Urso 2011)

SENSORE	Lancio	Risoluz. (m)	Freq. (g)	Swath (km)	num. bande	VIS (nm)		NIR (nm)												
						400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900				
LANDSAT TM	1982	30	16	185	6															
JERS OPS	1992	21	44	75	7															
IRS 1-C LISS III	1995	24	22	140	4															
ADEOS AVNIR	1996	16	46	1200	4															
SPOT 4 HRVIR	1998	20	3	60	4															
IKONOS 1-2	1998	4	5	11	4															
TERRA ASTER	1999	15	16	60	9															
QUICKBIRD	2000	2.8	8	16	4															
EO-1 HYPERION	2000	30	200	7.5	70															
CHRIS PROBA	2001	18	7	14	19															
SPOT 5 HRG	2002	10	3	60	4															
IRS P6 LISS III	2003	24	10	140	3															
FORMOSAT 2	2004	8	3	24	4															
DMC (*)	2005	20-30	4	60	4															
ALOS AVNIR2	2006	10	46	70	3															
KOMPSAT 2	2006	8	14	15	4															
CBERS 2	2007	20	3-26	113	4															
RAPID-EYE (*)	2008	6	1	77	8															
DEIMOS	2009	22	3	60	3															
WORLDVIEW-1	2009	2	3	16	5															
RESOURCESAT 2	2011	5.8	24	70	3															
X_SAT	2011	12	n.d.	50	3															
PLEIADES	2012	3	3	20	4															
LANDSAT DCM	2012	30	16	185	5															
EnMAP	2013	30	4	30	94															
PRISMA	2013	30	4	30	-															
SENTINEL-2 (*)	2013	20	4	290	10															

(\*) costellazione di 2 o più satelliti

Per facilitare lo studio delle caratteristiche della vegetazione si ricorre all'uso di Indici di Vegetazione (VI), cioè combinazioni algebriche tra singole bande spettrali, derivanti da dati telerilevati. Da un punto di vista teorico un buon indice di vegetazione dovrebbe dipendere solamente dalle caratteristiche spettrali della copertura vegetale: per tale motivo è necessario minimizzare gli effetti dovuti a fattori esterni, che possano alterare la risposta spettrale della vegetazione, quali l'influenza degli angoli di osservazione e di illuminazione, gli effetti atmosferici e l'influenza del suolo (Baret and Guyot 1991). Gli indici di vegetazione più comuni utilizzano la banda spettrale del rosso e dell'infrarosso

vicino. Infatti, i pigmenti delle foglie non sottoposte a stress, riflettono circa il 10% della radiazione ricevuta nella regione spettrale della luce visibile (rosso) ed oltre il 40% di quella ricevuta nell'infrarosso vicino.

### 2.3.2.1 NDVI Normalised difference Vegetation Index

L'indice NDVI (Normalised difference Vegetation Index) è l'indice di vegetazione più largamente utilizzato e menzionato in tutti gli studi che riguardano l'individuazione delle aree irrigate (Silleos and Alexandridis 2006). È stato ampiamente dimostrato come il suo valore è fortemente correlato ai parametri della vegetazione. L'NDVI possiede una struttura semplice e facilmente interpretabile (Bastiaanssen, Molden, and Makin 2000) e si calcola come differenza normalizzata tra valori di riflettanza registrati nelle bande infrarosso vicino e rosso, definito come:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$$

Dove  $\rho_{NIR}$  è la riflettanza nella banda del vicino infrarosso e  $\rho_{RED}$  è la riflettanza nel rosso. Per definizione è una funzione limitata che varia nell'intervallo [-1, +1]. Valori negativi corrispondono all'acqua, valori vicini a zero ma positivi (da 0 a 0,2) corrispondono ai suoli nudi e valori più alti, da 0,3 a 0,6 indicano la presenza di superfici vegetate, con valori massimi attorno a 0,8 per vegetazione molto densa. La grande diffusione di questi indici spettrali deriva dalla loro capacità di monitoraggio dei cambiamenti globali delle aree vegetate. Infatti, essi risultano molto ben correlati alla quantità di vegetazione fino alla saturazione quando si ha copertura totale e quindi sono rappresentativi delle proprietà biofisiche della copertura vegetale. Sono, però anche estremamente sensibili alle proprietà ottiche dei suoli, e quindi sono difficili da interpretare nel caso di copertura parziale bassa. È ampiamente rilevato che lo studio dell'andamento temporale dell'indice NDVI permetta di identificare le fasi fenologiche della vegetazione. In Figura 2.7 è riportato un andamento temporale tipico di NDVI dove si distinguono:

1. stagione vegetativa, determinata da un rapido incremento del valore di NDVI,

2. periodo durante il quale la specie investigata è al massimo delle proprie potenzialità (plateaux),
3. senescenza

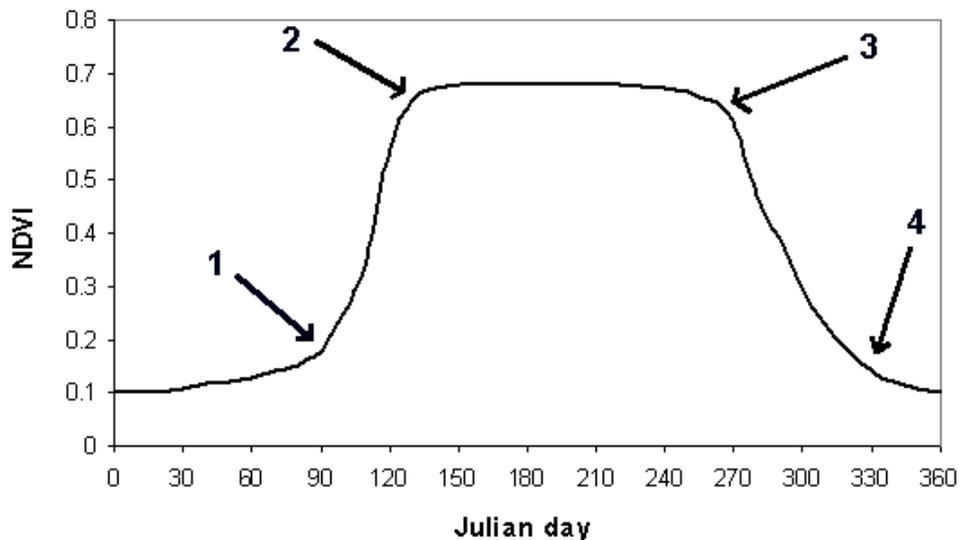


Figura 2.7. Andamento stagionale teorico dell'indice NDVI con indicazione dei limiti delle fasi fenologiche.

### 2.3.2.2 NDWI Normalised Difference Wetness Index

Nonostante la sua utilità e vasta diffusione, l'indice NDVI non riesce a descrivere efficacemente differenze tra vegetazioni molto fitte a causa di problemi di saturazione. Per tale motivo diversi autori hanno suggerito altri indici che non risentissero dello stesso problema. Anche l'indice NDWI (Normalised Difference Wetness Index) (Gao 1996) talvolta indicato anche come NDMI (Normalized Difference Moisture Index) è stato ampiamente suggerito in studi sulle aree irrigate, poiché risulta molto sensibile alla contenuto di umidità della vegetazione. Questo indice spettrale si basa sul maggiore assorbimento nella banda dell'infrarosso a onde corte SWIR (short-wave infred) da parte dell'umidità fogliare. Esso, quindi, utilizza la riflettanza nelle bande del vicino infrarosso e dell'infrarosso a onde corte per migliorare la visualizzazione di vegetazione ad alto contenuto di umidità.

$$NDWI_{GAO} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$$

Alcuni autori hanno concluso che l'indice  $NDWI_{GAO}$  è superiore all' NDVI per identificare i terreni irrigati in India (Rao and Mohankumar 1994). Uno dei limiti legato al suo utilizzo è l'incapacità di distinguere le acque superficiali dai suolo irrigati. Dal punto di vista dell'applicabilità, occorre rilevare che la maggior parte dei sensori commerciali non hanno alcuna banda nell'infrarosso a onde corte, che quindi limitano l'applicabilità di tale indice.

### 2.3.2.3 Greenness index

Irs et al. (2010) hanno proposto un ulteriore indice, denominato *Greenness*, che in qualche modo combina il contenuto informativo dei due indici precedentemente descritti. I concetti rappresentati da questo indice sono molto simili a quelli della trasformata di Tasseled Cap – (TCT) (Kauth and Thomas 1976) che quindi vale la pena di riassumere brevemente. La TCT permette di creare tramite una rotazione un nuovo sistema di coordinate di riferimento nel quale suoli e vegetazione sono meglio rappresentati. Gli assi del nuovo sistema di coordinate sono definiti “*brightness*”, “*greenness*”, “*yellowness*” and “*nonessuch*”. L'asse *brightness* è associato con le variazioni di riflettività dei suoli, l'asse *greenness* è correlato con le variazioni di vigore della vegetazione mentre l'asse *yellowness* è in relazione all'ingiallimento della vegetazione senescente. L'asse *nonessuch* è stato interpretato da alcuni autori in relazione alle condizioni atmosferiche. L'utilità della TCT consiste nella determinazione di un sistema di coordinate basato su parametri fisici per l'interpretazione di immagini di aree agricole nelle varie fasi di maturazione delle colture. Si tratta quindi di una trasformazione dove, però, a differenza della trasformazione per componenti principali, i coefficienti non sono calcolati a partire dal set di dati ma sono determinati a priori per i diversi sensori. I parametri delle trasformazioni sono stati determinati prevalentemente per il TM di Landsat. L'utilizzo di tale trasformazione è però abbastanza limitato per noti problemi di calibrazione. Senza entrare nel dettaglio, si vuole fare notare che la seconda trasformazione

denominata greenness è di fatto un indice di vegetazione, con un coefficiente molto alto per la Banda 4 e coefficienti negativi per le altre bande. Da questa considerazione Irs et al., 2010 sono partiti per costruire il loro indice di Greenness

$$Greenness = \max \left\{ 0, \left( \frac{\rho_{NIR}}{\rho_R} + \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{SWIR}} - \frac{\rho_R}{\rho_{SWIR}} \right) \right\} \geq 0$$

Esso può essere considerato come una originale combinazione di tre ben noti indici spettrali riportati in letteratura tecnica :

1. a canopy chlorophyll absorption index  $\frac{\rho_{NIR}}{\rho_R}$ ;
2. canopy water absorption index  $\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{SWIR}}$
3. a snow/water ratio index.  $\frac{\rho_R}{\rho_{SWIR}}$

La somma dei primi due addendi rappresenta la derivata seconda per la lunghezza d'onda pari al centro della banda del NIR dello spettro. In sostanza il greenness index rappresenta la concavità verso il basso dello spettro alla lunghezza d'onda del centro della banda del NIR. Questo significa che tale somma è tanto più elevata quanto più la vegetazione è rigogliosa e ben irrigata. Tal concetto è facilmente ricavabile dal grafico in Figura 2.8

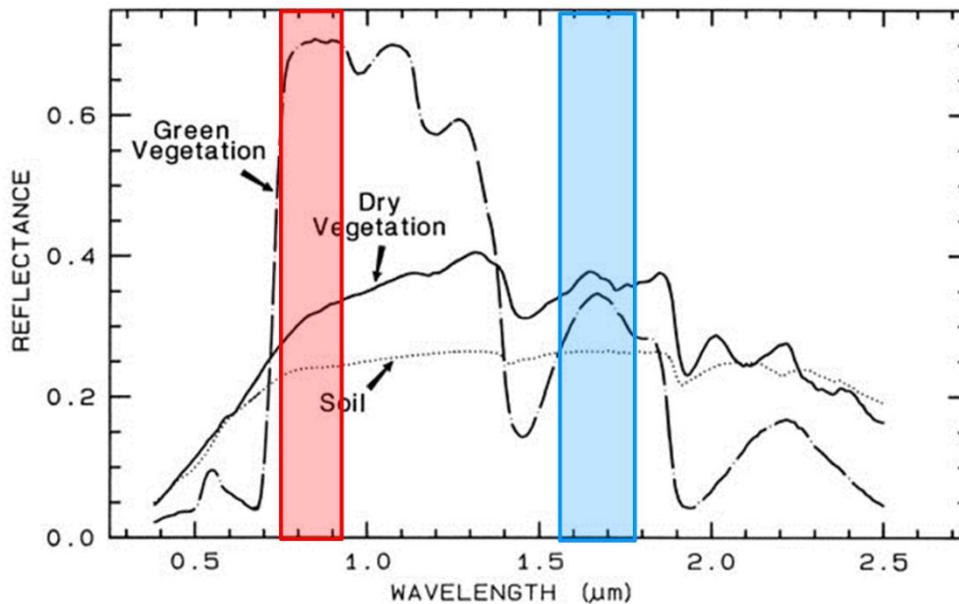


Figura 2.8. Riflettanza, nelle diverse lunghezze d'onda di una vegetazione verde, vegetazione secca e suolo nudo. In rosso e azzurro sono riportate rispettivamente le bande corrispondenti al NIR e lo SWIR tipici dei sensori attualmente operanti (le ampiezze delle bande non sono rappresentative di uno specifico sensore).

### 2.3.3 Requisiti di risoluzione temporale

La mappatura delle aree irrigate dipende fortemente dal periodo di acquisizione e dal numero di immagini usate (Pax-Lenney and Woodcock 1997). La scelta del periodo di acquisizione e dell'intervallo temporale tra un'immagine e l'altra dipende dai tipi di colture irrigue presenti nel territorio oggetto di studio (Beltran and Belmonte 2001).

Ad esempio per alcune colture irrigue presenti nel mezzogiorno d'Italia i calendari colturali medi sono schematicamente riportati in Figura 2.9.

	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
mais												
Alfalfa												
germogli di soia												
girasole												
patata												

Figura 2.9 – Calendario di alcune colture presenti in Italia

La conoscenza del periodo di semina e di raccolta delle colture da monitorare permette di individuare l'intervallo temporale da coprire con le acquisizioni. La densità delle acquisizioni dipende invece dal *pattern* di crescita della coltura. Studi precedenti (D'Urso et al. 2010), condotti in regione Campania hanno mostrato che un numero di acquisizioni variabile tra 8 e 12 con una frequenza temporale di circa 10-15 gg rappresenta la configurazione ideale per seguire in dettaglio l'andamento di crescita delle diverse colture, per una corretta valutazione dei fabbisogni irrigui. In Figura 2.10 è riportato un andamento tipico medio per le due colture in regione Campania.

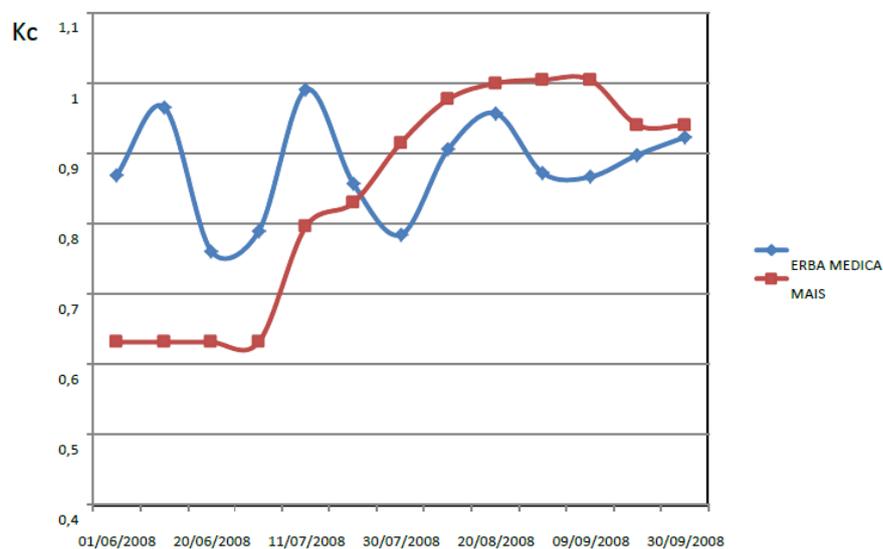


Figura 2.10 : Andamento del coefficiente culturale  $K_C$  per il mais e l'erba medica in regione Campania. (Ariespace 2011)

## 2.4 Pre-processamento delle immagini satellitari

Le attività di pre-processamento delle immagini satellitari includono l'ortorettifica con successivo geo-riferimento e la correzione radiometrica e atmosferica. La prima è ormai effettuata direttamente dall'ente o agenzia che gestisce la piattaforma e distribuisce le immagini; il livello di precisione fornito è generalmente più che adeguato all'utilizzo per fini agricoli ed ambientali.

### *Calibrazione radiometrica e Correzione Atmosferica*

L'utilizzo di dati provenienti da diversi sensori per la valutazione dell'evoluzione temporale delle colture, necessita di tenere conto di fattori che possono influenzare la risposta registrata al sensore (espressa dal DN del pixel), quali: differenze di calibrazione tra i diversi sensori satellitari, variabilità delle condizioni atmosferiche, differenti angoli di vista e di incidenza dell'irradianza solare dovuti alla geometria di acquisizione.

È utile sottolineare che la correzione atmosferica dei dati è indispensabile nel caso di elaborazioni che mirano a definire gli andamenti multi-temporali di mappe di NDVI (Duggin and Robinove 1990) e in particolare per le applicazioni che hanno l'obiettivo di valutare le variazioni dell'indice NDVI tra acquisizioni di epoche differenti. (Song, Woodcock, and Seto 2001), proprio per ridurre le variazioni di riflettanza causate dai citati fattori e non dall'effettiva variazione delle condizioni delle superfici vegetate.

## 2.5 Classificazione multi-temporale

### 2.5.1 Algoritmi di classificazione

I metodi per la classificazione delle immagini possono essere di due tipi:

- *assoluti*: che si basano sulla disponibilità di ampie librerie contenenti le caratteristiche di riflettività spettrale di tutte le superfici, e miranti ad identificare le

classi di copertura del suolo mediante una conoscenza a priori del comportamento spettrale;

- *relativi*: i pixel di una immagine vengono raggruppati in una medesima classe sulla base di un'analisi di similitudine spettrale che mira ad ottenere, in base a procedure di assegnazione dei pixel basate su metodi statistici, classi più o meno omogenee; questo tipo di classificazione richiede che vengano individuati nell'immagine insiemi di pixel rappresentativi per ognuna delle classi (*dati di training*); a seconda se i pixel rappresentativi delle classi siano disponibili prima o dopo il processo di classificazione possiamo distinguere le classificazioni di tipo *supervisionato* e non supervisionato.

#### *Classificazione Supervisionata (supervised).*

È l'approccio più utilizzato per l'analisi delle immagini in telerilevamento. Essa tratta esplicitamente le classi di informazioni o classi tematiche e richiede che sia noto a priori il numero e l'identità delle classi (ad esempio: acqua, prato, bosco di latifoglie, zone agricole) che si intende individuare nella mappa tematica finale.

La classificazione supervisionata, a differenza di quella non supervisionata, utilizza alcune aree o pixel come training per la successiva classificazione. L'esperto interviene istruendo il calcolatore ed assegnando i pixel selezionati ad una particolare classe semantica. I pixel di training devono essere il più omogenei possibile e spettralmente distinti, in quanto per il successivo processo di classificazione verrà utilizzata la media delle firme spettrali dei pixel di training di ciascuna classe definita. Da un punto di vista operativo, è buona norma selezionare più aree di training per una stessa classe, ben distribuite su tutta l'immagine al fine di evitare disomogeneità dovute ad angoli di vista differenti o autocorrelazioni spaziali. L'assegnazione dei pixel rimanenti a ciascuna classe avviene calcolando la probabilità che ciascun pixel appartenga a una classe piuttosto che ad un'altra utilizzando prevalentemente la cosiddetta *maximum likelihood classification*. Questo classificatore utilizza i dati di training per stimare media e varianza di ogni classe e calcola la probabilità che ciascun pixel rimanente cada in una classe piuttosto che in un'altra. Un altro metodo standard è quello della distanza

*parallelepiped* che invece tiene dentro il concetto di distanza classica sempre nello spazio multispettrale. In generale il primo metodo è più performante anche se computazionalmente più gravoso del secondo. In definitiva, la scelta dell'uno o dell'altro dipende da come vengono scelti i pixel di training. Conviene utilizzare il classificatore *maximum likelihood* se i pixel di training sono abbastanza omogenei spettralmente, mentre è preferibile il classificatore della distanza *parallelepiped* se si ha una maggiore eterogeneità.

