

This is the peer reviewed version of the following article:

Indagini di carattere ambientale attraverso l'analisi di dati multispettrali Landsat ed ASTER / Mancini, Francesco; De Giglio, M; Nurra, M.. - In: RIVISTA ITALIANA DI TELERILEVAMENTO. - ISSN 1129-8596. - STAMPA. - 40:(2008), pp. 39-53.

*Terms of use:*

The terms and conditions for the reuse of this version of the manuscript are specified in the publishing policy. For all terms of use and more information see the publisher's website.

02/05/2026 04:11

(Article begins on next page)

# Indagini di carattere ambientale attraverso l'analisi di dati multispettrali Landsat ed Terra-ASTER

Francesco Mancini<sup>1</sup>, Michaela De Giglio<sup>2</sup> e Massimiliano Nurra<sup>3</sup>

<sup>1</sup>DAU, Politecnico di Bari, Via Orabona, 4 – 70125 Bari, e-mail: f.mancini@poliba.it

<sup>2</sup>DISTART, Università di Bologna, Viale Risorgimento, 2 – 40136 Bologna

<sup>3</sup>CIRSA, Università di Bologna, P.zza Kennedy, 12 – 48100 Ravenna

## Riassunto

In questo lavoro i dati satellitari multispettrali vengono utilizzati per indagini di carattere ambientale in una porzione dell'area costiera emiliano-romagnola caratterizzata da una rara coesistenza tra presenza antropica, intenso sfruttamento agricolo ed aree umide di particolare pregio. La caratterizzazione di tale area, in termini di usi del suolo e fenomeni in atto nelle zone umide, è stata ottenuta con procedure di classificazione supervisionata e non, a partire da dati dei sensori TM 4/5, ETM+ (piattaforma Landsat) ed ASTER (piattaforma TERRA) in un periodo compreso fra il 1986 ed il 2002. Il lavoro discute i risultati raggiunti nella definizione dell'uso del suolo e di alcuni processi dinamici, tipici degli ambienti di transizione.

**Parole chiave:** Landsat, ASTER, uso del suolo, monitoraggio ambientale

## *Use of Landsat and Terra-ASTER data for environmental monitoring*

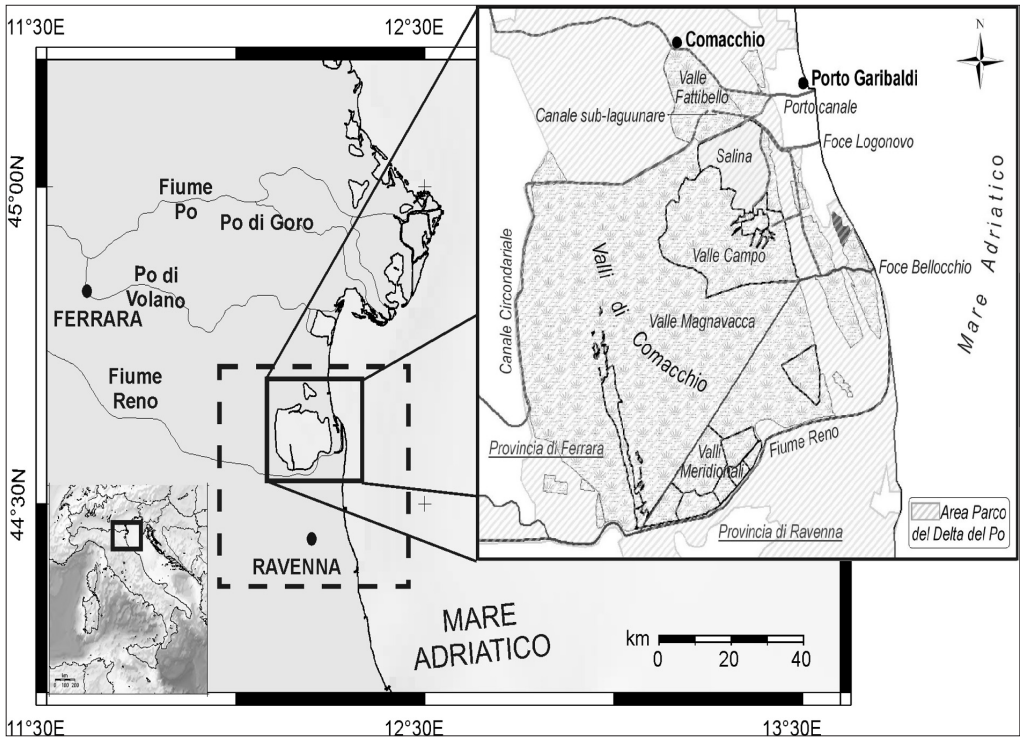
### *Abstract*

*The paper focuses on the use of multispectral satellite data for environmental monitoring along a portion of the Emilia-romagna coastal area where natural (wetland and salt intrusions) and anthropical (agricultural exploitations) aspects interact and modify the original ecological equilibrium. The environmental properties of wet and dry areas have been investigated by classification of satellite data acquired from Landsat TM 4/5, ETM+ and Terra-ASTER platforms acquired since 1986 to 2002. Results, specific properties of transitional environments that were highlighted by the analysis and possible validation procedures are addressed.*

**Keywords:** Landsat, ASTER, land use, environmental monitoring

## Introduzione

Lo studio presentato in questo lavoro si colloca nelle applicazioni del telerilevamento al territorio e all'ambiente. Infatti l'area investigata, comprendente la porzione costiera delle province di Ferrara e Ravenna (Fig. 1), è caratterizzata da una notevole complessità ecologica, costituita da elementi naturali altamente sensibili, attualmente soggetti a vincolo, inseriti in un contesto antropico con il quale interagiscono intensamente. La contemporanea presenza di insediamenti produttivi industriali, agricoli e di zone di notevole pregio ambientale dai delicati equilibri naturali, richiede continue indagini sul territorio che attualmente sono svolte dai vari Enti preposti al controllo dei vari comparti ambientali coinvolti tramite indagini puntuali.



