



# Rivista italiana di TELERILEVAMENTO

n° 20 / 21 - Settembre 2000 / Gennaio 2001



Spedizione in Abbonamento postale 70% Filiale di Firenze

ASSOCIAZIONE ITALIANA DI TELERILEVAMENTO

---

**In copertina:**

Il Vesuvio ripreso dallo strumento MIVIS (Multispectral Infrared/Visible Imaging Spectrometer) montato sulla piattaforma aerea Casa 212 cc della Compagnia Generale Ripreseeree di Parma.

Il volo è stato realizzato per conto del Consiglio Nazionale delle Ricerche "Progetto LARA" alle 12.30 del 07/11/95 da una quota assoluta di 2300 metri con 284° di rotta magnetica.

L'immagine tridimensionale mostra una sintesi RGB "falso colore" della caldera principale del vulcano. La composizione in falsi colori è stata ottenuta dalle bande MIVIS 21-18-7 corrispondenti rispettivamente agli intervalli di lunghezza d'onda di 1.150 - 1.200 nm per la banda 21, 0.773 - 0.793 nm per la banda 18 e 0.553 - 0.573 per la banda 7. La visualizzazione 3D è stata ottenuta attraverso la sovrapposizione dei dati MIVIS, precedentemente georeferenziati, ad un modello digitale del terreno con passo di 40 metri.

La correzione geometrica e di conseguenza la georeferenziazione dei dati è avvenuta con un adattamento (warping) e successivo ricampionamento dell'immagine sulla base di punti verità a terra (Ground Control Points - GCPs) ottenuti dalla comparazione con Ortofoto digitale a colori. Il metodo di warping impiegato è stato quello della triangolazione di Delaunay; attraverso l'utilizzo di circa 110 punti GPCs, distribuiti su 755 x 1459 pixel. (Aut. SMA n°568 del 18/12/95).

---

## Prefazione

I recenti sviluppi delle applicazioni del Telerilevamento aero-spaziale hanno determinato una rapida evoluzione nell'uso dei sistemi di rilevamento. Il Telerilevamento, la Fotogrammetria Digitale, il rilevamento geo-topo-cartografico, la cartografia numerica, i Sistemi Informativi Territoriali si sono progressivamente avvicinati e, in alcuni aspetti, integrati fino a diventare decisamente complementari tra loro.

L'Associazione Italiana di Telerilevamento (AIT), insieme con le altre Associazioni SIFET, AIC e AM/FM GIS Italia, ha compreso che, per un omogeneo sviluppo e per una diffusione ad ampio spettro delle tecniche e delle applicazioni del Telerilevamento, è necessario il confronto e la collaborazione con tutti coloro che in Italia operano nel settore dell'Informazione Geografica.

E' nata quindi nel marzo 1998 la Federazione ASITA (Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali) con lo scopo di organizzare un evento annuale comune e di attivare il dialogo con le istituzioni al fine di realizzare una seria normativa sui temi dell'Informazione Geografica e quindi anche del Telerilevamento. In tale ambito è stato possibile, per i Soci delle quattro Associazioni federate, conoscersi, confrontarsi, promuovere e diffondere un corretto uso dell'informazione geografica. In questo contesto, tuttavia, i temi presentati non possono sempre essere sviluppati con il necessario dettaglio e rigore scientifico, come può avvenire invece in un seminario tematico in cui gli specialisti del settore presentano le proprie attività ed i risultati ottenuti.

E' questo il caso del seminario: "I rilevamenti iperspettrali MIVIS: ricerca e applicazioni" tenutosi a Colorno il 7-8 giugno 2000, le cui comunicazioni sono presentate, dopo attenta revisione, in questo numero speciale della Rivista Italiana di Telerilevamento.

Ci auguriamo che in ambito AIT il susseguirsi di queste iniziative tematiche possa contribuire a migliorare la conoscenza sull'Informazione Geografica e, per l'aspetto che ci sta più a cuore, sul Telerilevamento.

Mario A. Gomasca  
*Presidente ASITA*

Giovanmaria Lechi  
*Presidente AIT*

---

---

## Introduzione

Il sensore iperspettrale MIVIS è operativo sul territorio italiano da circa sei anni nell'ambito delle attività dell'Istituto sull'Inquinamento Atmosferico del CNR. I rilievi effettuati con questo strumento hanno permesso di approfondire la conoscenza del territorio e di consentirne una migliore gestione. Per l'interesse dimostrato verso questi dati da diverse categorie di utenti si è ritenuto necessario dare vita ad un confronto sui risultati ottenuti nei diversi settori applicativi della geologia, della botanica, dell'archeologia, dell'agronomia, delle scienze del mare ed atmosferiche, della pedologia e dell'assetto urbano. A tal fine l'Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, in collaborazione con l'Associazione Italiana di Telerilevamento, ha coordinato il seminario "I rilevamenti iperspettrali MIVIS: ricerca e applicazioni" tenutosi a Colorno il 7-8 giugno 2000.

Il seminario ha fornito spunti ed approfondimenti per una ricerca sempre più avanzata sia nelle differenti discipline scientifiche, che nell'operatività del sensore MIVIS. In questa occasione è stato inoltre possibile un confronto diretto tra il mondo della ricerca e quello delle amministrazioni pubbliche e private che ha permesso di comprendere meglio le reciproche esigenze, dimostrando la necessità di continuare il confronto sulla ricerca al fine di ampliare i campi di applicazione del MIVIS. E' importante evidenziare che al seminario si siano registrati più di ottanta partecipanti, molti dei quali giovani, studenti e ricercatori.

La Rivista italiana di Telerilevamento ospita in questo numero speciale gli articoli scaturiti dai lavori del seminario di Colorno, con l'intento di fornire a tutti coloro che operano nell'ambito del Telerilevamento un'informazione accurata delle tematiche affrontate con l'utilizzo di dati MIVIS. La qualità dei lavori rivela la competenza della comunità scientifica italiana nel valorizzare l'informazione territoriale contenuta nei 102 canali spettrali di questo sensore e l'interesse della stessa a sviluppare applicazioni mirate ad una più corretta gestione del territorio in collaborazione con le autorità preposte.

Un ringraziamento particolare è rivolto alla Compagnia Generale Ripreseeree e al GISFORM che hanno ospitato il seminario.

**Ivo Allegrini**

*Direttore*

Istituto sull'Inquinamento Atmosferico del CNR

**Ruggero Casacchia**

*Coordinamento tecnico-scientifico*

CNR- Istituto Inquinamento Atmosferico

---

## Presentazione

Da oltre trent'anni il Gruppo della Compagnia Generale Ripreseeree S.p.A. (C.G.R.) è sinonimo di qualità e innovazione tecnologica; questo binomio, oggi più di ieri, è indispensabile per rispondere in modo positivo e propositivo alle esigenze del mercato sempre più esigente, selettivo e concorrenziale.

Il Gruppo, con circa 150 tecnici altamente specializzati alle proprie dirette dipendenze ed un fatturato annuo di oltre 30 miliardi, è la maggiore realtà privata esistente in Italia, e una tra le prime in Europa, che operano nel campo del rilevamento del territorio.

Le società del gruppo, unite nel Consorzio Compagnie Aeronautiche, partecipano come parte privata al CISIG (Consorzio per l'innovazione dei sistemi informativi geografici) unitamente all'Università di Parma, al C.N.R. (Progetto LARA) ed al GISFORM (Associazione per la formazione e ricerca applicata sui sistemi informativi geografici) con sede a Colorno.

Il CISIG dispone di un laboratorio aviotrasportato equipaggiato con un iperspettrometro MIVIS, unico del suo genere al mondo, che consente di eseguire analisi del territorio estremamente sofisticate: dal controllo delle temperature al suolo, all'individuazione di specifici prodotti chimici e biologici e di fonti di inquinamento, al controllo di fenomeni morfologici, agronomici, idrologici, pedologici e vegetazionali.

La sensibilità all'innovazione tecnologica non può prescindere dall'interesse e dall'attenzione alla crescita culturale ed alla formazione nei settori innovativi. E' per questo che la Compagnia Generale Ripreseeree, da sempre consapevole dell'importanza dei momenti di formazione e approfondimento scientifico, ha entusiasticamente aderito all'idea di organizzare il seminario su "I rilevamenti iperspettrali MIVIS: ricerca e applicazioni" e di pubblicare gli articoli presentati. Il contributo di esperienze di ricerca e di applicazione è dimostrazione del ruolo che, nella visione dell'azienda che ho l'onore di presiedere, il settore privato è chiamato a svolgere in un mondo in cui l'aggiornamento e lo sviluppo continuo sono condizioni indispensabili di stabilità e di crescita.

**Licinio Ferretti**

Presidente  
della Compagnia Generale Ripreseeree

# L'evoluzione, gli obiettivi e i ruoli del Laboratorio Aereo per Ricerche Ambientali (LARA) del CNR nell'ambito del telerilevamento iperspettrale

Carlo Maria Marino<sup>(1)</sup>

Il Bacino del Mediterraneo, con la sua grande varietà di morfologie, litologie, suoli, vegetazione, microclimi, tipologie di acque marine ed interne, è caratterizzato da una serie di ecosistemi in cui si inseriscono insediamenti e sovrastrutture umane. Lo studio di queste complesse realtà territoriali è ormai diventato di rilevante importanza per l'osservazione ed il mantenimento di equilibri essenziali per una buona qualità del nostro ambiente e per uno sviluppo realmente sostenibile.

Al fine di offrire alla comunità scientifica nazionale ed internazionale un'attività di supporto alla ricerca ambientale nell'ambito delle misure da remoto di parametri fisici della superficie terrestre, il CNR ha dato inizio, nel 1991, al Progetto LARA (Laboratorio Aereo per Ricerche Ambientali) finalizzato alla ripresa di dati telerilevati da piattaforma aerea.

Il Progetto LARA ha acquisito e gestisce il sistema avanzato di ripresa elettronica a scansione MIVIS (Multispectral Infrared/Visible Imaging Spectrometer) AA5000, capostipite di una nuova generazione di apparati sensoriali iperspettrali, che opera con una elevata risoluzione spaziale e spettrale, utilizzando come supporto aereo un bimotore turboelica CASA 212/200.

Il Progetto LARA, inizialmente inserito all'interno del Progetto Strategico "Clima, Ambiente e Territorio del Mezzogiorno" è attualmente riconosciuto come Sezione dell'Istituto sull'Inquinamento Atmosferico del CNR. Questa stabilizzazione strutturale, contemporanea all'inserimento nel consorzio di ricerca CISIG, ove convivono in modo sinergico il mondo della ricerca pubblica, dell'università e dell'industria, costituisce un'ulteriore conferma della solidità dell'impianto progettuale, finalizzato ad un'utenza e ad applicazioni diversificate.

Nel panorama internazionale del telerilevamento iperspettrale da piattaforma aerea il LARA con il sensore MIVIS rappresenta un punto di confronto e di paragone attestato da una numerosa serie di riconoscimenti ufficiali. In questo contesto è doveroso riconoscere a tutti colo-

ro che, in questi anni, hanno operato internamente ed esternamente alla struttura, il merito di un risultato scientifico e operativo di sicuro rilievo.

La notevole mole di lavoro svolto e i riscontri in ambito operativo sono da tempo sotto gli occhi della comunità scientifica nazionale e internazionale nonché degli operatori politici ed amministrativi che, a vari livelli, si avvalgono oggi della operatività che il CNR ha conseguito e faticosamente mantiene in questo settore di primaria rilevanza strategica negli studi e nelle applicazioni inerenti il territorio e l'ambiente.

## Il Progetto LARA

Il Progetto LARA è stato indirizzato al perseguimento dei seguenti obiettivi:

- Creare un'attività di supporto alla ricerca avanzata nel settore delle misure da piattaforma aerea mediante l'acquisizione e la messa a disposizione della comunità scientifica, nazionale ed internazionale, del sensore MIVIS; quest'ultimo opera con un'elevata risoluzione geometrica e spaziale, registrando simultaneamente 102 canali nell'intervallo spettrale compreso tra 0.43 e 12.7 micron e consente pertanto lo studio dei parametri chimico-fisici della superficie terrestre con un estremo dettaglio operativo;
- Realizzare una stazione di conversione dei dati a terra (presso la sede di Pomezia) denominata MIDAS (*Multispectral Interactive Data processing and Analysis System*) in grado di distribuire in tempi brevi le riprese effettuate sotto forma di dati geometricamente e radiometricamente corretti;
- Processare dati provenienti anche da altri sensori, in modo da consentire alla comunità scientifica nazionale di poter accedere velocemente a misure effettuate in collaborazione con Enti Stranieri ed eseguite con apparati di proprietà degli stessi;
- Essere in grado di digitalizzare informazioni da supporti fotografici e cartacei al fine di rendere disponibili dati ad integrazione delle misure iperspettrali o di altri sensori;
- Coadiuvare, internamente al CNR, iniziative di telerilevamento a livello applicativo, su filoni ben determinati, anche mediante uno o più "call for experiment", estensibili anche a livello internazionale, finalizzati all'utilizzo delle risorse del Progetto;
- Collocarsi ad un livello di eccellenza, sia sperimenta-

<sup>1)</sup> CNR - Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, Sezione LARA, Pomezia e Dip. Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università degli Studi di Milano-Bicocca.

Ricevuto il 18/07/00 - Accettato il 14/10/00

le che operativo, in ambito internazionale, consentendo alla comunità scientifica nazionale una presenza "guida", o almeno paritetica, in programmi di largo respiro e prestigio, con particolare riferimento all'area mediterranea:

- Promuovere e condurre campagne di raccolta di dati integrativi e di supporto per aree di particolare rilevanza (ad esempio, il programma SIDERA 92': *Southern Italy Demonstration of Remote sensing Applications*) condotte mediante riprese con Radar ad apertura sintetica (SAR: *Synthetic Aperture Radar*) e con voli IRFC (Infrarosso Falsi Colori) da alta quota.

### Gli aspetti realizzativi.

Il primo passo nella realizzazione del progetto LARA è stato l'individuazione di una piattaforma aerea che potesse essere configurata come "laboratorio aereo", che potesse ospitare sia la strumentazione scelta che consentire la presenza di personale a bordo per seguire la fasi di acquisizione dei dati. Tale esigenza ha portato ad individuare l'utilizzo di una piattaforma che, sotto forma di uno "scientific cargo" (il bimotore CASA 212/200 della Compagnia Generale Ripresearee di Parma) ben si prestasse ad un uso per missioni di carattere scientifico, in quanto in grado di offrire uno spazio dove ricercatori e tecnici possono sperimentare gli apparati da essi realizzati e/o modificati (Fig.1).

### Acquisizione dei dati da piattaforma aerea

Nel Progetto LARA è stato creato un "mission branch" per discutere con gli interessati tutti gli aspetti operativi di ogni ricerca proposta e di valutare le eventuali modifiche da apportare agli apparati di misura sia, eventualmente, alla piattaforma aerea.

In questa fase vengono definiti i "punti critici" di ciascuna missione e vengono stabilite le modalità operative quali: tipologia dei sensori, periodo dell'anno, ora dei sorvoli, quota di ripresa, operazioni di *play-back*, correzioni geometriche e radiometriche, supporto di registrazione e modalità di diffusione finale dei dati.

Successivamente questo insieme di informazioni prende una duplice strada:

- parte di esse viene elaborata dal reparto che cura la previsione, la pianificazione e il coordinamento della fase di acquisizione delle informazioni; ivi comprendendo anche i rapporti con le squadre che operano a terra, ad esempio per misure di taratura e di campionamento "in situ";
- altre sono inviate al "data management branch" al fine di predisporre in anticipo le operazioni di pre-processing riferite alla specifica missione, nonché il *final delivery* dei dati con le eventuali autorizzazioni allo studio e alla divulgazione richieste dalle Autorità Militari.

I ricercatori interessati intervengono, per gli argomenti di specifica competenza, in ogni fase descritta in precedenza.

### La "ground station" di Pomezia

La stazione di Pomezia è stata concepita sia come un centro di supporto alla ricerca nello specifico settore del tele-rilevamento multi/iperspettrale, che come centro "aperto", per fornire una competente attività di training e di assicurare quel complesso di operazioni di documentazione ed integrazione indispensabili per un corretto impiego ed una ampia diffusione dei dati telerilevati.

A tale riguardo presso la stazione LARA di Pomezia è presente un sistema avanzato per la ripresa, memorizzazione e stampa di immagini b/n e a colori ad alta risoluzione, in grado di digitalizzare e processare dati provenienti, sotto forma di supporti fotografici o cartacei, da altre missioni (es.: Radar, Infrarosso Falsi Colori, Bianco e Nero d'alta quota). Questo sistema può effettuare la lettura di supporti fotografici sia in riflessione sia in trasmissione (fotografie su supporto cartaceo o su supporto trasparente positivo e/o negativo) e convertire i dati raccolti in formato *Computer Compatible Tape* (CCT).

La stazione di Pomezia gestisce il processamento, l'archiviazione e la distribuzione del dato MIVIS mediante il sistema software MIDAS.

### MIVIS

Il MIVIS è uno strumento modulare costituito da 4 spettrometri che riprendono simultaneamente la radiazione proveniente dalla superficie terrestre nel visibile (20 bande tra 0.43-0.83  $\mu\text{m}$ ), nell'infrarosso vicino (8 bande tra 1.15-1.55  $\mu\text{m}$ ), nell'infrarosso medio (64 bande tra 2.0-2.5  $\mu\text{m}$ ), e nell'infrarosso termico (10 bande tra 8.2-12.7  $\mu\text{m}$ ), per un totale di 102 canali. Lo strumento può essere considerato uno spettrometro ad immagine di seconda generazione le cui bande sono state scelte per soddisfare le necessità della ricerca per applicazioni avan-



Figura 1 - Il bimotore CASA 212/200 della Compagnia Generale Ripresearee di Parma.

zate in discipline scientifiche, coinvolte in studi di telerilevamento ambientale, come la Botanica, l'Agronomia, la Geologia, la Pedologia, l'Idrologia, l'Oceanografia e le Scienze Atmosferiche.

La ripresa simultanea di un alto numero di canali con un'alta risoluzione spettrale e spaziale ha richiesto l'utilizzo di una tecnologia molto avanzata per le ottiche, i sensori, ed il processamento elettronico e la registrazione di una grande quantità di dati. Nella fase di progettazione del sistema particolarmente complessa si è rivelata la combinazione di un'alta risoluzione nella regione spettrale dell'infrarosso medio con una buona sensibilità nella regione dell'infrarosso termico. La soluzione più efficiente è stata quella di utilizzare un sistema ottico a scansione meccanica con un sensore per ogni banda spettrale e con l'uso di un *Field Stop* comune per tutti i canali. In tal modo è stato anche risolto il problema dell'allineamento dei pixel che generalmente interessa altri strumenti iperspettrali che utilizzano più spettrometri.

I dettagli delle caratteristiche principali dello strumento sono riportate negli articoli della copiosa bibliografia a riguardo.

Il MIVIS è costituito da cinque componenti distinte (sottosistemi) in tre delle quali sono stati inseriti i computer di controllo che effettuano il monitoraggio delle operazioni per le quali i sottosistemi sono responsabili. Le tre CPU inviano comandi ed informazioni sullo stato dei vari sottosistemi attraverso una rete di comunicazione locale ethernet. Attraverso il registratore VLDS il sistema MIVIS registra tutti i dati per la loro successiva analisi, archiviazione e distribuzione attraverso il sistema MIDAS (*Multispectral Interactive Data Analysis System*).

### **MIDAS**

La stazione di conversione MIDAS del CNR in Pomezia implementa un sistema di pre-processing notevolmente evoluto, in grado di effettuare le correzioni geometriche e radiometriche necessarie alla produzione di dati rigorosamente traducibili in misure quantitative di parametri ambientali e territoriali. Questo sistema è stato sviluppato su piattaforma UNIX Silicon Graphics (SGI).

Le funzioni MIDAS per il pre-processing dei dati MIVIS comprendono calibrazione radiometrica, eliminazione di eventuali rumori sistematici introdotti accidentalmente nei dati, correzioni geometriche ed atmosferiche. La calibrazione radiometrica utilizza le sorgenti di riferimento dello strumento ed i più recenti dati di calibrazione in laboratorio del sistema MIVIS. La correzione geometrica rettifica le immagini per eliminare sia le distorsioni di panorama dovute alla geometria dello scanner che gli effetti dovuti a perturbazioni nella posizione e attitudine della piattaforma aerea. Per quest'ultima operazione il sistema MIDAS utilizza i dati GPS e dei riferimenti inerziali registrati per ogni linea di scansione nei dati MIVIS.

Il MIDAS, oltre al *pre-processing* del dato MIVIS, offre all'utenza un potente sistema di analisi per dati iperspettrali. L'elaborazione di dati iperspettrali richiede, come già accennato, un sistema di analisi con un'alto livello di interattività per il trattamento e la visualizzazione di grandi volumi di dati. MIDAS è un sistema che tratta il dato con una struttura tridimensionale (voxel) che permette trasferimenti di dati molto più veloci sia per il calcolo che per la visualizzazione a prescindere dalle dimensioni delle immagini. La possibilità di poter definire dei pacchetti logici tridimensionali di informazioni immagine rende possibile l'ottimizzazione delle elaborazioni nelle due dimensioni spaziali e nella dimensione spettrale, evitando di forzare tutti i dati in memoria con conseguente drastico abbattimento dell'efficienza del sistema.

### **Considerazioni conclusive**

Le missioni finora svolte a seguito di richieste effettuate da parte di istituzioni nazionali ed internazionali hanno raccolto dati per vari obiettivi di studio. Tra essi si ricordano: inquinamento da idrocarburi su terra e in mare, cartografia geologica ed osservazione dei fenomeni vulcanici attivi, dinamica e caratteristiche fisiche delle correnti marine, inquinamento costiero, valutazione della qualità di ambienti lagunari, discariche, archeologia, dinamica dei dissesti franosi, parchi naturali, contaminazione ambientale, stato idrico della vegetazione per studi di previsione della produzione agricola.

Nel corso della sua attività si può affermare che il Progetto LARA ha operato in linea con i presupposti che costituivano le motivazioni principali della sua istituzione. Il MIVIS ha registrato circa 850 Gigabytes di dati ed è correttamente inserito nella realtà di ricerca nazionale ed internazionale.

Le esperienze applicative in settori di rilevante interesse ambientale sono state oggetto di presentazione in diverse sedi istituzionali, ad esempio presso Commissioni Interparlamentari ad hoc, Commissari ad acta, Autorità di Vigilanza e Controllo.

Le possibilità di accesso e di utilizzo delle risorse offerte dal Progetto LARA, che presentano caratteristiche di unicità riconosciute ampiamente a livello nazionale ed internazionale, hanno finora soddisfatto, pur tra innumerevoli difficoltà, un gran numero di richieste con riprese MIVIS su un'ampia varietà di siti sia in territorio nazionale che estero.

L'implementazione inoltre delle capacità di pre-processing dei dati tramite l'acquisizione di due postazioni con caratteristiche specificatamente ottimizzate sulla base delle esperienze dei primi anni di lavoro, una sita in Pomezia ed una presso la Compagnia Generale Ripresaeree di Parma, garantiscono oggi una notevole velocizzazione delle operazioni di verifica, ispezione e delivery dei dati raccolti unitamente ai doverosi adempimenti richiesti dalle vigenti Leggi.

---

Attualmente, le nuove e numerose richieste di missione riguardano progetti di valenza Regionale, Nazionale ed Internazionale nonché la ripetizione del sorvolo MIVIS per alcune delle località nazionali già sorvolate per l'ottenimento di dati multitemporali.

### **Bibliografia essenziale**

**Avanzi G., Bianchi R., Cavalli R.M., Marino C.M., Pignatti S. e Pisacane G.C.** (1996) - *Geometric correction of airborne remote sensing data: an operational procedure to geocode MIVIS data*. Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition Technology, Measurement & Analysis, San Francisco, CA USA 24-27 June 1996, III: 229-238.

**Avanzi R. e Bianchi R., Cavalli R.M., Fiumi L., Marino C. M., Pignatti S.** (1996) - *Use of MIVIS navigational data for precise aircraft positioning and attitude*

*estimation*. Proc. EUROPTO, Remote Sensing for Geography, Geology, Land Planning, and Cultural Heritage, Taormina, Italy 23-26 September 1996, 2960: 184-192.

**Bianchi R., Cavalli R.M., Marino C.M., Pignatti S. e Pizzaferrì G.** (1995) - *Hyperspectral remote sensing: a new approach to environmental problems*. III International Congress Energy Environmental and Technological Innovations, Caracas, Venezuela, 5-11 Novembre, 1995, III: 381-386.

**Bianchi R. e Marino C.M.** (1994) - *CNR- Progetto LARA MIVIS/MIDAS sistema di acquisizione dati iperspettrali*. Atti del VI Convegno Nazionale A.I.T., Roma, 1-4 Marzo 1994, 43-46.

**Marino C.M.** (1993) - *Progetto L.A.R.A - C.N.R.* (Laboratorio aereo per Ricerche Ambientali), Rivista Italiana di Telerilevamento, 2: 6-8.

# Spettroscopia ottica con sistemi di telerilevamento: criteri e problemi

Ilaria Longhi<sup>(1)</sup> e Maria Sgavetti<sup>(1)</sup>

Vengono esposti concetti e procedure per caratterizzare spettralmente materiali geologici, utili per la interpretazione di dati immagine iperspettrali. Curve di riflettanza (2000-2500nm) misurate in laboratorio e rappresentative di minerali, rocce e croste di alterazione vengono utilizzate per simulare le risposte dei sensori e come endmembers per la analisi delle immagini. In mancanza di dati di terreno, questi vengono individuati usando per i profili spettrali da immagine le stesse procedure di analisi degli spettri di laboratorio. Viene fatta una prima valutazione di una recente ripresa MIVIS su litorali sabbiosi, evidenziando alcuni problemi legati alle non ottimali condizioni atmosferiche e forse anche alla calibrazione del sensore.