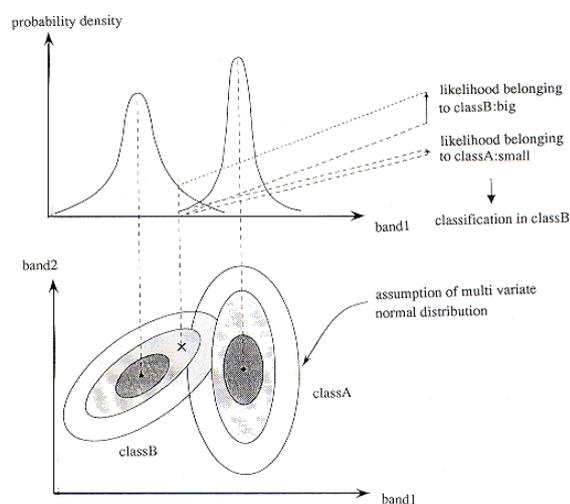


Figura 2.11 – Schema concettuale del classificatore *maximum likelihood*

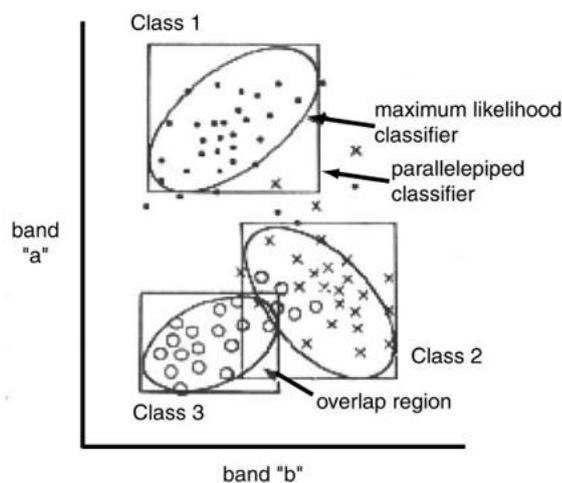


Figura 2.12 – Confronto tra il classificatore *maximum likelihood* e *distanza parallelepiped*

L'accuratezza del risultato finale e quindi della classificazione è eseguita mediante una matrice di errore in cui, generalmente nelle colonne sono riportate le classi delle verità a terra (pixel di training) e sulle righe le rispettive classi dopo la classificazione. Una classificazione perfetta dovrebbe prevedere una matrice diagonale.

		dati di riferimento - verità a terra				Totale per classe nella mappa
		classe 1	classe 2	classe 3	classe 4	
dati di classificazione	classe 1	p11	p12	p13	p14	p1+
	classe 2	p21	p22	p23	p24	p1+
	classe 3	p31	p32	p33	p34	p1+
	classe 4	p41	p42	p43	p44	p1+
Totale per classe nella classificazione		p+1	p+2	p+3	p+4	

Figura 2.13 – Matrice d'errore della classificazione

Ad esempio facendo riferimento allo schema riportato in Figura 2.13, la somma  $p_{21} + p_{31} + p_{41}$  rappresentano i pixel che pur appartenenti alla classe 1 sono stati classificati nelle altre classi.

*Classificazione non supervisionata (unsupervised).*

Questo tipo di classificazione effettua una suddivisione dello spazio delle caratteristiche in un certo numero di classi spettrali (*clustering*), senza richiedere il contributo di informazioni a priori. L'analisi di riconoscimento delle diverse classi ottenute viene

effettuata a posteriori in modo da poter poi definirne la descrizione (etichetta/*label*). La procedura di classificazione è basata sulla definizione di misure di similarità spettrale, anche di tipo statistico, fra i singoli pixel ed i gruppi (*clusters*) che vengono via via individuati. L'ipotesi fondamentale che sta alla base di questo approccio è che a oggetti tra loro simili debbano corrispondere risposte spettrali simili. Nel caso più generale, la classificazione *unsupervised* ha lo scopo di individuare un certo numero di cluster senza che sia noto a priori il loro numero e natura, in modo che essi risultino quanto più separabili e distinti. Dal punto di vista matematico, le coordinate del singolo pixel nello spazio multispettrale a  $b$  dimensioni (dove  $b$  è il numero delle bande del sensore) sono individuate dal vettore:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_b)$$

che deve essere assegnato ad una delle  $k$  classi  $w_i$  mediante una funzione di decisione

$$d(\mathbf{x}) = d(x_1, x_2, \dots, x_b)$$

differente per ogni classe. Il pixel appartiene alla classe  $w_i$  se è massima la sua funzione di decisione ovvero:

$$x \in w_i \text{ se } d_i(\mathbf{x}) < d_j(\mathbf{x}) \quad \forall j \neq i$$

Questa operazione suddivide lo spazio delle caratteristiche  $b$ -dimensionale in regioni di decisione corrispondente a ciascuna delle classi individuate delimitate da una frontiera di superfici dell'iperspazio a  $b$  dimensioni.

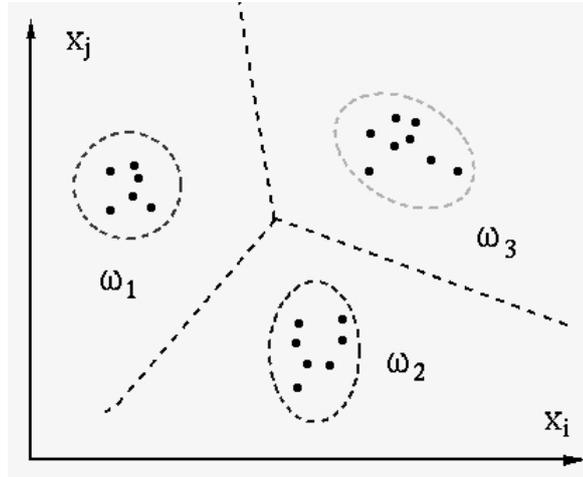


Figura 2.14 : Cluster e frontiera delle diverse classi suddivisa in base alle funzioni di decisione

Definita il concetto di distanza  $L(x, \mathbf{m}_i)$  del generico pixel  $x$  dal centroide della classe  $\mathbf{m}$  nello spazio multispettrale mediante una delle note formule (distanza euclidea o city block), le tecniche mirano a massimizzare la cosiddetta matrice di dispersione esterna  $\mathbf{S}_{ex}$  che misura la separabilità dei cluster e a minimizzare quella interna  $\mathbf{S}_{in}$  che misura la compattezza generale dei cluster. Le espressioni corrispondenti sono le seguenti.

$$\mathbf{S}_{in} = \sum_i \sum_{x \in \omega_i} (x - \mathbf{m}_i)(x - \mathbf{m}_i)^T = \sum_i n_i \mathbf{C}_i$$

$$\mathbf{S}_{ex} = \sum_i n_i (\mathbf{m}_i - \mathbf{m})(\mathbf{m}_i - \mathbf{m})^T$$

Essendo  $\mathbf{m}_i$  le coordinate della media del cluster,  $\mathbf{m}$  le coordinate della media totale, e  $\mathbf{C}_i$  la matrice di covarianza dei singoli cluster.

I più noti algoritmi che permettono di creare i cluster sono il *k-means* e l'algoritmo *ISODATA* (Ball and Hall 1965).

### 2.5.2 Pre - Classificazione e estrazione dei pattern multi-temporali

La metodologia proposta prevede di applicare una classificazione non supervisionata per raggruppare automaticamente i pixel delle serie multi-temporali di indici di vegetazione derivate dalle immagini a più bassa risoluzione che coprono l'intero periodo irriguo. La classificazione può essere effettuata ricorrendo all'algoritmo ISODATA, un metodo di clustering che utilizza le distanze nello spazio delle caratteristiche in un processo iterativo di assegnazione dei pixel alle classi stesse e diffusamente disponibile nei principali software di *image-processing*. Il processo di classificazione a cui ci si riferisce, utilizza le tecniche di clustering applicate non alle singole bande spettrali, ma ad una serie temporale di indici di vegetazione (una mappa per ogni acquisizione). In sostanza le mappe temporali di indici di vegetazione (ad esempio NDVI) prendono il posto delle singole bande spettrali. Dal punto di vista statistico il processo di assegnazione non cambia sebbene il risultato concettuale sia diverso. Per ogni data nel processo di classificazione è presente una sola informazione rappresentata dall'indice di vegetazione prescelto. Le singole classi o cluster sono raggruppamenti di pixel aventi andamenti di indice di vegetazione simili, in termini di valori di picco, andamento di crescita, ecc. Per ciascuna classe vengono estratti i pattern temporali medi e la varianza di ciascuna classe per ogni acquisizione. Il numero di classi viene fatto variare in modo da ottenere la migliore separabilità e compattezza delle classi. Aspetti importanti del processo sono:

- Il numero di classi deve essere sufficiente numeroso: in quanto per una fissata forma (*shape*) dell'andamento (*pattern*) temporale si possono ottenere differenti classi: si pensi, per fissare le idee, a due colture di mais che pur avendo mediamente una forma dell'andamento temporale di NDVI simile possono essere traslate nel tempo (ad esempio per differenza nelle epoche di semina) con conseguente spostamento temporale del pattern di NDVI. Analogamente le stesse due colture potrebbero presentare degli andamenti simili in termini di valori medi e di picco ma essere più o meno allungati nel tempo (ad esempio, cicli di durata diversa).

- Individuazione delle superfici irrigue a prescindere dalla mappa delle colture: gli andamenti temporali da ricercare per l'individuazione delle aree irrigue sono quelli che evidenziano trend di crescita compatibili con la pratica irrigua: in sostanza il metodo così formulato permette di riconoscere se su una data area è irrigua, prescindendo dal tipo di coltura presente; in altre parole, l'area oggetto di studio è suddivisa in classi irrigue e non in classi colturali.

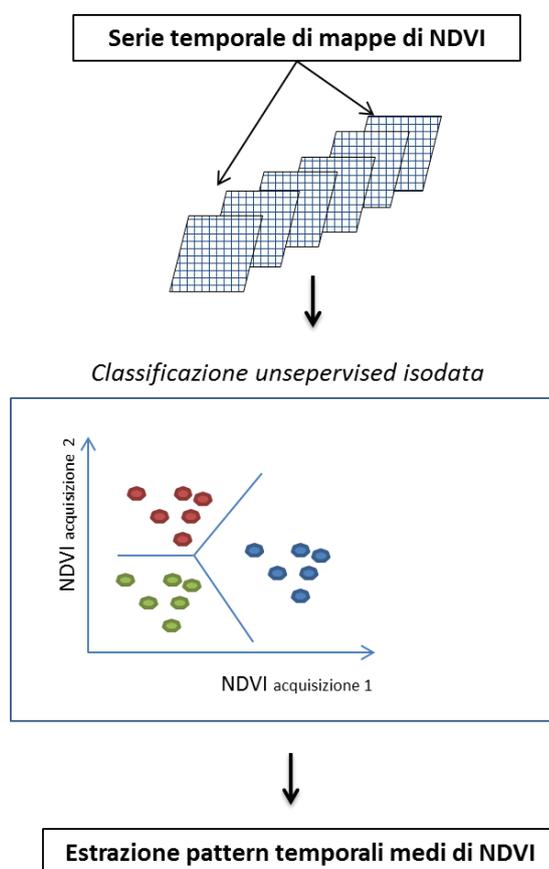


Figura 2.15 : Classificazione ISODATA della serie temporale di mappe di NDVI. Cluster e frontiera delle diverse classi suddivisa in base alle funzioni di decisione

### 2.5.3 Dai pattern temporali alle classi irrigue

Valutando a video le diverse forme delle risposte spettrali multi-temporali si effettua una ricodifica delle classi, per poi assegnarle alle classi irrigue e non irrigue. Con il termine “*ricodifica sulla base dell’andamento temporale dell’indice di vegetazione: crescente, variabile e stabile*” s’intende il passaggio da classi statistiche in output dal classificatore ISODATA a classi di semantiche irrigue e non irrigue, secondo andamenti caratteristici riportati rispettivamente nelle figure da 2.17 a 2.20 e riferiti all’indice NDVI. Con riferimento al solo indice NDVI, le metriche utilizzate per assegnare le differenti classi in output dal classificatore automatico sono le seguenti:

- *Soglia valore minimo e massimo*: se il valore medio per una data classe è sempre inferiore ad un valore di soglia minimo (tipicamente 0.4), la classe non è da considerarsi irrigua; se il valore di NDVI è sempre superiore mediamente ad una soglia massima (tipicamente 0.8) la classe potrebbe essere un irriguo arboreo (Vale la pena precisare che il valore di 0,8 non è da intendersi in maniera troppo categorica, dato anche i noti problemi di saturazione dell’NDVI. Inoltre in tale classe finiranno anche le aree forestate che però vengono escluse dalla mappa a priori sulla base delle informazioni territoriali)
- *Andamento crescente*: vengono valutate le differenze tra due acquisizioni successive, se le differenze sono non negative si ha un andamento crescente; se il controllo è positivo solo per alcune date si ha un andamento crescente locale da investigare ulteriormente;
- *Differenze seconde*: permette di valutare le eventuali concavità e convessità degli andamenti.

Le metriche esposte possono essere utilizzate secondo il processo logico indicato in Figura 2.16. Per l’assegnazione delle etichette alle diverse classi irriguo/non irriguo, possono considerarsi, per fissare le idee, gli andamenti tipo riportati nelle figure delle pagine successive. È importante sottolineare, come già riportato in precedenza, che l’assegnazione delle etichette non viene fatta in base alle tipo di coltura (uso del suolo)

ma considerando gli andamenti tipici di classi di colture che hanno trend di crescita compatibili solo con un apporto irriguo.

In definitiva si distinguono tre tipologie di aree irrigate:

- *superfici irrigue caratterizzate da un forte trend di crescita della coltura, incompatibile con le condizioni meteo (deficit idrico) compatibile solo con il ricorso all'irrigazione. (CLASSE A) Figura 2.18 e Figura 2.19*
- *superfici irrigue caratterizzate da un andamento temporale del'indice NDVI a "dente di sega", (CLASSE B) Figura 2.20.*
- *superfici con elevati valori di NDVI ma con trend costanti; si tratta per lo più di colture arboree per le quali potrebbe evidenziarsi un ricorso sporadico all'irrigazione (CLASSE C) Figura 2.17 a destra.*

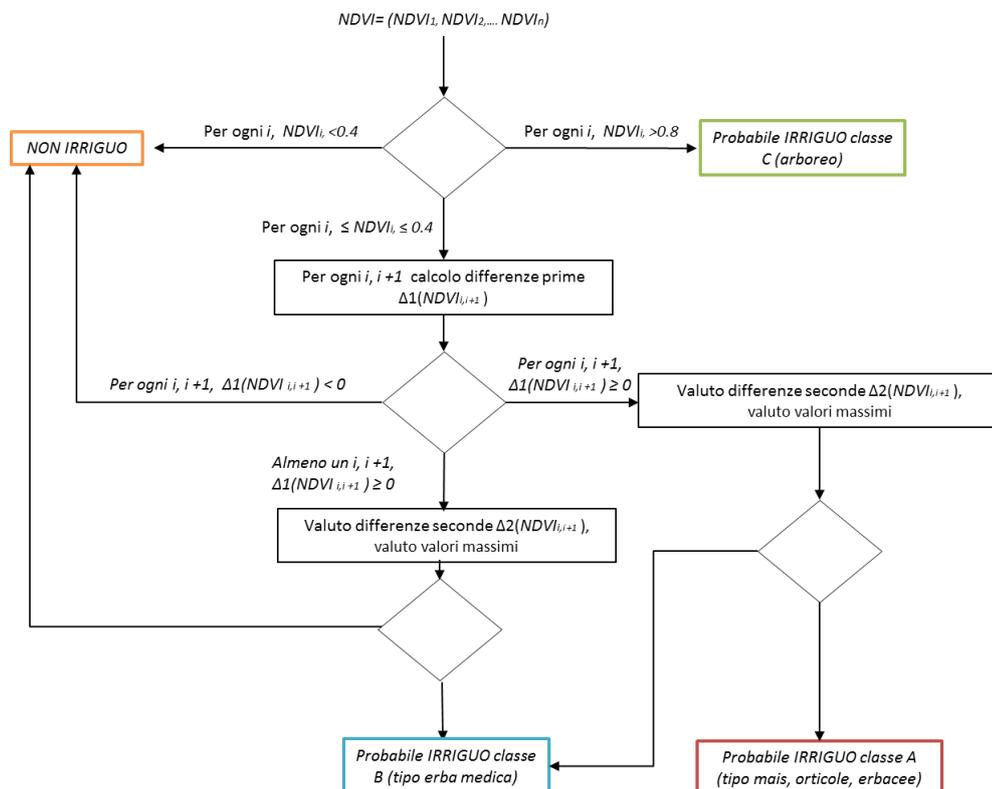


Figura 2.16 : Schema logico assegnazione label alle classi/cluster della classificazione automatica per l'indice NDVI.

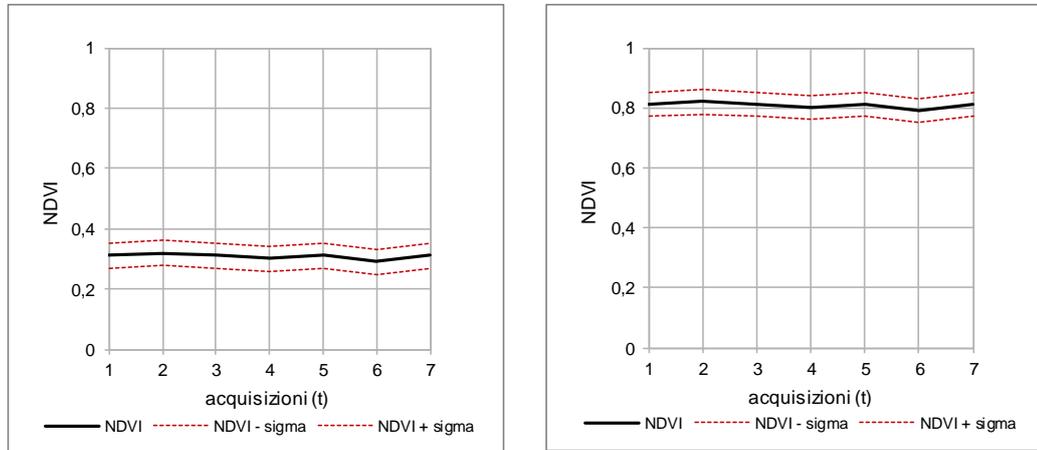


Figura 2.17 – Andamenti multi temporale schematici dell'indice NDVI. Un andamento tipo della figura a sinistra è da considerare non irriguo (nessun trend di crescita della coltura); un andamento tipo della figura a destra riguarda una coltura con vigore vegetativo costante, tipico ad esempio di alcune colture arboree irrigue (Classe C).

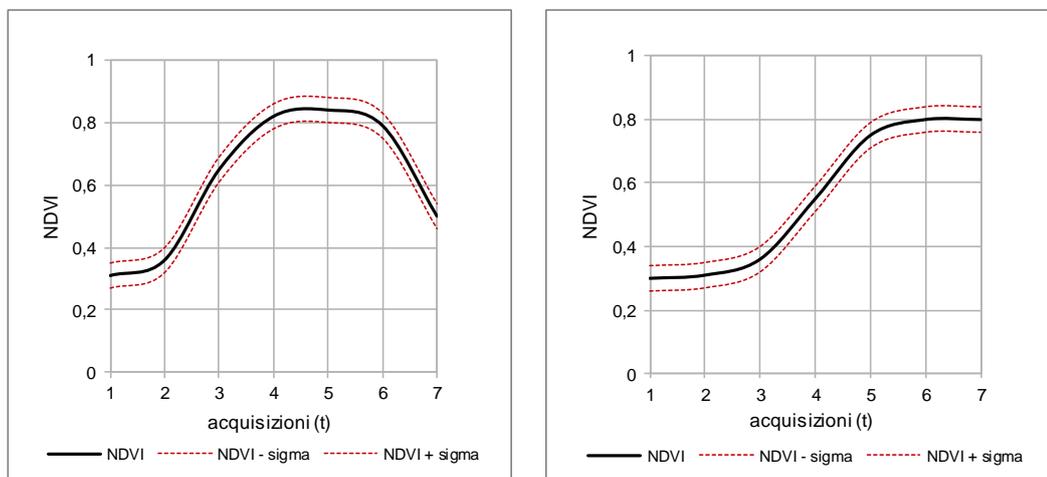


Figura 2.18 – Andamenti multi temporale schematici dell'indice NDVI. Un andamento tipo della figura a sinistra è da considerare irriguo (classe A): si notano la zona di sviluppo, la maturità e la senescenza; un andamento tipo della figura a destra può essere interpretato come quello di sinistra traslato nel tempo, per cui è da considerarsi ancora irriguo (Classe A).