**Figura 1 – Inquadramento geografico dell’area di studio ed indicazione delle aree investigate tramite dati Landsat MSS/TM (rettangolo con linea continua) ed ASTER (rettangolo tratteggiato). Nel riquadro un dettaglio relativo all’ecosistema delle Valli di Comacchio.**

Le difficoltà incontrate nel monitoraggio di aree estese e di fenomeni di interazione che avvengono su scala spaziale e temporale variabile, suggeriscono l’introduzione dei dati satellitari ad integrazione del rilevamento puntuale terrestre. Il presente lavoro, dopo una breve descrizione dei principali lineamenti evolutivi dell’area, illustrerà alcuni risultati ottenuti tramite i metodi di classificazione a partire da dati multispettrali forniti dai sensori Terra-ASTER e Landsat TM/ETM+. In Figura 1, i rettangoli con linea tratteggiata e continua rappresentano le aree investigate con i due sensori. In particolare, in ragione delle diverse caratteristiche di questi ultimi, i dati ASTER sono stati utilizzati in ambiente terrestre/agricolo, per la definizione dell’uso del suolo, mentre i dati TM/ETM+ nello studio degli ambienti sommersi /vallivi e dei processi di scambio tra acque continentali e marine. Tale scelta è dipesa da due aspetti fondamentali: il primo relativo alla presenza solo sul sensore Landsat della banda del blu, nella quale la radianza riflessa dell’acqua risulta essere più rilevante; il secondo è legato alla maggiore risoluzione geometrica proposta dal sottosistema di Aster che opera nel visibile e nel vicino infrarosso. Il suo pixel di 15 m infatti, rispetto a quello di 30 m del Landsat nello stesso range, è risultato più adatto alla dimensione media, circa 10-15 ettari, dei numerosi appezzamenti agricoli presenti sul territorio.

### **Lineamenti evolutivi dell’area**

L’attuale configurazione dell’area investigata è storicamente legata a diversi fattori, quali le trasformazioni dei rami deltizi del Po, la formazione della pianura alluvionale, l’evolu-

zione degli ambienti costieri e le opere di bonifica, realizzate a partire dall'epoca romana, che hanno portato alla creazione degli ambienti umidi delle Valli di Comacchio. Queste ultime si formarono in seguito alla crisi e successiva estinzione dell'Eridano (VI-VII sec. d.C.). A causa della diminuzione dell'apporto sedimentario proveniente dal fiume, venne infatti a mancare l'azione di compensazione alla subsidenza naturale dei suoli. Inoltre, dopo l'arresto dello sviluppo dell'antico delta romano, il rimaneggiamento delle barre sabbiose di foce, ad opera del moto ondoso, provocò l'interclusione di alcuni bracci di mare tra le penisole costruite dall'avanzamento delle foci fluviali, isolandoli dall'ambiente marino.

La rotta di Ficarolo (1152) portò a conseguenze decisive per il sistema vallivo che, privo dei maggiori apporti sedimentari fluviali e agevolato dalla subsidenza, raccolse le acque di scolo circostanti che non potevano raggiungere il mare. Così, mentre la linea di costa prospiciente le Valli tendeva a stabilizzarsi, si formò un vastissimo territorio depresso con acque di diversa salinità e situazione idrogeologica articolata, per la complessità dei fenomeni di scambio tra acque dolci di provenienza continentale e salate, sia marine che di falda.

Seguì quindi un periodo in cui l'azione antropica, volta a bonificare i terreni umidi per destinarli all'agricoltura, cominciò a modificare notevolmente l'assetto del territorio nel basso ferrarese. Tra il XV ed il XVIII secolo cominciò il prosciugamento di paludi e valli salmastre attraverso l'immissione di acque torbide dei torrenti o dei fiumi (bonifica per colmata) mentre le zone più depresse e vicine alla costa non potevano essere ancora bonificate.

A metà dell'Ottocento le bonifiche effettuate tramite l'utilizzo di macchine idrovore consentì per la prima volta di prelevare acque anche da aree depresse e portò, attraverso varie fasi, all'attuale conformazione del sistema vallivo. Nel 1966 il Ministero dell'Agricoltura sospese a tempo indeterminato gli interventi di prosciugamento delle Valli, oramai ridotte agli attuali 12,146 ettari circa. Le aree recuperate sono quelle che oggi ospitano insediamenti ed attività agricole. A queste vicende si aggiunge poi la presenza di diverse altre aree umide e di pregio ambientale, situate nella porzione meridionale dell'area studiata, che rivestono una notevole importanza per la presenza di avifauna locale e per questo sottoposte ai vincoli del Parco Regionale del Delta del Po.

### **Dati satellitari e strumenti disponibili**

La caratterizzazione delle aree sopra descritte è stata condotta attraverso metodi di classificazione supervisionata e non-supervisionata, applicati alla serie temporale di immagini multispettrali Terra-ASTER e Landsat disponibili. In Figura 2 viene presentato un confronto tra le principali caratteristiche dei due sensori utilizzati.

L'utilizzo congiunto dei dati, diversi sia per distribuzione delle bande che per risoluzione geometrica, ha consentito la messa a punto degli algoritmi di classificazione rispettivamente per gli ambienti emersi (uso del suolo) e per quelli umidi, sino alla definizione dell'intero territorio studiato. In Tabella 1 vengono riassunti i dati utilizzati.

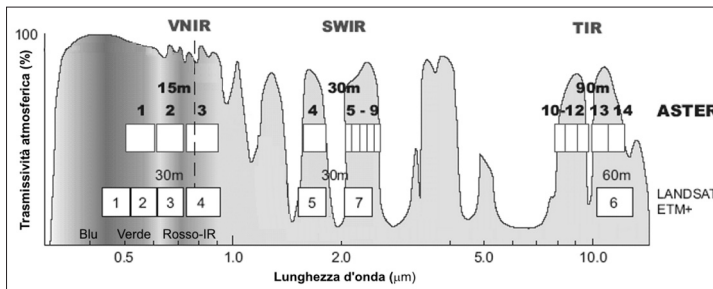
Dato che le immagini elencate nella tabella sono di repertorio, diventa indispensabile esaminarle in relazione alla data di acquisizione. Infatti, molti dei fenomeni indagati presentano caratteri di stagionalità che non sempre possono essere rappresentati da dati acquisiti in un'epoca specifica.

Per le fasi di classificazione, descritte nei paragrafi relativi all'analisi dei dati, sono stati utilizzati gli algoritmi implementati negli applicativi IDRISI32 (Clark University, Worcester, Massachusetts, USA) e ENVI 4.1.

### ***I dati ASTER per l'analisi dell'uso del suolo***

Il dato ASTER, utilizzato nella definizione dell'uso del suolo, è stato fornito nel livello di processamento 1B, che prevede la calibrazione radiometrica e la co-registrazione geometri-

ca nelle diverse bande dei valori associati al livello 1A, a loro volta generati dal dato grezzo. Il dato acquisito il giorno 23/04/2002 (ore 10:17 a.m.) è significativo dal punto di vista agronomico, in riferimento ai cicli di crescita e di maturazione di molti tipi di coltivazioni presenti: tale informazione è di fondamentale importanza per l'incidente influenza che lo stato fenologico della pianta esercita sulla firma spettrale al momento dell'acquisizione dei dati.