## Introduzione

È una curiosa coincidenza che questo incontro tra utilizzatori di dati MIVIS cada nel 15<sup>o</sup> anniversario del primo workshop sull'analisi dei dati Airborne Imaging Spectrometer (AIS), uno spettrometro a immagine ad alta risoluzione installato su piattaforma aerea, che ha rappresentato una importante svolta nel campo del telerilevamento. In quel convegno, venivano presentati i risultati preliminari di due anni di sperimentazione con immagini iperspettrali, dimostrando come fosse divenuta realtà la possibilità di identificare diversi materiali naturali e di visualizzarne la distribuzione areale con metodi di osservazione a distanza, realizzando ciò che già alla fine degli anni settanta era stato avviato con le prime individuazioni di minerali fatte utilizzando spettrometri montati su aereo [Vane e Goetz, 1985].

In quella stessa occasione, oltre ai promettenti risultati ottenuti in aree di interesse minerario e in aree vegetate, risultava però anche chiara la necessità di sviluppare nuove metodologie per la analisi di questo particolare tipo di dati. E in effetti, da allora molti progressi sono stati fatti con la elaborazione di appositi algoritmi e lo sviluppo di software per la analisi e classificazione dei dati iperspettrali, i quali, parallelamente, venivano acquisiti con strumenti sempre più perfezionati.

<sup>(1)</sup> Università degli Studi di Parma - Dipartimento di Scienze della Terra Parco Area delle Scienze, 157/A - 43100 Parma

Ricevuto il 29/06/00 - Accettato il 14/09/00

*Concepts and procedures for a spectral characterisation of geologic materials based on laboratory data are reported, useful for remote sensing hyperspectral image interpretation. Laboratory 2000-2500nm reflectance spectra diagnostic of minerals, rocks and alteration crusts are used to simulate hyperspectral sensor responses, and as endmembers for image analysis. When ground data are not available, the endmembers can be selected applying to image spectra the same procedure of analysis used for laboratory spectra. A first evaluation is made of a recent MIVIS survey on sandy littorals, and problems due to sensor calibration and unsuitable atmospheric conditions are pointed out.*

Di pari passo con questa evoluzione tecnologica e informatica, cresceva anche la esigenza di maggiori conoscenze riguardo il significato del dato iperspettrale. Infatti, è vero che questi dati rappresentano una curva di riflettanza spettrale (tra i 400 e i 2500nm) o di emittanza (tra 8 a 12mm), la cui natura è comparabile con quella di curve spettrali misurate in laboratorio; e infatti esistono in letteratura numerosi studi che mostrano come gli spettri acquisiti da remoto possano essere interpretati, analogamente ai dati di laboratorio, in base ai processi elettronici e vibrazionali che caratterizzano minerali ed altri materiali naturali. Ma è anche vero che tra le due categorie di dati esistono differenze di condizioni sperimentali, che richiedono diversi criteri di lettura delle informazioni contenute negli spettri.

Queste diverse condizioni sperimentali non riguardano solo la risoluzione spettrale (in genere, 1nm in laboratorio, 10nm per gli spettrometri a immagine), ma anche le condizioni radiometriche legate all'"ambiente", che, quasi ottimali in laboratorio, sono invece influenzate dalla geometria della ripresa e dalla trasmittanza atmosferica nelle riprese aeree. A questo si aggiunge la diversa risoluzione spaziale, con tutti i problemi derivanti dalla disomogeneità del pixel.

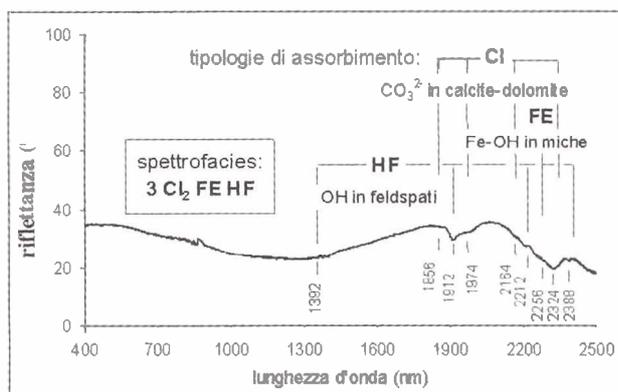
Queste difficoltà si sovrappongono inoltre al fatto che, nel caso più frequente, si ha a che fare con materiali di composizione complessa come, ad esempio, rocce e suoli, che consistono di associazioni di minerali, ciascuno dei quali contribuisce agli assorbimenti nella curva spettrale, formando a volte strutture composite con possibilità di fenomeni di convergenza spettrale tra materiali in realtà mine-

ralogicamente diversi. Questo porta alla necessità di approfondire la ricerca di base, per giungere ad una miglior conoscenza delle caratteristiche spettrali degli oggetti e per individuare specifici criteri di interpretazione da applicare alle immagini iperspettrali. In questo articolo, descriveremo brevemente alcuni aspetti delle nostre ricerche attinenti a questi problemi, e riguardanti in particolare il campo della spettroscopia ottica a diverse risoluzioni spettrali e le problematiche relative alla acquisizione da remoto, avendo come oggetto di analisi minerali, rocce e sedimenti [Chiari et al., 1994, 1997; Ferrari et al., 1996; Longhi et al., 2000a,b; Sgavetti et al., 1995, 1999].

### Caratterizzazione spettrale delle rocce

Questa rappresenta la prima fase di lavoro, che consiste in misure spettrali di laboratorio condotte su vari tipi di rocce e sedimenti provenienti da contesti geologici diversi. Le curve spettrali vengono dapprima analizzate con individuazione delle strutture di assorbimento dovute ai vari minerali componenti le rocce, e le strutture vengono interpretate anche col supporto di analisi petrografiche e mineralogiche sia qualitative che quantitative. Gli spettri di laboratorio vengono successivamente classificati in base a ricorrenti associazioni di strutture di assorbimento, giungendo ad una particolare suddivisione delle rocce in gruppi che rispecchiano le loro proprietà spettrali dominanti e secondarie (Fig. 1).

Come risultato, si vengono ad individuare specifiche associazioni di strutture spettrali che sono diagnostiche di un ben determinato gruppo di rocce (Tab. 1). Alcune di queste associazioni possono anche dar luogo a strutture di assorbimento complesse, risultanti dalla combinazione di bande di assorbimento particolarmente vicine tra loro, che richiedono appropriate analisi per la individuazione delle bande componenti.



**Figura 1** - Esempio di strutture di assorbimento, tipologie spettrali (associazioni di strutture) e spettrofacies individuate nello spettro di laboratorio di un carbonato, in questo caso un marmo impuro. Vedi didascalia della Tabella 1 per la spiegazione dei simboli.

**Tabella. 1** - Classi di spettrofacies rappresentative di diversi litotipi. CA, CAa, CD, CI: bande di assorbimento del gruppo carbonatico ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) rispettivamente in calcare, superficie esposta di calcare, dolomia e superficie esposta di dolomia; F, FY, FE: assorbimenti del ferro trivalente in diversi minerali; H: bande del gruppo O-H e H-O-H in siti definiti; W: assorbimenti dell'acqua in siti multipli non definiti; A: bande del gruppo Al-OH in minerali argillosi; HF: assorbimenti di O-H e H-O-H in feldspati alterati; MA: Mg-OH in rocce ferro-magnesiache; HG: H-O-H in gesso.

classi di spettrofacies			
rocce carbonatiche ed evaporitiche			
roccia fresca		superfici esposte	
CA FY H CA F H CA F H A CA F W CA W	calcari	CAa FY/H W(H) CAa FY/F W(H) CAa F H A CAa F W	
CA F H/W	dolomie	CI FY/F W	
HG F MT	evaporiti	HG F A	
rocce metamorfiche			
roccia fresca		superfici esposte	
CA CI FE HF	marmi	CA (HF) (F) CI FE HF (F)	
AM (FE) AM FE	quarziti e micascisti	AM (FE) (F) (L)	
HF HF FE HF (MA, FE, F) FE HF	gneiss e granofels 90% quarzo	HF (FE, F, MA) FE HF	
MA FE (HF) MA HF (FE)	rocce ferro-magnesiache	MA HF (FE, F, MA) MA (HF, FE)	

D'altra parte, solo per alcune rocce la mineralogia principale è anche spettralmente dominante nella regione VIS-SWIR, mentre molte rocce, in particolare le rocce silicee, possono essere spettralmente caratterizzate dagli assorbimenti dovuti a fasi mineralogiche secondarie. Di conseguenza, una classificazione spettrale in questa regione dello spettro elettromagnetico non necessariamente coincide con la classificazione petrografica dello stesso insieme di rocce, ed è quindi necessario stabilire una relazione tra i due criteri di classificazione. Problemi analoghi si

presentano, ovviamente, anche nel caso di suoli e sedimenti recenti, la cui caratterizzazione spettrale deve tener conto del fatto che essi consistono di miscele a scala particellare di diversi minerali, presenti in proporzioni variabili.

Questa prima fase di analisi ha quindi lo scopo di creare una ampia base di dati, sulla quale fondare alcuni criteri di analisi spettrale per la individuazione di specifici minerali e associazioni di minerali caratterizzanti rocce, suoli e sedimenti, indispensabili per interpretare dati ad alta risoluzione spettrale acquisiti da remoto.

### Analisi dei dati iperspettrali da remoto

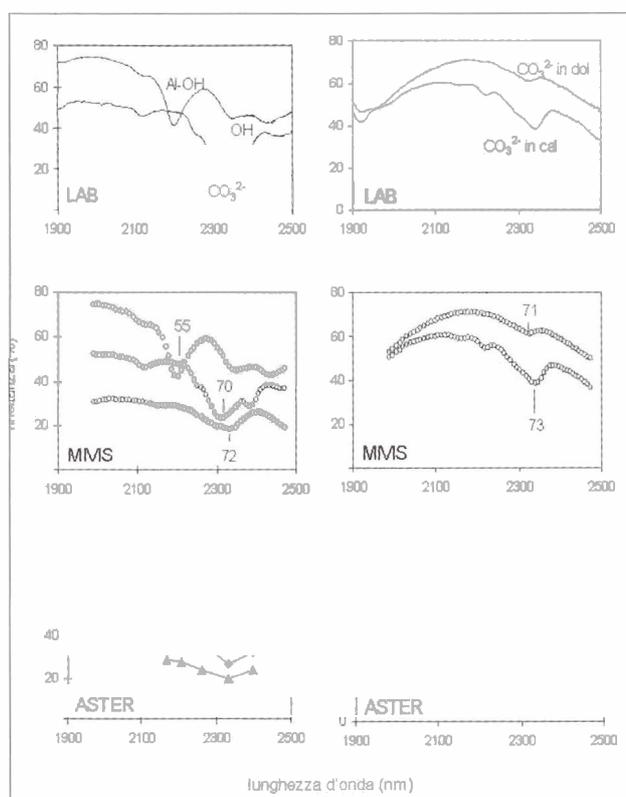
Questa seconda fase comprende sia una valutazione a priori della potenzialità dei sensori remoti di individuare questi stessi minerali e associazioni di minerali, che sia analisi e interpretazioni in termini mineralogici di dati immagine iperspettrali.

La valutazione preliminare viene fatta tramite simulazione della risposta di sensori quali, ad esempio, MIVIS, AVIRIS, DAIS, ASTER (Fig. 2). La simulazione utilizza spettri di laboratorio rappresentativi delle diverse classi spettrali, individuate seguendo la procedura descritta in precedenza, e consiste nella convoluzione di questi spettri con le funzioni di sensibilità delle bande di un dato sensore. Sebbene questa procedura non tenga conto delle curve di trasferimento radiometrico nelle varie bande, dà comunque un'idea della congruenza delle ampiezze e centri di banda del sensore con le caratteristiche delle strutture di assorbimento individuate in laboratorio per i vari minerali e associazioni di minerali.

I criteri e i risultati della analisi e classificazione dei dati di laboratorio possono essere utilizzati per la elaborazione e interpretazione dei dati acquisiti dai sensori iperspettrali. In particolare, avendo a disposizione dati spettrali relativi a campioni di rocce raccolti nell'area sorvolata dal sensore, spettri rappresentativi delle classi spettrali riconosciute in quel particolare set di campioni possono essere utilizzati come *endmembers* nella classificazione dell'immagine. Oppure, in mancanza di dati di terreno, i criteri messi a punto per i dati di laboratorio possono essere applicati alla classificazione dei profili spettrali estratti dall'immagine, e, a loro volta, gli spettri immagine rappresentativi delle varie classi possono essere utilizzati come *endmembers*, seguendo una procedura deterministica alternativa ai metodi statistici per la individuazione degli *endmembers*. Questi diversi modi di analisi sono stati parzialmente testati in varie aree di studio (ad es., Cuprite, dati inediti).

### Analisi spettrale dei litorali sabbiosi: il volo MIVIS del marzo 2000

Un ulteriore "oggetto" geologico la cui natura può essere efficacemente indagata utilizzando sensori iperspettrali è rappresentato da corpi deposizionali quali, ad esempio, le



**Figura 2** - Spettri tra 2000 e 2500nm e simulazioni MIVIS e ASTER. A sinistra: spettro di quarzite, dominato dall'assorbimento Al-OH, di roccia ferro-magnesiaca, dominato da Mg-OH e di marmo, caratterizzato dalla mineralogia principale carbonatica  $CO_3^{2-}$ . A destra: spettri delle superfici esposte di un calcare e di una dolomia, caratterizzati dagli assorbimenti del gruppo  $CO_3^{2-}$  a lunghezze d'onda superiori rispetto a quelle delle corrispondenti rocce fresche.

spiagge. Queste, infatti, rappresentano ambienti deposizionali relativamente semplici, in cui, però, sono in genere presenti almeno tre principali tipi di materiali: depositi sabbiosi, accumuli più o meno estesi di alghe, e maggiori o minori concentrazioni di gusci di molluschi, la cui distribuzione areale è controllata prevalentemente da processi marini, come moto ondoso e correnti litorali, e da processi eolici. Questi tre materiali quindi possono rappresentare i componenti a mesoscala di pixels misti.

Di questi tre materiali, prendiamo in considerazione, in particolare, i sedimenti sabbiosi, costituiti da miscele di minerali e da frammenti litici, che a loro volta rappresentano soluzioni solide di minerali. La composizione del sedimento è in relazione con quella del materiale trasportato al mare dai fiumi che sfociano in prossimità di un determinato tratto di litorale, che a sua volta riassume la composizione delle rocce affioranti nei relativi bacini di

drenaggio. Quindi, diversi tratti di un litorale possono costituire distinte province petrografiche. La loro analisi mineralogica con sensori da telerilevamento è semplificata dal fatto che in genere sono caratterizzati da morfologie pianeggianti o comunque poco rilevate.

Con queste premesse, una ripresa con il sensore MIVIS, di recente ricalibrato presso la ditta costruttrice, è stata effettuata su alcuni settori del litorale dell'alto Adriatico, comprendenti la laguna di Marano-Grado, la foce Tagliamento e la foce Adige. Il volo è stato eseguito il 22 marzo 2000, tra le 12 e le 14 30, da quota 1500 e, per una strisciata, da quota 500 m. In contemporanea al volo sono state eseguite misure di riflettanza spettrale a terra e di

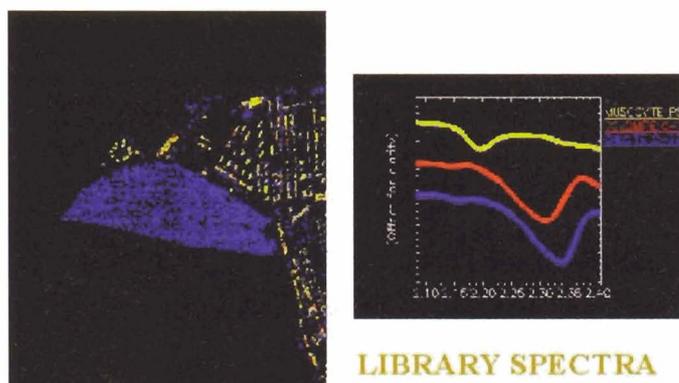
parametri atmosferici in due aree distinte (spiaggia di Grado e Rosolina mare, presso foce Adige; Tab. 2). Per il momento, comunque, vengono valutati i dati così come vengono forniti all'utilizzatore, senza ulteriori calibrazioni e con correzione atmosferica di routine, utilizzando il codice 6S e assumendo parametri atmosferici standard.

Per la classificazione dei dati MIVIS relativi a queste due aree test è stato utilizzato Spectral Angle Mapper (ENVI) assumendo come endmembers sia spettri di minerali dalla libreria inclusa nel software (Fig. 3), che curve di riflettanza delle sabbie misurate sul terreno nelle relative aree. In entrambe le elaborazioni, la spiaggia di Grado è risultata avere una composizione prevalentemente carbonati-

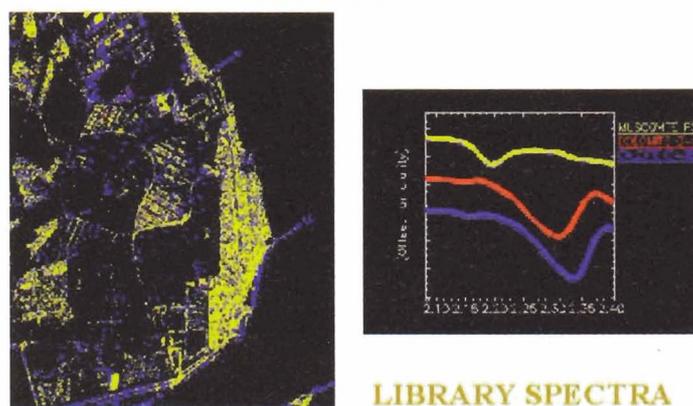
**Tabella 2** - Strumenti utilizzati e misure effettuate a terra. La squadra operativa a Rosolina mare comprendeva: A. Barducci (IROE, FI), F. Maselli (FMA, FI), I. Longhi (Università, PR) e L. Chiarantini (Officine Galileo-Spazio, FI); quella operativa a Grado era formata da C. Giardino (CNR-RS, MI) e M. Sgavetti (Università, PR).

Misure di riflettanza al suolo
<b>spettrometri</b>
GER (in dotazione a IROE, FI) intervallo di campionamento: 2nm dual field of view: 100 mrad range spettrale: 400-2500nm
FieldSpec_Pro FR (messo a disposizione da CNR - IRRS/IIA) intervallo di campionamento: 1,4nm (350-1000nm), 2nm (>1000nm) field of view: 8° range spettrale: 355-2500 nm

Misure di parametri atmosferici
area test Grado
strumenti: FieldSpec_Pro FR con cosine receptor, Sunphotometer EKO MS-120 e Termoradiometro (messi a disposizione da CNR-IRRS, MI)
misure effettuate: curve di irradianza solare diretta e diffusa nell'intervallo 350-2500nm valori di irradianza solare diretta a 368, 500, 657, 778nm temperature del terreno e dell'aria
area test Rosolina mare
strumenti: centralina meteorologica (messa a disposizione da FMA, FI)
misure effettuate: irradianza solare integrata temperature del terreno e dell'aria umidità relativa velocità e direzione del vento



### ADIGE

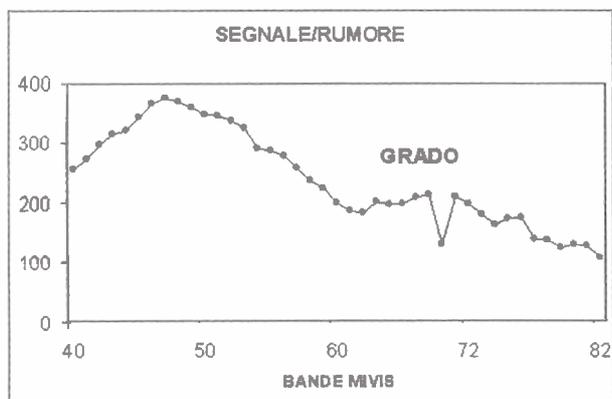
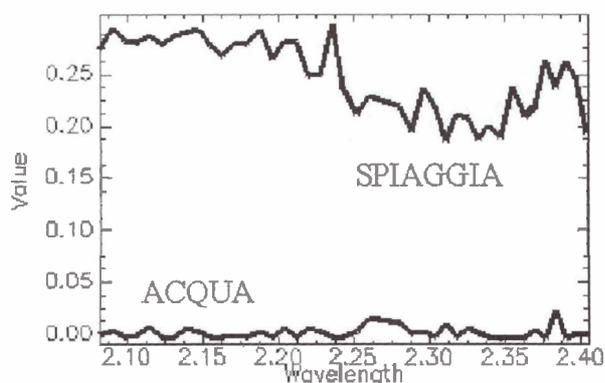


**Figura 3** - Classificazione con Spectral Angle Mapper (ENVI Version 3.2) delle spiagge di Grado e di foce Adige, utilizzando come *endmembers* spettri di minerali dalla libreria JPL disponibile in ENVI.

ca, mentre la spiaggia di Rosolina mare è risultata essere costituita per lo più da minerali con una significativa componente argillosa. I risultati di entrambe le classificazioni sono in accordo con dati petrografici riportati in letteratura [Gazzi et al., 1973], con analisi spettroscopiche di laboratorio su campioni di sabbie delle due aree e con dati MIVIS di campagne precedenti [Sgavetti et al., 1999]. Questo livello di riconoscimento mineralogico sarebbe, in realtà, ottenibile anche con spettrometri da telerilevamento a risoluzione inferiore rispetto a quella del MIVIS (ad es., con ASTER; Fig. 2), mentre la ripresa sui litorali, a cui si fa riferimento, era stata appositamente progettata per ottenere discriminazioni mineralogiche più sottili, consistentemente con la risoluzione nominale, dell'ordine di 8-10 nm, del MIVIS, e per valutare la possibilità di

determinazioni quantitative basate sulla deconvoluzione degli assorbimenti composti che caratterizzano le associazioni di fasi mineralogiche.

Questo tipo di analisi richiede metodi di classificazione in grado di determinare con accuratezza la posizione del minimo di assorbimento e di analizzare la forma delle bande [ad es., Singer, 1981]. Metodi adatti a questo scopo sono implementati nel sistema ENVI (ad es., Spectral Feature Fitting, Match Filtering), i quali, però, richiedono dati adeguatamente privi di rumore. Nel caso di questa ripresa MIVIS, sia i profili *z*, estratti in corrispondenza di sabbia e di acqua, che il rapporto segnale/rumore dell'immagine mostrano una notevole componente di rumore nella regione 2000-2500 nm (Fig.4), proprio dove cadono le più significative strutture di assorbimento dei mine-



**Figura 4** - Profili z di sabbia e di acqua, estratti dall'immagine MIVIS della spiaggia di Grado. In basso: rapporto segnale-rumore dell'immagine.

rali. D'altra parte, anche il segnale misurato a terra con FieldSpec risulta rumoroso alle lunghezze d'onda maggiori (Fig. 5), suggerendo un livello di operatività di entrambi i sensori critico in rapporto alle condizioni atmosferiche presenti in quel momento. Più accurate correzioni degli effetti atmosferici e calibrazioni con i parametri di gain e offset dei sensori potranno migliorare la qualità dei dati, ma in ogni caso, una combinazione di condizioni strumentali e atmosferiche di questo tipo, probabilmente accettabile per riprese standard, non appare del tutto adeguata per riprese che prevedano l'uso dei dati per analisi quantitative della presenza e distribuzione di materiali con proprietà spettrali complesse.

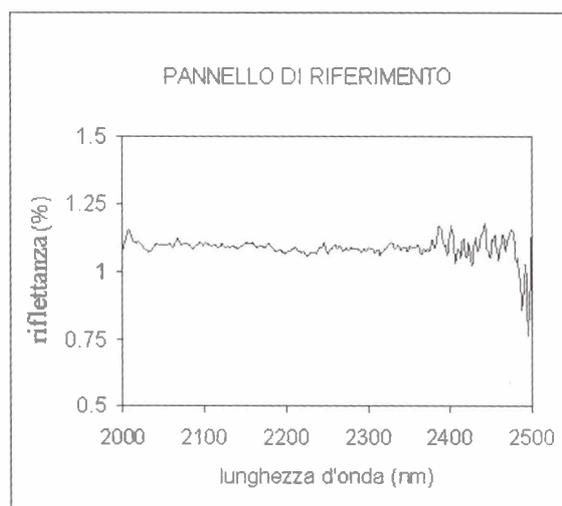
#### Alcune considerazioni conclusive

Il riconoscimento con sensori remoti di materiali composizionalmente complessi, quali i materiali geologici, si basa sullo sviluppo di due linee di ricerca tra loro complementari: da un lato, la individuazione di caratteri spet-

trali che rappresentino una semplificazione della originaria complessità dei diversi materiali, ma che allo stesso tempo ne consentano la discriminazione; dall'altro lato, la verifica della congruenza di questi caratteri con la risoluzione spettrale effettiva dei sensori, tenendo conto, oltre che della loro calibrazione radiometrica, anche delle complicazioni introdotte dalla risoluzione spaziale della ripresa e delle condizioni atmosferiche al momento in cui questa viene eseguita.

Per quanto riguarda la prima linea di ricerca, abbiamo realizzato una raccolta di oltre 300 spettri, in maggioranza relativi a campioni di rocce, classificati in base alle strutture di assorbimento e interpretati tramite analisi petrografiche; questa base di dati viene continuamente incrementata man mano si rendono disponibili nuovi campioni di rocce, sedimenti e prodotti di alterazione superficiale provenienti da aree di interesse geologico.