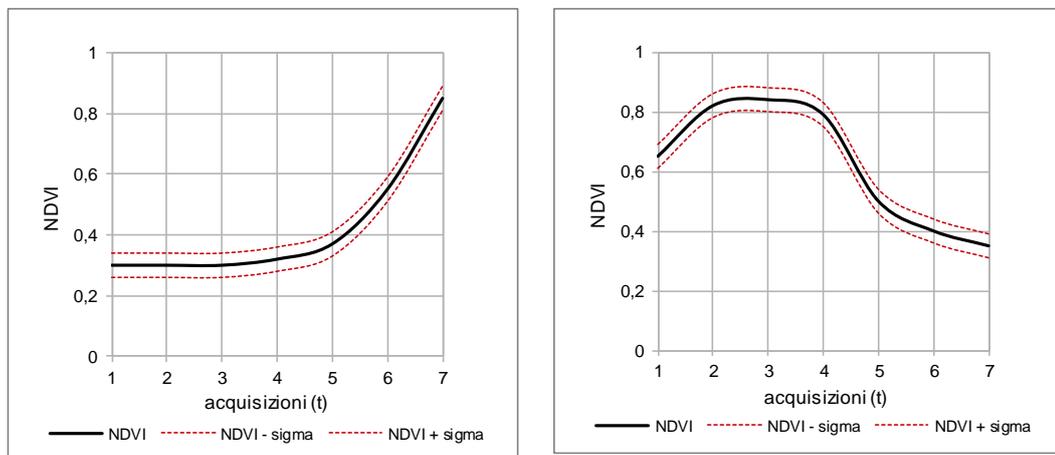


Figura 2.19 – Andamenti multi temporale schematici dell'indice NDVI. I due andamenti in figura sono da considerarsi traslazioni temporali (in avanti, semina tardiva a sinistra, indietro, semina precoce, a destra) del grafico tipico di una coltura con vigore vegetativo crescente che deve considerarsi irriguo (Classe A).

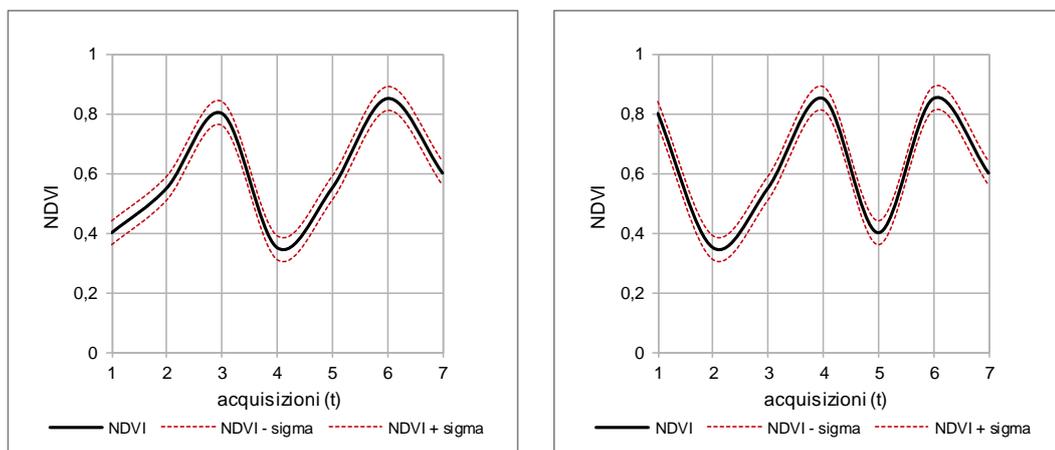


Figura 2.20 – Andamenti multi temporale schematici dell'indice NDVI. Gli andamenti tipo rappresentati sono da considerare irrigui (classe B); sono tipici di una coltura soggetta a più tagli durante la stagione:

#### 2.5.4 Post – Classificazione supervisionata

La classificazione supervisionata nella procedura proposta per la mappatura delle aree irrigate, è applicata per migliorare la risoluzione spaziale della segmentazione. Infatti la prima classificazione, a bassa risoluzione, è ottenuta mediante la serie temporale di mappe di indice di vegetazione (NDVI). In pratica, le immagini a più bassa risoluzione spaziale e a più elevata risoluzione temporale (serie lunga) permettono di seguire nel tempo la coltura con un passo temporale adeguato, con bassi costi computazionali (è una procedura quasi completamente automatica) e minori costi unitari dei dati. Le immagini a più alta risoluzione spaziale sono in numero inferiore, al limite una, e servono per migliorare geometricamente il dettaglio delle singole classi individuate. Ne occorrerebbe una per ogni picco significativo rilevato nei pattern temporali per ciascuna classe. In questo modo, è possibile distinguere in dettaglio sulla mappa le diverse parcelle appartenenti alle diverse classi. La scelta delle immagini nel periodo di picco permette anche di procedere più facilmente alla classificazione assistita, in quanto i pixel di training sono facilmente individuabili. Ovviamente, da un punto di vista operativo, occorre che si abbia l'acquisizione ad alta risoluzione nel periodo prescelto. Con un po' di esperienza ed un'adeguata programmazione delle acquisizioni, è possibile riuscire a fare in modo che l'immagine prescelta sia inclusa in un intervallo temporale molto prossimo alla data corrispondente al picco di indice di vegetazione da indagare.

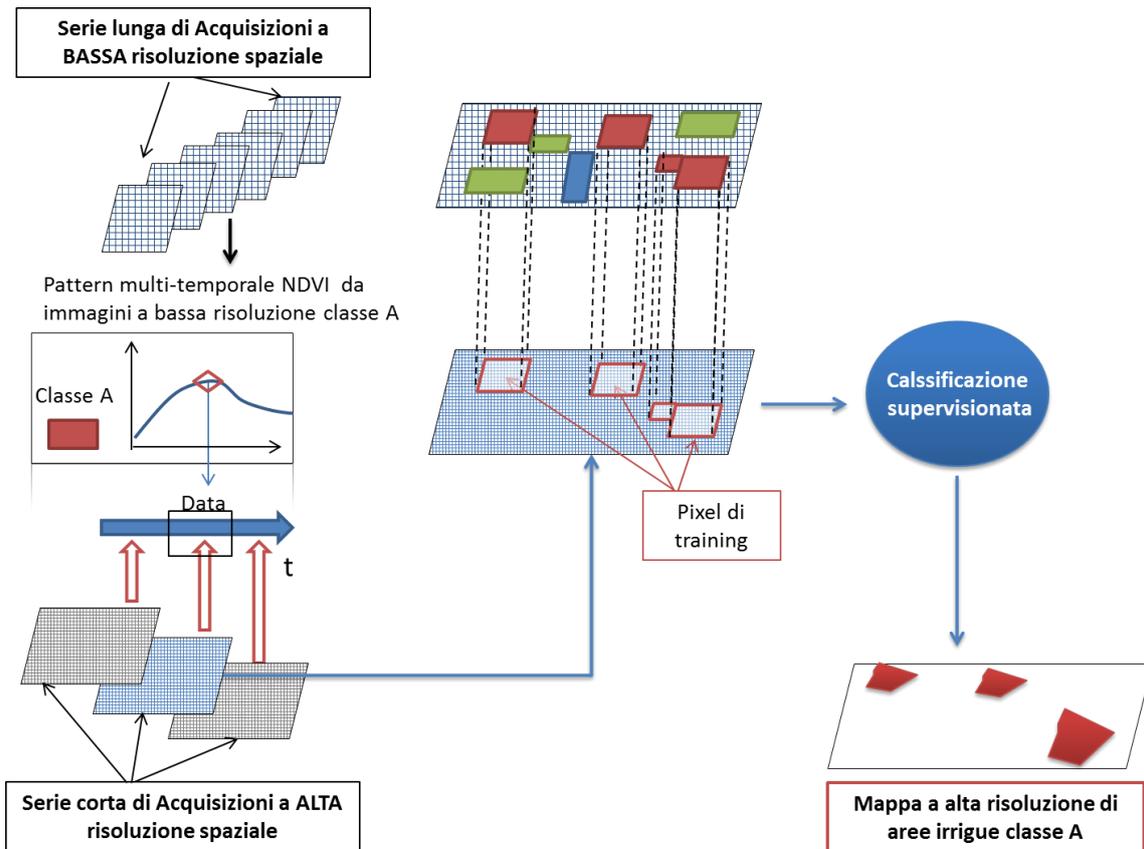


Figura 2.21 – Procedura per la classificazione delle immagini ad alta risoluzione (serie corta) scegliendo i pixel di training sulla base della classificazione multi-temporale di indice NDVI effettuata sulla serie lunga di immagini a bassa risoluzione

La procedura nel suo complesso prevede i seguenti passi:

1. Individuazione, mediante i pattern temporali medi, del periodo o dei periodi di picco per ciascuna classe;
2. Scelta, tra quelle disponibili, dell'acquisizione ad alta risoluzione più prossima al periodo di picco;
3. classificazione supervisionata, individuando geograficamente i pixel di training sulla base della classificazione multi-temporale.

## 3 CASO DI STUDIO

### 3.1 Inquadramento dell'area di studio.

L'area di studio ricade nella zona agricola della Valle-Telesina, facente parte del Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano, per un'estensione di circa 5000 ha. È ubicata nell'Italia meridionale, nella provincia di Benevento al confine con quella di Caserta e comprende i comuni di Telesse, San Salvatore Telesino, Faicchio, Puglianello e Amorosi. Essa ricade nel bacino del fiume Calore che si inserisce in quello più vasto del Volturno che rappresenta il principale fiume dell'Italia meridionale. Il fiume Calore nasce dal Monte Accellica (1.660 metri) nel comune di Montella, che fa parte del complesso dei Monti Picentini e il suo corso può essere diviso in alto, medio e basso Calore.

L'altimetria del territorio varia dal livello del mare fino alla quota di circa 1500 m.s.l.m. relativa al massiccio del Matese.

Il clima è decisamente mite: la temperatura media oscilla tra i 16 – 17 ° C in pianura e tra 8 -10° C delle zone più alte. La precipitazione media annua è di circa 800 mm, per lo più concentrati durante i mesi invernali, con estati secche e calde. In estate i valori massimi dell'evapotraspirazione di riferimento sono dell'ordine di 6 -7 mm/giorno.

L'area è caratterizzata da agricoltura irrigua nel periodo da maggio a settembre. Le principali colture praticate sono mais, alfalfa, alberi da frutto e colture orticole. La dimensione media delle parcelle è di circa 2 ha.

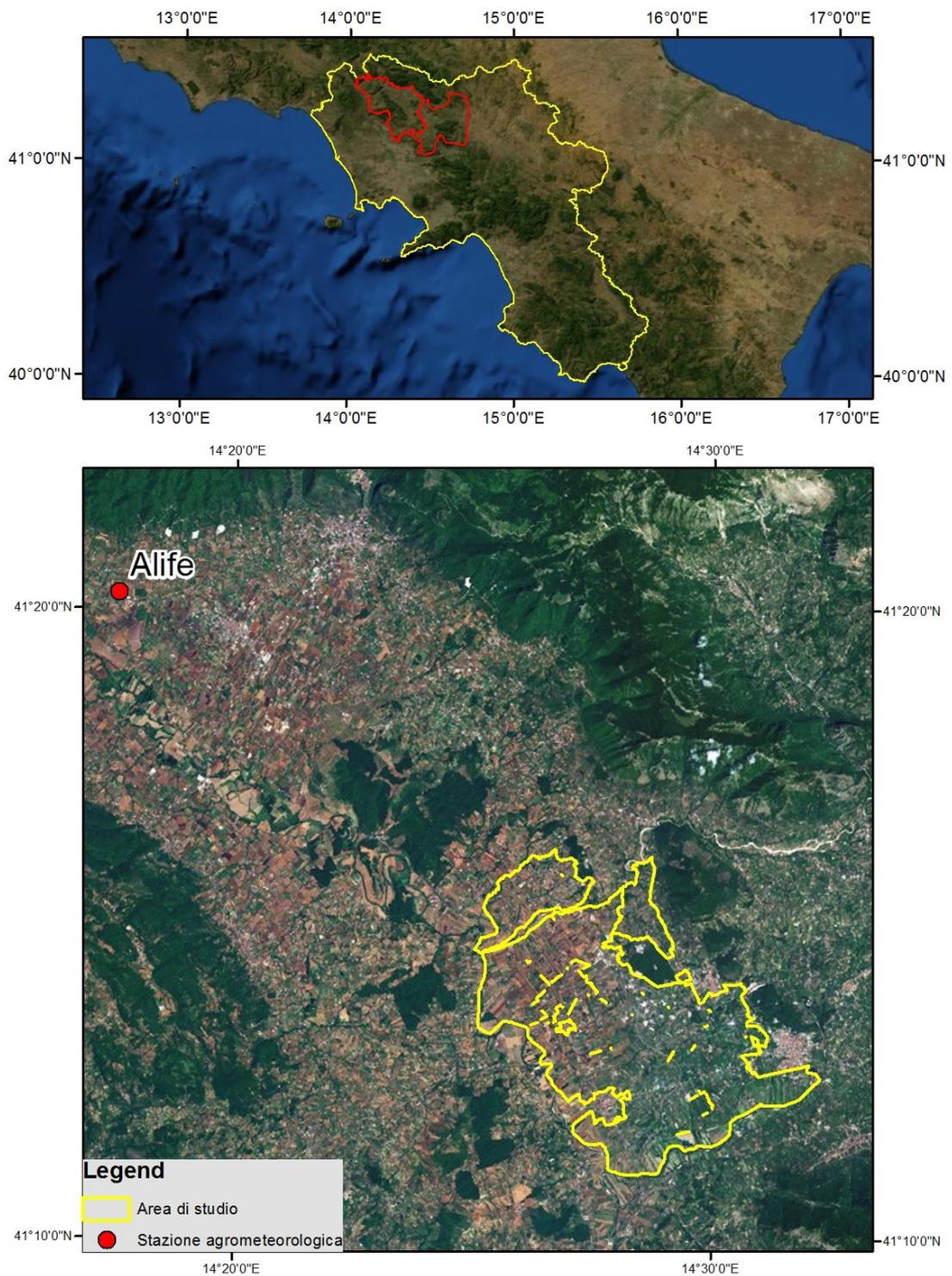


Figura 3.1- Corografia dell'area oggetto di studio

### **3.1.1 Applicazioni del Telerilevamento nell'area di studio: i progetti IRRISAT e SIRIUS.**

Da diversi anni l'area del Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano è oggetto di numerosi progetti applicativi e di ricerca che utilizzano dati di Osservazione della Terra. Le mappe prodotte da dati di O.T. sono utilizzate per l'applicazione di modelli per la descrizione di numerosi processi dinamici che interessano la superficie terrestre, con particolare riferimento all'idrologia dei sistemi agro-forestali. I parametri caratteristici della vegetazione, ricavati da satellite, rappresentano il principale dato di input per i modelli applicati per la gestione irrigua. Tra i diversi progetti basati su dati di O.T. realizzati, citiamo il Progetto IRRISAT (PSR Campania 2007-2013) nato dalle precedenti esperienze del Piano Regionale di Consulenza all'irrigazione in Campania e il progetto EU FP7 SIRIUS.

Il progetto IRRISAT ha per obiettivo lo sviluppo e l'applicazione di un sistema di supporto all'irrigazione, sia a scala aziendale che consortile, basato sull'impiego di immagini satellitari. L'osservazione dallo spazio delle superfici agricole viene utilizzata per il monitoraggio dello sviluppo delle colture, con un dettaglio di 20×20 m. È così possibile valutare il quantitativo massimo di acqua da utilizzare per irrigazione (consiglio irriguo) entro poche ore dall'acquisizione satellitare. L'informazione è distribuita agli utenti finali, singole aziende agricole e consorzi di bonifica ed irrigazione, attraverso telefonia cellulare (SMS) ed Internet (e-mail e pagine dedicate Web-GIS). IRRISAT è un esempio importante di utilizzo delle tecnologie di osservazione della Terra nella gestione del territorio. Il know-how tecnico e scientifico presente in Irrisat è un valore aggiunto d'importanza strategica per la salvaguardia delle risorse idriche. Utilizzando valori di indice di area fogliare (LAI) e albedo stimati da dati O.T., insieme a dati meteorologici standard (temperatura ed umidità dell'aria, radiazione solare incidente e velocità del vento) rilevati a terra, è determinata l'evapotraspirazione in condizioni potenziali in base ad una procedura basata sul metodo F.A.O.-56 e validata in diversi ambienti e tipologie colturali (D'Urso, 2010; Consoli et al., 2006 ).

Un altro esempio di applicazione di dati di O.T. è il progetto EU 7 Framework Program SIRIUS che utilizza i dati satellitari per la realizzazione di strumenti innovativi per supportare un uso sostenibile dell'agricoltura promuovendo contemporaneamente un uso efficiente delle risorse idriche. Il progetto, oltre che l'Italia, ha coinvolto altre 6 differenti aree test localizzate in altrettanti Paesi dislocati in quattro continenti (Europa mediterranea, Africa, Sud America, Asia). Esso si pone l'obiettivo di una forte interazione ed interscambio tra i diversi stakeholders promuovendo l'innovazione tecnologica e l'utilizzo dei dati di O.T. sia a livello aziendale che comprensoriale. I progetti citati hanno permesso di accedere a una ampio numero di immagini satellitari utilizzate per il presente lavoro.

### 3.1.2 Sistema informativo geografico.

Un'altra importante fonte di informazioni per la metodologia proposta, è il sistema informativo irriguo utilizzato attualmente dal Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano. A partire dalla stagione irrigua 2013, il Consorzio si è dotato di un sistema informativo geografico per razionalizzare il sistema della prenotazione irrigua, migliorando la distribuzione delle risorse idriche sul proprio territorio. È stato costruito, a tale scopo, un sistema informativo consultabile e aggiornabile via web che consente di “agganciare” il singolo appezzamento sia alle unità cartografiche ad esso sottese (particelle catastali, comizi e distretti irrigui, reti di distribuzione, ecc), sia di annotare tutte le informazioni riguardanti il tipo di coltura praticata, i periodi di semina e raccolta, le tecniche irrigue utilizzate. Il sistema è stato realizzato dallo spin off accademico Ariespace srl.

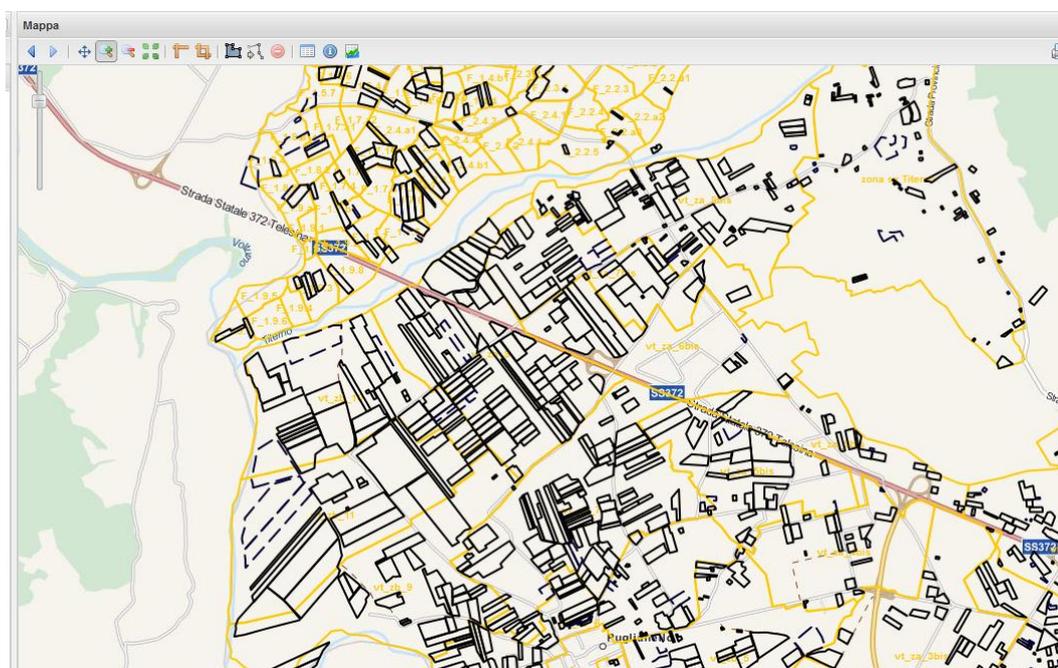


Figura 3.2- Vista del Web Gis Consortile

Le caratteristiche fondamentali di tale sistema sono:

- applicazione GIS based di facile accesso e consultabile via web mediante i comuni browser;

- database alfanumerico e geografico dei dati aziendali, degli appezzamenti irrigati, dei periodi di irrigazione e dei volumi prenotati e consegnati (questi ultimi mediante sistema di telecontrollo laddove presente).