**Figura 2 - Localizzazione nello spettro elettromagnetico dei canali di acquisizione Landsat (ETM+) ed ASTER con le rispettive risoluzioni geometriche. In background la trasmissività (%) attraverso l'atmosfera in funzione della lunghezza d'onda. La linea tratteggiata delimita la regione del visibile-vicino infrarosso (VNIR) da quelle del medio infrarosso (SWIR, Short Wave InfraRed) e dell'infrarosso termico (TIR, Thermal InfraRed). Immagine da Kääb et al. [2002] con modifiche.**

**Tabella 1 - Elenco dei dati utilizzati in questo lavoro**

Dati	Sensore	Data di acquisizione
ID4192029009121110	Landsat 4 TM	30/7/1991
ID5192029008628510	Landsat 5 TM	12/10/1986
ID7192029009928150	Landsat 7 ETM+	8/10/1999
AST.L1B.003-04232002101741	ASTER	23/04/2002

### Procedure di classificazione dei dati Aster

Ai fini dell'analisi dell'uso del suolo nell'area identificata in Figura 1, il dato ASTER è stato elaborato tramite procedure di classificazione supervisionata che richiedono la definizione di aree di addestramento (training sites) da inserire come elementi noti. Le "verità al suolo" (validation sites) sono invece necessarie nella fase di verifica dei risultati, dove è possibile quantificarne la bontà in termini di percentuale di successo del classificatore. La raccolta di queste informazioni può essere anche onerosa ma rappresenta una fase necessaria per ottenere una mappa affidabile dell'uso del suolo a partire da dati telerilevati. Le fonti utilizzate in questo lavoro sono diverse ed in particolare: la "Carta dell'Uso del Suolo" del Comune di Ravenna (scala 1:25000, realizzata nel 2003), prodotta dall'ufficio SIT tramite fotointerpretazione (base informativa della Carta dell'Uso del Suolo della Regione Emilia Romagna e successivi aggiornamenti da volo TerraItaly2000) integrata con rilievi a terra; la Carta della Vegetazione della Provincia di Ravenna (scala 1:25000, realizzata nel 1999);

le dichiarazioni degli agricoltori, relative all'anno 2002 ed effettuate ai fini della PAC (Politica Agricola Comune), fornite dall'Unione Agricoltori della Provincia di Ravenna. Queste ultime contengono i riferimenti catastali utili alla localizzazione dell'appezzamento nell'immagine satellitare dopo consultazione dei Fogli catastali (scala 1:2000, aggiornati al 2003) reperiti presso l'Agenzia del Territorio (Ufficio Provinciale di Ravenna, Direzione e Servizi catastali).

Complessivamente dal materiale citato sono state definite 18 classi di istruzione per l'uso del suolo (Tab. 2) delle quali sono stati considerati diversi aspetti utili alla corretta interpretazione delle firme spettrali. Tra questi ad esempio lo stato fenologico atteso all'epoca di acquisizione per le coltivazioni più comuni nell'area. Particolarmente interessante si è dimostrata la consultazione delle dichiarazioni degli agricoltori ai fini della PAC e relativa al periodo dell'acquisizione dell'immagine, che ha consentito la definizione di molte aree di "training" limitando il rilievo sul terreno ad alcune operazioni di verifica. L'analisi della Carta della Vegetazione invece, integrata con un sopralluogo, ha permesso l'introduzione di altre tipologie di coperture, quali spiagge, boschi misti o di conifere, zona urbana e zona industriale. In realtà i campioni prelevati per queste ultime due voci sono rappresentativi di realtà altamente disomogenee, tali da renderli ambigui: tuttavia una loro esclusione causerebbe dei problemi di confusione agli algoritmi di classificazione, soprattutto a quelli che non ammettono la presenza di classi ignote.

**Tabella 2 - Classi di uso del suolo scelte come target per la classificazione**

Classi Individuate			
1	MAIS	10	BOSCHI MISTI O DI CONIFERE
2	BIETOLA	11	SPIAGGE
3	GRANO	12	ZONA INDUSTRIALE
4	ERBA MEDICA	13	ZONA URBANA
5	PISELLO	14	POMODORO
6	SOIA	15	GIRASOLE
7	FRUTTETI	16	SET-ASIDE
8	VIGNETI	17	PESCHE
9	COLTURE DA LEGNO	18	PERE

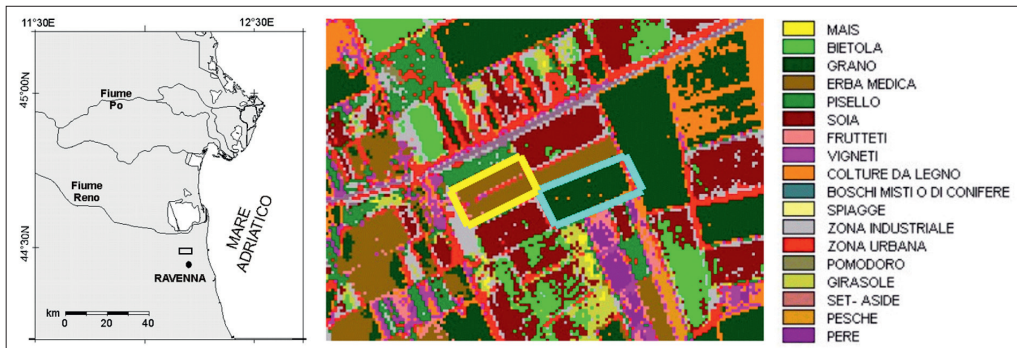
La classificazione supervisionata è preferita anche in considerazione della specificità degli usi del suolo ricercati, spesso legati a fattori geografici o stagionali. Il software utilizzato, IDRISI32, distingue i metodi hard, che definiscono in modo rigido la classe di appartenenza del pixel ignorando la sua natura ambigua, dai soft che, viceversa, prevedono tale possibilità associando al pixel le diverse componenti presenti anche se in proporzioni variabili. Senza scendere nella discussione dei singoli classificatori possiamo dire che nella prima categoria rientrano i seguenti: Minima Distanza dalla Media, Parallelepipedo e Massima Verosimiglianza. Nella seconda invece troviamo metodi, appartenenti alla teoria *Fuzzy Measures* [Dubois e Prade, 1980, 1982], che fanno riferimento a teorie statistiche differenti (Bayesiana, Dempster-Shafer, Fuzzy), prevedendo la natura ambigua del pixel che, come detto, potrà essere assegnato a classi miste in varia proporzione [Burrough, 1989; Wang, 1990].

La sperimentazione ha previsto il ricorso a tutti gli algoritmi elencati, traendo da ciascuno il maggior numero di informazioni possibile, e l'impiego di cinque bande, ovvero le 1,

2 del visibile e le 3N, 4, 5 del vicino-medio infrarosso, ritenute le migliori ai fini della classificazione dopo numerose prove. La preferenza di tali bande è basata anche su analisi mediante il metodo PCA (*Principal Components Analysis*): la tecnica consente di verificare quali siano le bande che apportano il maggior contenuto informativo rispetto ad altre che contengono solo informazioni ridondanti.