Per quanto riguarda la seconda linea di ricerca, una tra le maggiori difficoltà che si incontrano utilizzando dati di riflettanza spettrale ad alta risoluzione è dovuta alla bassa irradianza solare nella regione dell'infrarosso a onde corte (2000-2500 nm), dove sono presenti strutture di assorbimento diagnostiche non solo di minerali, ma anche di diversi altri materiali naturali e artificiali. Questo problema può essere reso più critico da condizioni atmosferiche non ottimali, che non sempre possono essere evitate, in alcuni casi per la natura stessa del problema in esame. Condizioni fisiche di questo tipo al momento della ripresa richiedono un appropriato livello di calibrazione del sensore e una accurata correzione successiva dei dati. Ciò comporta anche la disponibilità di dati negli intervalli spettrali di assorbimento del vapor d'acqua, a circa 900 e 1100 nm, in corrispondenza dei quali non sono attual-



**Figura 5** - Spettro FieldSpec tra 2000-2500nm del pannello di calibrazione da 50 cm di distanza, misurato in contemporanea al volo.

mente disponibili canali MIVIS, così come necessita di valori di riflettanza al suolo e di parametri atmosferici attendibili.

In attesa quindi di futuri sviluppi tecnologici che possano rendere disponibili nuovi sensori in grado di sfruttare al meglio la poca energia disponibile alle lunghezze d'onda maggiori, si vorrebbe avanzare una proposta. Questa prevederebbe di riconfigurare il MIVIS in modo da renderlo operativo per il riconoscimento di almeno alcuni gruppi di materiali, individuati come di maggior interesse per specifici scopi. Si tratterebbe di individuare ampiezze e posizioni del centro delle bande, in base ad esperienze precedenti o a nuove indagini, che porterebbero a conferire al MIVIS una risoluzione spettrale certamente inferiore a quella attuale, ma compensata da una maggior sicurezza nell'individuare almeno alcune famiglie di materiali.

Per quanto riguarda la correzione post-volo dei dati, per ogni ripresa dovrebbero essere forniti all'utilizzatore i parametri di calibrazione dello strumento prima, durante e dopo il volo. Inoltre, il posizionamento di canali in corrispondenza delle bande di assorbimento del vapor acqueo renderebbe disponibili informazioni che, abbinate a dati ancillari a terra acquisiti con strumenti rigorosamente calibrati e con procedure formalizzate, permetterebbero di migliorare sensibilmente la qualità dei dati.

### Ringraziamenti

Le misure a terra sono state possibili grazie alla collaborazione e alla strumentazione messa a disposizione dai colleghi delle unità operative IROE, FMA, Officine Galileo-Spazio di Firenze; da Alessandro Brivio, Claudia Giardino, Alessandro De Carli, Mauro Musanti del CNR-IRRS Reparto Telerilevamento di Milano; e da Ruggero Casacchia del CNR-Istituto sull'Inquinamento Atmosferico di Roma. Finanziamento da parte dell'Agenzia Spaziale Italiana.

### Bibliografia

**Chiari R., Ferrari M.C. e Sgavetti M.** (1994) - *Spectral classification of the rocks as a preliminary procedure for the lithologic interpretation of remote sensing multispectral data*; In *Geology from Space*, Ed. by E. Zilioli, SPIE, 2320, 24-35, Bellingham, Washington.

**Chiari R., Longhi I., Sgavetti M., Gelli A., Orsi A. e Pecoraro F.** (1997) - *Spectral classification of rocks: analysis of laboratory 0.4 to 2.5 mm reflectance and 2.5 to 25 mm transmittance spectra of sedimentary and metamorphic rocks*; In *Earth surface remote sensing* GG. Ed. by G. Cecchi, E.T. Engman and E. Zilioli, SPIE, 3222:

284-294, Bellingham, Washington.

**Ferrari M.C., Sgavetti M., e Chiari R.** (1996) - *Thematic Mapper multispectral facies in prevalent carbonate strata of an area of Migiurtinia (Northern Somalia): analysis and interpretation*; *International Journal of Remote Sensing*, 17: 111-130.

**Gazzi P., Zuffa, G.G., Gandolfi, G. e Paganelli, L.** (1973) - *Provenienza e dispersione litoranea delle sabbie delle spiagge adriatiche fra le foci dell'Isonzo e del Foglia: inquadramento regionale*, *Memorie della Società Geologica Italiana*, 12: 1-37.

**Longhi I., Mazzoli C. e Sgavetti M.** (2000 a) - *Metamorphic grade in siliceous muscovite-bearing rocks through laboratory reflectance and imaging spectroscopy*, *Terra Nova*, in press.

**Longhi I., Sgavetti M., Chiari R. e Mazzoli C.** (2000 b) - *Spectral analysis and classification of metamorphic rocks from laboratory reflectance and transmittance spectra in the 0.4-2.5m and 2.5-25m regions: a tool for hyperspectral data interpretation*; *International Journal of Remote Sensing*, in press.

**ENVI Version 3.2 Manuals** (July 1999) - Research Systems, Boulder, CO.

**Sgavetti M., Ferrari M.C., Chiari R., Fantozzi P.L. e Longhi I.** (1995) - *Stratigraphic correlation by integrated photostratigraphy and remote sensing multispectral data: an example from Jurassic to Eocene strata in an area of northern Somalia*; *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 79: 1571-1589.

**Sgavetti M., Longhi I., Guerra G.L., Barducci A. e Tonelli A.** (1999) - *Effects of optical remote sensor spectral and spatial resolution variation for geological feature recognition*, In *Remote Sensing for Earth Science Applications*, Ed by T. Engman and E. Zilioli, SPIE, 3868: 308-319.

**Singer R.B.** (1981) - *Near-infrared reflectance of mineral mixtures: systematic combinations of pyroxenes, olivine, and iron oxides*, *Journal of Geophysical Research*, 86: 7967-7982.

**Vane G. e Goetz A.F.H.** (1985) - *Introduction to the Proceedings of the Airborne Imaging Spectrometer (AIS). Data Analysis Workshop*, Pasadena, California, April 8-10, 1985, JPL Publication 85-41: 1-21.

# Georeferenziazione e integrazione di dati iperspettrali MIVIS all'interno di Sistemi Informativi Geografici

Riccardo De Paulis<sup>(1)</sup> e Armando Cavazzini<sup>(1)</sup>

Dal 24 settembre 1999 il CISIG (Consorzio per l'Innovazione dei Sistemi Informativi Geografici) in collaborazione con la Facoltà di Scienze Geologiche dell'Università di Chieti sta svolgendo un progetto di ricerca finanziato dall'ISPESL (Istituto Superiore per la Prevenzione E Sicurezza Sul Lavoro), indirizzato al controllo e alla prevenzione dei rischi naturali in aree caratterizzate dalla presenza d'insediamenti industriali.

L'acquisizione di dati telerilevati, nell'ambito del progetto, nasce dall'opportunità di verificare e promuovere le potenzialità del sensore MIVIS per studi ambientali e come apporto a studi a carattere tipicamente idrologico, con l'obiettivo finale d'integrare i dati e i risultati ottenuti all'interno di GIS opportunamente predisposti.

## Introduzione

Fin dai primi anni di ricerca ed applicazioni legate alla conoscenza e alla gestione del territorio tramite l'utilizzo del sensore iperspettrale MIVIS, è emersa l'opportunità di collegare un numero sempre crescente d'informazioni a sistemi gestionali di facile e largo utilizzo.

I Sistemi Informativi Territoriali (SIT/GIS) attualmente rappresentano uno dei mezzi migliori per una rapida e dettagliata gestione delle informazioni territoriali.

La georeferenziazione di dati iperspettrali e la successiva integrazione all'interno di sistemi informativi geografici non è certo una novità di rilievo nel campo del telerilevamento; nel caso del MIVIS però la gestione di entrambi gli aspetti, per la maggior parte degli utenti, è sempre stata contrassegnata da notevoli difficoltà dovute principalmente alla particolare natura del dato.

Il rischio di compromettere il dato radiometrico, la difficoltà nella gestione dei dati ancillari, la necessità di dedicarsi a problematiche più urgenti per una corretta lettura del dato, insieme ad una "cronica" mancanza di tempo, hanno contribuito ad "abituare" l'utente MIVIS all'utilizzo di dati non georiferiti.

Con il passare degli anni ed il crescente numero degli utenti è aumentata però contemporaneamente la necessità

*Since 24 September 1999 the CISIG (Consortium for Innovation in Geographic Information Systems) in collaboration with the Department of Geologic Sciences of the University of Chieti is working on a research project, financed by the ISPESL (Institute for Risk Prevention and Work Safety of the Ministry of Health), directed to the control and prevention of natural risks in industrial areas. Data derived from the MIVIS hyperspectral sensor have been used in the project because the capacity for terrain analysis of the sensor has proven to have a high potential. The objective of the project was that of providing within a GIS which collects data from several sources, the additional data and analyses obtained by the use of these new methods.*

di una corretta collocazione da un punto di vista geografico del dato MIVIS ed in particolare delle informazioni territoriali ad esso associate.

Per questo motivo nell'ambito di un progetto di ricerca che dall'autunno scorso il CISIG (Consorzio per l'Innovazione dei Sistemi Informativi Geografici) sta svolgendo per conto dell'ISPESL (Istituto Superiore per la Prevenzione E Sicurezza Sul Lavoro) indirizzato al controllo e alla prevenzione dei rischi naturali in aree caratterizzate dalla presenza d'insediamenti industriali, ci si è proposti di restituire i risultati, derivati dall'elaborazione di dati iperspettrali, all'interno di un sistema informativo geografico opportunamente predisposto. In quest'articolo saranno mostrati i primi risultati ottenuti dalla georeferenziazione dei dati MIVIS all'interno dei Consorzi Industriali di Sulmona e Pescara, e dalla creazione di un sistema informativo geografico gestibile direttamente dal software d'elaborazione.

Accanto all'ortofoto digitale a colori del Programma "it2000<sup>™</sup>", base principale per il processo di georeferenziazione, è evidenziata la possibilità di utilizzo del relativo modello digitale del terreno (DTM), che consenta un'osservazione tridimensionale del dato iperspettrale. Nell'ambito del progetto, in collaborazione con l'Università di Chieti, si è verificato anche l'effettivo utilizzo del DTM e del dato telerilevato in ambito geomorfologico e/o come supporto alle tradizionali rappresentazioni cartografiche legate alla geologia.

<sup>(1)</sup> **Compagnia Generale Ripresearee S.p.A.**  
via Cremonese 35/A - 43100 Parma  
info@terraitaly.com

Ricevuto il 28/07/00 - Accettato il 27/11/00

## L'area del progetto

Le aree d'indagine sono state concordate tenendo conto fondamentalmente di due fattori:

- 1) La disponibilità d'informazioni che consentissero un inquadramento di tipo geomorfologico e tematico dell'area d'interesse;
- 2) La possibilità di accedere facilmente a informazioni territoriali relative agli insediamenti industriali, alla loro tipologia ed al loro livello di rischio;

In quest'ottica e in accordo con l'ISPESL (Istituto Superiore per la Prevenzione E Sicurezza Sul Lavoro), l'area del progetto è stata individuata all'interno del bacino di drenaggio del fiume Pescara (Fig.1), tra la zona industriale di Sulmona e quella di Pescara, fino alla sua confluenza a mare; non sono stati inclusi i principali tributari del Pescara, il Sagittario e l'Aterno, che avrebbero inglobato un'area di drenaggio fino a L'Aquila. Nella prima fase del lavoro sono state prese in esame in particolare due zone, corrispondenti rispettivamente agli Agglomerati Industriali di Sulmona e di Sambuceto - Pescara.

## Piano di Volo

Nel corso del progetto, dovendo analizzare i dati iperspettrali anche per valutazioni di tipo idrogeologico, è emersa la necessità della creazione di un piano di volo caratterizzato da un'alta risoluzione geometrica e da un abbracciamento comprendente l'intera area alluvionale. Per ottenere la massima risoluzione a terra dei pixel, circa 3 metri, le riprese sono state effettuate a 1500 metri di quota con un campo di copertura, attorno all'asse del fiume, di circa 1 km. Per avere un abbracciamento maggiore del campo alluvionale è stato realizzato inoltre un secondo volo a circa 3000 metri di quota.

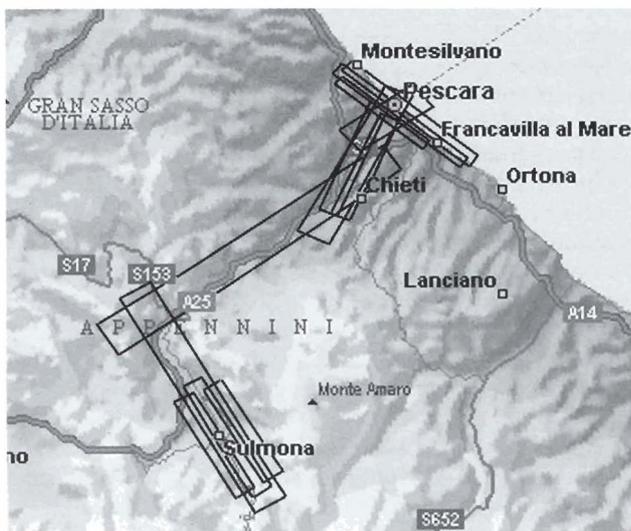


Figura 1 - Area del progetto e grafico di volo.

Il volo è stato eseguito tra le ore 11 e le ore 15 del 30 settembre 1999, per un totale di 101 km e 43000 ha di area coperta.

## L'ortofoto digitale a colori

L'ortofoto digitale a colori del Programma "it2000" (Fig.2), realizzata e di proprietà della Compagnia Generale RipreseAeree, ottenuta da riprese effettuate nel biennio 1998/99, ad oggi è lo stadio più recente dell'evoluzione delle metodologie di rappresentazione del territorio e s'impone, per efficacia, rapidità ed economicità, come strumento imprescindibile per la costituzione e l'aggiornamento della base di riferimento di un Sistema Informativo Territoriale.

L'ortofotocarta si può definire come una carta a base fotografica che rispetta le tolleranze planimetriche delle carte tradizionali di pari scala, alla quale è associato o associabile un contenuto altimetrico di analoga accuratezza. L'ortofoto digitale in sintesi, è il prodotto del raddrizzamento differenziale dell'immagine aerofotogrammetrica digitalizzata, georeferenziata nel sistema geodetico-cartografico nazionale e resa geometrica sulla base del modello digitale del terreno appositamente realizzato con griglia regolare di 40 m in coordinate terreno. [Banchini et al; 1999].

Il contenuto informativo dell'ortofoto dipende fondamentalmente dalla sua risoluzione, ovvero dalla dimensione nominale del pixel, che per le ortofoto del Programma "it2000" è di 1 metro per 1 metro in coordinate terreno [Banchini et al; 1999].

Il contenuto geometrico è dello stesso ordine di grandezza della Carta Tecnica Regionale a scala 1.10000



Figura 2 - L'ortofoto digitale a colori Programma "it2000" Concessione SMA N° 135 del 06/05/98.

(CTR10). Ad ogni ortofoto possono essere associati a livelli vettoriali differenti (reticolato Gauss - Boaga, informazioni marginali della corrispondente CTR10, limiti amministrativi, toponomastica, etc.) visualizzabili sul prodotto digitale e riproducibili sul supporto analogico secondo convenzionalismi concordati con l'utente.

## La Georeferenziazione

La possibilità di correlare informazioni di vario tipo attraverso logiche flessibili e adattabili alle differenti esigenze rappresenta una delle potenzialità principali che si richiede ad un sistema informativo geografico.

Le informazioni che vengono fornite da tali sistemi, oltre ad avere una definizione quantitativa e/o qualitativa intrinseca, devono anche essere collocate a livello spaziale, cioè inquadrare in una determinata posizione rispetto ad un sistema di riferimento unificato. Infatti, comunque si articoli l'interazione tra utente e sistema informativo, essa può partire dalle domande elementari del dove (cioè in corrispondenza di quali coordinate si trovi un elemento informativo presente nel sistema o vada inserita una nuova informazione) e/o del cosa (cioè quali e quanti elementi informativi ricadono totalmente o parzialmente in una data area geografica definita da una sequenza di coordinate) [Surace, 1998].

Appare ovvio quindi che uno dei più potenti ed immediati strumenti di correlazione tra le varie informazioni è costituito dalle coordinate che a ciascuna informazione vengono assegnate per definire la posizione e attraverso cui si possono determinare relazioni di vicinanza, influenza, conflitto, appartenenza e così via. Tale potere di correlazione è pienamente sfruttabile se, prima dell'immissione delle informazioni, è stato correttamente definito il sistema di riferimento [Surace, 1998].

Nel caso delle immagini MIVIS il problema va ben oltre il sistema di riferimento. In modo particolare una delle difficoltà maggiori per la georeferenziazione è data dalla presenza di una notevole distorsione geometrica, imputabile sia alla particolare modalità di ripresa che alla naturale presenza di dislivelli tra le superfici indagate.

Con l'utilizzo dei dati ancillari e attraverso una buona conoscenza dell'area non è però impossibile raggiungere l'obiettivo finale.

Certamente le difficoltà, ma soprattutto i tempi di realizzazione, appaiono però molto rilevanti. Per ridurre notevolmente i tempi di georeferenziazione, ottenendo un buon risultato, è possibile effettuare la georeferenziazione attraverso l'utilizzo dell'ortofoto digitale a colori del Programma "it2000™" (Fig. 2).

Il metodo di realizzazione è molto semplice e, in funzione delle aree da georiferire, anche relativamente rapido. Nel nostro caso le varie operazioni sono state realizzate attraverso il software ENVI (commercializzato dalla RSI Italia), lo stesso software che comunemente viene utilizzato per l'analisi iperspettrale di dati telerilevati.

Il software è in grado, una volta che ha a disposizione dei punti di verità a terra (*Ground control points* – GCPs) di effettuare un adattamento (*warping*) dell'immagine da georiferire, con un ricampionamento automatico dei pixel.

I punti di controllo sono ottenuti attraverso la comparazione con l'ortofoto digitale a colori del Programma "it2000™". Durante questa fase l'utilizzo delle suddette ortofoto a colori facilita l'operazione di comparazione, altrimenti difficoltosa in presenza di immagini a differenti scale.

A seconda del numero dei punti di controllo ottenuti è possibile scegliere tra tre tipi differenti di *warping*:

a) RST (*Resampling, scaling and translation*)

b) Polinomiale

c) Triangolazione di Delaunay (Fig.3)

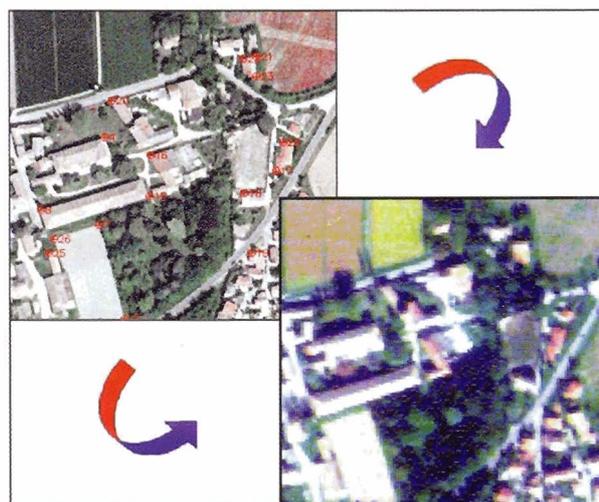
Il metodo RST è il più semplice sia come preparazione, bastano un minimo di tre punti, sia come tempi d'elaborazione da parte del calcolatore. Il metodo polinomiale al contrario è strettamente legato al numero di punti e si basa sull'uso di polinomi di trasformazione dalle coordinate "riga-colonna" a quelle geografiche.

Il grado di polinomio attuabile è legato al numero dei punti secondo la relazione:

$$\text{GCPs} > (\text{grado del polinomio} + 1)^2.$$

In generale maggiore è il grado del polinomio migliore è l'accuratezza della georeferenziazione, il tutto però a discapito della mole di calcolo.

Nella Triangolazione di Delaunay per ogni triangolo



**Figura 3** – Esempio di georeferenziazione tramite il metodo della Triangolazione di Delaunay. In alto a sinistra l'ortofoto digitale a colori con i punti di controllo in rosso. In basso a destra l'immagine MIVIS georeferenziata, rappresentata con sintesi additiva RGB a colori reali. Concessione Aeronautica Militare – R.G.S. N° 417 del 24.11.1998.

costruito a partire dai GCPs utilizzati, il calcolatore effettua una trasformazione e successivo adattamento. L'efficienza del metodo è legata al numero dei triangoli e di conseguenza al numero dei punti a disposizione. Da diverse prove effettuate è risultato comunque il metodo con la precisione migliore.

### Il modello digitale del terreno (DTM)

Il modello numerico del terreno, appositamente realizzato nell'ambito del Programma "it2000", ha una struttura matriciale con passo di campionamento di 40 m ed è articolato in blocchi coincidenti con i fogli della carta d'Italia alla scala 1:50000. Per la realizzazione di tale prodotto sono stati utilizzati dati di input anche in funzione della loro disponibilità; in particolare si possono definire due tipologie fondamentali di dati:

a) curve di livello provenienti dalla formazione della Cartografia Tecnica Regionale 1:5.000 o 1:10.000, acquisite tramite registrazione numerica, con introduzione di punti quota e di linee di discontinuità (*break lines*);

b) registrazione dell'altimetria per curve o per profili mediante osservazione dei modelli del volo Italia 94, con introduzione di punti quota e di linee di discontinuità (*break lines*).

Ai margini del blocco di calcolo l'area di registrazione e di determinazione del DTM è stata estesa ad una fascia esterna al blocco larga almeno 400 metri.

L'accuratezza media del DTM prodotto, valutabile attraverso le discrepanze tra le quote di punti determinati fotogrammetricamente su particolari ben identificabili e quelle corrispondenti ricavate per interpolazione sul DTM, è inferiore a 5 m, a livello di confidenza del 95%, cioè alla metà dell'equidistanza delle curve di livello della corrispondente CTR10.

Tale tolleranza vale ovviamente per terreno scoperto; nelle zone ove a causa della fitta vegetazione non è possibile collimare stereoscopicamente il terreno, le osservazioni sono state condotte sulla base della superficie visibile, tenendo conto mediamente dell'altezza della vegetazione, con un degrado di precisione stimabile in misura

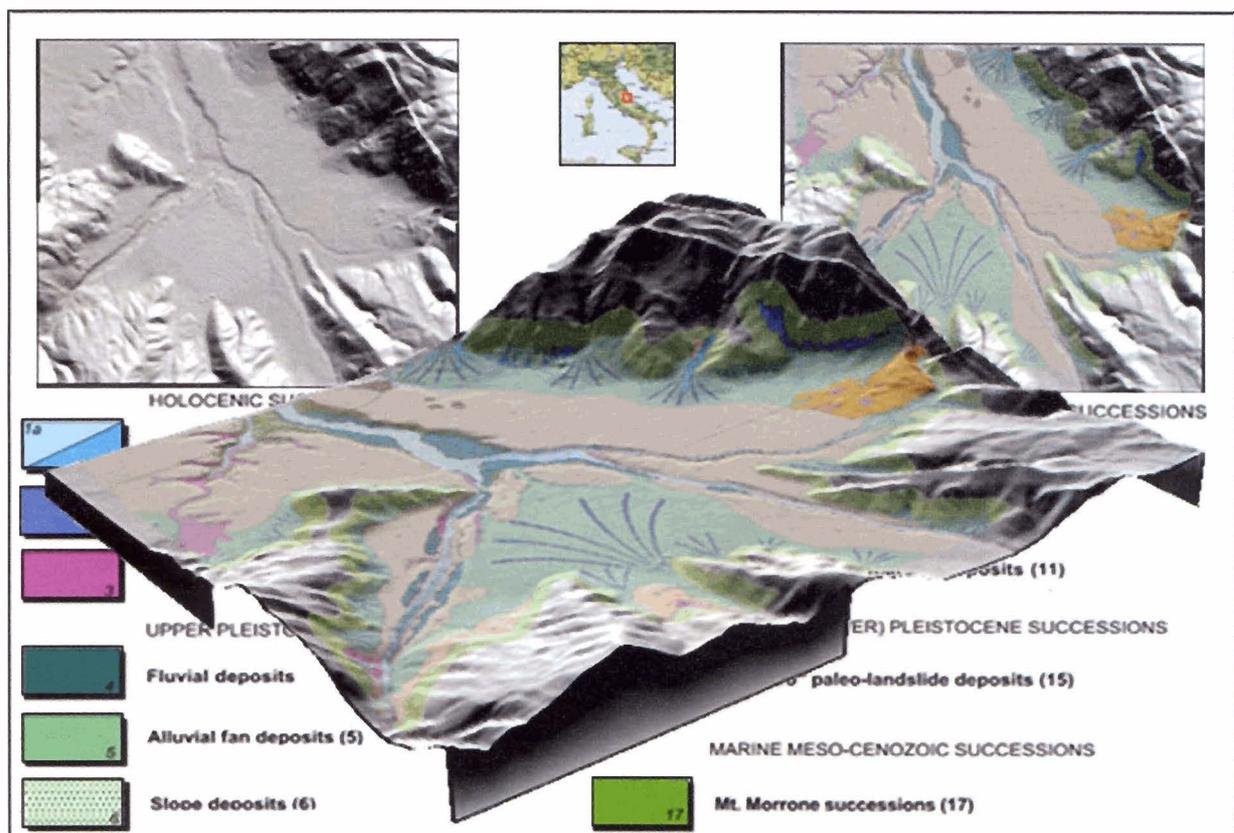


Figura 4 – Piana di Sulmona (Abruzzo) – Esempio di visualizzazione tridimensionale attraverso l'utilizzo del modello digitale del terreno (DTM). In questo caso al modello digitale del terreno è stata sovrapposta la Carta Geologica della Piana di Sulmona scala 1:33000 [Miccadei et al.,1999]. Si noti come sia le conoidi alluvionali ed anche alcune particolari litologie siano enfatizzate da tale rappresentazione.

non superiore alla tolleranza rispettata per il terreno scoperto.