Per gli scopi del presente lavoro, la possibilità di accedere a tale database geografico, ha permesso sia di migliorare la segmentazione e la risoluzione delle mappe prodotte, utilizzando ad esempio lo strato informativo catastale vettoriale, sia di avere una numerosa popolazione di verità a terra necessarie per controllare la bontà delle elaborazioni effettuate.

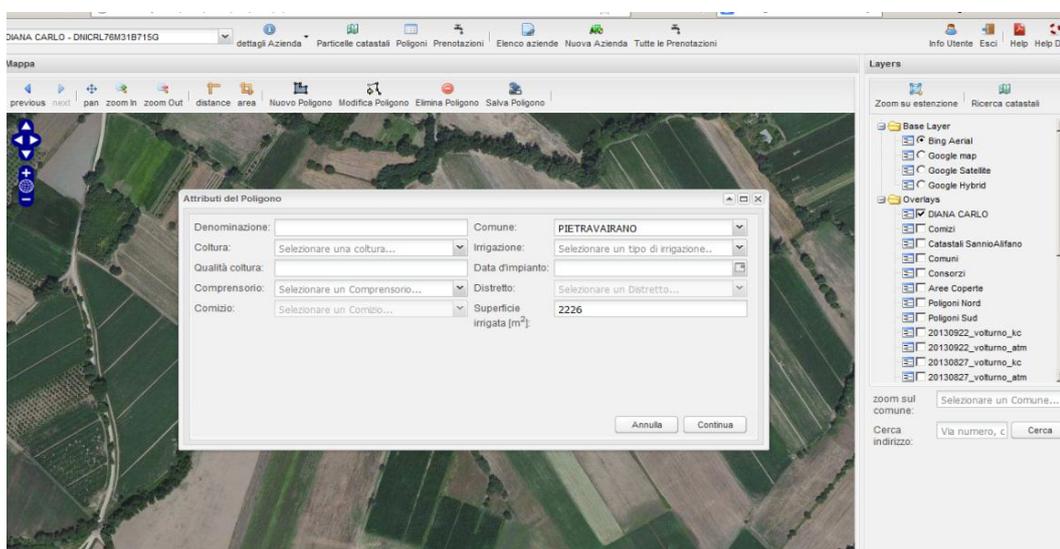


Figura 3.3- Form inserimento dati colturali dell'appezzamento

### 3.1.3 Stima dell'indice di aridità dell'area di studio

Molte classificazioni climatiche e biologiche sono state proposte per definire l'aridità di una zona. Alcuni autori distinguono tra l'aridità, intesa come condizione climatica di lungo periodo e la siccità che invece è collegata al concetto di deficit idrologico (Agnew and Anderson 1992). Per gli scopi di questo lavoro faremo riferimento al concetto di indice di aridità come espresso dall'UNESCO nel 1999 e alle procedure operative riportate da Maliva and Missimer, 2012.

L'indice di aridità proposto dall'UNESCO è dato dal rapporto tra le piogge P e l'evapotraspirazione di riferimento di una data area. L'evapotraspirazione di riferimento è determinata con la formula FAO 56 (Allen et al. 1998).

$$AI = \frac{P}{ET_0}$$

L'UNESCO fornisce anche una tabella che distingue tra i diversi valori di indice di aridità.

Tabella 3.1 – Classificazione indice di Aridità

Classificazione Indice di Aridità	
Iperarido	AI<0.03
Arido	0.03<AI<0.20
Semi- Arido	0.20<AI<0.50
Secco	0.50<AI<0.65

### 3.1.3.1 Dati agrometeorologici.

I dati meteo sono stati scaricati dalla stazione agrometeorologica regionale sita nel comune di Alife (CE). Il calcolo della evapotraspirazione di riferimento  $ET_0$  è stato condotto secondo la metodologia Penman-Monteith riportata nel quaderno 56 della FAO (Allen et al. 1998). L'equazione è la seguente:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Dove:

- $ET_0$  è l'evapotraspirazione di riferimento [ $\text{mm day}^{-1}$ ],
- $R_n$  è la radiazione netta alla superficie della vegetazione [ $\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ],
- $G$  è la densità di flusso di calore concernente il suolo [ $\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ],
- $T_{mean}$  è la temperatura media giornaliera dell'aria misurata a 2 m di altezza [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- $u_2$  è la velocità del vento a 2 m di altezza [ $\text{m s}^{-1}$ ],

- $e_s$  è la tensione di vapore al punto di saturazione [kPa],
- $e_a$  è la tensione di vapore effettiva [kPa],
- $D$  è la pendenza della curva della tensione di vapore [kPa °C<sup>-1</sup>],
- $g$  è la costante psicrometrica [kPa °C<sup>-1</sup>].

I dati di input utilizzati, in accordo alla procedura richiamata, sono: temperatura e umidità dell'aria, velocità del vento, radiazione solare. Per valutare la variabilità spaziale dell'evapotraspirazione nell'area di studio si è fatto riferimento a uno lavoro precedente non pubblicato (Ariespace 2011) che stima l' $ET_0$  anche con la relazione di Hargreaves (Hargreaves and Samani 1985) utilizzando mappe spazializzate di temperatura come dato di input e assimilando, nei punti dove sono presenti tutti i dati meteo necessari, la stima dell' $ET_0$  determinata con il metodo FAO 56. La mappa spazializzata dell'evapotraspirazione mostra che i valori sono abbastanza costanti nell'area di interesse e non molto differenti da quelli rilevati della stazione agro-meteo di Alife, i cui valori, relativi all'anno 2013, sono riportati nei grafici di Figura 3.5 e Figura 3.6 e in Tabella 3.2.

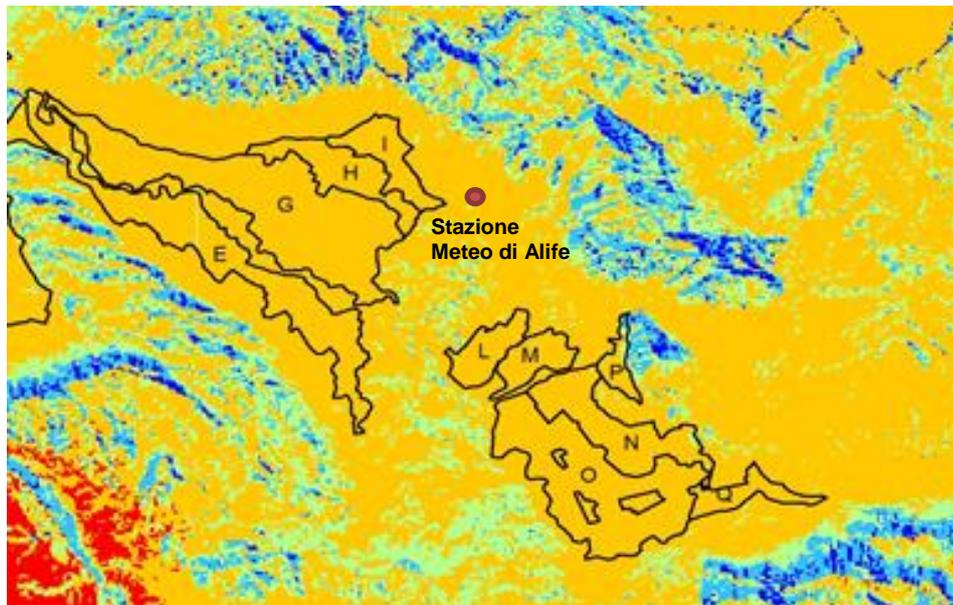


Figura 3.4 - Variabilità dell'evapotraspirazione di riferimento  $ET_0$  cumulata nell'area di interesse. Dati in mm, periodo giugno settembre.

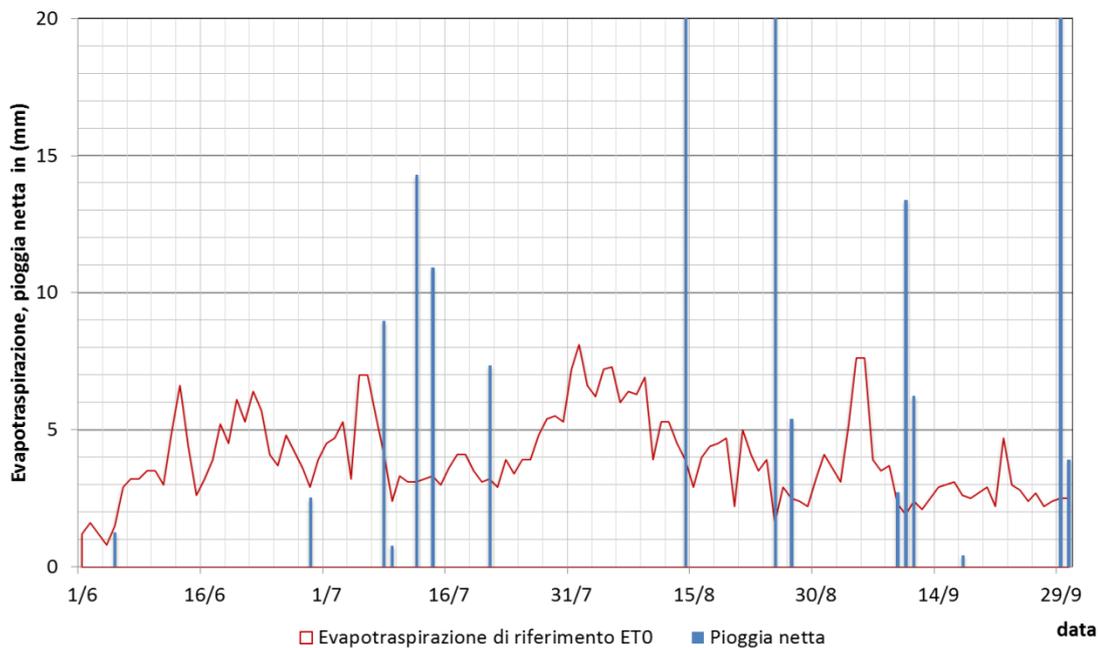


Figura 3.5 – Evapotraspirazione di riferimento  $ET_0$  (metodo FAO) e piogge relative alla stazione di Alife (giugno settembre 2013 – dato giornaliero)

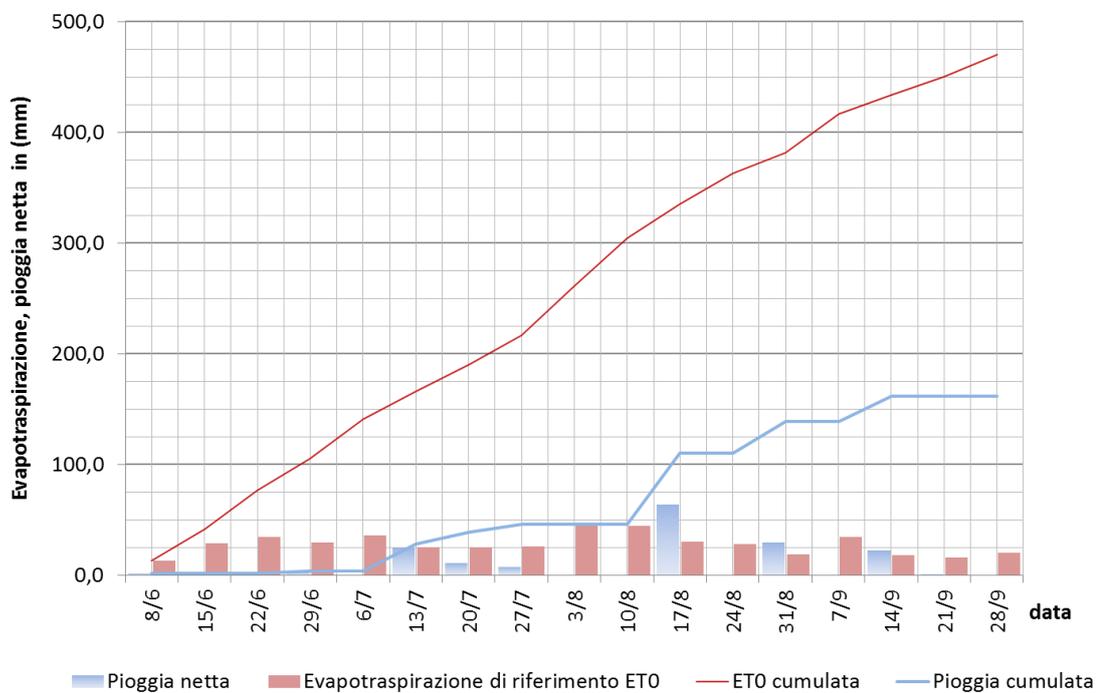


Figura 3.6 – Evapotraspirazione di riferimento  $ET_0$  (metodo FAO) e piogge relative alla stazione di Alife (giugno settembre 2013 – dato settimanale e cumulato)

Tabella 3.2 - Evapotraspirazione di riferimento ET<sub>0</sub>. (metodo FAO) e piogge relative alla stazione di Alife(giugno settembre 2013 – dato settimanale)

data		ET <sub>0</sub> (mm)	Pioggia Netta (mm)
dal	al		
2/6	8/6	13,2	1,3
9/6	15/6	28,5	0,0
16/6	22/6	34,6	0,0
23/6	29/6	29,0	2,5
30/6	6/7	35,6	0,0
7/7	13/7	24,7	24,0
14/7	20/7	24,7	10,9
21/7	27/7	26,0	7,4
28/7	3/8	44,3	0,0
4/8	10/8	44,0	0,0
11/8	17/8	30,3	63,8
18/8	24/8	27,9	0,0
25/8	31/8	18,9	29,1
1/9	7/9	34,5	0,0
8/9	14/9	17,8	22,3
16/9	21/9	16,0	0,4
22/9	28/9	20,2	0,0
<b>totale</b>		<b>470,2</b>	<b>161,7</b>

L'analisi dei dati meteo mostra che, nonostante alcune piogge anche abbastanza intense nei mesi primi 15 giorni di luglio e negli ultimi 15 giorni di agosto, il valore dell'evapotraspirazione di riferimento, nel periodo giugno – settembre, cioè in piena stagione irrigua estiva, è di circa 3 volte maggiore delle piogge nette efficaci. Da cui l'indice di aridità, introdotto nelle pagine precedenti è:

$$AI = \frac{P}{ET_0} = \frac{161,7}{470,2} = 0,34$$

Che corrisponde a un clima semiarido e che conferma una situazione di impossibilità di attuare colture produttive senza il ricorso all'irrigazione essendo  $P < ET_0$ , (condizione di deficit idrologico) (Maliva and Missimer 2012).

### 3.2 Scelta dei dati di osservazione della Terra

La scelta del tipo di dato satellitare da utilizzare per il presente lavoro è stata valutata in base ai requisiti minimi necessari discussi nel capitolo 2 e tenendo conto anche di un

giusto compromesso tra costo di fornitura delle immagini satellitari e numerosità delle immagini. Un primo aspetto da considerare, che incide sia sui costi che sull'operatività, è legato ai tempi che intercorrono tra l'acquisizione e la fornitura dei dati. Tale aspetto è importante sia per validare prontamente in campo i risultati delle elaborazioni fatte al calcolatore (avrebbe poco senso andare a verificare se un campo è irrigato dopo la stagione irrigua), sia se la procedura impiegata per individuare le cosiddette aree irrigate senza permesso. In base a questo requisito vengono escluse molte missioni, che non forniscono le informazioni in tempo reale o a poche ore dall'acquisizione del dato. Gli ulteriori requisiti valutati, in linea con quanto già esposto in precedenza, sono: unità minima identificabile al suolo (risoluzione spaziale), bande necessarie alla stima degli indici di vegetazione (risoluzione spettrale) e numero minimo di immagini necessarie per valutare l'evoluzione delle colture (risoluzione temporale). Si pone l'accento sul fatto che la procedura proposta utilizza due serie temporali di immagini satellitari multispettrali (*Double Series Irrigation Mapping - DSIM*). La prima serie, caratterizzata da una più bassa risoluzione spaziale e una elevata frequenza temporale, consente di seguire l'andamento fenologico della colture nel tempo. La seconda, a più alta risoluzione spaziale, è impiegata nel periodo di picco della vegetazione, per ottenere una migliore segmentazione dei singoli appezzamenti. Quindi, sarà necessario definire le caratteristiche di entrambe le serie.

1. *Serie lunga, sensori candidati* LANDSAT 7, LANDSAT 8, SPOT 5 e 6, DEIMOS

La risoluzione spaziale delle serie lunga, deve essere adeguata a seguire l'andamento fenologico della coltura, per cui occorre che le acquisizioni non siano molto distanti tra loro. Un intervallo temporale di 10-15 gg tra le due acquisizioni successive, si ritiene adeguato. Non è necessaria una risoluzione spaziale molto spinta, pixel di risoluzione a terra di 20 -30m sono sufficienti per il territorio in esame. La risoluzione spettrale ottimale dovrebbe prevedere la presenza di almeno le bande del rosso e del vicino infrarosso NIR e, preferibilmente, anche di una banda nell'infrarosso a onde corte SWIR.

Tabella 3.3 – Sensori candidati per la mappatura delle aree irrigate in Valle Telesina

Satellite/Sensore	LANDSAT 7 ETM+	LANDSAT 8 OLI/TIRS	SPOT 5 HRG	SPOT 6	DEIMOS
Risoluzione pixel a terra	30 metri	30 metri	10 metri	8 metri	22 metri
Bande	Blue (450 - 520 nm) Green (520-600 nm) Red (630 - 690 nm) NIR(770-900nm) SWIR(1550-1750 nm) Thermal(10400-12500 nm) 60 m Mid-Infrared(2080-2350nm) PAN (520 - 900 nm) 15 m	Band1(430-450nm) Band2(450-510nm) Band3(530-590nm) Band4 Red(640-670nm) Band 5 NIR(850-880nm) Band 6 SWIR 1(1570 - 1650 nm) Band7 SWIR2 (2110 - 2290 nm) Band8 PAN(500- 680 nm) 15 m Band9 Cirrus(1360-1380 nm) 30 m	Green: 500 – 590 nm), Red: 610 – 680 nm), NIR 780 – 890 nm), SWIR(1580 – 1750 nm) 20 m PAN (480-710 nm)	Panchromatic (450 – 745 nm) Blue (450 – 525 nm) Green (530 – 590 nm) Red (625 – 695 nm) NIR (760 – 890 nm)	Green (520-600 nm) Red (630-690 nm) NIR (770-900 nm)
Tempo di rivisita	16 giorni	16 giorni	1-4 giorni utilizzando tutti i satelliti della costellazione e angoli off nadir	1-4 giorni utilizzando tutti i satelliti della costellazione e angoli off nadir	1 giorno (off nadir)-5.5 giorni (at nadir)
note	Operativo ma non ancora utilizzabile a causa di noti problemi di acquisizione	Operativo ma non completamente utilizzabile nella stagione 2013	tempi di rivisita dichiarati validi solo se si accettano angoli di vista molto ampi e se si fa riferimento all'intera costellazione. Costi elevati.	tempi di rivisita dichiarati validi solo se si accettano angoli di vista molto ampi e se si fa riferimento all'intera costellazione. Costi elevati.	Ottima programmabilità. Tempi di rivisita certi. Costi bassi.