### Analisi e verifica dei risultati delle classificazioni Aster

Lo studio delle prestazioni dei diversi classificatori applicati a dati ASTER è stato affrontato dagli autori anche in precedenti lavori nella stessa area [Barbarella et al., 2005, Barbarella et al., 2006]. In questi si è cercato di sfruttare al meglio le capacità dei singoli algoritmi nel riconoscimento di determinate categorie: nei classificatori hard si è riscontrato una maggiore tendenza a delineare delle classi omogenee, con il rischio però, a volte alto, di assegnare erroneamente una classe diversa da quella reale; gli algoritmi soft invece, hanno dimostrato un'elevata capacità di discriminare gruppi di elementi a diverso comportamento (es. piante con patologie) all'interno di aree uniformi, anche se possono rendere più complessa, in alcuni casi, l'interpretazione dei risultati. Ne consegue che una ricostruzione affidabile del territorio è raggiungibile con l'utilizzo sinergico di tutte le tecniche elencate. A titolo esemplificativo nella Figura 3 si riporta, per un'area limitata, l'uso del suolo ottenuto tramite il metodo della massima verosimiglianza, rivelatosi uno dei più accurati, con l'impiego delle bande 1, 2 (nel visibile) e 3N, 4, 5 (nel vicino-medio infrarosso).

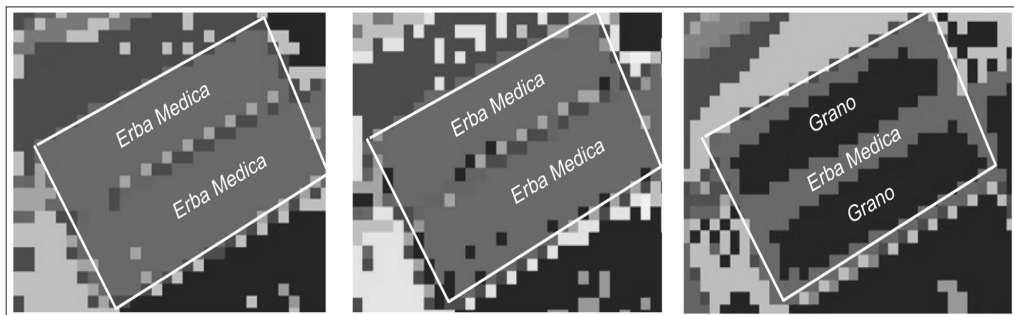


**Figura 3 - Esempio di classificazione dell'Uso del Suolo di un'area agricola a nord di Ravenna (identificata nella visione d'insieme a sinistra) ottenuta con il metodo della Massima Verosimiglianza. Le classi *erba medica* e *grano* sono evidenziate rispettivamente nel rettangolo giallo ed azzurro.**

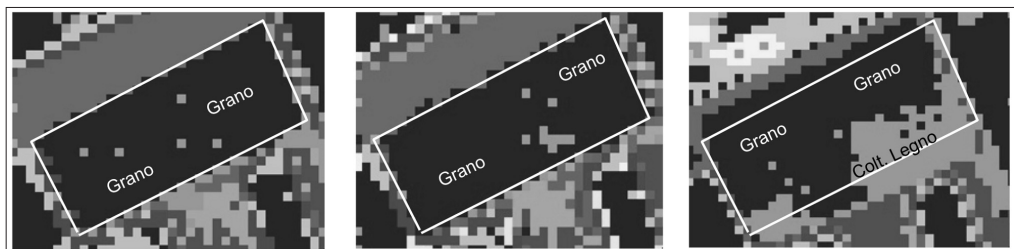
Tali bande possono essere considerate le più utili ai fini dell'indagine in ambienti agricoli e vegetati. Infatti il contenuto e la tipologia di pigmenti presenti influenza i valori di riflettanza soprattutto nel visibile, la struttura della foglia influenza la risposta nell'infrarosso vicino e il contenuto d'acqua nell'infrarosso a media-breve lunghezza d'onda. In generale però la risposta spettrale delle colture dipende anche dallo stato fenologico della pianta al momento della ripresa, dallo stato fitosanitario e dalla densità di copertura fogliare. Pertanto il risultato della classificazione va interpretato in relazione a tutti questi aspetti. L'uso delle restanti bande dei sottoinsiemi SWIR e TIR non introduce elementi particolarmente utili ai fini della classificazione. Questo dipende anche dal fatto che i vegetali sono pecilotermi, ovvero incapaci di mantenere la propria temperatura interna a livelli diversi da quelli

dell'ambiente in cui si trovano. Non bisogna inoltre dimenticare che nel TIR la risoluzione geometrica scende a 90 m. Dalla Figura 3 si può osservare che, considerando la data di acquisizione dell'immagine (23 aprile 2002), lo stadio di maturazione di coltivazioni come *erba medica* e *grano* è sufficientemente avanzato per facilitarne il loro riconoscimento confermato anche nelle dichiarazioni PAC. L'erba medica è una coltura foraggera poliennale falciabile, seminata generalmente all'inizio di marzo e sottoposta al primo taglio nei primi giorni di maggio. Il grano invece è un cereale autunno-vernino dotato di elevata capacità di adattamento, anche in presenza di fattori limitanti, seminato a novembre e raccolto in primavera-estate.

In Figura 4 e Figura 5 sono riportate e confrontate le classificazioni delle due colture, ottenute con le tre tecniche rivelatesi più significative ai fini dell'indagine: Massima Verosimiglianza, che fornisce la classificazione visivamente più omogenea e con i confini degli appezzamenti delineati quasi perfettamente; Massima Verosimiglianza-Fuzzy, nel quale il classificatore valuta le percentuali delle altre classi eventualmente presenti nel training site; Minima Distanza dalla Media, metodo qualitativamente meno preciso nei casi analizzati, come verificato anche in numerose altre aree campione.



**Figura 4 - Confronto tra i risultati ottenuti rispettivamente con i metodi della Massima Verosimiglianza (a sinistra), della Massima Verosimiglianza-Fuzzy (al centro), della Minima Distanza dalla Media (a destra), relativi al dettaglio evidenziato in giallo in Figura 3 (bande 1, 2, 3n, 4, 5), coltivato ad *erba medica* secondo la dichiarazione PAC.**



**Figura 5 - Confronto tra i risultati ottenuti rispettivamente con i metodi della Massima Verosimiglianza (a sinistra), della Massima Verosimiglianza-Fuzzy (al centro), della Minima Distanza dalla Media (a destra), relativi al dettaglio evidenziato in azzurro in Figura 3 (bande 1, 2, 3n, 4, 5), coltivato a *grano* secondo la dichiarazione PAC.**

I pixel isolati sono attribuibili a più fattori (differente stato di sviluppo, diverso grado di umidità, patologie o stress, variazioni in densità) che inducono una variabilità nella risposta della pianta: sono comunque eliminabili con procedure di post-classificazione, come l'applicazione di filtri, previsti dal software stesso, capaci di rigenerare un'immagine nella quale ciascun pixel assume un valore radiometrico dato dalla combinazione del suo valore originale con quello dei pixel circostanti. Infine, la comparsa di pixel erroneamente attribuiti ad aree industriali ed urbane può essere spiegata con la presenza di situazioni altamente disomogenee collocate ai margini di appezzamenti invece ben catalogati.