### Agglomerato industriale di Sulmona

La scelta del nucleo industriale di Sulmona come area pilota nella prima fase del progetto è legata principalmente a due aspetti:

- La disponibilità del Consorzio per lo sviluppo industriale di Sulmona a fornire i dati territoriali relativi alle principali imprese produttive dell'area;
- L'estensione areale particolarmente ridotta dei confini dell'agglomerato.

Alcuni dei risultati finora ottenuti sono visibili nella figura sottostante (Fig. 5). La prima delle immagini è ricavata attraverso la creazione di poligoni vettoriali su ortofoto digitale; in questo caso sono stati digitalizzati:

- I confini dell'agglomerato industriale;
- I principali lotti industriali;
- Il piano regolatore.

Le immagini successive rappresentano invece il dato

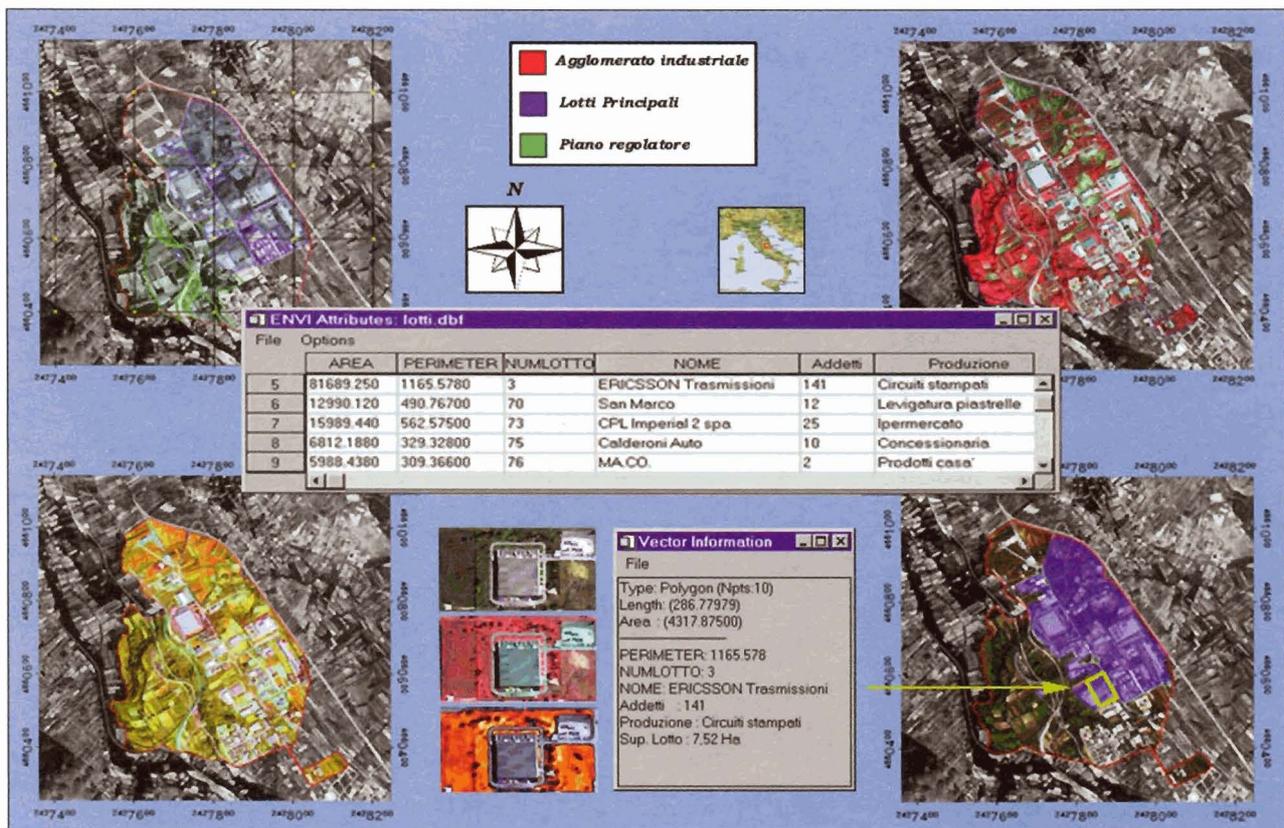
MIVIS, opportunamente georeferenziato e mascherato all'esterno dei confini del nucleo industriale.

Per preservare l'effettivo dato radiometrico, le procedure di warping sono state realizzate solo sull'immagine finale. Ad ogni poligono vettoriale sono state assegnate delle particolari informazioni, nel caso dei lotti industriali ad esempio:

- Tipo di poligono ;
- Numero del lotto;
- Area;
- Perimetro;
- Nome dell'industria;
- Numero degli addetti;
- Tipologia di produzione.

Interrogando il software è possibile inoltre avere per ogni singolo lotto le relative elaborazioni iperspettrali.

Nell'esempio in basso sono mostrate tre semplici elaborazioni relative al lotto n°3, l'industria Ericsson. Si tratta di due sintesi additive in RGB, ed un density slice nell'infrarosso termico.



**Figura 5** – Agglomerato industriale di Sulmona – Esempio di georeferenziazione e integrazione in sistemi informativi geografici di dati iperspettrali telerilevati da sensore MIVIS. Per aumentare l'enfaticizzazione dei risultati, le diverse elaborazioni sono sovrapposte ad ortofoto digitali a colori; tale sfondo è comunque rappresentato in scala di grigio in modo da non confondere la lettura del dato iperspettrale. Concessione Aeronautica Militare – R.G.S. N° 410 del 07.12.1999.

### Agglomerato industriale di Pescara

Le elaborazioni seguenti (Fig. 6) sono un esempio delle possibilità d'analisi iperspettrale di siti industriali in vicinanza d'alvei fluviali. E' analizzato in particolare il comportamento della vegetazione e la presenza d'anomalie termiche riconducibili a possibili fenomeni d'inquinamento in acqua.

- Ortofoto digitale con associato il poligono vettoriale corrispondente al lotto industriale preso in esame;
- Sintesi additiva RGB in falsi colori, sono utilizzate rispettivamente le bande 18 (0,773-0,793,  $\mu\text{m}$ ) -13 (0,673-0,693 $\mu\text{m}$ ) -7 (0,553-0,573 $\mu\text{m}$ );
- Sintesi additiva RGB a colori reali, bande 13 (0,673-0,693 $\mu\text{m}$ ) -7 (0,553-0,573 $\mu\text{m}$ ) -3 (0,473-0,493 $\mu\text{m}$ ), con evidenziato in rosso il profilo termico lungo il fiume Pescara ed in bianco i punti principali in cui si registrano dei valori di temperatura apparente di corpo nero, superiore ai 16°C;
- Nell'intorno dell'alveo fluviale in scala a colori l'indice della differenza normalizzata della vegetazione

(NDVI o Normalized Difference Vegetation Index) calcolato tramite la relazione: [Colwell,1974]

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{IR}} - \rho_{\text{R}}}{\rho_{\text{IR}} + \rho_{\text{R}}}$$

Dove:

$\rho_{\text{IR}}$  → riflettività di radianza nell'infrarosso vicino

$\rho_{\text{R}}$  → riflettività di radianza nel rosso;

- Restituzione della radianza emessa in un definito intervallo di colori (Density Slice). Infrarosso Termico in acqua;
- Valutazione delle principali anomalie registrabili nella scena; in acqua dal viola al rosso valori crescenti di albedo, sul terreno dal giallo al rosso i valori maggiori di radianza emessa.

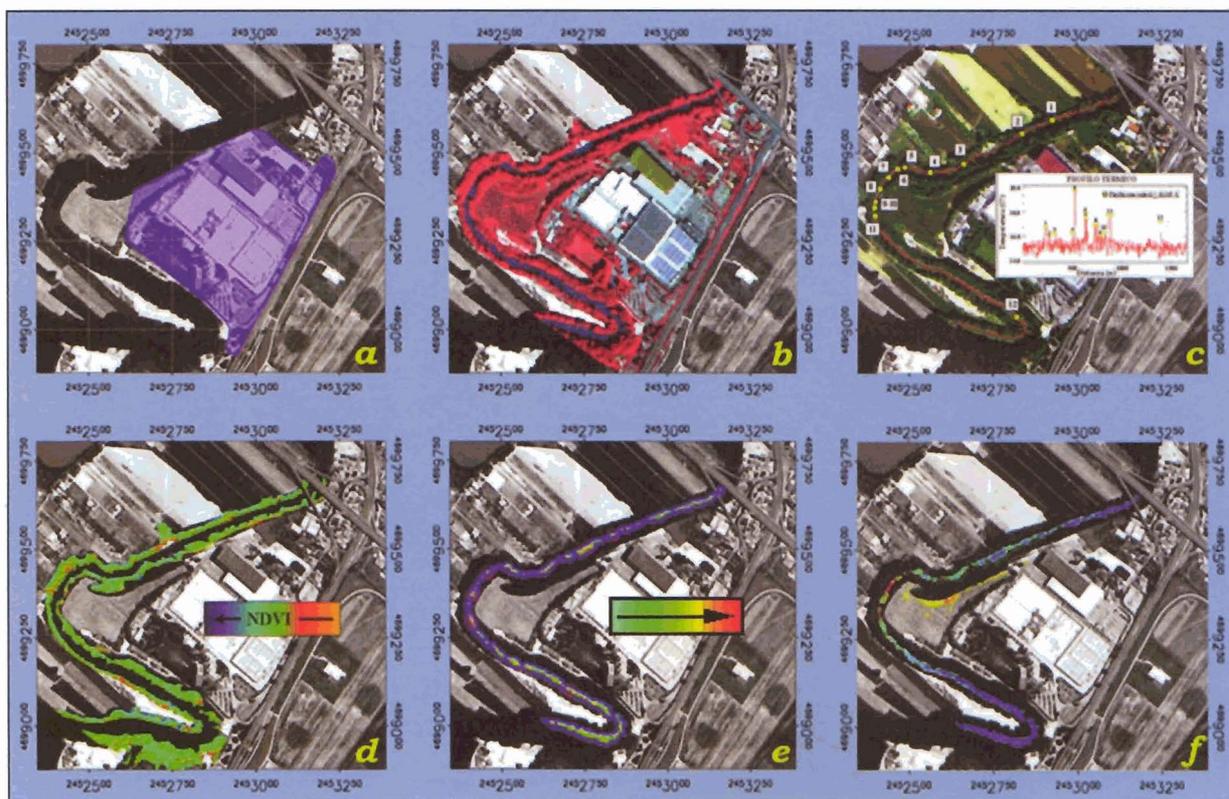


Figura 6 – Agglomerato industriale di Sambuceto – Pescara. Esempi d'alcune elaborazioni iperspettrali indirizzate al controllo dei rischi naturali in aree caratterizzate dalla presenza d'insediamenti industriali, in particolare dei siti più prossimi all'alveo fluviale. L'utilizzo dell'ortofoto digitale come sfondo nelle varie rappresentazioni permette di creare delle vere e proprie carte tematiche, ognuna indirizzata verso un differente tipo d'elaborazione. Concessione Aeronautica Militare – R.G.S. N° 410 del 07.12.1999.

## Conclusioni

Diverse sono le definizioni volte a stabilire cosa s'intenda per GIS: Burrough [1986] definisce i GIS come un potente insieme di strumenti atti a raccogliere, memorizzare, richiamare, trasformare e rappresentare dati georiferiti; Aronoff [1989] considera i GIS come un insieme di procedure, basate sull'utilizzo di strumenti informatici, atte a memorizzare e manipolare dati geografici; Cowen [1988] definisce un GIS come un sistema per il supporto alle decisioni su problemi di carattere ambientale utilizzando dati spazialmente riferiti. Nella costruzione di un GIS, qualunque sia la sua esatta definizione, la schematizzazione del territorio avviene sempre attraverso due differenti approcci, vettoriale e raster.

Nel modello raster lo spazio è suddiviso in una griglia, generalmente di dimensioni regolari, che isola porzioni discrete di territorio denominate pixel.

La localizzazione dell'oggetto è in questo modo definita dal numero di riga e colonna della matrice ed il singolo pixel ha quindi come attributo identificativo quell'elemento del territorio che occupa quella determinata posizione geografica.

Nei GIS, con modello di dati vettoriale, il territorio è descritto invece utilizzando gli elementi propri della car-

tografia numerica, attraverso punti, linee o segmenti, aree o poligoni, nodi; ecc. [Gomarasca, 1997].

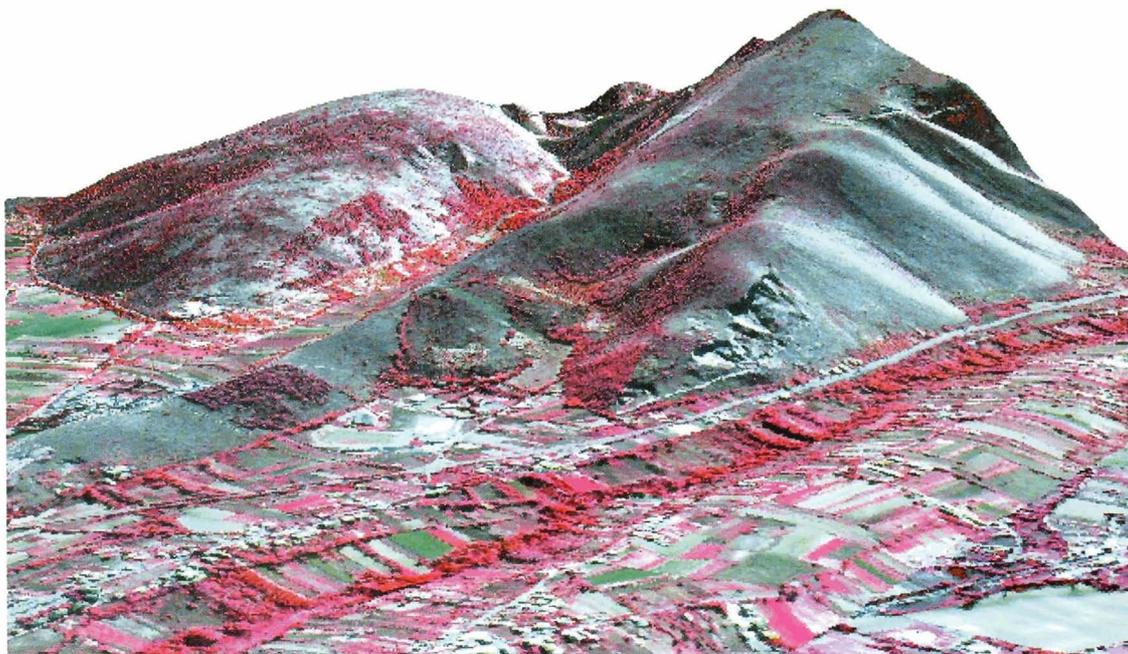
Il dato telerilevato, se georeferenziato, rappresenta quindi, per la sua natura, già un modello raster di GIS.

La possibilità di un uso combinato di dati vettoriali e dati raster permette quindi di aumentare notevolmente le potenzialità del dato telerilevato, in modo particolare del dato iperspettrale ad alta risoluzione.

Dall'insieme di queste definizioni possiamo concludere che l'utilizzo dell'informazione territoriale del dato MIVIS, integrata all'interno di un Sistema Informativo Geografico appare come un valido contributo qualitativo per analisi ed interpretazioni indirizzate a particolari valutazioni tematiche; associata al modello digitale del terreno, può fornire ulteriori informazioni a livello geografico e geomorfologico, oltre ad aumentarne le possibilità di visualizzazione.

## Bibliografia

Aronoff S. (1989) – *Geographic Information Systems: A Management Perspective*. WDL Publications, Ottawa Canada, pp. 294.



**Figura 7** – Piana di Sulmona (Abruzzo) – Esempio di visualizzazione tridimensionale di dati iperspettrali attraverso l'utilizzo del modello digitale del terreno (DTM). In questo caso al DTM è associata una sintesi RGB in falsi colori.

---

**Banchini G., Gentili G.** (1999) – *L'Ortofoto digitale a colori: un nuovo strumento per la gestione del territorio*. Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia (SIFET) – Estratto 1-2

**Barberi R., Cavinato G.P. e Miccadei E.** (1998) - *La Geologia Quaternaria della Conca di Sulmona (Abruzzo, Italia Centrale)*. Geologica Romana, 34: 59-60

**Barberi R., Cavinato G.P. e Miccadei E.** (1998) - *Carta Geologica della Piana di Sulmona (Abruzzo)*. Centro di Studio per il Quaternario e l'Evoluzione Ambientale – Consiglio Nazionale delle Ricerche – Roma

**Burrough P.A.** (1986) – *Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment*. Oxford University Press, New York, pp. 193.

**Colwell B.J.** (1974) – *Vegetation Canopy Reflectance*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 3: 175-183.

**Cowen D.J.** (1988) – *GIS versus CAD versus DBMS: What are the difference?* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54: 1551 - 1554.

**Gomasasca M.** (1997) – *Introduzione a Telerilevamento e GIS per la gestione delle risorse agricole e ambientali*. AIT -Associazione Italiana di Telerilevamento, pp. 81.

**Surace L.** (1998) – *La georeferenziazione delle informazioni territoriali*. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, 2: 187-188.

# Aspetti metodologici ed operativi nella caratterizzazione spettrale e spaziale di coperture in cemento amianto: l'esempio del comune di Broni (Pv)

Carlo Maria Marino<sup>(3)</sup>, Andrea Galli<sup>(2)</sup>, Cinzia Panigada<sup>(1)</sup> e Lorenzo Busetto<sup>(1)</sup>

Le coperture in cemento-amianto, nonostante le attuali restrizioni di legge [L. 257/82], sono largamente presenti sia in aree urbane sia in aree rurali e costituiscono un problema ambientale di notevole rilevanza sanitaria [Chiappino et al., 1991], che può essere affrontato disponendo di censimenti completi ed aggiornati sulla loro effettiva diffusione. Il telerilevamento iperspettrale si dimostra tecnica efficace ed operativa ai fini del riconoscimento ed individuazione spaziale di tali coperture. Nello studio presentato si sono confrontati differenti approcci metodologici (sia *image based* sia *spectral library based*) per caratterizzare il comportamento spettrale delle coperture in cemento-amianto (anche mediante rilievi spettro-radiometrici a terra), classificarle e localizzarle nell'ambito dell'area scelta a titolo esemplificativo. Le elaborazioni effettuate sui dati telerilevati sono state trasferite in un sistema informativo geografico (SIT/GIS) dedicato, il quale rappresenta uno strumento fondamentale di pianificazione territoriale, nel caso specifico, utile al fine di programmare interventi di bonifica e di smaltimento delle coperture in cemento amianto.

## Introduzione

Con il presente lavoro ci si è proposti di affinare metodologie d'individuazione e mappatura delle coperture in cemento amianto, in ambiente agricolo e urbano, utilizzando tecniche di telerilevamento opportunamente integrate a tecniche GIS.

La legge 257/92 prevede, oltre alla cessazione della produzione di manufatti contenenti amianto, il censimento delle coperture in cemento amianto, che attualmente rappresentano una delle principali fonti di dispersione di fibre in atmosfera.

- (1) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università degli Studi di Milano-Bicocca
- (2) Dipartimento di Biotecnologie Agrarie ed Ambientali, Università degli Studi di Ancona
- (3) CNR-IIA, Sez. e LARA, Pomezia e Dip. Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università degli Studi di Milano-Bicocca.

Ricevuto il 18/07/00 - Accettato il 14/10/00

*Hyperspectral Remote Sensing has shown excellent attitude in recognition and identification of manmade surfaces. In particular the analysis of MIVIS (Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer) remote sensed data led to the identification of different surface materials used for construction purposes, such as the asbestos concrete sheeting. These surfaces, used in both agricultural and urban buildings, represent a strong environmental problem since they proved to have a toxic influence on human health. In Italy the law n.257/1982 forbade any use of asbestos derived materials and, for what it concerns asbestos concrete, provided the Public Administration to take a census of the asbestos concrete sheeting. In this framework hyperspectral remote sensing from airborne platforms has revealed to be a useful methodology to take a census of artificial surfaces in urban and agricultural areas. (In this study) different methodology approaches were compared to characterise the spectral behaviour of asbestos concrete sheeting, and to classify and map them. Remote sensed data, processed and integrated by other information layers through GIS techniques, have also allowed to locate and map the asbestos concrete sheeting, setting up an useful instrument for urban planning policy in monitoring and managing asbestos problems.*

Il telerilevamento iperspettrale da piattaforma aerea ha rappresentato un valido strumento d'indagine ambientale, permettendo di individuare e cartografare con elevata accuratezza le superfici in cemento amianto presenti all'interno di un'area campione, il comune di Broni, in provincia di Pavia, sede della Fibronit, industria che produceva questo manufatto, attualmente dismessa. Tale area è stata scelta per la messa a punto e validazione delle metodologie seguite in merito alla cospicua presenza di coperture in cemento amianto, riscontrate in questa zona, ed alla loro diversificazione nello stato di alterazione fisica, confermata dalle indagini condotte con il telerilevamento [Marino et al.1999].

## Metodologia

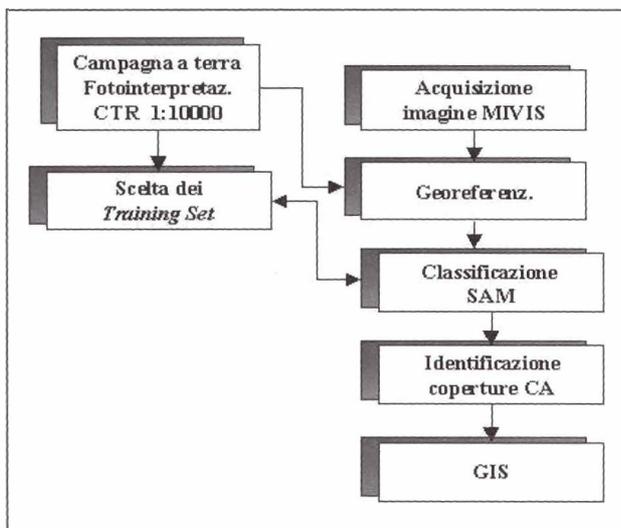
L'immagine MIVIS, acquisita il 20/07/1999 da una quota di volo relativa di 1500 m, è stata georeferenziata al fine di renderla coerente e quindi sovrapponibile alla cartografia topografica e tematica disponibile per l'area di studio. Seguendo una metodologia di classificazione *image based* (Fig. 1), foto aeree a colori, acquisite contempora-

neamente all'immagine MIVIS, ed osservazioni effettuate sul campo hanno permesso l'identificazione delle coperture presenti nell'area in esame per la definizione del training set. Si sono distinte due classi di cemento amianto, sulla base del grado di alterazione fisica (*weathering*), che ne caratterizza il comportamento spettrale nel visibile (differente colorazione) e nell'infrarosso. Il materiale, infatti, acquista con l'invecchiamento caratteri cromatici e strutturali diversi che ne influenzano la riflettività.

Ai training delle due classi di cemento amianto individuate ("cemento amianto meno alterato" e "cemento amianto più alterato") si sono aggiunti quelli di altre superfici presenti nell'area in esame (manto stradale in asfalto e manto stradale in cemento, tipico di parcheggi o piazzali, coperture edilizie in alluminio), il cui comportamento spettrale, soprattutto in particolari situazioni di ripresa, può causare errori di classificazione da parte dell'algoritmo. Con riferimento alle medesime classi d'informazione, è stato anche individuato a terra un congruo numero di coperture di edifici da utilizzare in sede di verifica dei risultati della classificazione (*testing set*).

Per l'individuazione delle coperture in cemento amianto si è utilizzato l'algoritmo di classificazione SAM (*Spectral Angle Mapper*) [Fiumi e Marino, 1997].

I risultati della classificazione dell'immagine MIVIS sono stati sottoposti, secondo le metodologie standard, ad una valutazione di accuratezza mediante l'analisi della matrice di confusione. Il livello complessivo di accuratezza della classificazione, superiore al 90% può ritenersi, facendo anche riferimento alla letteratura in merito, pienamente soddisfacente, nonostante si siano osservati alcuni errori di commissione dell'algoritmo tra classi d'informazione distinte che mostrano comportamento spettrale simile.

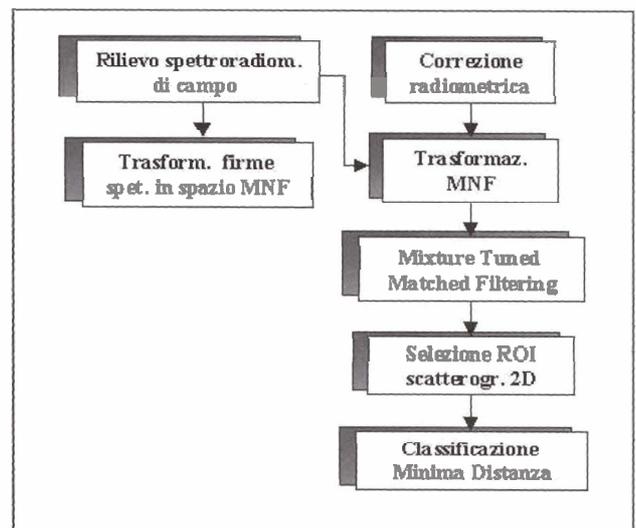


**Figura 1** - Approccio metodologico di classificazione *image based*.

Per meglio caratterizzare il comportamento spettrale delle superfici in cemento amianto si sono quindi effettuate campagne di rilievo a terra con lo spettroradiometro FieldSpec<sup>R</sup> FR. Le misure sono state effettuate su diversi campioni di materiali allo scopo di valutare la distinguibilità spettrale del cemento amianto da altri superfici e la separabilità interna alla classe del cemento amianto in funzione del suo stato di degrado.