Tra i vari sensori e missioni disponibili quelli che meglio rispettano i requisiti definiti sono quelli riportati in Tabella 3.3. Landsat 7 e 8 hanno una risoluzione a terra di 30 metri che si ritiene adeguata per gli scopi del presente lavoro (in ogni parcella di circa 2 ettari ricadono mediamente 20 25 pixel). Inoltre i dati Landsat sono gratuiti, prevedono il fast delivery di default (circa 24 ore dopo l'acquisizione), sono scaricabili facilmente da internet previo registrazione. Di contro, le immagini del Landsat 7 non sono utilizzabili, poiché l'area di studio ricade nella parte dell'immagine interessata dal noto problema al correttore della linea di scansione (come descritto al link: [http://landsat.usgs.gov/products\\_slcoffbackground.php](http://landsat.usgs.gov/products_slcoffbackground.php)). Il Landsat 8, invece, è stato lanciato nel febbraio 2013 ed è operativo dal maggio 2013, ma, durante la stagione estiva 2013, la distribuzione delle immagini era ancora in fase preliminare, tanto è vero che lo scorso ottobre 2013 l'USGS (United States Geological Survey) che gestisce il

satellite, ha provveduto alla ri-calibrazione di tutti i dati precedentemente distribuiti. Inoltre la risoluzione temporale è solo teoricamente soddisfacente (16 gg) in quanto in caso di copertura nuvolosa si rischia di avere un intervallo tra due acquisizioni utilizzabili di oltre un mese. Sicuramente il Landsat 8 può essere un ottimo candidato per future applicazioni, soprattutto per la presenza di ben due bande nell'infrarosso a onde corte (SWIR). Necessita, però, di essere “integrato” con acquisizioni di altri satelliti per garantire un adeguato tempo di rivisita.

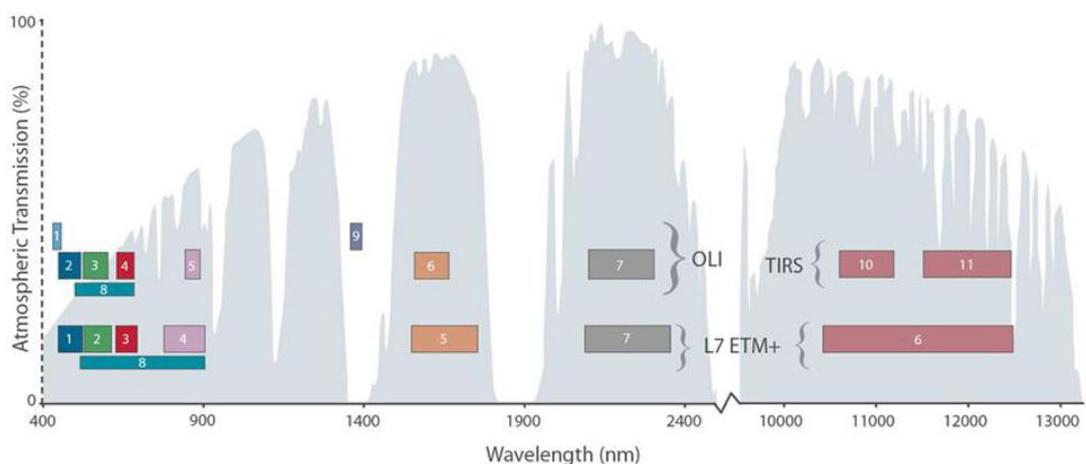


Figura 3.7 – Bande e lunghezze d’onda del Landsat 8 OLI e TIRS comparati con il sensore ETM+ di Landsat 7. In grigio è riportata la trasmittività dell’atmosfera (USGS 2013)

I satelliti della costellazione SPOT (*Système Probatoire d’Observation de la Terre*) attualmente operativi sono lo SPOT 5 e lo SPOT 6. SPOT 5 è stato lanciato nel 2002 ed ancora operativo. Presenta delle ottime caratteristiche in termini di risoluzione spettrale, poichè oltre alle bande del visibile e del NIR, ha una banda nello SWIR sia pure ad una risoluzione di 20 metri. I satelliti Spot sono caratterizzati dall’aver un sensore che permette di acquisire anche fuori dal *nadir*. Infatti, mediante comandi inviati dal controllo a terra a uno specchio guidato, è possibile cambiare la direzione di osservazione dei sensori. In linea di principio, questa caratteristica del sensore permetterebbe di osservare una stessa zona con intervalli di rivisitazione anche quotidiani, in presenza di ottimali condizioni di funzionamento dell’intera costellazione SPOT. Nel periodo di osservazione del presente studio, tuttavia, un intervallo di rivisitazione di 10 gg sarebbe stato

necessario considerare angoli di acquisizione eccessivi (circa +/- 20 ° off-nadir) o, in alternativa, integrare le acquisizioni con quelle dello SPOT 6, dotato di risoluzione spaziale maggiore (8 metri in multispettrale) ma mancante della banda nello SWIR. Inoltre, sia Spot 5 che Spot 6 hanno costi di acquisizione per il “rush delivery” (in quasi-tempo reale) elevati, e stimati al momento dello studio pari a circa 4000 euro per ogni acquisizione. Anche la programmazione delle acquisizioni è difficilmente concordabile con il provider dei dati, presentando spesso dei lunghi buchi temporali. Escludendo i sistemi di osservazione fin qui richiamati, la scelta è caduta sul satellite DEIMOS.

La principale caratteristica dei satelliti DEIMOS e del gemello DMC, è di permettere una programmazione molto precisa (è possibile chiedere acquisizioni in un intervallo di 8-12 giorni con un servizio di consegna molto efficiente). L’elevato *swath* e i tempi di rivisitazione effettivi di 2-3 giorni permettono di acquisire immagini sempre nella condizione migliore di copertura nuvolosa e illuminazione. Le immagini sono fornite già geo-riferite, le bande hanno una totale sovrapposizione con le omologhe del più noto Landsat ETM+. La risoluzione spaziale a terra di 22 m è adeguata per gli scopi del presente lavoro. Un ulteriore vantaggio è il basso costo di acquisizione (circa 0,1 euro a Km<sup>2</sup>). Di contro, la mancanza di una banda nell’infrarosso a onde corte (SWIR) limita nell’utilizzo degli indici di vegetazione. Utilizzando DEIMOS l’analisi dell’andamento della vegetazione può essere ottenuta, in pratica, solo con l’indice NDVI.

Tabella 3.4 – DEIMOS 1: caratteristiche di acquisizione (dati dichiarati della missione).

DEIMOS 1 (costellazione DMC) System Mission Characteristics		
Orbit Altitude	663 km	
Nodal Crossing Time	10:30 am	
Spectral Bands :	Capable of capturing any of the following spectral bands	
	Name	Spectral Bands (nm)
	Green	520 – 600
	Red	630 - 690
	NIR	770 - 900
Multispectral Resolution at nadir	22 m	
Swath Width	625 km	
Constellation revisit time	Daily coverage at a resolution that enables effective monitoring of the rapidly changing environment	

2. *Serie corta candidati:* WorldView2 o IKONOS o QUICKBIRD, Rapid-Eye, SPOT 6.

La risoluzione spaziale della cosiddetta serie corta, come detto in precedenza, deve essere adeguata a distinguere chiaramente la minima area cartografabile. Nell'area oggetto di studio, gli appezzamenti hanno un'estensione media di circa 2 ettari. Quindi, sulla base della Tabella 2.1, si ritiene che una risoluzione a terra del pixel inferiore ai 10 metri sia adeguata, anche se, sarebbe preferibile avere risoluzioni uguali o superiori ai 5 metri. Sulle caratteristiche spettrali, dato l'utilizzo di queste immagini solo per il miglioramento della risoluzione geometrica, si può ritenere che la presenza delle sole bande del visibile e dell'infrarosso vicino siano sufficienti. Per i requisiti di tempo di rivisitazione occorrerebbe avere acquisizioni abbastanza ravvicinate nei periodi in cui ci si prevede la presenza dei picchi di vegetazione.

Le immagini scelte sono le Rapid Eye. Infatti gli altri candidati non garantiscono una adeguata programmazione nel periodo luglio agosto 2013 per un eccessivo carico di richieste e hanno costi molto più elevati (1 euro a km<sup>2</sup> per Rapid Eye contro i 20-25 degli altri sensori). Fatta questa premessa, sono stati immediatamente esclusi i sensori ad altissima risoluzione quali worldview2, Ikonos e Quickbird. La scelta è ricaduta su Rapid Eye che, con costi equivalenti a quelli di Spot 6, garantisce tempi nominali di rivisita minori (cioè è utile nel caso di coperture nuvolose nei giorni prescelti per l'acquisizione), migliore risoluzione spaziale (5 metri contro 8 metri).

Tabella 3.5 – RapidEye: caratteristiche di acquisizione (dati dichiarati della missione).

RapidEye System Mission Characteristics		
Orbit Altitude	630 km in Sun-synchronous orbit	
Equator Crossing Time	11:00 am (approximately)	
Sensor Type	Multi-spectral push broom imager	
Spectral Bands :	Capable of capturing any of the following spectral bands	
	Name	Spectral Bands (nm)
	Blue	440 – 510
	Green	520 – 590
	Red	630 – 685
	Red Edge	690 – 730
	NIR	760 – 850
Ground sampling distance (nadir)	6.5 m	
Pixel size (orthorectified)	5 m	
Swath Width	77 km	
Revisit time	Daily (off-nadir) / 5.5 days (at nadir)	

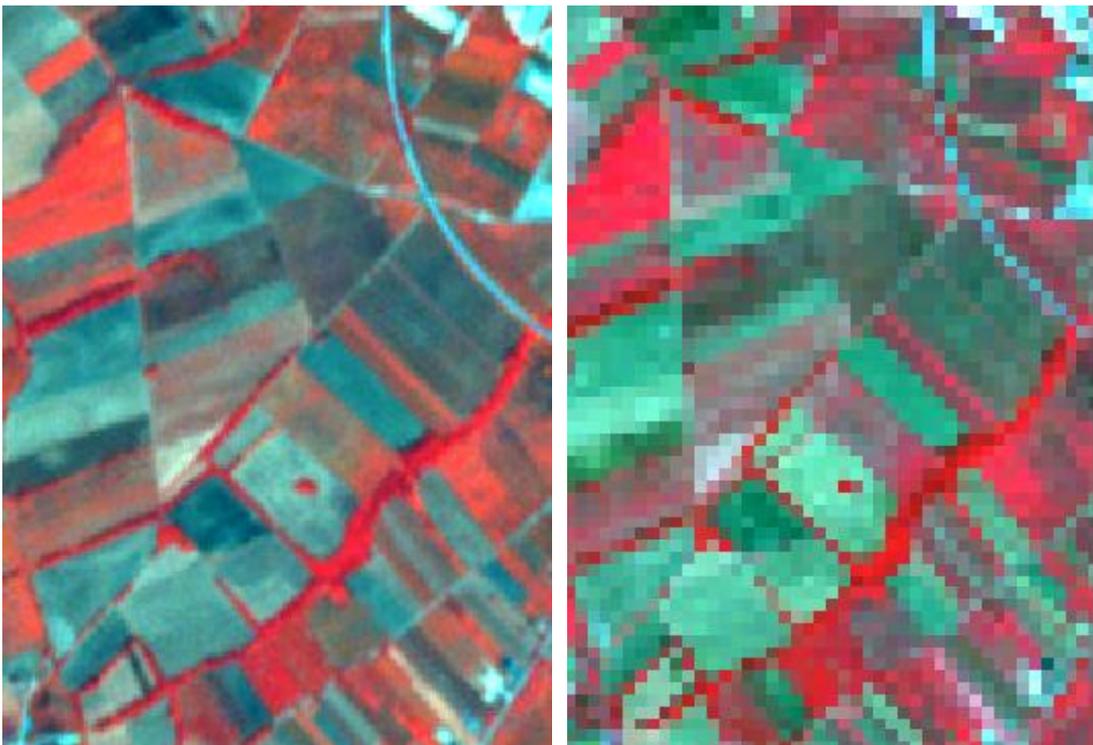


Figura 3.8 Immagini a confronto: Differenza di risoluzione spaziale tra l'immagine RapidEye (sulla sinistra) e Deimos (sulla destra) . Immagini in falsi colori (NIR, Red, Green).

Riassumendo sono state acquisite 8 immagini DEIMOS (serie multi-temporale lunga a più bassa risoluzione spaziale) e 4 acquisizioni Rapid Eye (serie multi-temporale corta a più alta risoluzione spaziale). Le date delle acquisizioni sono riportate in Tabella 3.6

Tabella 3.6 – Programmazione Acquisizioni immagini

acquisizioni	data	satellite/sensore
1	13/06/2013	DEIMOS
2	20/06/2013	DEIMOS
3	02/07/2013	Rapid Eye
4	03/07/2013	DEIMOS
5	16/07/2013	DEIMOS
6	18/07/2013	Rapid Eye
7	29/07/2013	DEIMOS
8	30/07/2013	Rapid Eye
9	13/08/2013	Rapid Eye
10	17/08/2013	DEIMOS
11	27/08/2013	DEIMOS
12	22/09/2013	DEIMOS

### 3.3 Serie multi-temporali di indici di vegetazione NDVI

#### 3.3.1 Pre-processamento delle immagini satellitari

Il pre-processamento delle immagini ha riguardato:

1. Miglioramento del georiferimento nel sistema WGS84 UTM 33; I coefficienti di trasformazione sono stati determinati con un modello geometrico polinomiale, prendendo un set di riferimento di punti di controllo sufficiente ad ottenere un errore quadratico medio inferiore ad 1 pixel (22 m per DEIMOS-1; 5 m per RapidEye)
2. correzione atmosferica utilizzando il tool ATCOR2 (Atmospheric Topographic Correction) integrato nel software Erdas Imagine. Questo tool si basa sul codice MODTRAN4 - MODerate resolution Atmospheric TRANsmission, sviluppato da ricercatori dell'agenzia spaziale tedesca DLR (Berk 1999) ;

### 3.3.2 Calcolo dell'indice NDVI

Per ciascuna immagine DEIMOS corretta atmosfericamente è stata creata una mappa di indice NDVI secondo la nota formula e, successivamente, le mappe sono state ordinate in un *layer stack*. Si ottiene un'unica immagine multi layer, in cui ogni strato corrisponde all'indice NDVI di una data acquisizione.

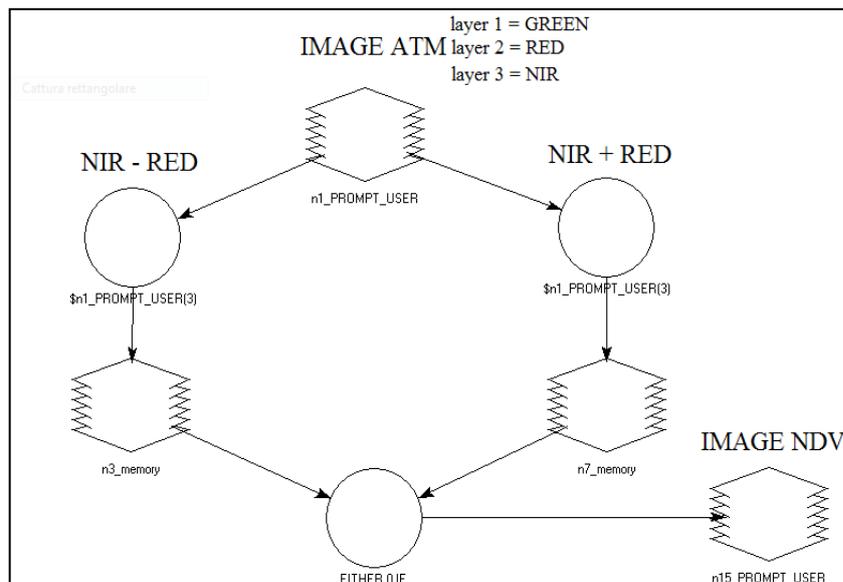


Figura 3.9. Modello calcolo NDVI per il sensore Deimos

### 3.3.3 Pre - Classificazione multi-temporale e estrazione dei pattern multi-temporali

La classificazione, eseguita sulla serie temporale di mappe NDVI derivate dalle immagini DEIMOS è stata eseguita mediante un tool di classificazione senza supervisione (*unsupervised*). Occorre precisare che, il layer stack utilizzato per la successiva fase di classificazione è composto da 5 differenti mappe relative alle seguenti date: 13/06/2013; 20/06/2013; 03/07/2013; 16/07/2013 e 29/07/2013. Le successive acquisizioni non sono state utilizzate per la classificazione. Ciò per permettere la produzione di una mappa delle aree irrigate in tempo utile per eseguire i controlli in campo nei primi giorni del mese di agosto 2013.

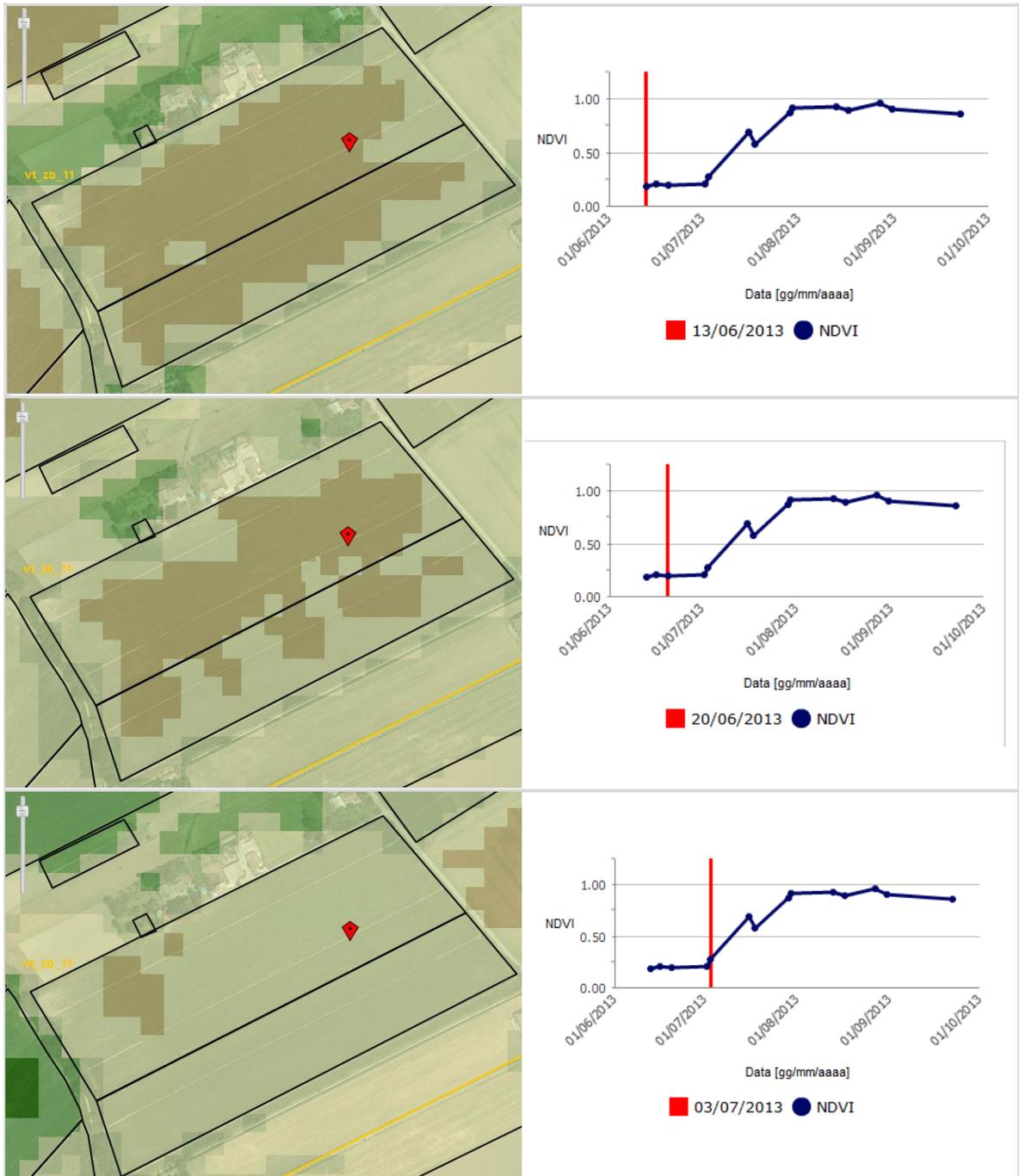
Il metodo di clustering prescelto è di tipo ISODATA, che permette di estrarre e suddividere tutti gli andamenti medi rappresentativi delle diverse classi irrigue e non irrigue in maniera automatica. Il numero di classi è stato scelto in modo da essere sufficiente numeroso da poter distinguere tutti i diversi andamenti di crescita della vegetazione. Per tale scopo, il loro numero è stato fatto variare, in prima approssimazione, da 10 a 30. Il numero per cui si è ottenuta la migliore separazione, è pari a 20.