Dal punto di vista quantitativo, la bontà dei risultati prodotti dai diversi metodi è stata verificata attraverso l'analisi delle matrici di confusione, delle quali si riportano alcuni estratti nella Tabella 3: ciascuna matrice deriva dal confronto del raster di campioni di verità a terra, esterni ai training sites di partenza, con il risultato della classificazione.

Nel caso della Massima Verosimiglianza e della Massima Verosimiglianza-Fuzzy, gli errori di commissione (pixel dichiarato in eccesso per una tipologia nella quale è erroneamente rientrato) per le classi *erba medica* e *grano* sono relativamente piccoli, e si osservano inoltre errori di omissione (pixel ritenuto mancante perché classificato in un'altra classe) quasi trascurabili per entrambe le colture. Questi sono associati, rispettivamente, alla classe *frutteti* (classe 7) per l'*erba medica* e alle *colture da legno* (classe 9) per il *grano* nel primo esempio di Tabella 3, e alla sola categoria *colture da legno* nel secondo estratto di Tabella 3. Una situazione peggiore è invece data dall'algoritmo della Minima Distanza dalla Media (terzo estratto di Tab. 3): la classe *grano* è stata in buona parte riconosciuta ma sono molti i pixel in eccesso ad essa erroneamente associati, mentre l'*erba medica* è stata quasi completamente confusa con il *grano*. Le precedenti considerazioni sono riscontrabili anche nelle Figure 4 e 5.

Per una valutazione dell'attendibilità complessiva di ogni classificazione generata, è possibile calcolare, sulla base della matrice di confusione, l'accuratezza globale (probabilità che un pixel estratto a caso sia classificato correttamente) e il coefficiente K che depura quest'ultima dall'accordo casuale: i valori riportati in Tabella 4 confermano che il metodo della Minima Distanza della media fornisce il risultato più scadente.

Un'ulteriore verifica proviene dall'applicazione della procedura soft BAYCLASS per la valutazione della probabilità a posteriori (Fig. 6).

La probabilità a-posteriori di entrambe le coperture è prossima al valore massimo (1,00) per la quasi totalità dell'estensione degli appezzamenti considerati: la dichiarazione PAC dell'Azienda agricola operante sui terreni precedentemente analizzati costituisce la prova definitiva dell'accuratezza fornita dalla classificazione.

### ***I dati Landsat per lo studio degli ambienti umidi***

Il dataset Landsat, elencato nella tabella 1, è stato utilizzato invece per effettuare uno studio degli ambienti umidi tramite tecniche di classificazione non supervisionata. Come esemplificazione dei risultati raggiungibili verranno discussi quelli relativi alle Valli di Comacchio ed all'area costiera antistante. L'analisi dei dati è rivolta alla comprensione dei fenomeni di scambio ed interazione tra acque costiere, fluviali ed interne, con i consueti vantaggi offerti dall'osservazione satellitare, ovvero sinotticità ed analisi selettiva dei fenomeni attraverso la selezione delle bande utilizzate.

### **Procedure di classificazione dei dati Landsat**

A differenza delle immagini Aster, i dati Landsat sono stati analizzati mediante classificazione non supervisionata, procedura che non richiede a priori la disponibilità di informazioni esterne per l'assegnazione dei pixel alle diverse classi.

**Tabella 3 - Estratti delle matrici di confusione relativi, rispettivamente, agli algoritmi di Massima Verosimiglianza, Massima Verosimiglianza-Fuzzy e Minima Distanza dalla Media, con evidenziati i risultati ottenuti per le classi *grano* ed *erba medica*. In particolare, sono riportati gli errori di Commissione (Err Com.) e di Ommissione (Err Omiss.).**

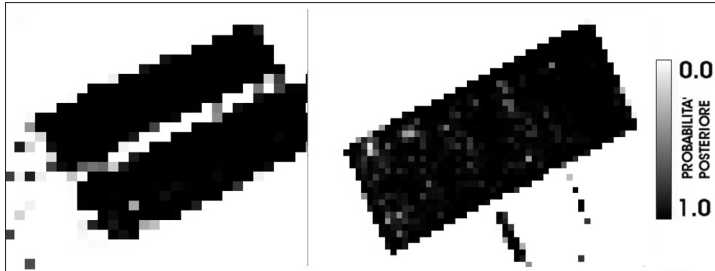
<b>MASSIMA VEROSIMIGLIANZA</b>							
	1	2	<i>Grano</i>	<i>Erba Med.</i>	5	..	Err. Com.
1	430	0	0	0	1	..	0,0713
2	0	202	0	0	0	..	0,0605
<b><i>Grano</i></b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>616</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>..</b>	<b>0,1809</b>
<b><i>Erba Med.</i></b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>411</b>	<b>0</b>	<b>..</b>	<b>0,0420</b>
5	0	0	0	0	545	..	0,2302
7	0	0	0	1	0	..	0,8863
..	..	..	..	..	..	..	..
9	0	0	5	0	0	..	0,1559
..	..	..	..	..	..	..	..
Totali			<b>621</b>	<b>412</b>		..	
Err. Omiss.			<b>0,0081</b>	<b>0,0024</b>		..	

<b>MASSIMA VEROSIMIGLIANZA-FUZZY</b>							
	1	2	<i>Grano</i>	<i>Erba Med.</i>	5	..	Err. Com.
1	0	120	0	0	17	..	1,0000
2	0	209	0	0	0	..	0,5047
<b><i>Grano</i></b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>611</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>..</b>	<b>0,2177</b>
<b><i>Erba Med.</i></b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>400</b>	<b>2</b>	<b>..</b>	<b>0,0719</b>
5	0	0	0	0	537	..	0,1973
..	..	..	..	..	..	..	..
9	0	0	10	4	0	..	0,1559
..	..	..	..	..	..	..	..
Totali			<b>621</b>	<b>412</b>		..	
Err. Omiss.			<b>0,0161</b>	<b>0,0291</b>		..	