Le firme spettrali di diverse lastre di cemento amianto sono state integrate in una libreria spettrale ancora in fase di completamento. Si è quindi messa a punto una metodologia di classificazione *spectral library based* delle coperture in cemento amianto, ancora in fase di sperimentazione (Fig. 2).

L'immagine MIVIS è stata corretta radiometricamente attraverso il programma di correzione atmosferica ATREM. In seguito l'immagine e le firme spettrali sono state trasformate in spazio MNF (Minimum Noise Fraction) [Harsanyi et al., 1994], ottenendo un nuovo set di bande decorrelate e ordinate in funzione della qualità dell'immagine. Le successive elaborazioni sono state effettuate sulle prime dieci bande sintetiche. Più precisamente si è utilizzato un algoritmo *Mixture Tuned Matched Filtering* [Boardman et al., 1995] per individuare un nuovo set di pixel immagine avente firma spettrale simile alla firma di riferimento del cemento amianto acquisita con lo spettroradiometro da campo [Wang. et al., 1996]. Questo metodo di analisi permette l'individuazione di determinati materiali all'interno di un'immagine, mediante il confronto tra la riflettività del pixel e la firma spettrale di riferimento del materiale ricercato. Rispetto alle comuni tecniche di *spectral unmixing* la tecnica MTFM presenta il vantaggio di richiedere unicamente la conoscenza delle firme spettrali dei materiali che si vogliono



**Figura 2** - Approccio metodologico di classificazione *spectral library based*.

identificare [Settle, 1996] e si è quindi potuta applicare nel nostro caso di studio dove non si conoscevano le firme spettrali di altri materiali artificiali utilizzati per l'edilizia. La classificazione, effettuata con algoritmo di minima distanza, ha dato risultati che presentano contenute differenze, in termini di accuratezza complessiva del classificato (sempre superiore al 90%), rispetto al percorso metodologico *image based*. Una prima analisi dei risultati ha comunque rivelato, nel caso di applicazione della metodologia *spectral based*, una notevole diminuzione degli errori di commissione tra le classi cemento amianto e asfalto stradale, al contrario evidenti nel risultato della classificazione secondo metodologia *image based*.

### Risultati e conclusioni

Il telerilevamento iperspettrale da aereo si dimostra, grazie alla sua elevata risoluzione spaziale e spettrale, uno strumento valido nell'individuazione e mappatura di superfici artificiali quali le coperture in cemento amianto. Le due metodologie di classificazione sperimentate (*image based e spectral library based*) hanno dato entrambe validi risultati in termini di accuratezza complessiva del classificato (superiore al 90%). Di contro si è osservata una maggiore diversificazione dei risultati relativamente alla congruenza della definizione spaziale delle coperture che, ad una prima analisi degli stessi (riportati su cartografia) si è dimostrata migliore nel caso di applicazione della metodologia *spectral library based*. Sviluppi futuri, nell'ambito di questa ricerca prevedono di completare la libreria spettrale mediante un rilievo spettrometrico effettuato in situ su altre lastre di cemento amianto a diverso stato di alterazione fisica. Si intende inoltre realizzare (sempre in situ) una libreria spettrale di superfici artificiali, quali asfalti, cementi, coppi, ecc. e di nuove coperture utilizzate nell'edilizia in sostituzione delle lastre in cemento amianto, quali il fibrocemento ecologico, al fine di meglio sperimentare tecniche di *spectral unmixing* nel riconoscimento e mappatura di coperture artificiali.

Le informazioni tematiche, relative alla mappatura delle coperture in cemento amianto, ottenute dall'elaborazione dei dati telerilevati iperspettrali, sono state trasferite, grazie alle informazioni cartografiche messe a disposizione dal Comune di Broni, in un sistema informativo geografico (SIT/GIS) comprendente vari piani informativi: Piano Regolatore Generale, carta tecnica regionale, reticolo viario e ferroviario. Questo rappresenta uno strumento fondamentale di pianificazione territoriale utile al fine di stimare l'entità della problematica e di programmare eventuali interventi di bonifica delle coperture in cemento amianto.

### Ringraziamenti

Nel corso di questa ricerca, cofinanziata dalla Fondazione Lombardia per l'Ambiente e dal CNR-IIA, sono stati

molto coloro che, direttamente o indirettamente, hanno contribuito al raggiungimento degli obiettivi che c'eravamo prefissati. Sentiamo quindi il dovere di ringraziarli tutti, in particolare: i ricercatori ed il personale tutto della Sez.e LARA, IIA-CNR di Pomezia, il reparto di telerilevamento, CNR-IRRS di Milano, il Prof. G. Chiappino, il Prof. M. Maroni, il Dott. D. Cavalli, dipartimento di Medicina del Lavoro, Università degli Studi di Milano, Il Dott. A. Cavazzini e il Sig. G. Pizzaferrì, CGR s.p.a di Parma, il Dott. S. Morisi e G. Volpi, Bentley Italia s.r.l. di Milano.

### Bibliografia

**Boardman, J. W., Kruse, F. A., e Green, R. O.** (1995) *Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data*. - Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication, 23-26.

**Chiappino G. e Venerandi I.** (1991) - *The erosion of asbestos cement roofs: an important source of environmental pollution*. - Medicina del Lavoro. 82; 99-121.

**Fiumi L. e Marino C.M.** (1997) - *Potenzialità del telerilevamento aereo con dato MIVIS per la caratterizzazione di materiali di copertura in aree urbane: il cemento-amianto*. - 1° Conferenza nazionale A.S.I.T.A., Parma, 30 Settembre-3 Ottobre, 373-377.

**Harsanyi, J. C., e Chang C. I.** (1994) - *Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: An orthogonal subspace projection approach*. - IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34; 1045-1046.

**Marino C.M., Galli A., Panigada C., Menin A., Maroni M., Chiappino G. e Cavallo D.** (1999) - *Utilizzo del telerilevamento iperspettrale da aereo nel riconoscimento di coperture in cemento amianto*. - Relazione finale, Progetto cofinanziato. Fondazione Lombardia per l'Ambiente, Milano, CNR-IIA, Roma.

**Settle, J.J.** (1996) - *On the relationship between spectral unmixing and subspace projection* - IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, . 32: p. 779-785.

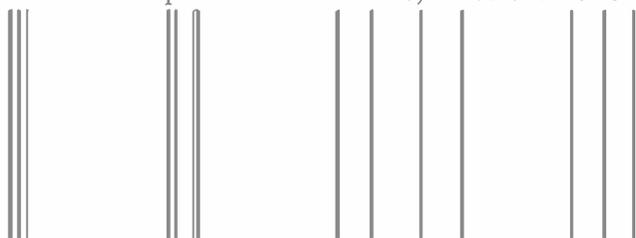
**Wang Z., Zhu Z., Wang H., e Liu Q.** (1999) - *Application of the Method of Imaging Spectral Angle Mapping based on laboratory spectra analysis*. Applied geologic remote sensing, Vancouver, BC, Canada - 1-3 march, 300-307.

---

# Caratterizzazione radiometrica di discariche controllate con dati MIVIS

Daniela Carrion <sup>(1)</sup> e Giovanmaria Lechi <sup>(1)</sup>

In questo lavoro sono state analizzate immagini telerilevate con lo strumento a scansione MIVIS riprese su siti ove è nota la presenza di discariche controllate di rifiuti solidi urbani ed è stata valutata la natura statistico - spettrale di due discariche campione in relazione all'ambiente circostante. È stato verificato che l'aspetto della discarica, valutato da un punto di vista statistico, è caratteristico nel-



*In this work remote sensing images taken by the MIVIS scanner on municipal landfills have been analysed. The spectral feature of the landfills has been studied in comparison to the surroundings. Landfills have a characteristic statistical behaviour in the frequency histogram, calculated in particular bands and bands ratios. An algorithm has been built to locate automatically a subject with a frequency histogram behaviour similar to a landfill on a high resolution image.*

Parma). Il materiale fornito consiste in due immagini telerilevate con lo scanner iperspettrale MIVIS (Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer) in un'area a sud-est di Milano. In particolare le immagini sono state riprese sulle discariche del Comune di Cavenago d'Adda e del Comune di Vizzolo Predabissi, rispettivamente nel lodigiano e nella zona di Melegnano, come si può vedere dalla Figura 1.

I dati sulla ripresa delle immagini sono elencati nella Tabella 1. La risoluzione al suolo delle immagini è di circa 2 m x 2 m.

32 - 20133 Milano

Ricevuto il 29/06/00 - Accettato il 12/10/00

---

Figura 1 - Localizzazione delle aree riprese.

**Tabella 1** - Dati relativi alle immagini utilizzate

Luogo ripreso	Data	Ora	Quota	Area al suolo
Cavenago	22/7/99	11.55	1500 m	1500 m x 4000 m
Vizzolo	22/7/99	11.50	1500 m	1500 m x 3100 m

Lo scanner iperspettrale MIVIS riprende contemporaneamente in 102 canali, di cui sono però stati disponibili solo 28 canali, corrispondenti alle bande della luce visibile, dell'infrarosso vicino e parte dell'infrarosso termico.

Sono note inoltre le temperature dei corpi neri di riferimento per la ripresa nell'infrarosso termico [Lechi, 1998], che il sensore legge all'inizio e alla fine di ogni strisciata, in modo da poter ricostruire la temperatura di corpo nero corrispondente al valore di radianza emessa registrato sull'immagine.

Sono state effettuate delle verifiche della realtà al suolo per valutare l'effettiva natura e destinazione delle superfici delle discariche.

### Aspetto delle discariche

Le discariche si presentano suddivise in diversi lotti: alcuni presentano - sopra l'accumulo dei rifiuti - una copertura definitiva, costituita da strati drenanti e isolanti e in superficie da almeno un metro di terreno, sono presenti lotti che presentano una copertura provvisoria, costituita da teli in HDPE (high-density polyethylene) [Gervasoni, 1991; Tutone, 1998] e lotti di conferimento, dove avveniva l'accumulo dei rifiuti al momento della ripresa delle immagini.

Dove è presente la copertura definitiva compare vegetazione non rigogliosa.

### Discarica di Cavenago d'Adda

La discarica di Cavenago d'Adda (Lodi) è di 1<sup>a</sup> categoria per rifiuti solidi urbani (RSU) compattati. Riceve i rifiuti da un bacino di utenza di 66 comuni delle province di Milano e Lodi per un quantitativo giornaliero totale di circa 180 tonnellate.

Nella discarica di Cavenago d'Adda sono stati raccolti finora rifiuti "tal quali", che pertanto non hanno subito nessun processo di pretrattamento.

Attualmente iniziano a pervenire alla discarica rifiuti secchi, come richiesto dalla legislazione recente.

Tutto il biogas prodotto viene bruciato nella torcia dell'impianto.

La base della discarica si trova a circa 10 m dal livello di massima escursione della falda.

La discarica è costruita in rilevato, con una quota massima di progetto di circa 10 m ed è costituita da tre lotti che occupano complessivamente circa 500000 m<sup>3</sup>.

Il primo lotto è stato coltivato dal mese di maggio 1993 al luglio 1995 e possiede ora una copertura quasi definitiva. Il secondo lotto è stato coltivato dal luglio 1995 al mese di dicembre 1998 ed è attualmente coperto con teli verdi. Il terzo lotto è in fase di conferimento dal mese di dicem-

bre 1998 ed è interessato dalla copertura giornaliera di rifiuti e di terreno.

Attualmente è in fase di elaborazione un progetto di ampliamento della discarica.

La discarica è concessa in gestione alla società ECOAD-DA di cui fa parte il gruppo Waste Management.

### Discarica di Vizzolo Predabissi

La discarica di Vizzolo Predabissi (Milano) è di 1<sup>a</sup> categoria per rifiuti compattati (RSU, rifiuti assimilabili agli urbani e rifiuti ingombranti triturati) e serve un bacino di utenza costituito da 101 comuni e da altri due soggetti convenzionati della Provincia di Milano. Vengono accumulate circa 620 tonnellate di rifiuti al giorno.

Il sito della discarica è stato individuato dal Piano Regionale lombardo per lo smaltimento dei RSU tramutato nella Legge Regionale 37 del 2 Luglio 1988.

La discarica di Vizzolo Predabissi è di notevoli dimensioni, occupa infatti un'area di 250000 m<sup>2</sup> e un volume di circa 3 milioni di m<sup>3</sup>. La base della discarica poggia su uno strato naturale di materiale argilloso e dista circa 10 m dal livello di massima escursione della falda.

Lo scarico è concesso in gestione alla Società SACAGICA S.r.l. di Milano, appartenente al gruppo Waste Management dal 1983.

La discarica è suddivisa in dieci lotti che sono stati coltivati in varie fasi. Il lotto zero corrisponde ad una vecchia discarica degli anni '60. In seguito, con ampliamenti successivi sono stati coltivati i lotti dall'1 al 6, poi i lotti 7 e 8 in base a delibere autorizzative regionali. L'ultimo lotto coltivato è il numero 9 istituito in seguito ad un'ordinanza del Commissario per l'emergenza dei rifiuti.

Nell'ultima fase di vita della discarica sono stati effettuati i lavori di adeguamento delle pendenze in base al D.G.R. Lombardia 5/65874 del 28 Marzo '95.

La quota massima di progetto è circa 20 m.

Sono destinati a questa discarica solo rifiuti secchi, preventivamente privati della frazione umida mediante raccolta differenziata porta a porta o pretrattamenti.

Il biogas prodotto dai rifiuti è inviato ad un impianto di cogenerazione che alimenta un sistema di teleriscaldamento di cui usufruisce l'Ospedale di Melegnano.

### Scelta delle bande

Innanzitutto è stato necessario operare una scelta fra le bande da utilizzare per le elaborazioni, vista la gran quantità di materiale disponibile, in modo da ridurre i tempi di calcolo. Le bande scelte sono elencate in Tabella 2.

I canali sono stati selezionati in modo da rappresentare i settori significativi dello spettro elettromagnetico esplorati dagli spettrometri dello strumento MIVIS.

Sono stati scelti quattro canali corrispondenti alla luce visibile, uno nell'infrarosso molto vicino, uno nell'infrarosso vicino ed uno nell'infrarosso termico. Sono state inoltre utilizzate delle bande sintetiche date dal rapporto

**Tabella 2** - Canali utilizzati.

Canale 1	0.433-0.453 $\mu\text{m}$	luce visibile blu
Canale 4	0.493-0.513 $\mu\text{m}$	luce visibile blu-verde
Canale 7	0.533-0.573 $\mu\text{m}$	luce visibile verde
Canale 14	0.693-0.713 $\mu\text{m}$	luce visibile rossa
Canale 18	0.773-0.793 $\mu\text{m}$	infrarosso molto vicino
Canale 23	1.250-1.300 $\mu\text{m}$	infrarosso vicino
Canale 93	8.200-8.600 $\mu\text{m}$	infrarosso termico

di coppie delle bande sopra menzionate come descritto nei paragrafi seguenti.

### Strumenti usati per l'elaborazione

Per elaborare le immagini sono stati utilizzati il programma ENVI (The Environment for Visualizing Images) [Research Systems, Inc., 1996] e l'ambiente Matlab. ENVI è un sistema di processamento delle immagini che contiene numerose funzioni per l'elaborazione dei dati. Matlab è un ambiente di lavoro e di programmazione particolarmente adatto per le operazioni matriciali, nel quale sono stati implementati appositamente degli algoritmi per le necessità di questo lavoro.

### Caratterizzazione delle discariche controllate

Si è pensato di utilizzare l'istogramma di frequenza per trovare una caratterizzazione della discarica rispetto al resto dell'immagine. Per fare questo sono state scomposte entrambe le immagini in finestre delle dimensioni delle rispettive discariche e si è calcolato l'istogramma caratteristico di ogni finestra.

Gli istogrammi sono stati calcolati innanzitutto sulla banda 93 dell'infrarosso termico, in quanto si è pensato che la temperatura potesse dare una caratterizzazione alla discarica rispetto al terreno circostante.

Sono state considerate anche delle bande sintetiche realizzate come rapporto delle bande scelte precedentemente (Tab. 1). Sono state generate le bande sintetiche ottenibili dal rapporto delle coppie date dalle possibili combinazioni delle bande scelte.

### Rapporto fra bande

È possibile realizzare delle bande sintetiche per migliorare i contrasti e aumentare il numero di informazioni contenute in una singola banda.

Per ottenere il rapporto fra due bande è possibile utilizzare lo strumento dell'ambiente ENVI che permette di effettuare operazioni matematiche fra bande.

Il valore di DN di ogni pixel della banda sintetica è dato dal rapporto dei DN delle bande originarie moltiplicato per un fattore di amplificazione e poi troncato per ottenere nuovamente un numero intero.

### Confronto fra gli istogrammi

Per confrontare gli istogrammi calcolati sulle varie fine-

stre è necessario ridurli a dati omogenei fra loro. Inoltre se si vuole confrontare finestre di dimensioni diverse è anche necessario normalizzare rispetto al numero di pixel della finestra.

Per normalizzare gli istogrammi si è scelto di:

- dividere ogni DN per il DN medio della finestra (nel caso della banda dell'infrarosso termico per il DN medio dell'intera immagine);
- dividere il valore in ascissa di ogni istogramma per il numero totale di punti della finestra in cui l'istogramma è stato calcolato.

In questo modo si ottengono grafici con valori in ordinata e in ascissa confrontabili nonostante siano stati calcolati su parti diverse di immagini differenti.

### Interpolazione dei dati

Si è scelto di confrontare i vari istogrammi in modo discreto, punto per punto, in quanto la particolare forma assunta dal grafico non si prestava a nessuna interpolazione con funzioni note che risultasse significativa. Per fare questo è però necessario che i valori in ascissa delle varie curve siano sempre gli stessi.

Essendo discreti anche i dati calcolati ed essendo il valore in ascissa dipendente dagli specifici DN presenti in ogni finestra e dal valore medio per il quale sono stati divisi, si è dovuto ricorrere ad un'interpolazione.

I valori in ordinata normalizzati sono stati interpolati linearmente e calcolati in corrispondenza di valori in ascissa definiti a priori e con un passo opportuno.

In tutte le elaborazioni citate in questo lavoro i dati in ordinata sono stati calcolati in corrispondenza di valori in ascissa compresi tra 0 e 2 con passo 0.02.

Tutte queste operazioni sono state eseguite implementando le funzioni necessarie in ambiente Matlab.

### Indici di confronto

Sono stati utilizzati diversi indici per confrontare le curve e per valutare numericamente la maggiore o minore corrispondenza fra di esse: l'indice di covarianza, l'indice di *semblance* [Zanzi, 1998] un indice empirico, definiti di seguito [McPherson, 1990].

Dati due insiemi di misure

$$x_A = (x_{A1}, x_{A2}, \dots, x_{An})$$

$$x_B = (x_{B1}, x_{B2}, \dots, x_{Bn})$$

definiamo valore medio la media aritmetica di ognuno dei due insiemi:

$$\mu_A = \frac{\sum_{i=1}^n x_{Ai}}{n}$$

$$\mu_B = \frac{\sum_{i=1}^n x_{Bi}}{n}$$

$$\sigma_A^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{Ai} - \mu_A)^2}{n}$$

$$\sigma_B^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{Bi} - \mu_B)^2}{n}$$

Definiamo la covarianza degli insiemi di misure:

$$\sigma_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{Ai} - \mu_A) \cdot (x_{Bi} - \mu_B)}{n}$$

Il coefficiente di correlazione è così definito:

$$r_{AB} = \frac{\sigma_{AB}}{\sigma_A \cdot \sigma_B} \quad -1 \leq r_{AB} \leq 1$$

Quando  $r_{AB}=0$  gli insiemi di misure sono completamente scorrelati, quando  $r_{AB}=1$  o  $r_{AB}=-1$  i due insiemi sono totalmente correlati.

Il coefficiente di *semblance* è definito come

$$c_{SMB} = \frac{1}{M} \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \sum_{j=1}^M x_{ij} \right]^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^M x_{ij}^2} \quad 0 \leq c_{SMB} \leq 1$$

dove  $n$  è il numero di elementi di ogni campione e  $M$  è il numero di campioni che si desidera confrontare. Nel nostro caso  $M=2$  e  $j=A,B$ .

Il coefficiente di *semblance* è uguale a 1 solo quando i due campioni coincidono.

L'indice empirico considerato è così definito:

$$sp = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{A,i} - x_{B,i})^2 - \left[ \sum_{i=1}^n (x_{A,i} - x_{B,i}) \right]^2 / (n-1)}{\sum_{i=1}^n x_{A,i}^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_{A,i} \right)^2 / (n-1)}$$

In questo indice al secondo membro compare il rapporto fra la varianza degli scarti fra i due istogrammi a confronto e la varianza dell'istogramma di riferimento. Tale indice è ovviamente pari a uno quando gli scarti sono nulli.

### Gli istogrammi delle discariche controllate

Gli istogrammi di frequenza calcolati sulle due discariche nella banda dell'infrarosso termico (banda 93) e ancor più nella banda sintetica data dal rapporto del blu (banda 1) sul verde (banda 7) hanno una fisionomia simile. Gli istogrammi delle due discariche interpolati e normalizzati sono rappresentati nella Figura 2. È possibile quantificare questa somiglianza utilizzando gli indici descritti precedentemente. Tutti gli indici infatti confermano che la correlazione fra gli istogrammi delle due discariche è elevata, come si può vedere nella Tabella 3.

Per capire quanto questo dato sia significativo è necessario calcolare la correlazione anche fra altri istogrammi.

È possibile effettuare controlli incrociati di diverso tipo, ad esempio fra l'istogramma di una discarica e quelli calcolati sulla stessa immagine su altre finestre, oppure fra l'istogramma di una discarica e varie finestre di un'altra immagine e valutare i valori assunti dai vari indici. In Figura 3 possiamo vedere gli istogrammi della discarica di Cavenago e di una finestra della stessa immagine che risulta essere poco correlata con essa.

I diversi indici danno risultati congruenti fra loro, ma cambia la gamma di valori che possono assumere e la sensibilità alle piccole variazioni, come illustrato sempre nella Tabella 3.

L'indice che si dimostra più severo e che quindi permette di individuare con più facilità solo le forti correlazioni è l'indice empirico.

Analizzando i risultati dei possibili controlli incrociati si può concludere che sulle immagini sono presenti zone diverse dalla discarica che hanno un comportamento spettrale simile ad essa, che presentano quindi con la discarica un elevato valore dell'indice empirico.

Tuttavia variando opportunamente il valore di soglia dell'indice di confronto è possibile selezionare un numero limitato di finestre simili alla discarica.

Nelle pagine e nelle figure seguenti vengono esposti i risultati relativi alle analisi effettuate sulle immagini nella banda sintetica descritta precedentemente del blu sul verde.

### Risultati della ricerca effettuata sull'immagine di Cavenago d'Adda

La discarica di Cavenago occupa una finestra di circa 150 pixel x 150 pixel, quindi esplorando l'immagine con una finestra di dimensioni 150 x 150 che si sposta a partire dal primo punto in alto a sinistra ogni volta di 50 pixel verso destra per ogni riga e poi verso il basso sempre di 50 pixel, arriviamo a coprire tutta l'immagine con 494 finestre.

Stabilendo una soglia per l'indice empirico del 90% e

**Tabella 3** - Valori assunti dai coefficienti usati per il confronto degli istogrammi rispettivamente delle due discariche e di una discarica con una finestra con campi coltivati.

Soggetti a confronto	Coeff. di correlazione	Indice di semblance	Indice empirico
Le due discariche	0.9397	0.9739	0.8828
Discarica di Cavenago e finestra con campi coltivati	0.1528	0.5859	0.2105

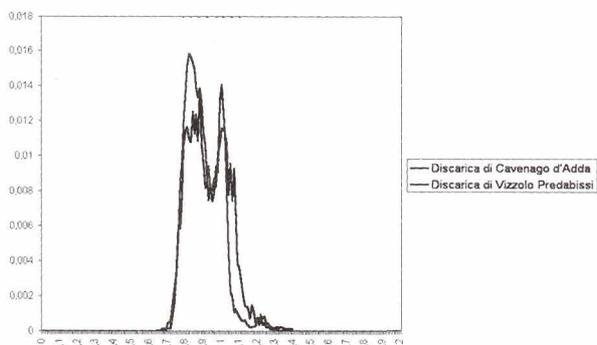


Figura 2 - Istogrammi calcolati nella banda sintetica blu/verde.

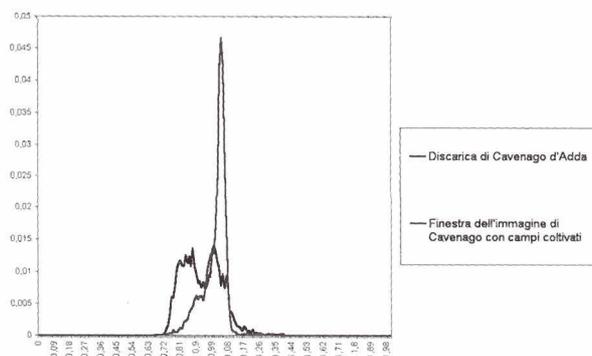


Figura 3 - Istogrammi calcolati nella banda sintetica blu/verde.

confrontando l'istogramma di ogni finestra con quello ottenuto mediando gli istogrammi delle discariche di Vizzolo e Cavenago, si selezionano 9 istogrammi, circa il 2% di quelli calcolati.