Tabella 3.7 Parametri utilizzati per la classificazione.

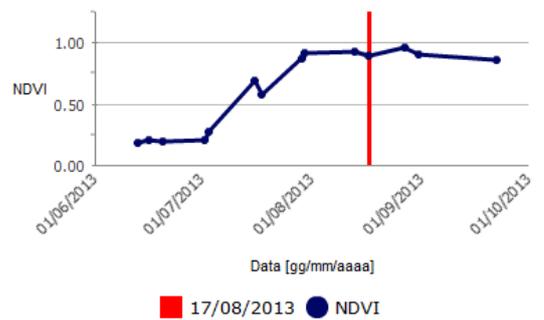
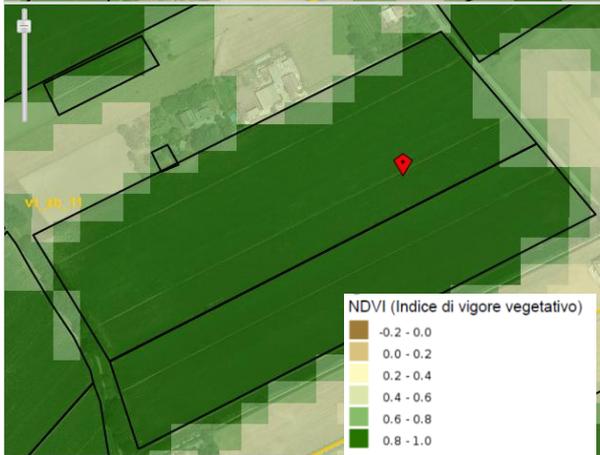
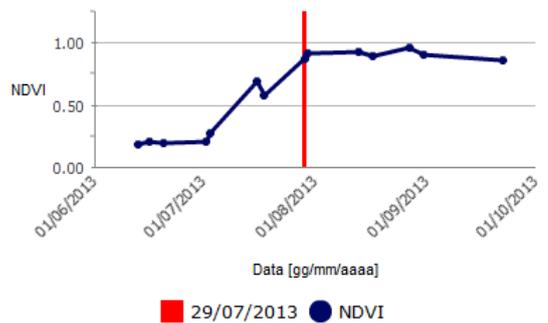
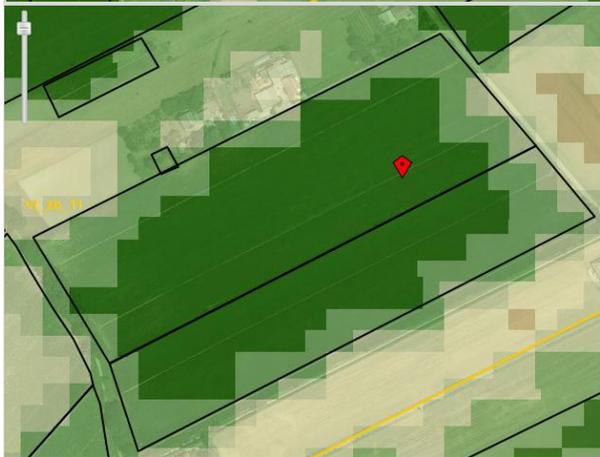
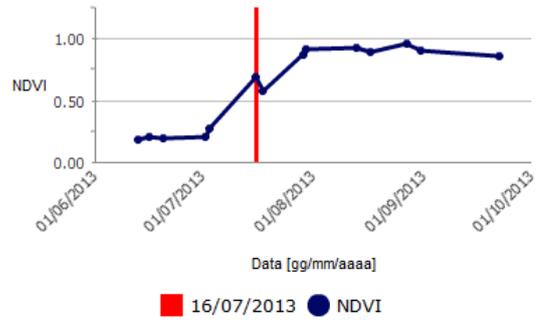
<i>Numero minimo di classi</i>	<i>10</i>
<i>Numero massimo di classi</i>	<i>30</i>
<i>Soglia</i>	<i>0,975</i>
<i>Numero massimo di iterazioni</i>	<i>50</i>
<i>Numero finale di classi</i>	<i>20</i>

Passo successivo è stato quello di associare ai diversi cluster le corrispondenti categorie di classi irrigate e non irrigate. Tale associazione è stata eseguita in base a conoscenze a priori su gli andamenti tipici medi delle classi irrigue e non irrigue formalizzati mediante le procedure e le metriche discusse nel paragrafo 2.5.3. Un esempio dell'andamento di indice NDVI per una parcella irrigua è riportato in Figura 3.10.

Figura 3.10 – Andamento Temporale di indice NDVI di una parcella irrigua- Si nota il trend di crescita dell'indice NDVI. Periodo giugno- settembre 2013 (date: 13/6; 20/6; 3/7)



Andamento Temporale di indice NDVI di una parcella irrigua- Si nota il trend di crescita dell'indice NDVI. Periodo giugno- settembre 2013 (date: 16/7; 29/7; 17/8) (continua zione)



### 3.3.4 Riconoscimento delle classi di colture irrigue

I valori medi per ciascuna delle classi estratte e per ciascuna acquisizione sono riportati in Tabella 3.8. Nella stessa sono riportati i controlli effettuati sui valori di soglia (minimi e massimi) e sulle differenze prime tra due acquisizioni successive. Gli stessi valori sono plottati in Figura 3.12 per permetterne il confronto con gli andamenti tipici riportati nel capitolo 2.

Tabella 3.8 –Valori medi di indici NDVI delle venti classi estratte con il classificatore Isodata

classe	date acquisizioni					metriche NDVI		
	13/06/2013	20/06/2013	03/07/2013	16/07/2013	29/07/2013	NDVI < 0,4	NDVI > 0,8	differenze prime
1	0,20	0,22	0,20	0,19	0,18	non irriguo		
2	0,37	0,36	0,34	0,35	0,32	non irriguo		
3	0,19	0,21	0,26	0,65	0,78			sempre positive
4	0,22	0,30	0,52	0,86	0,81			positive a tratti
5	0,34	0,34	0,36	0,52	0,57			sempre positive
6	0,47	0,47	0,47	0,52	0,45			
7	0,62	0,51	0,41	0,42	0,38			
8	0,49	0,45	0,50	0,69	0,68			positive a tratti
9	0,50	0,55	0,57	0,65	0,53			
10	0,65	0,59	0,54	0,59	0,52			
11	0,41	0,54	0,71	0,86	0,76			positive a tratti
12	0,60	0,61	0,64	0,72	0,63			
13	0,73	0,68	0,62	0,69	0,56			
14	0,81	0,46	0,69	0,82	0,55			positive a tratti
15	0,71	0,68	0,69	0,77	0,69			
16	0,80	0,75	0,72	0,78	0,63			
17	0,64	0,70	0,78	0,87	0,77			positive a tratti
18	0,81	0,77	0,78	0,84	0,74			
19	0,86	0,83	0,85	0,91	0,79			
20	0,91	0,88	0,90	0,96	0,84		irriguo C	

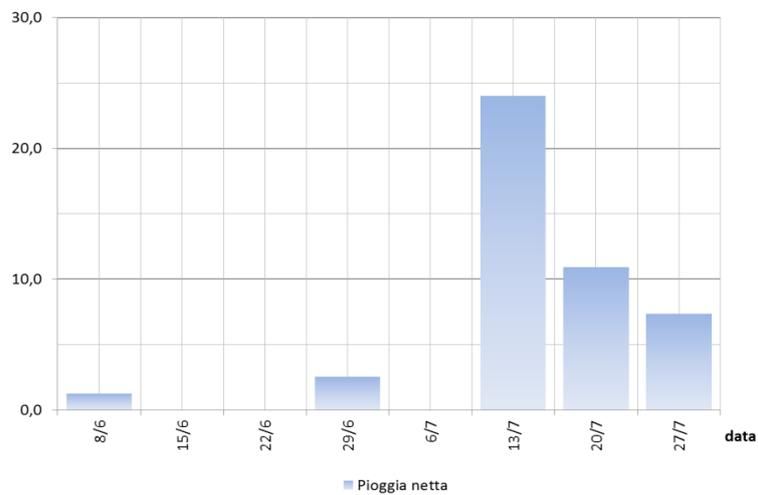


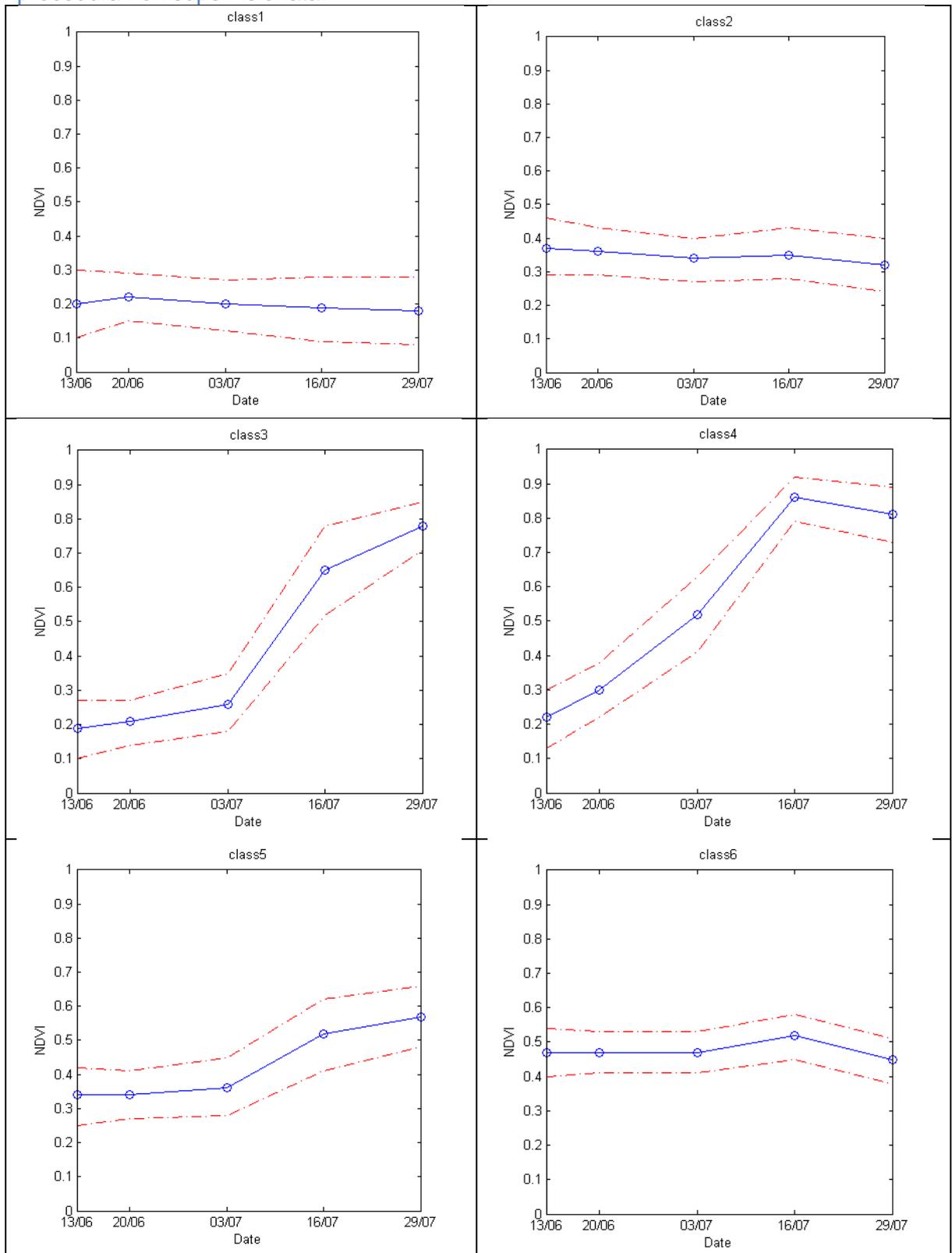
Figura 3.11 – Piogge nette settimanali, in mm, per il periodo di analisi degli andamenti temporali di NDVI

Nell'analisi degli andamenti temporali, un altro aspetto da tenere in conto è il volume di pioggia nel periodo di esame. Infatti, alcune piogge nella seconda metà di luglio possono portare ad aumenti dell'indice NDVI, senza ricorso all'irrigazione di cui si deve tenere conto nella fase di assegnazione delle classi. Le classi sono state così ricodificate come in Tabella 3.9.

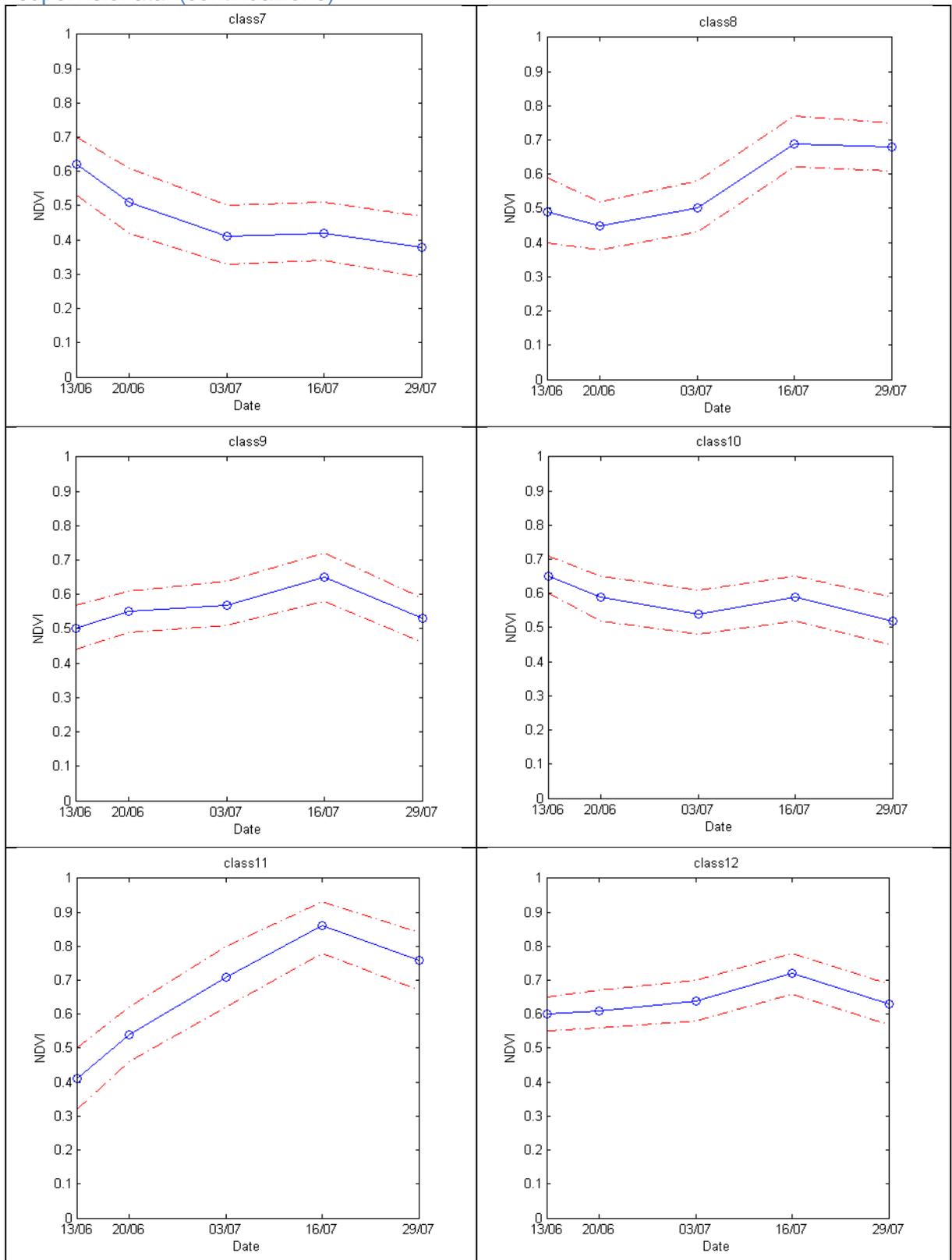
Tabella 3.9 – Ricodifica delle classi

CLASSE RICODIFICATA	CLASSI ORIGINARIE
NON IRRIGUO	classi 1, 2, 6
CLASSE A, <i>superfici irrigate caratterizzate da un forte trend di crescita della coltura,</i>	classi 3, 4, 5, 8, 11 e 17
CLASSE B, <i>superfici irrigate caratterizzate da un andamento temporale dell'indice NDVI a "dente di sega",</i>	classe 14
CLASSE C1, <i>superfici con elevati valori di NDVI ma con trend costanti (probabili irrigazione)</i>	classi 18, 19, 20
CLASSE C2 <i>superfici con valori abbastanza elevati di NDVI e trend quasi costanti,</i>	classi 15, 16
Altre classi,, <i>andamenti che non sono facilmente distinguibili</i>	classi 6,9,10,12,13,

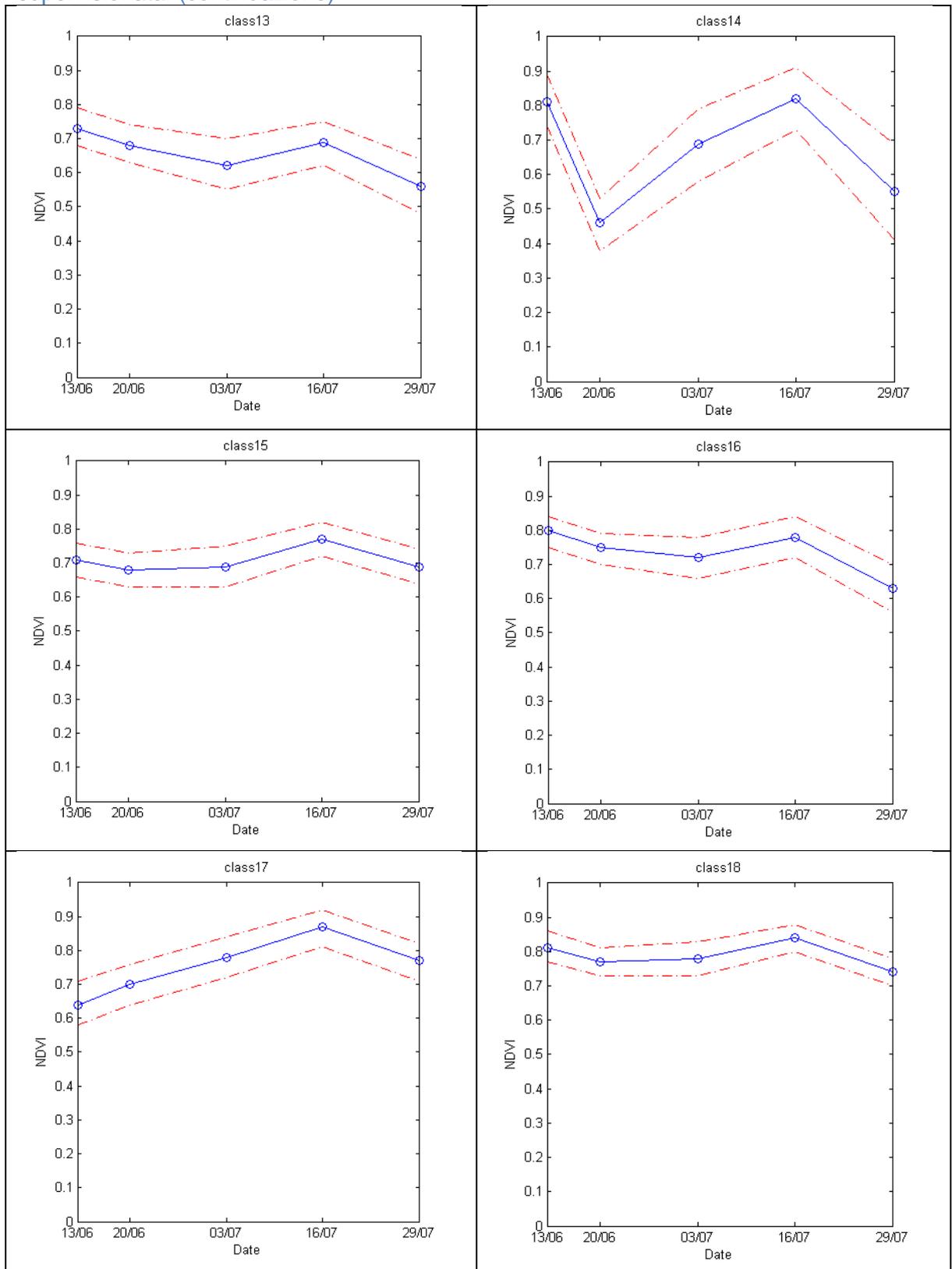
Figura 3.12 – Classi di andamenti temporali medi di NDVI estratte mediante la procedura non supervisionata.