<b>MINIMA DISTANZA DALLA MEDIA</b>							
	1	2	<i>Grano</i>	<i>Erba Med.</i>	5	..	Err. Com.
1	396	0	0	0	1	..	0,6289
2	0	277	0	0	0	..	0,0315
<b><i>Grano</i></b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>478</b>	<b>351</b>	<b>0</b>	<b>..</b>	<b>0,6242</b>
<b><i>Erba Med.</i></b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>61</b>	<b>0</b>	<b>..</b>	<b>0,1408</b>
5	5	0	0	0	408	..	0,2892
..	..	..	..	..	..	..	..
9	0	0	143	0	0	..	0,3398
..	..	..	..	..	..	..	..
Totali			<b>621</b>	<b>412</b>			
Err. Omiss.			<b>0,2303</b>	<b>0,8519</b>			

**Tabella 4 - Valori di Accuratezza Globale e Indice K per le classificazioni ottenute con la Massima Verosimiglianza, la Massima Verosimiglianza-Fuzzy e la Minima Distanza dalla Media.**

ALGORITMO	Accuratezza globale	Indice K
Massima Verosimiglianza	0,9184	0,9079
Massima Verosimiglianza-Fuzzy	0,7801	0,7630
Minima Distanza dalla Media	0,6882	0,6591



**Figura 6 - Probabilità posteriore *erba medica* (a sinistra) e Probabilità posteriore *grano* (a destra) ottenuta su aree di verifica.**

Tra i metodi previsti da ENVI 4.1, per tale elaborazione è stato selezionato il K-Means (o Medie Mobili): l'algoritmo, dopo aver individuato delle classi medie uniformemente distribuite nello spazio n-dimensionale, effettua la clusterizzazione attribuendo ogni pixel alla classe con la media più vicina, di cui di volta in volta ricalcola la media stessa. Il processo, iterativo, termina quando non vengono più effettuate operazioni di assegnazione entro un numero di classi previste e le medie rimangono invariate [MacQueen, 1967, Tou e Gonzalez, 1974, Dermanis e Biagi, 2002]. La classificazione non supervisionata ha permesso inoltre la realizzazione di una libreria di firme spettrali relative ai peculiari ambienti costituenti il complesso sistema vallivo.

Dopo la fase di post-classificazione è stato possibile riconoscere, in base alla firma spettrale ricavata, non solo le varie tipologie di acque, ma anche quei particolari elementi paesaggistici caratterizzanti gli ambienti costieri ad elevato grado d'umidità, come acquitrini e argini.

### **Analisi e verifica dei risultati delle classificazioni Landsat**

La Figura 7 riporta, rispettivamente, (a) la classificazione fornita da ENVI per l'immagine Landsat7 (ETM+) acquisita in data 8/10/1999 e (b) per l'immagine Landsat 5 (TM) acquisita in data 12/10/1986. Nella prima sono state messe in evidenza sei tipologie di acque marine e continentali sulla base delle differenti risposte spettrali e delle preliminari conoscenze sull'ecosistema: *acque profonde*, *costiere*, *salmastre*, *salmastro-marine*, *acque con alto contenuto di sedimenti sospesi*, *fiume/canale*. È stato possibile identificare inoltre altre cinque classi d'informazione relative ad ambienti di transizione e continentali: acquitrini, argini-dossi, dossi-acquitrino, irriguo e terreno allagato.

Dall'analisi della Figura 7a si notano anche molte delle peculiarità di tale ambiente. Ad esempio si osserva come nella Valle Fattibello (si veda la Fig. 1 per la localizzazione) coesistono diverse classi relative agli ambienti umidi identificati. In particolare nell'area

centro-orientale, in corrispondenza dello sbocco del canale sub-lagunare, si può notare la presenza di acque di tipo marino-costiero segregate da acque salmastre e torbide. Tale situazione non è stata riscontrata negli altri specchi vallivi nonostante il fatto che, nel mese d'ottobre, normalmente i canali di comunicazione con il mare vengano utilizzati in fase di carico. Ciò indica come solo tale valle risenta dell'effetto diretto della marea, mentre le restanti porzioni vallive ricevono scarsi apporti di acque marine attraverso canali controllati da chiuse. Poiché l'algoritmo è stato calibrato per estrarre informazioni dalle zone con maggiore contenuto d'acqua, le Saline (situate a sud della Valle Fattibello) risultano incluse tra le aree non classificate, evidenziando un sostanziale prosciugamento di tale ambiente.

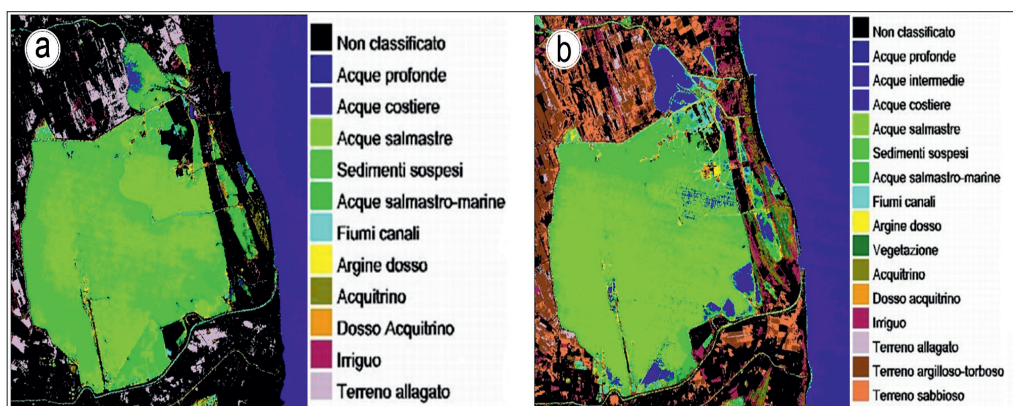
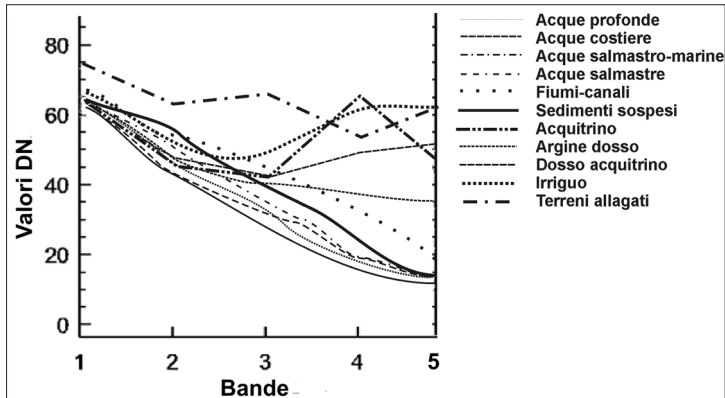


Figura 7 – (a) classificazione non supervisionata dell'immagine Landsat7 (ETM+) con algoritmo K-Means nell'area delle Valli di Comacchio: le classi predominanti all'interno del corpo idrico principale sono *acque salmastre*, *sedimenti sospesi* e *acque salmastro-marine*; (b) Classificazione non supervisionata dell'immagine Landsat 5 (TM) con algoritmo K-Means nell'area delle Valli di Comacchio: rispetto alla mappa precedente sono presenti 4 classi aggiuntive e risulta maggiormente estesa la classe *acque salmastre* all'interno del corpo idrico principale.