Il picco di somiglianza si ha per gli istogrammi che sono calcolati sulle finestre che meglio sono centrate sulla discarica. Come è possibile vedere dalla Figura 4 sostanzialmente sono state individuate quattro zone sull'immagine: la discarica e altri due punti con campi coltivati. Quindi visualizzando i 9 istogrammi individuati sull'immagine si può evidenziare che il numero di tipologie di superfici effettivamente simili alla discarica è ancora inferiore, pari a 4.

In questo caso era prevedibile che il picco fosse in corrispondenza della discarica, in quanto il grafico che avevamo preso come riferimento derivava direttamente, tramite l'operazione di media, da quello della discarica, tuttavia una ricerca di questo tipo ci permette di concludere che l'aspetto dell'istogramma della discarica è effettivamente differente dal resto dell'immagine e solo poche zone sono individuabili come analoghe.

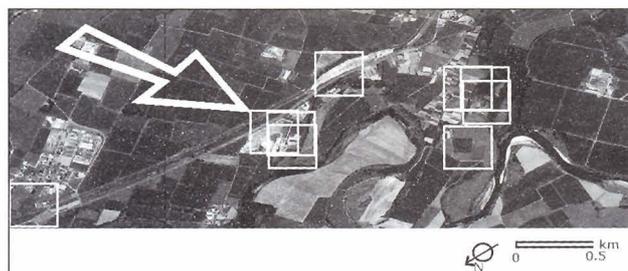


Figura 4 - Risultati della ricerca sull'immagine di Cavenago d'Adda - Aut. SMA N°309 del 13/10/99

### Risultati della ricerca effettuata sull'immagine di Vizzolo Predabissi

È stata quindi condotta la stessa analisi per la discarica di Vizzolo. In questo caso la discarica è molto più grande. Si può scegliere di esplorare l'immagine con una finestra che ha circa le dimensioni della discarica, cercando di individuare la discarica, oppure di esplorarla con una finestra di dimensioni diverse, ad esempio più piccole, in modo da individuare zone con un comportamento spettrale simile alla discarica, ma che evidentemente non saranno situate sulla discarica.

Esplorando l'immagine con una finestra di 150 pixel x 450 pixel che è circa la dimensione della discarica è possibile trovare 299 finestre. Confrontando gli istogrammi di queste finestre nuovamente con quello ottenuto mediando i grafici delle due discariche è stato trovato che 11 finestre danno, rispetto al riferimento, un indice empirico del 90%, poco meno del 4%.

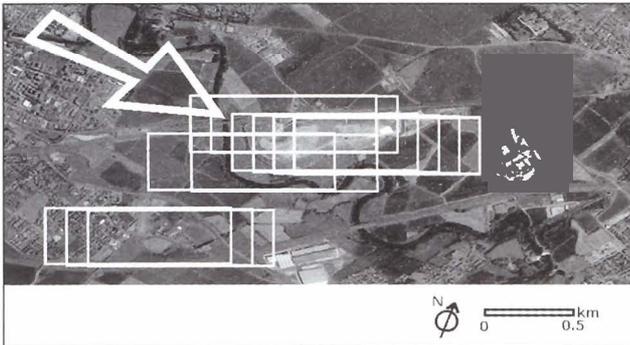
Possiamo vedere nella Figura 5 che anche in questo caso, una volta riportate sull'immagine le finestre individuate per via statistica, viene individuato un numero limitato di zone effettivamente simili alla discarica. Sempre sull'immagine in Figura 5 possiamo vedere come la discarica sia stata individuata più volte e che quindi molte finestre rappresentino sempre la zona della discarica e altri tre istogrammi individuano una seconda zona mista di urbanizzato e campi coltivati.

Sono state effettuate anche prove utilizzando come riferimento anziché l'istogramma medio delle due discariche quello della discarica di Cavenago sull'immagine di Vizzolo ottenendo risultati analoghi.

### Verifica dell'algoritmo su altre immagini

Abbiamo verificato i risultati così trovati su altre immagini riprese con lo strumento MIVIS.

Una prima prova è stata effettuata su un'immagine della città di Parma, ripresa da una quota di 1000 m, raffigurante solo terreno urbanizzato. Sempre con il metodo della finestra mobile abbiamo esplorato tutta la matrice confrontando tutti gli istogrammi con quello ottenuto mediando i grafici delle discariche di Vizzolo e Cavenago.



**Figura 5** - Risultati della ricerca sull'immagine di Vizzolo Predabissi. - Aut SMA N°315 del 18/10/99

Impostando una soglia per gli indici confrontabile con quelle utilizzate in precedenza non sono state individuate zone con un comportamento spettrale analogo alle discariche.

Questo risultato è coerente con quanto ci si aspettava, visto che una zona densamente urbanizzata si presenta molto diversa dalla discarica, che è caratterizzata sostanzialmente da terreno scoperto.

È stata effettuata un'altra prova su un'immagine contenente una discarica.

L'immagine è stata ripresa sulla discarica del Comune di Bassa di Stura (Torino) – di caratteristiche analoghe alle discariche di Cavenago e Vizzolo – con il sensore MIVIS il 15 Novembre 1997 alle 10.00 del mattino ad una quota di 1500 m, con una risoluzione di 2 m x 2 m.

La quota di volo è la stessa delle discariche studiate in precedenza, la stagione di ripresa è invece diversa, trattandosi in questo caso di inverno.

Sono state effettuate prove analoghe a quelle descritte precedentemente, esplorando l'immagine con finestre di dimensioni variabili.

La discarica è piuttosto grande e occupa una finestra di circa 250 pixel x 450 pixel. È possibile esplorare l'immagine con finestre più piccole in modo da individuare zone con comportamento spettrale analogo alla discarica, ma non la discarica, oppure fare una ricerca con finestre della dimensione della discarica, cercando di individuarla.

Sono state selezionate le finestre i cui istogrammi, confrontati con quello ottenuto mediando i grafici delle discariche di Cavenago e Vizzolo, dessero un valore dell'indice empirico almeno pari al 90%.

Utilizzando una finestra mobile delle dimensioni di 250 pixel x 450 pixel, della dimensione della discarica, sono stati ottenuti risultati molto soddisfacenti.

Sono state esplorate in tutto 341 finestre e solo 5 (Figura 6) hanno un indice empirico superiore al 90% e il picco dell'indice si ha in corrispondenza della finestra meglio centrata sulla discarica.

Questo risultato è sicuramente significativo, in quanto,

diversamente dalle prove precedenti l'istogramma preso come riferimento non ha alcun legame con l'immagine sulla quale si è effettuata la ricerca. Inoltre le condizioni spaziali e climatiche in cui sono stati raccolti i dati relativi alle immagini sulle quali si è basata questa ricerca e quelle di quest'ultima immagine sono diverse, trattandosi di due località distanti circa 140 km e di due stagioni dell'anno differenti e quindi di due condizioni diverse per lo strumento.

Alla luce di questi risultati possiamo quindi concludere che l'istogramma di frequenza calcolato sul rapporto di bande blu/verde permette di caratterizzare la discarica e di individuarla con una certa precisione su un'immagine ad alta risoluzione insieme ad un numero ristretto di altre zone con comportamento spettrale analogo.

### **Applicabilità dell'algorithm su altre bande**

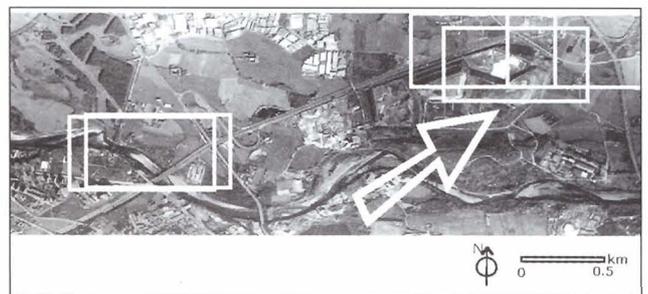
È possibile seguire lo stesso procedimento utilizzando sempre l'istogramma di frequenza, ma calcolato su altre bande.

Sono state effettuate prove con la banda 93 del MIVIS nell'infrarosso termico e sono stati ottenuti risultati interessanti, in quanto anche in questo caso la discarica presenta una fisionomia che si differenzia dall'ambiente circostante.

Effettuando analisi di questo tipo è molto importante l'intervento dell'operatore che deve, caso per caso, stabilire i parametri da utilizzare in relazione alla specificità del problema. Infatti passando alla banda dell'infrarosso termico cambia la risposta rispetto agli indici ed è quindi necessario modificare la soglia rispetto alla quale l'algorithm seleziona le finestre che hanno un comportamento analogo alla discarica.

È necessario alzare o abbassare la soglia – che è sensibile al caso specifico – in modo da selezionare un numero limitato di finestre sull'immagine: se la soglia è troppo bassa vengono selezionate troppe zone dell'immagine, se la soglia è troppo alta può non venire selezionata nessuna finestra, ma a priori questo non vuol dire che non ci sia sull'immagine nessuna zona effettivamente compatibile.

Per le prove effettuate con il rapporto di bande blu su verde la soglia del 90% per l'indice empirico ha in tutti i



**Figura 6** - Risultati della ricerca sull'immagine della discarica di Bassa di Stura (To) - Aut SMA N°590 del 22/12/97

casi dato buoni risultati. Invece nel caso della banda termica è stato necessario utilizzare una soglia più bassa, comunque con una soglia del 75+80% è stato possibile selezionare un numero limitato di zone tra le quali la discarica è effettivamente presente.

Per caratterizzare la discarica con questo procedimento le altre bande, sintetiche e non, che sono state esaminate non hanno dato una risposta soddisfacente.

### **Metodologia di analisi**

Possiamo quindi riassumere il tipo di approccio che è stato seguito per utilizzare l'algoritmo definito con questo lavoro per individuare una discarica controllata, o più in generale per individuare un elemento del territorio che presenti una fisionomia particolare nell'istogramma di frequenza rispetto all'ambiente circostante.

Il primo passo è stabilire le dimensioni dell'oggetto che si vuole caratterizzare e individuare sull'immagine una finestra rettangolare che ricopra perfettamente l'oggetto.

A questo punto bisogna calcolare l'istogramma di frequenza della finestra selezionata in bande che è possibile stabilire in diversi modi: è possibile cercare di decidere a priori in quali bande ci sono buone probabilità di individuare un carattere distintivo per l'oggetto in questione, oppure si può provare molti casi per via automatica al calcolatore e poi selezionare le bande interessanti in base ai risultati ottenuti.

La prima via può essere più veloce se si ha un'idea di cosa si sta cercando, ma è necessario che l'operatore abbia elementi sufficienti per stabilire come procedere. La seconda via può richiedere tempi di calcolo molto elevati, ma esplorando molti casi dà sicuramente una risposta più attendibile.

Una volta individuata la banda o le bande che danno una buona caratterizzazione all'oggetto di studio si può procedere ad esplorare l'immagine per via automatica.

I parametri da stabilire per effettuare questa operazione sono:

- dimensione della finestra mobile sull'immagine, che può essere grande come l'oggetto campione, più grande o più piccola;
- passo con il quale si vuole passare da una finestra alla successiva nell'esplorazione dell'immagine: se si sceglie un passo molto piccolo – ad esempio di pochi pixel – aumenta la precisione di individuazione ma aumentano molto anche i tempi di calcolo, passando ad un passo ad esempio di qualche decina di pixel i tempi si riducono e la precisione può essere accettabile; comunque la dimensione del passo è strettamente legata alla dimensione dell'oggetto che si vuole ricercare;
- passo con il quale si vogliono interpolare gli istogrammi in modo da avere dati confrontabili in modo discreto, quindi imponendo il valore in ascissa e valutando il corrispondente valore in ordinata;
- soglia da imporre all'algoritmo per selezionare le fine-

stre candidate in base agli indici di confronto;  
- infine in base all'obiettivo per il quale è stata effettuata la ricerca può essere necessario fare un controllo al suolo della natura delle zone selezionate.

Quando il caso lo richieda è possibile effettuare dei controlli incrociati, ad esempio selezionare le finestre che hanno un certo livello di correlazione con il campione in più bande contemporaneamente, oppure associare questo tipo di analisi ad altre in modo da rendere la selezione sempre più efficace.

### **Tempo necessario per le elaborazioni**

I dati finora descritti sono stati elaborati con un Personal Computer con un processore Pentium II a 300MHz e con 96 MB di RAM.

Il tempo di elaborazione per una matrice – l'immagine – di 2000 pixel x 750 pixel sulla quale si effettua una ricerca con una finestra mobile di 150 pixel x 150 pixel, con un passo di 50 pixel è di circa 25 minuti.

Con la risoluzione di circa 2 m x 2 m al suolo l'area esplorata in questo caso è di circa 6 km<sup>2</sup>.

Quindi supponendo di voler esplorare con gli stessi parametri tutta l'area del Comune di Milano – circa 180 km<sup>2</sup> – rilevata con la risoluzione di 2 m x 2 m i tempi di calcolo sarebbero di circa 12 ore con il PC utilizzato per questo lavoro.

Bisogna tenere conto che sono ora in commercio processori per PC che permettono tempi di calcolo molto inferiori.

### **Utilizzo della classificazione per individuare la superficie di conferimento della discarica**

Sono state effettuate delle classificazioni con l'algoritmo SAM (Spectral Angle Mapper) richiedendo al classificatore di individuare sull'immagine la sola classe corrispondente al suolo nudo.

Si è visto come sostanzialmente la superficie della discarica si presenti con un aspetto analogo a quello del suolo nudo. Infatti i rifiuti sono ricoperti da terreno e anche dove è già stata creata la copertura definitiva, destinata a ospitare la vegetazione, ci vuole molto tempo prima che la copertura vegetale diventi significativa, viste le difficili condizioni in cui si trova a crescere.

Ci si aspetterebbe quindi che il classificatore individuasse tutta la superficie della discarica come suolo nudo. Si è invece evidenziato come la zona di conferimento della discarica abbia un comportamento radiometrico distinguibile dal resto della discarica e dal suolo nudo.

Al variare delle bande con le quali si effettua la classificazione la parte della discarica costituita dalla zona di conferimento è a volte compresa e a volte no fra i pixel individuati dal classificatore come appartenenti alla classe suolo nudo. Nelle Figure 7 e 8 è possibile vedere i risultati delle classificazioni con e senza la zona di conferimento.

In particolare si è visto che per individuare correttamente il suolo nudo sono fondamentali i canali dell'infrarosso, sia vicino sia termico, e l'aggiunta del canale 4 corrispondente alla luce blu-verde permette al classificatore di distinguere la zona di conferimento dal suolo nudo.

Si è verificato questo risultato con entrambe le immagini.

### ***Come utilizzare il risultato***

Una volta ottenute le due mappe del suolo nudo, l'una contenente la zona di conferimento e l'altra no, è possibile realizzare una mappa delle differenze nella quale si troveranno una serie di pixel con lo stesso comportamento spettrale della zona di conferimento della discarica. Sulla mappa delle differenze saranno presenti alcuni pixel sparsi e alcune zone omogenee tra cui la zona di conferimento della discarica.

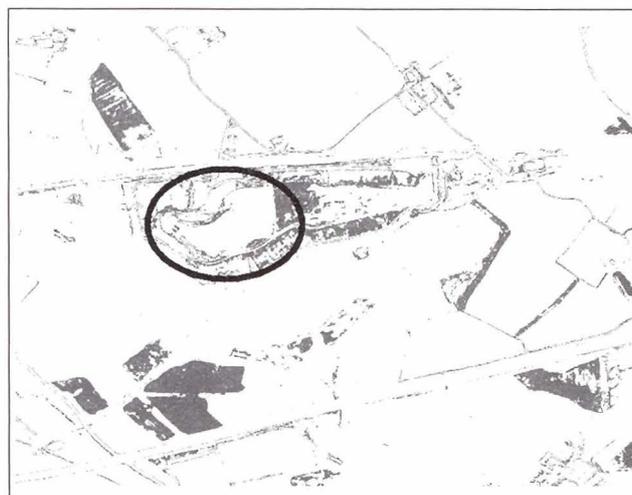
Applicando alla mappa ottenuta un filtro mediano più volte è possibile eliminare i pixel isolati e enfatizzare la presenza di zone omogenee.

Alla fine di quest'operazione sulla mappa saranno presenti solo zone omogenee di varia dimensione con comportamento radiometrico analogo alla zona di conferimento.

Possiamo vedere la mappa delle differenze nella Figura 9. Si può ipotizzare che la zona di conferimento di una discarica controllata abbia un aspetto analogo a quello di una discarica non controllata, nella quale si presume che si ometta di ricoprire i rifiuti con il terreno sia giornalmente sia al completamento dell'accumulo. Le immagini delle discariche infatti sono state riprese in un giorno lavorativo, durante l'accumulo di rifiuti, quando non erano presenti sui rifiuti i 10 cm di terreno che vengono sistemati a fine giornata come previsto dalla legge. Quindi questa caratteristica dei rifiuti, dopo opportuna verifica della sua



**Figura 7** - Mappa del terreno scoperto compresa la zona di conferimento.



**Figura 8** - Mappa del terreno scoperto esclusa la zona di conferimento (area cerchiata).

applicabilità alle discariche non controllate, potrebbe rivelarsi un utile strumento per l'individuazione delle stesse.

Dalla mappa delle differenze filtrata è infatti possibile individuare un numero limitato di aree "candidate" e l'ultimo passo dell'analisi consisterebbe in una verifica al suolo di tali superfici per vedere se alcune di esse siano realmente discariche non controllate.

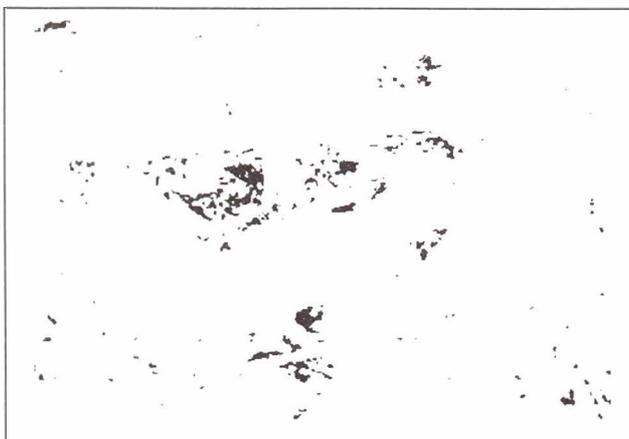
### **Conclusioni**

In questo lavoro è stato verificato che l'aspetto di una discarica controllata di RSU, valutato da un punto di vista statistico, è caratteristico nell'istogramma di frequenza calcolato in alcune particolari bande, rispetto al comportamento medio delle zone circostanti.

È stato costruito per questo un algoritmo in grado di individuare su un'immagine qualsiasi un elemento del territorio che presenti in qualche banda un comportamento analogo alla discarica nell'istogramma di frequenza.

Tale algoritmo calcola l'istogramma di frequenza di una finestra "mobile" che si sposta ordinatamente sull'immagine fino a ricoprirla tutta. Gli istogrammi così ottenuti vengono confrontati mediante alcuni indici di correlazione in modo discreto con quello di riferimento, relativo all'oggetto da cercare, nel nostro caso una discarica di RSU. In base ai valori assunti dagli indici è possibile individuare sull'immagine le finestre che hanno un comportamento spettrale analogo all'oggetto che si sta cercando.

La metodologia potrà essere applicata nell'immediato futuro per la ricerca su vaste zone della presenza di discariche controllate, oppure potrà essere esteso ad altri elementi del territorio, dopo aver verificato che questi abbiano un andamento caratteristico nell'istogramma di frequenza. Un primo aspetto sul quale potrebbe essere



**Figura 9** - Mappa delle differenze: aree con comportamento spettrale analogo alla zona di conferimento dei rifiuti.

importante puntare l'attenzione è l'individuazione delle discariche abusive, la cui posizione è ignota a priori. L'algoritmo descritto in questo lavoro di ricerca permette infatti di individuare su vaste zone un numero limitato di aree con caratteristiche molto simili a quelle cercate, quindi i costi legati all'esplorazione del territorio, in termini economici e di tempo, si ridurrebbero molto grazie alla rapidità con cui è possibile elaborare le immagini al computer.

Per la ricerca delle discariche abusive può ragionevol-

mente essere utile il risultato ottenuto riguardo all'individuazione della zona di accumulo dei rifiuti per mezzo della classificazione come descritto precedentemente. Questo tipo di analisi permette infatti di individuare poche regioni sull'immagine con comportamento spettrale analogo all'ammasso di rifiuti.

## Bibliografia

**Gervasoni S.**, (1991) – *Discariche controllate*. Ed. HOEPLI, Milano, pp. 223.

**Lechi G.**, (1998) – *Dispense del corso di Telerilevamento, Anno Accademico 1998-1999*. Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Milano, pp. 300.

**Research Systems, Inc.**, (1996) – *ENVI User's Guide, The Environment for Visualizing Images*. Better Solutions Consulting, Colorado, USA, pp. 370.

**Tutone G.**, (1998) – *Nuove discariche controllate di rifiuti solidi*. Dario Flaccovio Editore, Palermo, pp. 158.

**McPherson G.**, (1990) – *Statistics in Scientific Investigation*. Springer-Verlag, New York, pp. 667.

**Zanzi L.**, (1998) – *Dispense del corso di Geofisica Applicata, Anno Accademico 1998-1999*. Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Milano, pp. 330.

# Riconoscimento degli habitat vegetazionali del bacino del Torrente Baganza (Parma) attraverso dati MIVIS

Pierfrancesca Rossi <sup>(1)</sup>, Alessandro Ferrarini <sup>(2)</sup>, Nicola Zaccarelli <sup>(2)</sup> e Giovanni Zurlini <sup>(3)</sup>

La mappatura degli habitat naturali e seminaturali rappresenta un aspetto chiave per pianificare la conservazione e definire programmi di monitoraggio della biodiversità.

La tecnica di classificazione CART (Classification And Regression Trees) è stata applicata a dati iperspettrali MIVIS (ottenuti attraverso il rapporto tra bande contigue) per rappresentare la distribuzione della vegetazione nel bacino del Torrente Baganza (Parma). Quest'area è stata studiata nell'ambito del Progetto "Carta della Natura" che ha portato alla realizzazione della "Carta degli habitat CORINE" sulla base dei criteri esposti nel CORINE Biotopes Project dell'Unione Europea. Il metodo di classificazione CART ha permesso di raggiungere risultati molto promettenti sia sui training sites che fuori campione. Queste evidenze suggeriscono l'opportunità di utilizzo della tecnica CART applicata a sets MIVIS derivati anche per altri settori di ricerca nell'ambito del telerilevamento.

## Introduzione

La rappresentazione spaziale degli habitat a diverso grado di naturalità è divenuta un aspetto chiave a supporto della conservazione [Ludeke et al., 1990; Roy et al., 1997]. I caratteri di biodiversità degli habitat costituiscono la base per decidere quali siti sono prioritari nelle azioni di conservazione. La frammentazione e la degradazione del paesaggio sono stati identificati come le cause fondamentali della perdita di biodiversità [Roy et al., 1999; Debinski et al., 2000]. La loro quantificazione passa attraverso la misura di diverse variabili (forma, dimensione, numero degli habitat; contiguità spaziale; presenza/assenza di corridoi biologici e aree ecotonali, connettività e connettanza) su cui si fonda l'analisi della tessitura e della complessità del paesaggio e delle sue modificazioni nel tempo, nonché della ricchezza biologica che lo caratterizza

*Natural and seminatural habitat mapping is a key issue for landscape planning and conservation and for defining biodiversity monitoring programs.*

*The CART classification method has been applied to hyperspectral MIVIS data sets derived from raw data by the band ratioing of neighboring wavelengths. Our aim is to realize a vegetational mapping of the Baganza stream watershed. This area has been studied in the framework of the "Carta della Natura" Project which has led to the "CORINE habitat mapping" based on the criteria exposed in the UE CORINE Biotopes Project.*

*The CART classification method has provided promising results inside and outside the training sites. These evidences demonstrate the opportunity for further applications of the CART methodology to MIVIS derived data sets for different remote sensing research areas.*

za [O'Neill et al., 1997]. Questo obiettivo può essere raggiunto avvalendosi del telerilevamento che costituisce un approccio sinottico alla mappatura del territorio. Gli ecosistemi della regione mediterranea presentano un elevato grado di frammentazione [Naveh e Lieberman, 1994; Pignatti, 1994] dovuto ad un incessante impatto antropico: ne consegue la necessità di operare a grana fine nel riconoscimento di habitat a diverso grado di naturalità.

Nel presente lavoro è stata applicata la tecnica non parametrica CART (Classification And Regression Trees); [Breiman et al., 1984; Grossi, 2000] ad immagini iperspettrali del sensore MIVIS (Daedalus AA5000 Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer) del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Tale metodologia ha permesso di riconoscere gli habitat presenti nel bacino del Torrente Baganza, definiti nell'ambito del Progetto CORINE Biotopes del Programma CORINE [C.E.C., 1991] come porzioni di territorio relativamente omogenee sulla base di variabili ecologiche composizionali e strutturali. La classificazione CORINE biotopes rappresenta un punto di riferimento comune in termini di conservazione e gestione della biodiversità a scala europea.