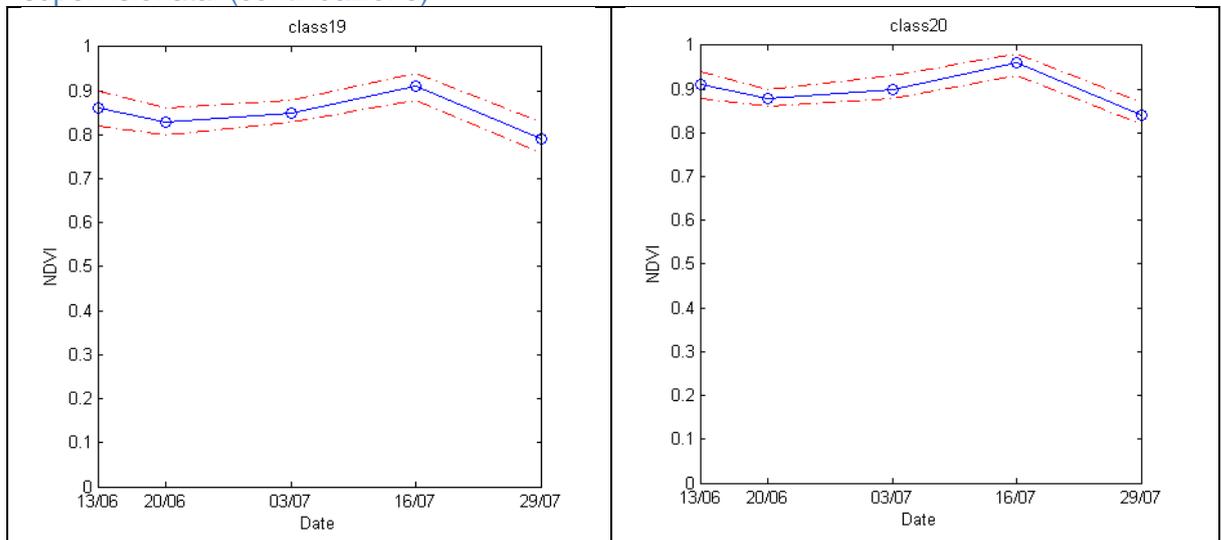
Classi di andamenti temporali medi di NDVI estratte mediante la procedura non supervisionata. (continuazione)



Classi di andamenti temporali medi di NDVI estratte mediante la procedura non supervisionata. (continuazione)



Classi di andamenti temporali medi di NDVI estratte mediante la procedura non supervisionata. (continuazione)



### 3.4 Classificazione assistita

Per ottenere una mappa con una migliore risoluzione spaziale si è proceduto alla classificazione supervisionata delle immagini Rapid Eye utilizzando, come pixel di training per ciascuna classe, le aree individuate mediante la classificazione multi-temporale delle immagini DEIMOS. Sono state classificate due immagini. L'immagine Rapid Eye del 30 luglio prossima alla data dove si registravano i picchi della classe A sull'immagine DEIMOS (29 luglio 2013) e l'immagine del 18 luglio 2013 dove si registrava un picco per la classe B (in corrispondenza dell'immagine DEIMOS del 16 luglio). La classificazione è stata condotta con un classificatore non parametrico.

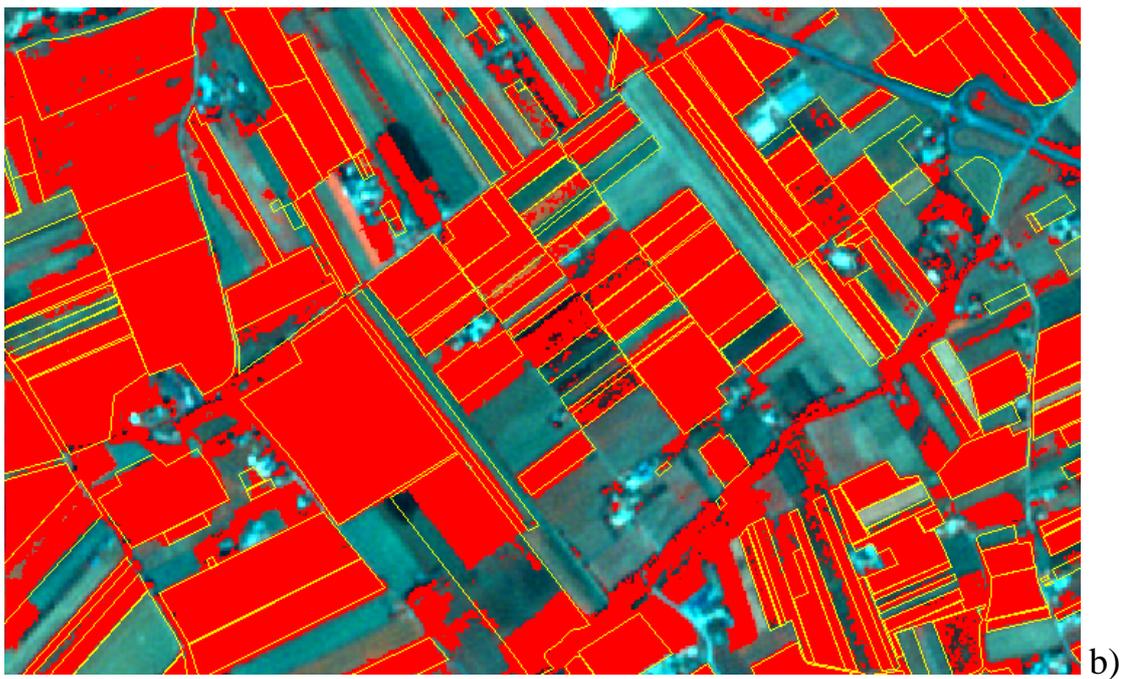
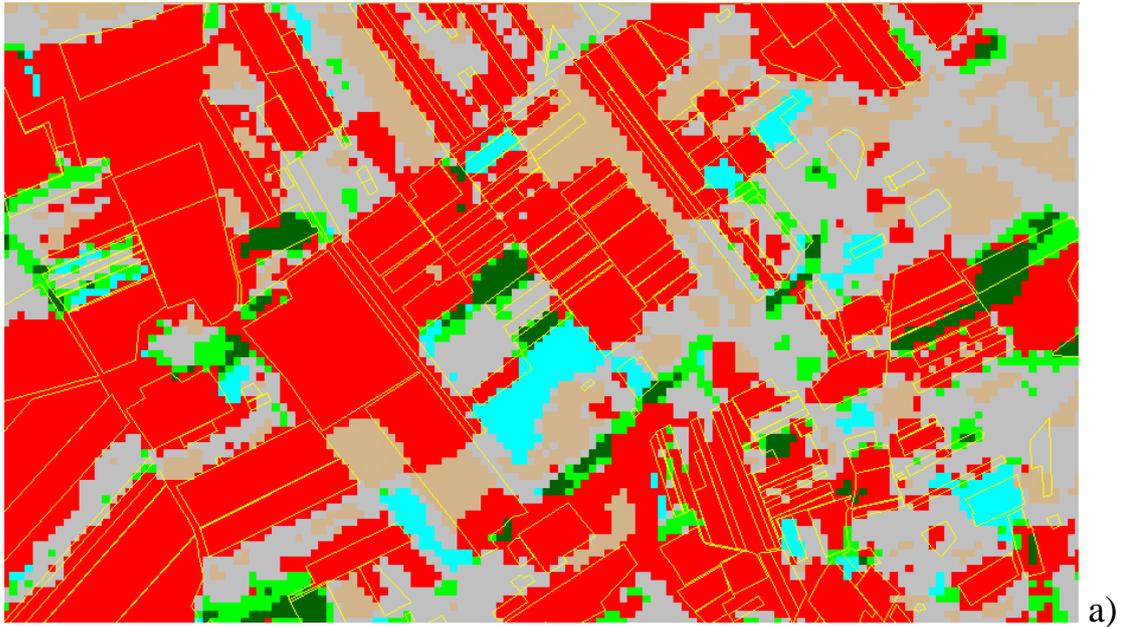


Figura 3.13 – a) In alto, stralcio di mappa della classificazione multi-temporale di NDVI di immagini DEIMOS. In rosso le aree irrigate di classe A, in ciano quelle di classe B, in verde le classi C. b) In basso, la sola classe A dopo la classificazione supervisionata dell'immagine Rapid Eye ad alta risoluzione. Sono rappresentate anche le parcelle del sistema informativo consortile che permettono di valutare un sostanziale accordo con la mappa prodotta, soprattutto con aree irrigate di classe A

### 3.5 Accuratezza.

L'affidabilità della classificazione è stata valutata mediante confronto con verità a terra ottenute dal database irriguo e in taluni casi mediante sopralluoghi in campo. Le parcelle sono state scelte in modo che fossero distribuite in maniera uniforme sull'area di studio. L'accuratezza della metodologia è stata valutata per mezzo della matrice di errore. Sono stati calcolati gli indici di qualità GA (Global Accuracy), UA (User Accuracy) e PA (Producer Accuracy) riportati in Tabella 3.10.

Tabella 3.10 - Matrice di errore e valori delle misure di accuratezza della procedura

		dati di riferimento/ verità a terra				Totale per classe nella mappa	UA
		classe A	classe B	classe C	non irriguo		
dati di classificazione	classe A	<b>25</b>	1	1	0	27	<b>93%</b>
	classe B	1	<b>5</b>	2	0	8	<b>63%</b>
	classe C	0	2	<b>3</b>	1	6	<b>50%</b>
	non irriguo	0	1	0	<b>8</b>	9	<b>89%</b>
Totale per classe delle verità		26	9	6	9	50	
PA		<b>96%</b>	<b>56%</b>	<b>50%</b>	<b>89%</b>		<b>82%</b> <b>GA</b>

L'accuratezza globale GA è definita dal rapporto tra il totale degli accordi e il totale n dei campioni test. Essa rappresenta la probabilità che un punto estratto a caso sia classificato correttamente nella mappa tematica. Si calcola come il rapporto tra la somma degli elementi della diagonale della matrice di errore e il numero totale dei campioni. L'accuratezza globale stimata è pari all'82%. Nella Tabella 3.10 sono riportate anche le accuratezze produttore e utente. Si noti come la classe irrigato A che

corrisponde alle colture con forte trend di crescita, abbia elevati valori sia in termini di accuratezza produttore che di accuratezza utente. Analogamente per la classe non irriguo. Per le due classi intermedie (irrigato classe B e classe C) , invece, si ottengono valori più bassi. Infine per completezza riportiamo il coefficiente di accordo *kappa hat* (Cohen 1960) calcolato secondo l'espressione:.

$$kappa\ hat = \frac{n \sum_{k=1}^q - \sum_{k=1}^q (p_{k+} \cdot p_{+k})}{n^2 - \sum_{k=1}^q (p_{k+} \cdot p_{+k})}$$

Essendo  $n$  il numero dei test effettuati,  $q$  il numero di classi,  $p_{kk}$  il numero di accordi,  $p_{k+}$  il numero di totali per riga e  $p_{+k}$  il numero dei totali per colonna. Per la classificazione realizzata si ha  $kappa\ hat = 0.72$  che rappresenta un valore abbastanza elevato e indice di una buona performance della classificazione attuata.



Figura 3.14 – Sopralluogo su un campo di mais per la definizione delle verità a terra.

### 3.6 Valutazione dei costi delle acquisizioni satellitari

Prescindendo da una valutazione rigorosa dei costi necessari per la mappatura delle aree irrigate, si vuole solo porre l'accento sul fatto che la procedura proposta permette di ridurre i costi di acquisizione. Infatti, con riferimento all'area di studio, si può ipotizzare che al minimo n. 5-6 acquisizioni differenti siano necessarie per monitorare l'andamento della vegetazione nel periodo centrale della stagione irrigua (giugno – agosto). Coprendo queste 6 acquisizioni con immagini DEIMOS (serie lunga) e aggiungendo almeno 2 acquisizioni Rapid Eye (serie corta) per il miglioramento della segmentazione spaziale, il costo totale dei dati è pari a circa 14.200,00 euro (costi unitari in Tabella 3.11). Se volessero utilizzare solo immagini Rapid Eye il costo delle n.6 acquisizioni sarebbe pari a 21.000,00 euro, con un incremento di oltre il 30%. A ciò

va aggiunto un incremento dei costi computazionali dovuti alla maggiore risoluzione del dato Rapid Eye.

Tabella 3.11 Caratteristiche e costi di acquisizione dei due sensori Deimos e RapidEye.

satellite	risoluzione spaziale	bande	tempo di rivisitazione	Minima superficie ordinabile	Costo minimo per scena (circa)
Deimos	22 m	Green, red, NIR	3-5 giorni al nadir	10.000 km	1200 euro
Rapideye	5 m	Blue, green, Red, Red Edge, NIR	5.5 giorni al nadir	3.500 km	3500 euro

## 4 SINTESI DEI RISULTATI

### 4.1 Metodologia proposta

L'ipotesi di base della metodologia proposta è che, in condizioni di deficit idrologico tipiche degli ambienti semi-aridi, elevati trend di crescita colturale siano compatibili solo con apporti irrigui esterni. In questo caso, l'individuazione delle aree irrigate ha il vantaggio di essere condotta indipendentemente dal tipo di coltura effettivamente praticata. Dal punto di vista pratico ciò significa che è possibile prescindere da una conoscenza dettagliata della distribuzione spaziale delle diverse tipologie colturali, tenendo conto dell'andamento temporale di alcuni indici capaci di rappresentare il vigore vegetativo, come ad esempio l'indice NDVI. Per seguire tali andamenti è stata utilizzata una serie di dati di Osservazione della Terra con elevata frequenza di acquisizione (10-15 gg) e moderata risoluzione spaziale a terra (DEIMOS, 22 metri). Le serie temporali di mappe di indice NDVI, raccolgono tutte le informazioni necessarie a stabilire, pixel per pixel, parcella per parcella, se una data area è irrigata o meno. La soluzione del problema prevede, però, un'unica mappa per l'intera stagione irrigua, con un contenuto informativo di tipo binario (irrigato/ non irrigato) o suddiviso per classi (irrigato con alta, media o bassa probabilità). Per fare ciò, stante la complessità del problema che si sviluppa in tre dimensioni, due nel piano della superficie investigata, la terza nel tempo (andamenti di crescita), è stata applicata una classificazione automatica delle mappe di NDVI. Ciò equivale, in altre parole, a eliminare la dimensione tempo dalla soluzione fornita: si analizza, pixel per pixel, l'andamento dell'indice NDVI e il risultato di tale analisi assegna il pixel ad una classe categorica (irrigato/non irrigato). Tale operazione è compiuta prima in maniera automatica con un algoritmo statistico che suddivide i pixel in cluster aventi caratteristiche simili, ovvero andamenti temporali dell'indice NDVI raggruppabili. Successivamente, con l'aiuto di metriche e diagrammi tipo si cerca di riconoscere le diverse classi irrigato e non irrigato. La scelta di eseguire la classificazione in modalità *unsupervised* (non assistita), trova giustificazione nel fatto che, sebbene siano noti a priori gli andamenti temporali tipici da ricercare, tali

informazioni non sono sufficienti per risolvere l'elevato numero di situazioni differenti che si potrebbero presentare. È stato già accennato nel capitolo 2, al problema di una stessa coltura irrigua, che venga seminata in epoche differenti. Altri problemi possono essere legati ai pixel misti o di frontiera, il cui comportamento a priori (e in realtà anche a classificazione avvenuta) è difficile da risolvere. La classificazione automatica ha restituito 20 classi differenti che sono state ricodificate, sulla base delle regole fissate a priori, nelle seguenti classi:

1. *Aree irrigate classe A*: caratterizzate da un forte trend di crescita della coltura; (prevalentemente mais)
2. *Aree irrigate classe B* prevalentemente coltivazioni di erba medica (alfalfa) caratterizzate da un andamento temporale di NDVI “a dente di sega”; in caso di acquisizioni satellitari molto distanziate temporalmente il suo riconoscimento è molto difficile;
3. *Aree irrigate classe C* caratterizzate da un NDVI abbastanza costante e di valore elevato; sono prevalentemente colture arboree (tra cui vigneti) per le quali è difficile riconoscere il ricorso all'irrigazione stante la condizione di stress a cui sono normalmente sottoposte nella pratica produttiva.
4. *Aree NON irrigate*.

I risultati della classificazione sono stati esaminati mediante una matrice di errore utilizzando un set di verità a terra e sono stati calcolati alcuni indici caratteristici. Pur ottenendo valori di accuratezza globale  $GA= 82\%$  e di  $kappa\ hat = 0,72$ , più che soddisfacenti, vale la pena analizzare le accuratezze per le singole classi investigate. In estrema sintesi, il metodo proposto ottiene ottime performances statistiche nel riconoscere colture che hanno effettivamente un elevato trend di crescita (aree irrigate Classe A,  $PA=96\%$ ,  $UA=93\%$ ). In tale classe ricadono, per andare nello specifico, gli appezzamenti coltivati a mais che sono largamente diffusi in zona. Sono riconosciute in maniera altrettanto accurata le aree non irrigate ( $PA=89\%$ ,  $UA=89\%$ ) rappresentate per lo più da suoli nudi o con vegetazione spontanea sparsa. Sono invece peggio riconosciute le due classi intermedie, che corrispondono nella maggior parte dei casi a

erba medica (Classe B, PA=56%, UA=63%) e alberi da frutta (Classe C, PA=50%, UA=50%). Il riconoscimento delle colture della classe B caratterizzate da più tagli durante la stagione è abbastanza complicato, in quanto i tagli sono effettuati in momenti differenti da ciascun agricoltore. Inoltre nell'area oggetto di studio, gli agricoltori tendono a gestire l'erba medica in condizioni di leggero stress, il che conduce a andamenti temporali più difficili da apprezzare e quindi da separare dai restanti. Per la classe C, in prevalenza colture arboree, il discorso è analogo. In questo caso i valori di NDVI sono molto influenzati dal tipo di impianto e dall'inerbimento. Per tale classe la risoluzione spaziale di DEIMOS risulta troppo bassa per un agevole riconoscimento. In tale classe sono incluse anche molte situazioni intermedie ed effetti di bordo che peggiorano ancora il risultato.

Con riferimento al miglioramento della risoluzione spaziale, la metodologia proposta ha permesso di limitare il numero di immagini ad alta risoluzione da elaborare a solo due. Infatti, la conoscenza dei periodi di picco delle singole classi ha consentito di utilizzare solo 2 immagini ad alta risoluzione. In termini di costi, la procedura proposta permette evidentemente un risparmio economico rispetto all'acquisto di sole immagini ad alta risoluzione Rapid Eye, ottenendo dei risultati soddisfacenti.

## **4.2 Gestione irrigua consortile**

La mappatura delle aree irrigate è uno strumento di sicuro supporto per la gestione dell'irrigazione a livello consortile. Attraverso tale mappa è stato possibile scoprire che l'esistenza di aree e appezzamenti che non sono correttamente registrati nel database consortile. Tali difformità sono prevalentemente dovute a dichiarazioni di superfici in difetto, aree irrigate senza permesso o errori nel database. In questi casi, la mappa delle aree irrigate, realizzata già nel corso della stagione irrigua, ha permesso un controllo speditivo e preciso da parte dei tecnici consortili. Casi tipici sono le domande di irrigazione per ottenere il permesso ad irrigare che non contenevano tutte le particelle effettivamente coltivate ed irrigate, che includevano superfici minori o aventi geometria differente. In definitiva, a fine stagione, sono state stimate superfici irrigate non

registrate nel database consortile per circa 114 ettari tutti appartenenti alle superfici irrigate individuate dalla classe A (elevato trend di crescita colturale).