Una situazione analoga si è verificata per una parte del complesso delle Valli Meridionali (localizzate in Fig. 1), utilizzato per l'allevamento ittico estensivo privato, nel quale è inoltre riscontrabile la presenza di acque fluviali, derivanti dalla naturale infiltrazione dal fiume Reno e dall'approvvigionamento forzato per scopi ittici. Infine, nelle lagune salmastre collocate tra i cordoni sabbiosi che separano le Valli dall'Adriatico, sono maggiormente presenti delle acque classificate come *salmastro-marine*, riscontrabili anche in altri bacini chiusi (nella porzione orientale e nel complesso meridionale) e nella Valle Fattibello. La maggiore trasparenza di tali acque rispetto alle salmastre può derivare sia dal mescolamento con acque marine (Valle Fattibello), dall'infiltrazione di queste ultime attraverso cordoni sabbiosi in bacini lagunari (Vene e Ancona di Bellocchio), e dal mescolamento di acque fluviali in bacini chiusi (Valli Meridionali). La più vasta zona ad acquitrino è stata riscontrata nell'area a sud del canale Bellocchio, dove fino agli anni '60 era presente la foce del Reno.

La possibilità di discriminare tra le classi di acque mostrate in Figura 7a è dimostrata dall'analisi delle firme spettrali che viene mostrata in Figura 8, che mostra una risposta variabile soprattutto nelle bande 4 e 5. Tra le *acque profonde*, *costiere*, *salmastre* e di *fiume*, si

riscontra un progressivo aumento della discriminazione delle classi nelle bande 2, 3 e 4, che può indicare un diverso aumento del contenuto di sedimenti, di microalghe e una differente torbidità, comunque crescente. Interessante anche notare il picco nella banda 4 per la classe *acquitrino* indicante l'elevata presenza di biomassa.



**Figura 8 - Risposte spettrali riscontrate nell'immagine Landsat 7 e relative alle undici classi individuate mediante classificazione non supervisionata.**

La successiva classificazione, ottenuta dai dati forniti dal Landsat 5 e seguendo lo stesso approccio, ha fornito alcuni elementi utili ad una migliore comprensione delle dinamiche in atto (Fig. 7b).

In tale immagine, pur applicando gli stessi parametri per l'algoritmo di clusterizzazione, le aree non classificate risultano essere nettamente inferiori, permettendo l'individuazione di 4 nuove classi d'informazione oltre alle precedenti: *acque intermedie*, *vegetazione*, *terreno argilloso-torboso*, *terreno sabbioso*. Sono facilmente distinguibili i terreni sedimentari con tessitura argillosa-torbosa da quelli sabbiosi, grazie alla loro differente capacità di trattenere l'acqua, che ristagna nei primi e percola più rapidamente nel sottosuolo nei secondi. L'esistenza di queste tipologie di suolo è ampiamente documentata dalla bibliografia esistente [Amorosi et al., 2003; Bondesan, 1990; Bondesan et al., 1999; Lenzi, 1993; Valpreda, 1993] anche se, va ancora sottolineato, i risultati forniti dalla classificazione devono essere sempre commentati in relazione all'epoca di acquisizione dei dati. La possibilità di discriminare tali proprietà dei suoli è dovuta sostanzialmente all'elevato contenuto d'umidità, riscontrato per quel periodo, a causa delle abbondanti precipitazioni [ARPA, 1997; ARPA, 2002]. In Figura 9 la presenza di acque segregate, di natura diversa, evidenzia gli scarsi ricambi idrici esistenti tra tali specchi vallivi. Si può notare la presenza di acque dolci nelle vasche settentrionali della Salina e del tipo salmastre, con alto contenuto di sedimenti, nella porzione meridionale del bacino.

Anche l'analisi dei dati relativi all'immagine Landsat 4 (per la quale è ridondante riportare i risultati) evidenzia alcune caratteristiche interessanti. In particolare è notevole l'estensione dell'area emersa non classificata, con un minor numero di classi d'informazione rilevate ad indicare un minore contenuto d'umidità dei suoli. In effetti tale immagine è relativa al mese di luglio 1991, di norma periodo poco piovoso. La verifica dei dati ottenuti dell'elaborazione di immagini acquisite lungo il periodo 1986-1999 è possibile solo con un attento studio

multisetoriale del territorio e con la consultazione di archivi storici di dati e di diverse fonti bibliografiche. La dinamicità dei fenomeni e l'evoluzione temporale degli stessi infatti non consente l'individuazione preliminare di training sites e di aree sulle quali effettuare la verifica dei risultati dopo la classificazione non supervisionata.

In effetti conferme relative all'assetto idrografico ed idrogeologico evidenziati in questo lavoro sono riportate in Bondesan [1989], Barili et al. [1993], Bucci [1993], Costa [1999], Viaroli e Giordani [2001]. L'interpretazione dei risultati ottenuti in termini di tipologia delle acque classificate trova conferme negli studi svolti da Sorokin e Bilio [1981], Olivieri et al. [1991], Laguna [1996], Sorokin et al. [1996], seppur nell'ambito di una variabilità stagionale dei fenomeni, e nei rapporti ARPA [2002] dove si possono trovare tutti i dati relativi alle principali caratteristiche chimico-fisiche dei corpi idrici e meteo-marini. Altre informazioni di notevole utilità nella caratterizzazione del sistema vallivo sono derivate dall'analisi degli studi della Regione Emilia Romagna [1995] ed ARPA [1997].

## Conclusioni

L'esperienza condotta dimostra come l'uso congiunto di dati provenienti da sensori multispettrali diversi sia utile nella caratterizzazione di realtà naturali complesse, nelle quali coesistono ambienti emersi e sommersi, interagenti tra loro attraverso processi di scambio molto frequenti (per esempio quelli legati ai cicli tidali) o più rarefatti nel tempo (come quelli tipicamente stagionali). La variabilità e la dinamicità di tali ambienti rendono necessario l'utilizzo contemporaneo di dati satellitari differenti, sia in termini di risoluzione temporale che spaziale e spettrale. Nel caso analizzato, i dati ASTER si sono rivelati utili nello studio dell'uso del suolo (si ricorda ancora l'assenza della banda nel blu in tale sensore) mentre quelli Landsat negli ambienti sommersi ed acquitrinosi. Di conseguenza la successiva fase di validazione dei risultati forniti dalla classificazione si è sviluppata secondo due differenti percorsi. In particolare, nelle indagini terrestri possono essere utilizzate le consuete verifiche basate sul calcolo della matrice di confusione, mentre per gli ambienti acquatici occorrono osservazioni a terra, che possono essere disponibili, puntualmente, grazie a campionamenti o monitoraggi eseguiti da Agenzie o Enti deputati alla salvaguardia dell'ecosistema. Un limite, che potrebbe compromettere l'analisi, rimane quello relativo al momento di acquisizione dei dati. Dovendo rappresentare i fenomeni di maggiore interesse, le immagini devono essere acquisite in epoche rilevanti: è richiesta quindi una programmazione accurata, presupponendo una conoscenza a priori dell'ambiente da studiare e dei principali processi che si svolgono al suo interno. In definitiva, tutti questi elementi suggeriscono una preliminare ed attenta fase di progettazione del lavoro che va dalle indagini conoscitive a terra alla strategia di acquisizione dei dati. Il tutto per sfruttare al massimo le potenzialità del telerilevamento satellitare ed evitare quegli studi condotti unicamente per la disponibilità di dati di archivio che potrebbero non essere adatti allo scopo.