## 5 SVILUPPI FUTURI

Gli sviluppi futuri della metodologia proposta sono legati sia alla possibilità di migliorare l'analisi dell'andamento temporale degli indici di vegetazione sia al miglioramento della segmentazione utilizzando i classificatori a oggetti "*object oriented*" in luogo del classificatore "*pixel based*". Il miglioramento dello studio dell'andamento degli indici di vegetazione può trarre un notevole vantaggio dalla possibilità di utilizzare i sensori di nuova generazione della costellazione Sentinel 2.

I satelliti dell'agenzia spaziale europea, Sentinel 2, il cui lancio è previsto nei prossimi mesi, forniranno immagini ad alta risoluzione ottica con una risoluzione spettrale di 13 bande. La missione Sentinel-2, sarà composta a regime da due satelliti gemelli che garantiranno una frequente e sistematica copertura del territorio. Essi permetteranno di aggiornare frequentemente la mappatura della copertura del suolo e di migliorare la valutazione dei parametri biofisici della vegetazione. I vantaggi per la procedura presentata, saranno innanzitutto nel definire indici di vegetazione che tengono conto del contenuto d'acqua, utilizzando i dati provenienti dalla banda dell'infrarosso ad onde corte SWIR che si è già dimostrata essere utile a identificare le aree irrigate (Rao and Mohankumar 1994). Inoltre, Sentinel 2 permetterà acquisizioni a elevata risoluzione spaziale (10m nelle bande del visibile e dell'infrarosso vicino NIR, 20 m per le bande dello SWIR) e tempi di rivisita di 5 giorni con entrambi i satelliti in funzione. Alcuni dubbi persistono ancora sulle politiche di consegna delle immagini da parte dell'ESA, in particolare sui tempi di consegna dopo l'acquisizione.

Altro aspetto che merita un miglioramento è la segmentazione della mappa finale delle aree irrigate. Infatti, è stato rilevato in precedenza, che, nell'individuazione delle aree irrigate, occorre tenere conto non solo dalle informazioni ricavate dalla copertura vegetale, ma anche di quelle connesse alla gestione delle colture e del territorio da parte dell'uomo. Per tale motivo un altro aspetto fondamentale da considerare è la forma geometrica dei campi irrigati. Una forma abbastanza regolare è opera dell'uomo. Quindi, classificatori che possano riconoscere anche le forme, potrebbero portare un

duplice effetto benefico. Da un lato, aiutare a classificare in maniera automatica le aree irrigate, dall'altro permettere di migliorare la precisione della segmentazione della mappa. (Conrad et al. 2010).

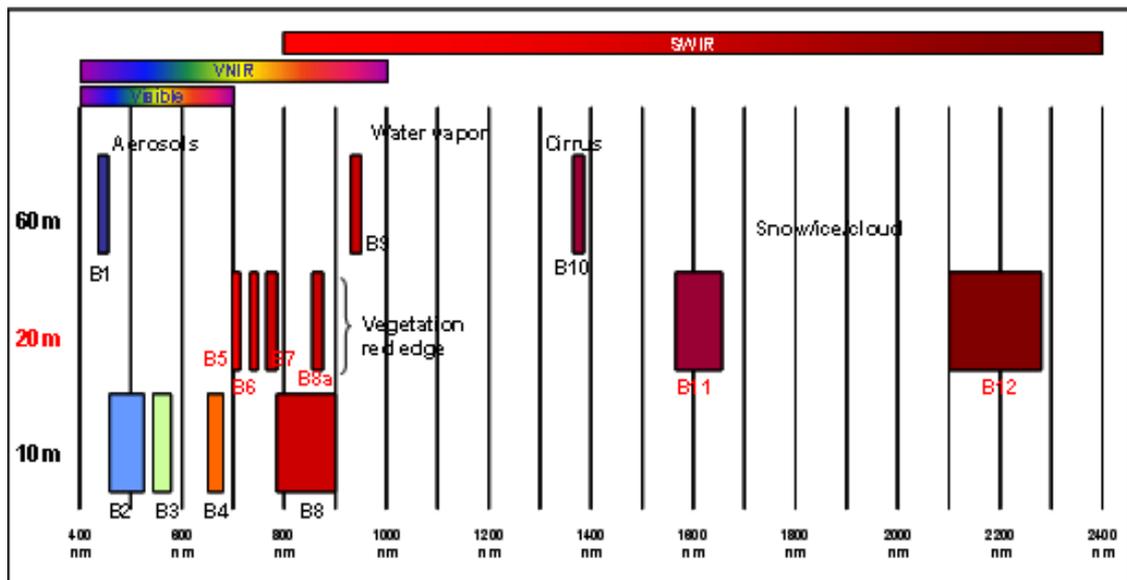


Figura 5.1 Sentinel-2 10 m Spatial Resolution Bands: B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4 (665 nm) and B8 (842 nm); 20 m Spatial Resolution Bands: B5 (705 nm), B6 (740 nm), B7 (783 nm), B8b (865 nm), B11 (1610 nm) and B12 (2190 nm); 60 m Spatial Resolution Bands: B1 (443 nm), B9 (940 nm) and B10 (1375 nm)

## 6 BIBLIOGRAFIA

- Agnew, C, and E Anderson. 1992. "Water Resources in the Arid Realm." <http://www.cabdirect.org/abstracts/19926787796.html>.
- Alexandridis, TK, GC Zalidis, and NG Silleos. 2008. "Mapping Irrigated Area in Mediterranean Basins Using Low Cost Satellite Earth Observation." *Computers and Electronics in ...* 64 (2) (December): 93–103. doi:10.1016/j.compag.2008.04.001. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168169908001105>.
- Allen, RG, LS Pereira, D Raes, and M Smith. 1998. "Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56." *FAO, Rome*. [http://www.engr.scu.edu/~emaurer/classes/ceng140\\_watres/handouts/FAO\\_56\\_Evapotranspiration.pdf](http://www.engr.scu.edu/~emaurer/classes/ceng140_watres/handouts/FAO_56_Evapotranspiration.pdf).
- Ariespace. 2011. *Studio E Realizzazione Di Un Sistema Informativo Di Supporto Alla Pianificazione Delle Risorse Idriche per Il Consorzio Del Sannio Alifano* 85.
- Arino, O, D Gross, and F Ranera. 2007. "GlobCover: ESA Service for Global Land Cover from MERIS." ... *and Remote Sensing ...* [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4423328](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4423328).
- Ball, GH, and DJ Hall. 1965. "ISODATA, a Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification." <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0699616>.
- Baret, F, and G Guyot. 1991. "Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment." *Remote Sensing of Environment*. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003442579190009U>.
- Bastiaanssen, Wim G M, David J. Molden, and Ian W. Makin. 2000. "Remote Sensing for Irrigated Agriculture: Examples from Research and Possible Applications." *Agricultural Water Management* 46: 137–155. doi:10.1016/S0378-3774(00)00080-9.
- Beltran, CM, and AC Belmonte. 2001. "Irrigated Crop Area Estimation Using Landsat TM Imagery in La Mancha, Spain." *Photogrammetric Engineering and Remote ...* 67 (10): 1177–1184. [http://info.asprs.org/publications/pers/2001journal/october/2001\\_oct\\_1177-1184.pdf](http://info.asprs.org/publications/pers/2001journal/october/2001_oct_1177-1184.pdf).

- Beltran, C. M., Calera, A., & Jochum, A. 2004. "Intersatellite Cross-Calibration: Integration of Reflectance and NDVI from Different Satellites by Means of a Linear Model." *In Remote Sensing International Society for Optics and Photonics*: pp. 128–139.
- Berk, A. 1999. "MODTRAN4 Radiative Transfer Modeling for Atmospheric Correction." *SPIE's ...* 3756 (July).  
<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=995156>.
- Cai, X, and MW Rosegrant. 2002. "Global Water Demand and Supply Projections: Part 1. A Modeling Approach." *Water International* 27 (2): 159–169.  
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02508060208686989>.
- Cohen, J. 1960. "A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. E&c. Psychof." *Measurement* 20.  
[http://scholar.google.it/scholar?q=cohen+coefficient+of+agreement+for+nominal+scales&hl=it&as\\_sdt=0,5&as\\_ylo=1960&as\\_yhi=1960#1](http://scholar.google.it/scholar?q=cohen+coefficient+of+agreement+for+nominal+scales&hl=it&as_sdt=0,5&as_ylo=1960&as_yhi=1960#1).
- Conrad, Christopher, Sebastian Fritsch, Julian Zeidler, Gerd Rucker, and Stefan Dech. 2010. "Per-Field Irrigated Crop Classification in Arid Central Asia Using SPOT and ASTER Data." *Remote Sensing* 2 (4) (April 8): 1035–1056.  
 doi:10.3390/rs2041035. <http://www.mdpi.com/2072-4292/2/4/1035/>.
- D'Urso, G. 2011. "L'OSSERVAZIONE DELLA TERRA NELL'INGEGNERIA AGRARIA E FORESTALE." *aiaa2011.unimi.it*: 22–24.  
<http://www.aiaa2011.unimi.it/chiave/memorie/Durso.pdf>.
- D'Urso, G., K. Richter, a. Calera, M.a. Osann, R. Escadafal, J. Garatuza-Pajan, L. Hanich, a. Perdigão, J.B. Tapia, and F. Vuolo. 2010. "Earth Observation Products for Operational Irrigation Management in the Context of the PLEIADeS Project." *Agricultural Water Management* 98 (2) (December): 271–282.  
 doi:10.1016/j.agwat.2010.08.020.  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377410002878>.
- DeFries, RS, and JRG Townshend. 1994. "NDVI-Derived Land Cover Classifications at a Global Scale." *International Journal of Remote ...*  
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169408954345>.
- Duggin, MJ, and CJ Robinove. 1990. "Assumptions Implicit in Remote Sensing Data Acquisition and Analysis." *REMOTE SENSING*.  
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169008955124>.
- Gao, BC. 1996. "NDWI—a Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space." *Remote Sensing of Environment*.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425796000673>.

- García-Mollá, M. 2013. "Irrigation Associations Coping with Drought: The Case of Four Irrigation Districts in Eastern Spain." *Drought in Arid and ...*  
[http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-6636-5\\_6](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-6636-5_6).
- Gleick, Peter H. 2003. "Global Freshwater Resources: Soft-Path Solutions for the 21st Century." *Science (New York, N.Y.)* 302 (5650) (November 28): 1524–8.  
 doi:10.1126/science.1089967. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14645837>.
- Hargreaves, GH, and ZA Samani. 1985. "Reference Crop Evapotranspiration from Ambient Air Temperature." ... (*Microfiche collection*)(USA). No. Fiche No ....  
<http://agris.fao.org/agris-search/search.do?f=2012/OV/OV201205434005434.xml;US19870079157>.
- Irs, Spot-, Avhrr Msg, Andrea Baraldi, Laurent Durieux, Dario Simonetti, Giulia Conchedda, Francesco Holecz, and Palma Blonda. 2010. "Automatic Spectral-Rule-Based Preliminary Classification of Radiometrically Calibrated DMC / SPOT-1 / -2 Imagery — Part I : System Design and Implementation" 48 (3): 1299–1325.
- Jones, HG, and RA Vaughan. 2010. "Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications."  
<http://books.google.it/books?hl=it&lr=&id=sTmcAQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=jones,+Vaughan+remote+sensing+of+vegetation+&ots=0c1IgKjT3Y&sig=4KD-UCzHoxDzQlBpzWzHmawAuOE>.
- Kamthonkiat, D., K. Honda, H. Turrall, N. K. Tripathi, and V. Wuwongse. 2005. "Discrimination of Irrigated and Rainfed Rice in a Tropical Agricultural System Using SPOT VEGETATION NDVI and Rainfall Data." *International Journal of Remote Sensing* 26 (12) (June 20): 2527–2547. doi:10.1080/01431160500104335.  
<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-22744447747&partnerID=tZOtx3y1>.
- Kauth, RJ, and GS Thomas. 1976. "The Tasselled Cap--a Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by Landsat." *LARS Symposia*.  
[http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1160&context=lars\\_symp](http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1160&context=lars_symp).
- Loveland, TR, and BC Reed. 2000. "Development of a Global Land Cover Characteristics Database and IGBP DISCover from 1 Km AVHRR Data." ... *Journal of Remote ...* 21 (6): 1303–1330.  
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/014311600210191>.
- Maliva, Robert, and Thomas Missimer. 2012. "Arid Lands Water Evaluation and Management" (1948). *Environmental Science and Engineering*: 21–40.  
 doi:10.1007/978-3-642-29104-3. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-29104-3>.

- Martínez-Casasnovas, José a., Almudena Martín-Montero, and M. Auxiliadora Casterad. 2005. "Mapping Multi-Year Cropping Patterns in Small Irrigation Districts from Time-Series Analysis of Landsat TM Images." *European Journal of Agronomy* 23 (2) (September): 159–169. doi:10.1016/j.eja.2004.11.004. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1161030104001212>.
- Nagy, M and Lenz, K and Windhofer, G and Fuerst, J and Fribourg-Blanc, B. 2007. "Data Collection Manual for the OECD." *Eurostat Joint Questionnaire ...*: 1–7. [http://scholar.google.it/scholar?q=Nagy%2C+M.%2C+Lenz%2C+K.%2C+Windhofer%2C+G.%2C+Fuerst%2C+J.%2C+Fribourg-Blanc%2C+B.%2C+2007.+Data+Collection&btnG=&hl=it&as\\_sdt=0%2C5#0](http://scholar.google.it/scholar?q=Nagy%2C+M.%2C+Lenz%2C+K.%2C+Windhofer%2C+G.%2C+Fuerst%2C+J.%2C+Fribourg-Blanc%2C+B.%2C+2007.+Data+Collection&btnG=&hl=it&as_sdt=0%2C5#0).
- Ozdogan, Mutlu, and Garik Gutman. 2008. "A New Methodology to Map Irrigated Areas Using Multi-Temporal MODIS and Ancillary Data: An Application Example in the Continental US." *Remote Sensing of Environment* 112 (9) (September): 3520–3537. doi:10.1016/j.rse.2008.04.010. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425708001338>.
- Ozdogan, Mutlu, Curtis E. Woodcock, Guido D. Salvucci, and Hüseyin Demir. 2006. "Changes in Summer Irrigated Crop Area and Water Use in Southeastern Turkey from 1993 to 2002: Implications for Current and Future Water Resources." *Water Resources Management* 20 (3) (June): 467–488. doi:10.1007/s11269-006-3087-0. <http://link.springer.com/10.1007/s11269-006-3087-0>.
- Ozdogan, Mutlu, Yang Yang, George Allez, and Chelsea Cervantes. 2010. "Remote Sensing of Irrigated Agriculture: Opportunities and Challenges." *Remote Sensing* 2 (9) (September 27): 2274–2304. doi:10.3390/rs2092274. <http://www.mdpi.com/2072-4292/2/9/2274/>.
- Pax-Lenney, Mary, and Curtis E. Woodcock. 1997. "The Effect of Spatial Resolution on the Ability to Monitor the Status of Agricultural Lands." *Remote Sensing of Environment* 61 (2) (August): 210–220. doi:10.1016/S0034-4257(97)00003-5. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425797000035>.
- Rao, PP Nageswara, and A Mohankumar. 1994. "Cropland Inventory in the Command Area of Krishnarajasagar Project Using Satellite Data." *Title REMOTE SENSING*. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169408954162>.
- Silleos, NG, and TK Alexandridis. 2006. "Vegetation Indices: Advances Made in Biomass Estimation and Vegetation Monitoring in the Last 30 Years." *Geocarto ...* <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106040608542399>.
- Song, Conghe, CE Woodcock, and KC Seto. 2001. "Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects?" *Remote Sensing of ...* 4257 (00). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425700001693>.

- Thenkabail, P S, P Gangadhararao, T W Biggs, M Krishna, and H Turrall. 2007. "Spectral Matching Techniques to Determine Historical Land-Use / Land-Cover ( LULC ) and Irrigated Areas Using Time-Series 0 . 1-Degree AVHRR Pathfinder Datasets" 73 (9): 1029–1040.
- Thenkabail, Prasad S., Venkateswarlu Dheeravath, Chandrashekhar M. Biradar, Obi Reddy P. Gangalakunta, Praveen Noojipady, Chandrakantha Gurappa, Manohar Velpuri, Muralikrishna Gumma, and Yuanjie Li. 2009. "Irrigated Area Maps and Statistics of India Using Remote Sensing and National Statistics." *Remote Sensing* 1 (2) (April 17): 50–67. doi:10.3390/rs1020050. <http://www.mdpi.com/2072-4292/1/2/50/>.
- Thenkabail, Prasad S., Mitchell Schull, and Hugh Turrall. 2005. "Ganges and Indus River Basin Land Use/land Cover (LULC) and Irrigated Area Mapping Using Continuous Streams of MODIS Data." *Remote Sensing of Environment* 95 (3) (April): 317–341. doi:10.1016/j.rse.2004.12.018. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425705000180>.
- Thenkabail, PS, and CM Biradar. 2008. *A Global Irrigated Area Map (GIAM) Using Remote Sensing at the End of the Last Millennium*. <http://www.iwmiwiam.org/info/gmi-doc/GIAM-world-book.pdf>.
- Thenkabail, PS, CM Biradar, and Praveen Noojipady. 2007. "Sub-Pixel Area Calculation Methods for Estimating Irrigated Areas." *Sensors*: 2519–2538. <http://www.mdpi.com/1424-8220/7/11/2519>.
- Tobler, W. 1988. "Resolution, Resampling, and All That." *Building Databases for Global Science*. [http://www.geog.ucsb.edu/~tobler/publications/pdf\\_docs/geog\\_analysis/ResltnEtc.pdf](http://www.geog.ucsb.edu/~tobler/publications/pdf_docs/geog_analysis/ResltnEtc.pdf).
- Toomanian, N., a. S. M. Gieske, and M. Akbary. 2004. "Irrigated Area Determination by NOAA-Landsat Upscaling Techniques, Zayandeh River Basin, Isfahan, Iran." *International Journal of Remote Sensing* 25 (22) (November): 4945–4960. doi:10.1080/01431160410001713007. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160410001713007>.
- USGS. 2013. "Landsat 8." *Fact Sheet*: 3–6. <http://pubs.usgs.gov/fs/2013/3060/pdf/fs2013-3060.pdf>.
- Vörösmarty, CJ. 2002. "Global Water Assessment and Potential Contributions from Earth Systems Science." *Aquatic Sciences*. <http://link.springer.com/article/10.1007/PL00012590>.

- Vörösmarty, CJ, and D Sahagian. 2000. "Anthropogenic Disturbance of the Terrestrial Water Cycle." *Bioscience*.  
<http://bioscience.oxfordjournals.org/content/50/9/753.full>.
- Williams, CS, and OA Becklund. 1989. "Introduction to the Optical Transfer Function."  
[http://spie.org/x648.html?pf=true&product\\_id=472708&origin\\_id=x25646](http://spie.org/x648.html?pf=true&product_id=472708&origin_id=x25646).
- Wriedt, Gunter, Marijn Van der Velde, Alberto Aloe, and Fayçal Bouraoui. 2009. "Estimating Irrigation Water Requirements in Europe." *Journal of Hydrology* 373 (3-4) (July): 527–544. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.05.018.  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169409003175>.
- Zhang, Xiaoyang, Mark a. Friedl, Crystal B. Schaaf, Alan H. Strahler, John C.F. Hodges, Feng Gao, Bradley C. Reed, and Alfredo Huete. 2003. "Monitoring Vegetation Phenology Using MODIS." *Remote Sensing of Environment* 84 (3) (March): 471–475. doi:10.1016/S0034-4257(02)00135-9.  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425702001359>.
- Zucaro, Raffaella. 2011. "Atlante Nazionale". INEA.  
[http://dSPACE.inea.it/bitstream/inea/388/1/AtlanteIrrigazione\\_NET.pdf](http://dSPACE.inea.it/bitstream/inea/388/1/AtlanteIrrigazione_NET.pdf).
- Zucaro, Raffaella, and Antonella Pontrandolfi. 2006. "Italian Policy Framework for Water in Agriculture." *Water and Agriculture Sustainability, Markets and Policies: Sustainability, Markets and Policies*: 411.