## Ringraziamenti

Si ringrazia per la collaborazione l'Unione Agricoltori della Provincia di Ravenna che ha fornito i dati relativi alle dichiarazioni PAC oltre alle competenze del personale (nella persona del dott. Danilo Verlicchi). I commenti dei due revisori hanno consentito un sostanziale miglioramento dei contenuti del manoscritto.

## Bibliografia

Amorosi A., Centineo C., Colalongo M.L., Pasini G., Sarti G., Vaiani S.C. (2003) - *Facies Architecture and latest Pleistocene-Holocene depositional history of the Po delta (Comacchio area), Italy*. Journal of Geology, 111: 39-56.

- ARPA (1997) - *Qualità ambientale nel Parco Del Delta del Po – Principali fonti di emissione in atmosfera e parametri meteorologici*. (Edito da Ghigli E., Strocchi V.), resoconto della giornata di studio, Comacchio.
- ARPA (2002) - *Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2000*. Bologna, 9, 32-39.
- Barbarella M., De Giglio M., Mancini F. (2005) - *I dati ASTER: indagini di carattere ambientale nell'area emiliano – romagnola*. Atti 9a Conferenza Nazionale ASITA, Catania 10-15 Novembre 2005, 217-223 Vol. 1.
- Barbarella M., De Giglio M., Mancini F. (2006) - *Monitoraggio del territorio rurale nell'area emiliano-romagnola mediante dati ASTER*. Atti del Workshop "CITIMAP – Il telerilevamento per un'agricoltura sostenibile", Piacenza, 20 Aprile 2006.
- Barilli L., Lenzi G., Mazzone N., Moretti L., Olivieri P., Tesini E., Valpreda E., Vincenzi D. (1993) - *Ricerche idrogeologiche nelle Valli di Comacchio*. ENEA, Bologna.
- Bondesan M. (1989) - *Condizioni e problemi attuali del territorio ferrarese, da Terre ed acqua*. Le bonifiche ferraresi nel delta del Po, 235-236.
- Bondesan M. (1990) - *L'area deltizia padana: caratteri geografici e geomorfologici*. In "Il Parco del Delta del Po, studi e immagini - L'ambiente come risorsa", Spazio Libri ed., Ferrara, 1:9-48.
- Bondesan M., Calderoni G., Cattani L., Ferrari M., Furini A.L., Serandrei Barbero R., Stefani M. (1999) - *Nuovi dati stratigrafici, paleoambientali e di cronologia radiometrica sul ciclo trasgressivo-regressivo olocenico nell'area deltizia padana*. Annali Univ. Ferrara, 8:1-34.
- Bucci M. (1993) - *Bilancio idrologico delle Valli di Comacchio*. Atti del seminario "Attività in campo idrologico, idrogeologico e geologico". ENEA, Bologna, 137-155.
- Burrough P.A. (1989) - *Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation*. Journal of Soil Science, 40(3):477-492.
- Costa M. (1999) - *Zone umide costiere della Regione Emilia-Romagna*. Relazione sulla gestione attuale delle zone umide (modulo 3), pp. 67.
- Dermanis A., Biagi L. (2002) - *Telerilevamento, Informazione territoriale mediante immagine da satellite*. Casa Editrice Ambrosiana.
- Dubois D., Prade H. (1980) - *Towards fuzzy differential calculus, Fuzzy Sets and Systems*. pp 1-17, 105-116, 225-233.
- Dubois D., Prade H. (1982) - *Fuzzy Set and System: Theory and applications*. Academic Press, New York.
- Kääb A., Huggel C., Paul F., Wessels R., Raup B., Kieffer H., Kargel J. (2002) - *Glacier monitoring from ASTER imagery: accuracy and applications*. Proceedings of EARSeL-LISSIG-Workshop - Observing our Cryosphere from Space, Bern, March 11 – 13, 2002.
- Laguna (1996) - *Comacchio: la qualità delle acque vallive*. Laguna, 1:10–13.
- Lenzi G. (1993) - *Ricostruzione del modello geologico del sottosuolo nelle Valli di Comacchio sulla base dei sondaggi eseguiti all'interno ed al contorno delle residue Valli, considerazioni stratigrafiche, litologiche, geotecniche e mineralogiche*. ENEA, Bologna, 123 pp.
- MacQueen J.B. (1967) - *Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations*. Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley, University of California Press, 1:281-297.
- Olivieri P., Barilli L., Mazzone N., Silingardi D., Tesini E., Zanini G., Malaguti A., Gness A. (1991) - *Qualità delle acque nelle Valli di Comacchio*. ENEA, Bologna, 55 pp.
- Regione Emilia-Romagna, Servizio Meteorologico Regionale (1995) - *I numeri del clima della Regione Emilia-Romagna*. (a cura di G. Di Dio, S.E.L.C.A.) Firenze, 120 pp.

- Sorokin Y.I., Bilio M. (1981) - *Studies of microbial sulfate reduction and microplankton in the fish culture ponds of Comacchio region*. Biology of the sea. Vladivostok, 2:50-58.
- Sorokin Y.I., Dallochio F., Gelli F., Pregolato L. (1996) - *Phosphorus metabolism in anthropogenically transformed lagoon ecosystem: the Comacchio lagoons* (Ferrara, Italy). Journal of Sea Research, 35(4):243-250.
- Tou J.T., Gonzalez R.C. (1974) - *Pattern recognition principles*. Applied Mathematics and Computation. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1974.
- Valpreda E. (1993) - *I depositi quaternari costituenti l'acquifero freatico delle Valli di Comacchio*. Atti del seminario "Attività in campo idrologico, idrogeologico e geologico". ENEA, Bologna, 60-87.
- Viaroli P., Giordani G. (2001) - *Valli di Comacchio, North Adriatic Coast of Italy*. LOICZ R&S, 19, 46-49.
- Wang F. (1990) - *Fuzzy Supervised Classification of Remote Sensing Image*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 28, 194-201.

**Manoscritto ricevuto il 20/06/2007, accettato il 18/08/2008**