## Aree di studio, materiali e metodi

L'area di studio è il bacino idrografico del Torrente Baganza (Prov. Parma) situato nel versante emiliano

<sup>(1)</sup> Dipartimento di Scienze Ambientali, Università di Parma, viale delle Scienze, 43100 Parma

<sup>(2)</sup> Unità operativa di ricerca CISIG, c/o CISIG, via degli Argini 103, 43100 Parma

<sup>(3)</sup> CNR c/o Dipartimento di Scienze Ambientali, Università di Parma, viale delle Scienze, 43100 Parma

Ricevuto il 20/06/00 - Accettato il 11/10/00

dell'Appennino settentrionale, area pilota del progetto "Carta della Natura" [Rossi e Zurlini, 1993; Zurlini et al., 1999]. Nell'ambito di tale progetto, ed in riferimento ai criteri espressi nella classificazione CORINE della Unione Europea, è stata realizzata la "Carta degli habitat CORINE" della Val Baganza [Rossi P., 1999]. Tale tematismo, a carattere principalmente vegetazionale, ha costituito la base per l'individuazione delle diverse tipologie di habitat.

Il profilo complessivo della Val Baganza è determinato essenzialmente dal gradiente climatico altitudinale che si riflette nella formazione di differenti popolamenti vegetali. Nella zona pianeggiante la vegetazione è limitata alle zone a minore impatto antropico ed è quasi esclusivamente costituita da tipiche boscaglie ripariali di scarso valore naturalistico [Rossi P., 1999]. Nell'area collinare la vegetazione forestale è prevalentemente rappresentata da boschi misti di caducifoglie a roverella e carpino nero, e, solo in minor parte, da cenosi boschive igrofile a pioppo e a salice. Diffusi sono i rimboschimenti di pino nero, espressione dell'antropizzazione del paesaggio. Nella zona submontana i boschi a cerro diventano i complessi forestali più estesi, mentre in quella montana, a quote superiori ai 900-1000 m s.l.m., dominano quelli a faggio. La classificazione degli habitat CORINE della Val Baganza è stata realizzata impiegando le prime 28 bande del sensore MIVIS. Le bande del terzo sensore non sono state considerate a causa di un basso valore di SNR (Signal to Noise Ratio). Inoltre, come è emerso in diversi tentativi, è risultata scarsa la loro efficacia per una classificazione su base vegetazionale. I canali dell'infrarosso termico sono stati scartati poiché l'area presenta un gradiente altitudinale considerevole che influenza il comportamento spettrale a queste lunghezze d'onda. Le bande da 1 a 28 sono state ridotte a 26 mediante un'operazione di rapporto tra lunghezze d'onda adiacenti eliminando il rapporto relativo ai canali 20 e 21 [Ferrarini et al., 2000].

Il set di dati così ottenuto mostra alcuni vantaggi rispetto a quello originale. Lechi [1999] ha rilevato che, quando l'effetto additivo atmosferico è trascurabile, il rapporto tra bande consente di enfatizzare anche piccole differenze di riflettività spettrale tra superfici di materiali difficilmente distinguibili.

L'individuazione dei training sites è avvenuta mediante campionamento a due stadi [Lionetti, 1996]. La necessità di ottenere livelli di accuratezza paragonabili nel set campionario e nell'immagine classificata [Labovitz, 1986] ha orientato la scelta di gruppi di pixels la cui distribuzione spaziale fosse rappresentativa di quella reale e la cui classe di appartenenza fosse certa. Si è quindi operato, al loro interno, un campionamento casuale di singoli pixels allo scopo di minimizzare gli effetti dovuti all'autocorrelazione spaziale [Janssen et al., 1994].

Sulla base del tematismo "Carta degli Habitat CORINE", si è ritenuto che 10 classi fossero esaustive dell'area con-

**Tabella 1** – Corrispondenza tra classi MIVIS e codici CORINE per l'area di studio considerata.

Classe MIVIS	Codice CORINE	Tipologia di Habitat CORINE
Abete bianco	42.1B1	Rimboschimenti ad abete bianco
Carpino nero	41.813	Boschi di carpino nero submontani
Cerro	41.74	Boschi di cerro
Faggio	41.1744	Faggete neutrofile
Pino nero	42.67	Rimboschimenti di pino nero
Pioppo	44.614	Pioppeti ripariali
Robinia	83.3234	Formazioni di Robinia pseudacacia
Roverella	41.7312	Boschi xerofili di roverella
Prato	38.2	Prati da sfalcio submontani e montani
	36.334	Praterie a Brachipodio
	82.11	Seminativi di foraggiere
Litoide	86.2	Aree urbanizzate, piccoli agglomerati
	62.4	Affioramenti litoidi
	82.11	Seminativi arati di foraggiere

siderata (Tab. 1).

Dato un insieme di  $n$  unità statistiche suddivise in  $j$  categorie diverse e che presentano  $p$  variabili descrittive, la tecnica CART viene definita come il metodo stepwise tramite il quale si ha una progressiva suddivisione dell'insieme iniziale delle  $n$  unità in sottogruppi disgiunti caratterizzati da un grado di impurità minore rispetto all'insieme iniziale. La formula di Gini consente di calcolare l'impurità, descritta da  $I_g$ , di un gruppo  $g$  (con  $g = 1, \dots, G$ ), come:

$$I_g = 1 - \sum f_j^2, j = 1, \dots, n$$

dove  $f_j$  è la frequenza relativa della classe  $j$ -esima presente nel gruppo  $g$ -esimo.

Ogni step successivo prevede la suddivisione (split) che determina il massimo decremento di impurità:

$$\Delta I_g = I_g - [(N_{g1} * I_{g1}) / N_g + (N_{g2} * I_{g2}) / N_g]$$

dove  $I_g$  è l'indice di Gini calcolato per il gruppo  $g$  di numerosità  $N_g$ ;  $I_{g1}$  ed  $I_{g2}$  sono gli indici di Gini calcolati per i sottogruppi  $g1$  e  $g2$  con numerosità rispettivamente  $N_{g1}$  ed  $N_{g2}$  derivanti dal gruppo  $g$ .

## Risultati

L'intero bacino idrografico del Torrente Baganza è stato ripreso in quattro strisciate MIVIS (suddivise in dodici immagini) disposte parallelamente all'asse longitudinale della valle ed acquisite nel luglio 1998. Per evidenziare

l'efficacia della metodologia CART, vengono riportate le matrici di confusione (Tabella. 2 e 3) e le relative classificazioni di due (Figura. 1 e 2) delle dodici immagini. Nella prima (Figura. 1) è stata ottenuta una overall accuracy pari al 97,28% nel campione. Si è riscontrato un problema di errata classificazione tra le classi roverella e carpino nero (omissione di 18 pixels a roverella classificati a carpino e di 7 a carpino attribuiti a roverella). Una prima possibile spiegazione di tale risultato risiede nella "natura mista", non immediatamente percepibile nelle immagini presentate, dato il ricampionamento cui sono state sottoposte, dei boschi mesofili che sono presenti nell'area collinare i quali potrebbero avere determinato errori in fase di campionamento. Non si può comunque escludere che la causa sia ascrivibile all'inefficienza del metodo nel dis-

criminare ulteriormente queste due classi.

Tale inconveniente non ha comunque assunto rilevanza nell'immagine classificata, come risulta dal confronto con la Carta degli habitat CORINE della Val Baganza (Fig. 3). Nella seconda immagine (Fig. 2), un'accuratezza complessiva del 99,5% ha evidenziato una corretta attribuzione dei pixels del training set. Nelle rimanenti dieci immagini sono stati ottenuti livelli di accuratezza paragonabili a quelli qui presentati.

### Discussione

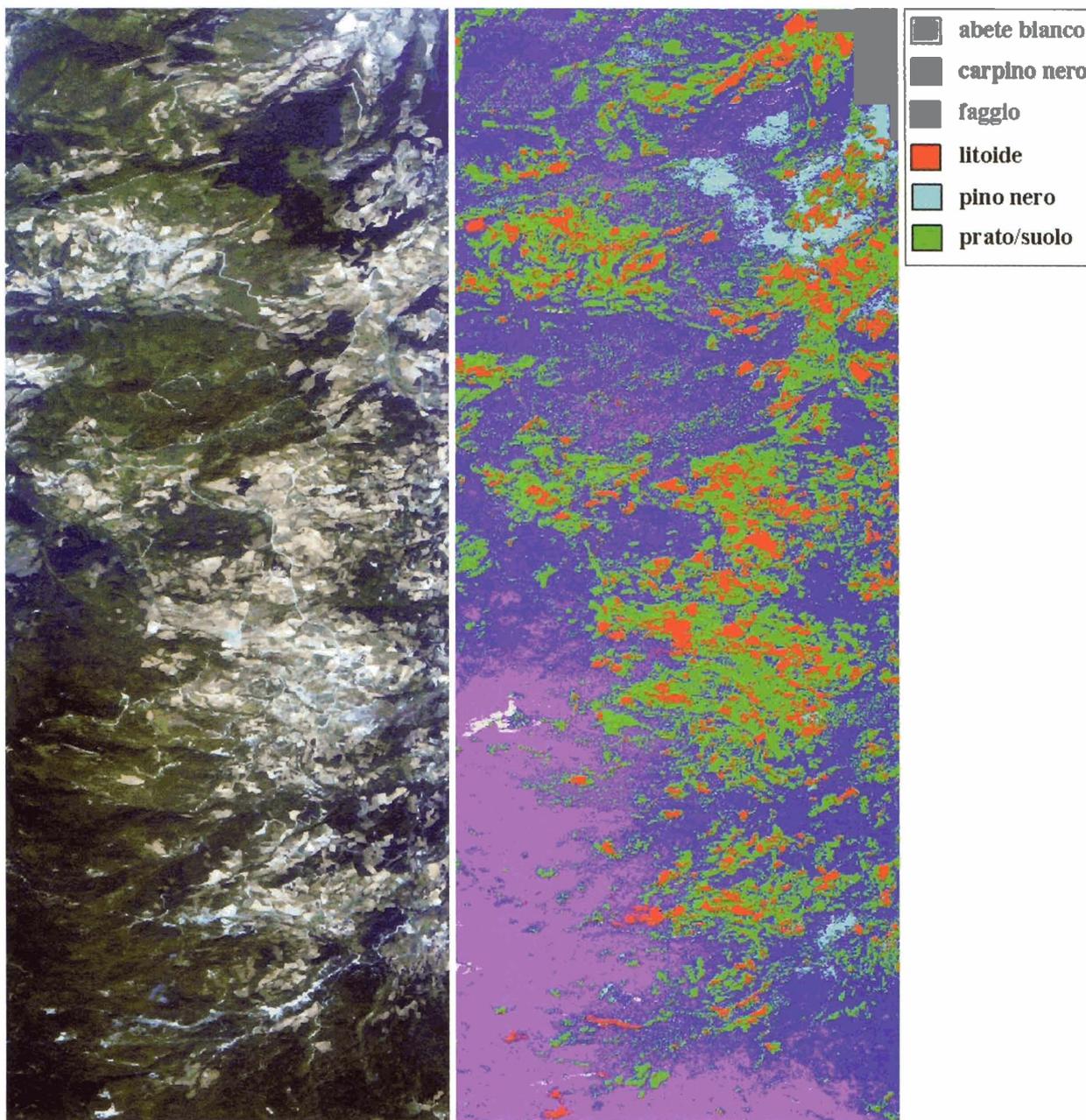
Nella zona pianiziale della valle, l'applicazione della tecnica CART ai dati MIVIS ha permesso di classificare correttamente le boscaglie ripariali a pioppo e robinia, gli agglomerati urbani e industriali e le colture agrarie. Le

**Tabella 2** – Matrice di confusione riferita all'immagine classificata di Figura.1.

		Matrice di errata classificazione								
		Categoria osservata								Totale
Categoria prevista		prato	litoide	pioppo	pino	roverella	robinia	cerro	carpino	
	prato	105	0	1	0	0	0	0	0	106
	litoide	0	142	0	0	0	0	0	0	142
	pioppo	0	0	56	0	2	0	0	0	58
	pino	0	0	0	100	0	0	0	0	100
	roverella	0	0	0	0	313	4	1	7	325
	robinia	0	0	0	0	0	49	0	1	50
	cerro	0	0	0	0	0	0	34	1	35
	carpino	0	0	0	1	18	0	2	557	578
Totale		105	142	57	101	333	53	37	566	1394
<b>Accuratezza =</b>		97,3%								

**Tabella 3** - Matrice di confusione riferita all'immagine classificata di Figura.2.

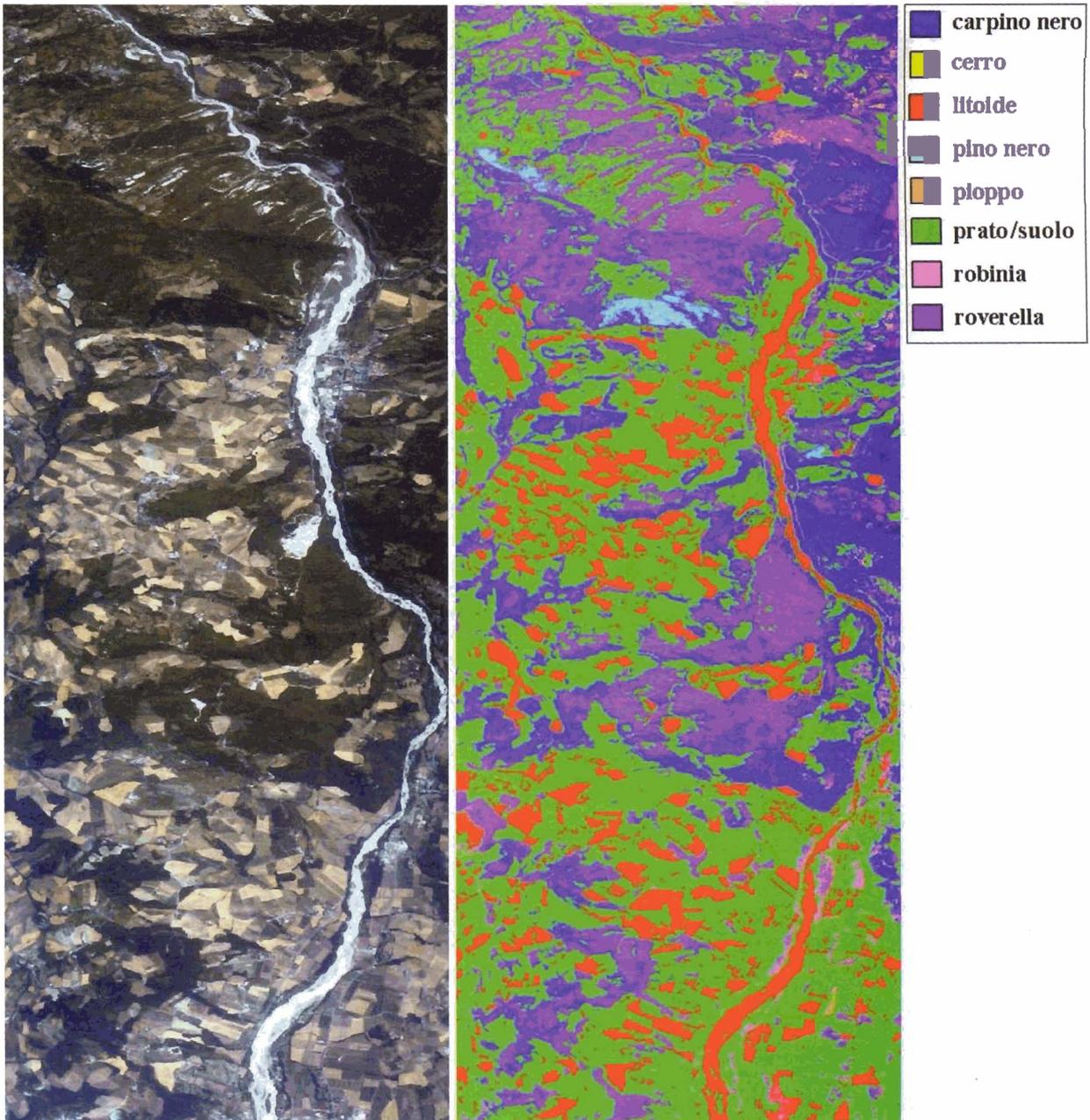
		Matrice di errata classificazione							
		Categoria osservata							Totale
Categoria prevista		prato	litoide	pino	roverella	abete	faggio	carpino	
	prato	94	0	0	1	0	0	0	95
	litoide	0	29	0	0	0	0	0	29
	pino	0	0	83	0	1	0	0	84
	roverella	0	0	0	19	0	0	0	19
	abete	0	0	0	0	27	0	0	27
	faggio	0	0	0	0	0	88	0	88
	carpino	0	0	0	1	0	0	234	235
Totale		94	29	83	21	28	88	234	577
<b>Accuratezza =</b>		99,5%							



**Figura 1** - Particolare della zona montana del bacino del Torrente Baganza. A sinistra, composizione RGB delle bande 14, 7, 2 del sensore MIVIS; a destra, classificazione (e relativa legenda) ottenuta tramite la tecnica CART (Concessione Aeronautica Militare - R.G.S. n. 401 del 19-11-1998).

cenosi erbacee previste dalla Carta degli habitat CORINE sono state accorpate in un'unica classe MIVIS, considerata la difficoltà del sensore nel raggiungere livelli così spinti di dettaglio. Tale accorgimento è stato applicato anche al resto della valle. Nell'area collinare sono risultati ben delineati i boschi

mesofili a carpino nero, i querceti a roverella ed i rimboschimenti a pino nero. Nell'ambito della vegetazione ripariale, sebbene sia stato possibile riconoscere la presenza di pioppeti misti a robinia, è risultata difficoltosa l'individuazione dei saliceti, tipologia CORINE comunque non particolarmente diffusa. Il salice è spesso risulta-

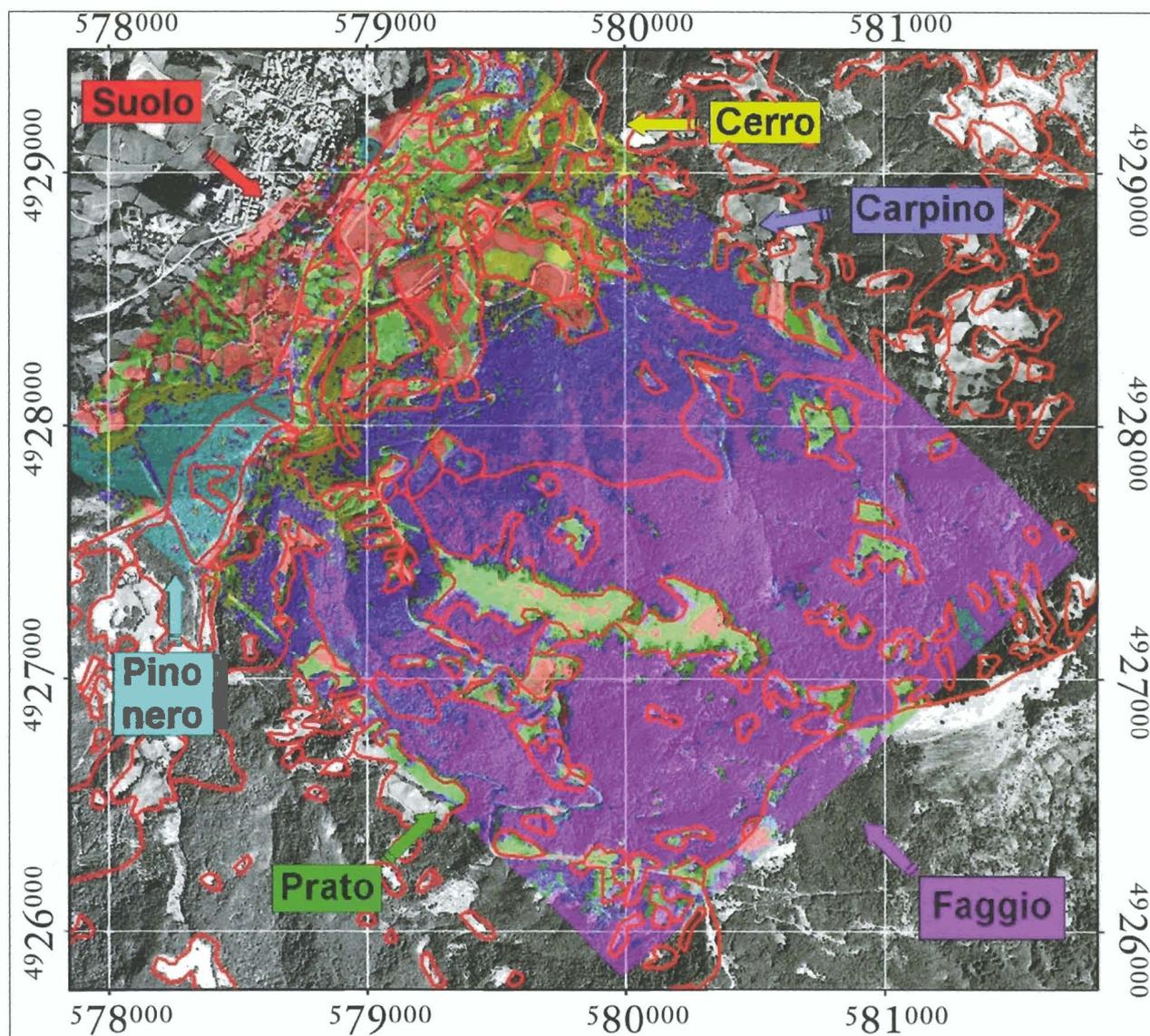


**Figura 2** - Particolare della zona collinare del bacino del Torrente Baganza. A sinistra, composizione RGB delle bande 14, 7, 2 del sensore MIVIS; a destra, classificazione (e relativa legenda) ottenuta tramite la tecnica CART (Concessione Aeronautica Militare - R.G.S. n. 401 del 19-11-1998).

to confuso con i pioppeti per via di un comportamento spettrale simile e con i suoli come conseguenza dell'habitus arbustivo che lascia emergere il "soil effect" in alcuni popolamenti. Queste ipotesi, verificate attraverso un'attenta analisi dei profili spettrali, hanno indotto l'esclusione di questa tipologia CORINE dal novero delle classi

MIVIS considerate.

Nella zona submontana è stato agevole il riconoscimento dei complessi forestali a cerro, carpino e pino nero, sia nei consorzi omogenei che in quelli misti. Nelle aree montane oltre i 900 m s.l.m. l'individuazione dei boschi a faggio e dei rimboschimenti ad abete bianco è risultata



**Figura 3** - Confronto tra la “Carta degli habitat CORINE” (scala 1:25.000) della Val Baganza (Rossi P., 1999; modificato) e particolare delle classificazioni ottenute dai dati MIVIS. In rosso il layer ottenuto dalla vettorializzazione della “Carta degli habitat CORINE” sovrapposto alla classificazione MIVIS georeferita su un ortofoto digitale (CGR, Parma) (Concessione Aeronautica Militare - R.G.S. n. 401 del 19-11-1998).

coerente con la “Carta degli habitat CORINE”.

La tecnica proposta non ha consentito di rilevare tipologie vegetazionali scarsamente diffuse, o a bassa densità, o a carattere frammistito come i castagneti, il pino silvestre e i popolamenti arbustivi.

Il metodo CART mostra notevoli vantaggi rispetto a quelli tradizionali. Non basandosi sul calcolo delle distanze dal vettore medio, esso risulta particolarmente utile nella distinzione di classi a comportamento spettrale molto

simile; in tale caso, infatti, anche un piccolo rumore di fondo potrebbe essere sufficiente per comprometterne la capacità di discriminare fuori campione.

Il suo impiego si rivela particolarmente utile qualora si vogliono aggiungere ulteriori layers informativi. Se al vettore medio di una classe viene aggiunta, ad esempio, una banda del termico, la relativa informazione rappresenta un singolo valore di un vettore più ampio. Tale dato rischia così di avere scarso rilievo in tecniche di classifi-

cazione basate sul calcolo della distanza dal vettore medio. Al contrario, nella tecnica CART, che prevede l'utilizzo di una informazione per volta (splits univariati), tale layer viene ad assumere un'importanza molto maggiore ai fini della classificazione. Un ulteriore vantaggio è rappresentato dall'interpretabilità degli splits. Considerando che le risposte spettrali in alcune bande MIVIS possono essere oggetto di analisi e interpretazione in termini ecologici, geopedologici e fisici (contenuto in acqua, lignina, nitrati, carbonio dell'apparato fogliare, presenza di carbonati e gruppi ossidrilici nei suoli, ecc...), il CART permette di individuare quali informazioni spettrali e anche quali fattori fisico-chimici rendono discriminabili classi spettrali simili. Ulteriori ricerche dovranno inoltre verificare l'incidenza che alcuni fattori, quali regole di stopping rule e dimensione del campione di pixels su cui condurre l'analisi, hanno sulla determinazione del set di regole da parte dell'algoritmo CART.

### Conclusioni

La tecnica CART è stata applicata ad immagini iperspettrali MIVIS evidenziando numerosi vantaggi rispetto ai metodi tradizionali. Il risultato ottenuto è una classificazione accurata dei tipi vegetazionali con una precisa individuazione della loro distribuzione nell'intero bacino del Torrente Baganza. L'impiego della tecnica non parametrica CART, associata all'elevata risoluzione geometrica e spettrale dello scanner MIVIS, rende possibile la realizzazione di mappature tematiche di alto valore scientifico e applicativo. Per tali motivi il loro uso combinato si propone come supporto per l'integrazione in sistemi informativi ambientali finalizzati alla gestione e conservazione del territorio.

L'utilizzo di un set spettrale derivato da quello originale come rapporto tra bande adiacenti si è rivelato un efficace procedimento per aumentare l'accuratezza della classificazione.

L'esito positivo di questa applicazione ha dimostrato l'effettiva validità e potenzialità della metodologia CART nell'esplorare e classificare dati iperspettrali raccomandandone, in futuro, l'utilizzo per analisi di tipo ecologico-ambientale.

### Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare per i consigli e per le revisioni all'articolo: Prof. O. Rossi del Dipartimento di Scienze Ambientali dell'Università di Parma, dott. L. Grossi dell'Istituto di Statistica economica della Facoltà di Economia dell'Università di Parma, la Compagnia Generale di Riprese di Parma per avere fornito le ortofoto relative all'area della Val Baganza.

### Bibliografia

**Breiman L., Friedman J.H., Olshen R. e Stone C.J.** (1984) - *Classification and Regression Trees*. Wadsworth, Belmont, pp. 358.

**C.E.C. (Commission of European Community)** (1991) - *CORINE Biotopes Manual, habitats of the European Community. A method to identify and describe consistently sites of major importance for nature conservation*. EUR 12587/3, Bruxelles, pp. 423.

**Debinski D.M. e Holt R.D.** (2000) - *A survey and overview of habitat fragmentation experiments*. *Conservation Biology*, 14(2): 342-355.

**Ferrarini A., Rossi P. e Zaccarelli N.** (2000) - *Un classificatore efficiente di dati iperspettrali MIVIS per la mappatura territoriale: CART (Classification And Regression Trees)*. *Rivista Italiana di Telerilevamento* (in revisione).

**Grossi L.** (2000) - *Tecniche di segmentazione gerarchica*. In: Zani S. (a cura di) "Analisi dei dati statistici, osservazioni multidimensionali", Vol. II, Giuffrè Ed., Milano, pp.223.

**Janssen L.L.F e Van der Wel F.J.M.** (1994) - *Accuracy assessment of satellite derived land cover data: a review*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(4): 419-426.

**Labovitz M.L.** (1986) - *Issues arising from sampling designs and band selection in discriminating ground reference attributes using remotely sensed data*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(2): 201-211.

**Lechi G.** (1999) - *Dispense del corso di telerilevamento*. Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Milano, Anno accademico 1999-2000, pp. 300.

**Lionetti L.** (1996) - *Problemi campionari connessi al telerilevamento*. In: Zani S. (A cura di) "Metodi statistici per le analisi territoriali", FrancoAngeli Editore, 67-91.

**Ludeke A.K., Maggio R.C. e Reid L.M.** (1990) - *An analysis of anthropogenic deforestation using logistic regression and GIS*. *Journal of Environmental Management*, 31: 247-259.

**Naveh Z. e Lieberman A.** (1994) - *Landscape ecology theory and application*. Ed. Springer Verlag, New York, pp. 360.

---

**O'Neill R.V., Hunsaker C.T., Jones K.B., Riitters K.H., Wickham J.D., Schwartz P.M., Goodman L.A., Jackson B.L. e Baillargeon W.S. (1997) - *Monitoring environmental quality at the landscape scale*. Bioscience, 47: 513-519.**

**Pignatti S. (1994) - *Ecologia del paesaggio*. UTET, Milano, Italy, pp. 225.**

**Rossi O. e Zurlini G. (1993) - *Primi elementi conoscitivi essenziali per la realizzazione della Carta della Natura* (Legge n. 394 del 6/12/1991). S.It.E. Notizie, Bulletin of the Italian Ecological Society, Vol. XIV: 46-56.**

**Rossi P. (1999) - *Analisi della diversità vegetazionale in Val Baganza mediante la classificazione CORINE Biotopes*. Tesi di Laurea in Scienze Biologiche, Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali, Università di Parma.**

**Roy P.S., Tomar S. e Jeganathan C. (1997) - *Biodiversity characterisation at landscape level using satellite remote sensing*. NNRMS Bulletin, 12-18.**

**Roy P.S., Singh S., Dutt C.B.S., Jeganathan C., Jadav R.N. e Ravan S.A. (1999) - *Biodiversity characterisation at landscape level using satellite remote sensing and GIS*. DOS-DBT Users Manual, Indian Institute of Remote Sensing (NRSA), Dept.of Space Govt. of India, 4 - Kalidas Road, Dehra Dun, pp. 233.**

**Zurlini G., Amadio V. e Rossi O. (1999) - *A Landscape Approach to Biodiversity and Biological Integrity Planning: the Map of the Italian Nature*. Ecosystem Health, 5(4): 294-311**

# Ricostruzione dell'impianto viario dell'antica Selinunte attraverso il telerilevamento iperspettrale

Rosa Maria Cavalli<sup>(1-2)</sup>, Francesca Colosi<sup>(3)</sup>, Stefano Pignatti<sup>(4)</sup>,  
Maurizio Poscolieri<sup>(4)</sup> e Remo Bianchi<sup>(4)</sup>

Lungo la costa sud-occidentale della Sicilia sono visibili i resti imponenti dell'antica colonia greca di Selinunte. Il Parco Archeologico creato su questi resti è stato ampiamente investigato tramite campagne di scavo e indagini geofisiche. A supporto di queste campagne, fin dal 1994, sul sito archeologico sono stati effettuati voli con vari tipi di sensori, al fine di individuare e confermare la presenza di strutture archeologiche. In questa ottica nel 1996 è stata condotta una campagna di telerilevamento con lo scanner iperspettrale MIVIS; questi dati sono stati poi analizzati mediante il metodo di classificazione iperspettrale SAM. Le immagini risultanti sono state interpretate, permettendo di individuare elementi lineari corrispondenti all'antico impianto viario della città, solo parzialmente riconosciuti con le tecniche archeologiche tradizionali.

## Problematiche e inquadramento metodologico

Il telerilevamento in campo archeologico può essere definito come il complesso di tecniche e metodologie relative all'individuazione e definizione in forma quantitativa delle aree di probabile frequentazione umana in età preistorica e storica.

Senza l'intervento umano in queste aree il suolo si formerebbe nel tempo, a seguito dell'alterazione delle rocce e del trasporto di materiali fini, organici e minerali, tramite l'azione dell'acqua e del vento: questo complesso ecosistema verrebbe poi completato dalla presenza della vegetazione naturale. Quando viene costruita una struttura antropica, questo ordine di sviluppo naturale risulta disturbato e i cambiamenti indotti restano persistenti.

L'analisi dei dati telerilevati permette agli archeologi di riconoscere le discontinuità del terreno legate a strutture umane sepolte sulla base delle proprietà geometriche e

*In the SW of the Sicily (Italy) coastline the ruins of the ancient Greek settlement of Selinunte are located. The Selinunte Archaeological Park has been largely investigated by both excavation and geophysical surveys. To support these campaigns Selinunte has been flown over, since 1994, by different remote-sensing platforms aimed at identifying unknown and hypothesized archaeological features. In this framework an airborne survey utilizing the MIVIS hyperspectral scanner has been carried out; the calibrated MIVIS hyperspectral data have been analysed to generate classification images. The output images have been interpreted to draw peculiar features related to structures showing good agreement with an ancient buried street pattern, previously and only partially pointed out by archaeologists.*

spettrali che differiscono da quelle dei suoli circostanti: questa differenza può manifestarsi tramite variazioni nella tonalità di colore, nella tessitura e nei livelli di luminosità.

Gli ultimi sviluppi della sensoristica per il telerilevamento hanno dato luogo a immagini con risoluzione spaziale dell'ordine del metro (pancromatico) o di pochi metri (multispettrale), talvolta abbinata a risoluzioni spettrali altrettanto dettagliate. Quest'ultimo caso è collegato all'avvento degli scanner iperspettrali, tramite i quali si sono messe a punto tecniche di indagine derivate dalla spettroscopia, che consentono di identificare i materiali presenti in superficie analizzando anche minute variazioni peculiari della loro firma spettrale. La disponibilità, ad esempio, di dati registrati tramite scanner iperspettrali aviotrasportati, quali l'AVIRIS (*Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer*), CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*), DAIS (*Digital Airborne Imaging Spectrometer*) e il MIVIS (*Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer*), ha accresciuto e migliorato le informazioni ricavabili dalle unità superficiali del terreno relative ad antiche testimonianze umane.

In questo ambito, nel contesto del Progetto Strategico del CNR "Tecnologie Moderne per la Conservazione dei Beni Culturali", linea di ricerca "Attività di telerilevamento sull'area archeologica di Selinunte", il Progetto

<sup>(1)</sup> IIA-LARA Via Mt. d'Oro 11, 00040 Pomezia - Roma

<sup>(2)</sup> CNR IST, Spianata S. Raineri, 98122 Messina

<sup>(3)</sup> CNR ITABC, Via Salaria km 29.300, 00016 Montelibretti - Roma

<sup>(4)</sup> CNR IAS, Via Fosso del Cavaliere 100, 00133 Roma

Ricevuto il 28/07/00 - Accettato il 27/11/00

LARA (*Laboratorio Aereo per Ricerche Ambientali*) ha utilizzato lo scanner Daedalus AA5000 MIVIS per acquisire dati iperspettrali sulla costa sudorientale della Sicilia durante due campagne di volo. L'area sorvolata, di grande interesse archeologico, è compresa tra il Canale di Sicilia a Sud, il paese di Campobello a Nord, la frazione di Tre Fontane a Ovest e quella di Porto Palo ad Est e coincide, quindi, con il territorio occupato in antico dalla colonia greca di Selinunte (Fig. 1).

### Inquadramento archeologico

Selinunte è uno dei più importanti siti greci della Sicilia. Esso è collocato lungo la costa sud-occidentale vicino a Trapani e si estende su un'area di 2,5 kmq, su tre colline allungate in direzione N-S con l'asse maggiore perpendicolare alla linea di costa. Partendo da est queste tre colline sono denominate: Collina Orientale, Acropoli-Manuzza e Gaggera.

Il primo nucleo urbano (*polis*) di Selinunte fu fondato alla metà del VII sec. a.C. da coloni provenienti da Megara Hiblaea, che si insediarono sulla parte sommitale dell'Acropoli e sulla collina di Manuzza.

Nel corso dei due secoli successivi la polis si estese verso oriente ed occidente lungo le due valli fluviali del Cottone e Modione che delimitano la collina dell'Acropoli, dando luogo così a due porti naturali alla confluenza con il mare. Il centro urbano di Selinunte era circondato da un imponente cinta muraria [Mertens, 1989].

L'Acropoli presenta un impianto viario costituito da una strada principale che corre lungo l'asse maggiore della collina (*plateia*) e da una serie di strade secondarie (*stenophoi*) parallele tra loro e perpendicolari alla *plateia*. Sul lato sud orientale dell'Acropoli persiste un'area sacra con quattro templi ed altri edifici minori.

A nord dell'Acropoli, separata da una sella naturale, vi è la collina di Manuzza che sembra presentare, sulla base di saggi di scavo (segmenti scuri in Fig. 2), un reticolo viario regolare [Di Vita, 1996] ruotato di 23° verso ovest rispetto a quello dell'Acropoli. Al punto di confluenza dei due sistemi stradali menzionati sembrerebbe trovarsi un'area di destinazione pubblica (*agorà*).

Ad est dell'Acropoli, sulla Collina Orientale, si trovano tre grandi templi denominati E, F e G, mentre ad ovest dell'Acropoli, sulla collina della Gaggera, è presente un'altra importante area sacra, la *Malophoros*.

Alla fine del V sec. a.C. Selinunte fu conquistata dai Cartaginesi, che occuparono per circa un secolo e mezzo l'area sommitale dell'Acropoli. Nel 250 a.C., con la conquista romana della Sicilia occidentale, la città fu abbandonata e i suoi abitanti furono trasferiti a Lilibeo. Infine, probabilmente durante il periodo bizantino, un terremoto causò il crollo di tutti gli edifici e dei templi dell'antica Selinunte.

### Descrizione dell'assetto geologico

Il complesso archeologico di Selinunte è articolato su tre



**Figura 1** - Mosaico delle strisciate MIVIS acquisite sul sito archeologico di Selinunte nel Maggio 1996 (Concessione SMA 357 del 18.07.96).

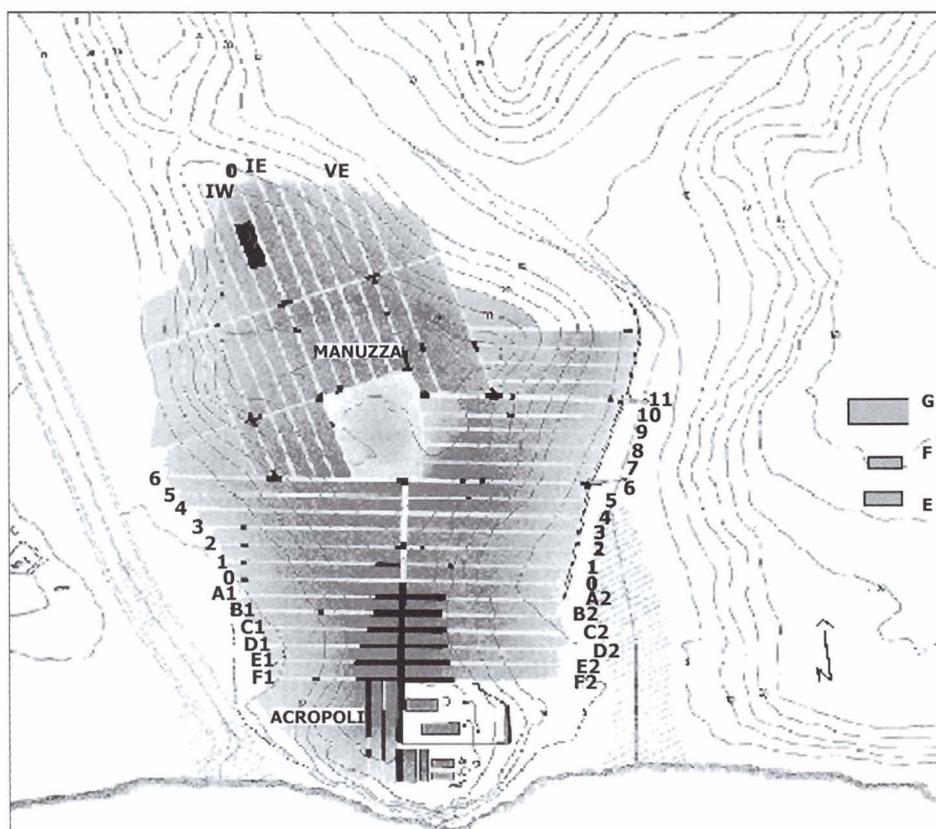


Figura 2 - Tracciato viario urbano dell'antica Selinunte come ipotizzato da D. Mertens [Di Vita, 1996]. In nero sono evidenziati i saggi di scavo. Sono anche riportate le denominazioni attribuite dagli archeologi ai tratti viari ed ai templi.

rilievi che si affacciano sul mare con una falesia di modesto dislivello. L'area è stata caratterizzata da processi di subsidenza quasi in forma continua nel corso del Pliocene e del Pleistocene inferiore e da un successivo moderato sollevamento [Amadori *et al.*, 1992; Piro e Versino, 1995]. Durante il Pleistocene l'area selinuntina è stata interessata da deformazioni indotte da faglie normali, trovandosi al centro di un piccolo graben chiuso da due faglie con direzione NE-SO e NNO-SSE. Una terza faglia, con direzione NO-SE, delimita il graben verso nord.

Sull'area di studio è stato possibile riconoscere la seguente successione litostratigrafica [Amadori *et al.*, 1992; Piro e Versino, 1995] che, procedendo dal terreno più recente al più antico, può essere descritta come segue (Figura. 3):  
 a) *Terreni di copertura* (unità 1 in Figura. 3): affiorano sull'Acropoli e sulla Collina Orientale, caratterizzati da una matrice argilloso-sabbiosa con numerosi ciottoli di varia origine (rocce carbonatiche, ghiaia, selce, e raro materiale fittile). Lo spessore è inferiore ai 50 cm;  
 b) *Calcareniti* (unità 4 in Figura. 3): presentano un diver-

so grado di porosità e di coerenza, talvolta appaiono fratturate e alterate. Come evidenziato da sondaggi elettrici, questa formazione presenta uno spessore variabile, con il valore massimo in corrispondenza dell'altura di Manuzza e in parte dell'Acropoli, mentre sulla Collina Orientale lo spessore diminuisce partendo dall'area dei templi e spostandosi verso sud (da 8 a 2 m). Lungo i pendii della collina di Manuzza e ad ovest, vicino a Casa Sabato, la calcarenite è tagliata da antiche cave. L'analisi petrografica dei campioni raccolti sull'Acropoli e sulla Collina Orientale ha indicato la presenza di una biocalcarenite con dimensione dei grani e porosità variabili. Essa (calcite da micritica a spatica) presenta un cemento micritico ed un grado di cementazione variabile, che provoca grandi variazioni locali nello stato di alterazione. La frazione detritica (dal 10 al 30%) è costituita principalmente da quarzo, mica (biotite-clorite e muscovite) e glauconite;  
 c) *Formazione argilloso-sabbiosa* (unità 5 in Figura. 3): si presenta talvolta cementata con concrezioni calcaree, localmente intercalata con lenti di calcarenite di colore ocra scarsamente cementate. Il suo spessore è di circa 10

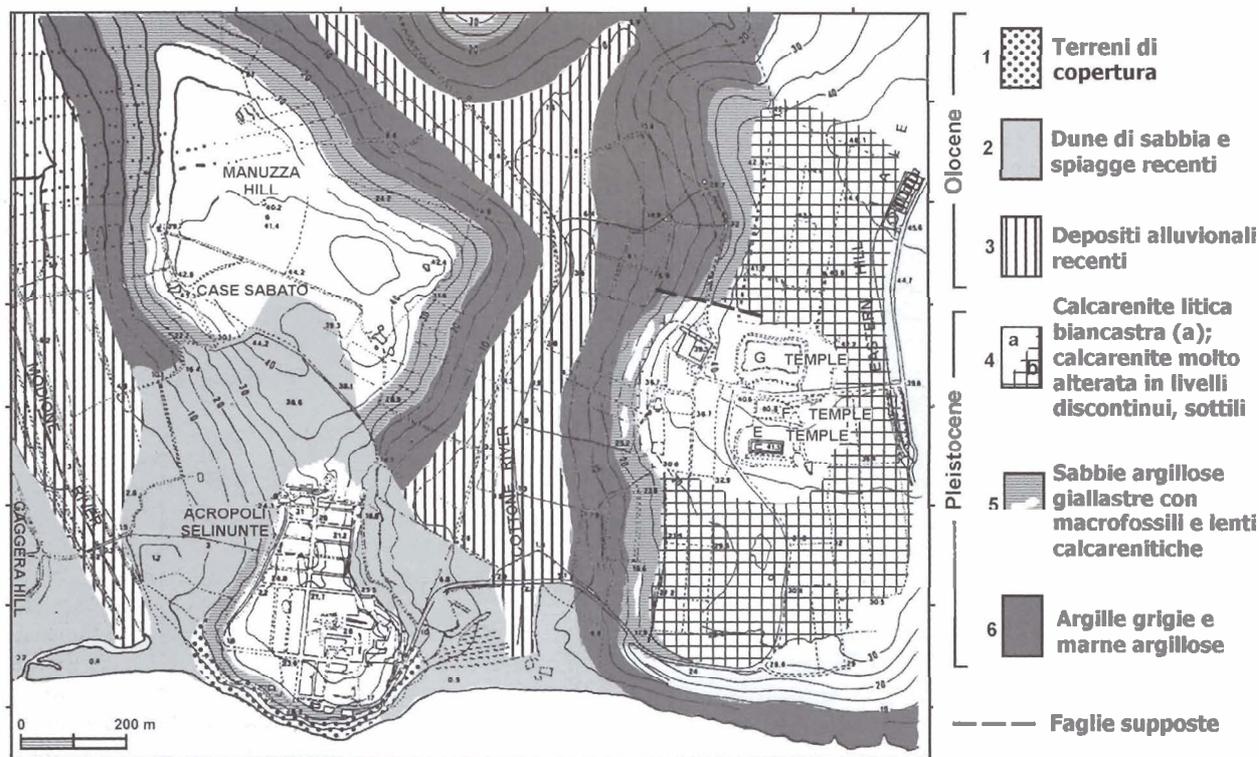


Figura 3 - Carta geologica del Parco Archeologico di Selinunte [da Amadori *et al.*, 1992]; verso l'alto la direzione del Nord geografico.

metri.

d) *Formazione argillosa* (unità 6 in Figura. 3): la sua origine risale al Pleistocene inferiore.

Dune di sabbia (unità 2 in Figura. 3), situate ad ovest dell'Acropoli e lungo le sue pendici orientali, e stratificazioni sabbioso-argillose nell'area archeologica dove la copertura detritica è meno spessa, sono facilmente riconoscibili dalle foto aeree per la loro maggiore riflettività. Sulle pendici della Collina Orientale, lungo la sponda sinistra del torrente Cottone, affiorano tre strati di calcarenite biancastra, a conformazione litoide-vacuolare, alternati a due strati di formazione sabbioso-argillosa.

### Applicazione di tecnologie non invasive sul sito di Selinunte

La prima campagna MIVIS di sorvolo del sito archeologico di Selinunte è stata effettuata il 20 luglio 1994 alle ore 11.30 (ora locale). L'area rilevata (circa 70 km<sup>2</sup>) comprende quattro strisciate parallele orientate Est-Ovest e riprese da una quota di volo di 2000m (risoluzione al suolo di 4 m/pixel al centro della striscia). La seconda campagna, eseguita il 23 maggio 1996, ha coperto, sempre con quattro strisciate parallele orientate Est-Ovest, un'area leggermente inferiore rispetto alla precedente a causa della minore quota di sorvolo (1500m, risoluzione

al suolo di 3m/pixel). Nella campagna del 1996 (Figura. 1) sono stati realizzati due voli, il primo alle 12.30 (ora locale) ed il secondo alle 7.15 (ora locale), allo scopo di derivare informazioni sulla conduttività termica dei materiali superficiali.

La zona è stata scelta come campione per sperimentare l'utilità dei dati MIVIS nel campo della ricerca archeologica. Questa scelta deriva dal fatto che Selinunte nel tempo è stata oggetto di numerose indagini condotte da parte di missioni italiane ed internazionali, i cui risultati rappresentano uno strumento di verifica delle informazioni scaturite dall'analisi dei dati telerilevati.

Negli ultimi venti anni, infatti, l'attenzione degli archeologi si è incentrata sullo studio sistematico dell'urbanistica dell'antica Selinunte e, attualmente, sulla base delle scoperte effettuate tramite ricerche topografiche ed opportuni saggi di scavo, è possibile ricostruire nel complesso la sua pianta (Figura. 2). In questo contesto l'analisi di dati telerilevati si è rivelata un metodo molto utile per la ricerca archeologica, fin da quando G. Schmiedt nel 1957 effettuò per primo lo studio delle foto aeree della zona, identificando sulla collina di Manuzza strutture lineari con andamento NNO-SSE, riconducibili all'antica rete viaria urbana. Successive indagini hanno in gran parte confermato la presenza di tale impianto portando

alla luce alcuni assi stradali ed i relativi incroci [Rallo, 1977; Rallo, 1984].

Il territorio selinuntino è stato inoltre indagato integrando diversi tipi di dati, quali immagini da satellite ed aeree, ad alta e bassa quota, ed informazioni geofisiche: si sono così delineate le caratteristiche geologiche e geomorfologiche e individuate tracce antropiche sepolte, anche con un alto grado di definizione.

Tali risultati sono stati suffragati elaborando i dati MIVIS iperspettrali che hanno permesso di caratterizzare la natura dei materiali superficiali affioranti nell'area in esame. Si sono inoltre evidenziate, con diverse tonalità, tracce per lo più lineari, anche all'interno di materiali simili, a causa di variazioni chimico-fisiche superficiali indotte dall'influenza di elementi archeologici sepolti.

### I dati MIVIS su Selinunte Calibrazione e pre-elaborazione

In questo lavoro vengono presentati i risultati dell'elaborazione dei dati iperspettrali MIVIS, acquisiti durante i sorvoli del 23 Maggio 1996 sull'area compresa nel Parco Archeologico di Selinunte (Fig. 1).

I dati MIVIS acquisiti sono stati calibrati radiometricamente al sensore e corretti geometricamente [Bianchi *et al.*, 1996].

La trasformazione del dato in riflettanza (per i canali dei primi tre spettrometri) è stata ottenuta attraverso il codice di calibrazione atmosferica ATREM (ATmosphere REMoval Program). Questa procedura, adattata al sensore MIVIS (Fig. 6), è stata sviluppata per il sensore AVIRIS del NASA-JPL e sfrutta le proprietà di linearità della funzione riflettanza intorno ai canali del vicino infrarosso, dove è particolarmente evidente l'assorbimento dovuto al vapor d'acqua. Per l'area di Selinunte le variabili utilizzate sono: modello atmosferico *mid latitude summer*, modello aerosol *maritime*, visibilità di 50km e un fattore di scala di 1000 in output per la riflettanza.

L'analisi del rapporto segnale rumore SNR (*Signal to Noise Ratio*), derivato dalle calibrazioni a terra su banco ottico del sensore MIVIS, ha portato ad escludere dalle successive elaborazioni le bande con un valore minore di 40. Per quanto riguarda la strisciata ripresa alle 12.30 del maggio 1996 non sono state considerate le bande del terzo spettrometro 59, 63 e 70 e quelle dalla 85 alla 92, nonché la 101 e la 102 del quarto spettrometro. Dai dati acquisiti alle 7.15 del 23 maggio 1996, invece, è stato escluso tutto il terzo spettrometro a causa del ridotto carico solare sulla scena, che ha dato luogo a valori di SNR troppo bassi.

### Analisi dei dati

L'analisi delle immagini MIVIS sul sito di Selinunte è stata finalizzata, come precedentemente menzionato, al riconoscimento di strutture archeologiche sepolte, evidenziate sulla base delle variazioni di tessitura, umidità e copertura vegetale indotte in superficie dalla presenza

delle strutture sottostanti. A tale scopo si sono utilizzati i prodotti di elaborazione dei dati iperspettrali, quali l'*Inerzia Termica Apparente* (ATI), la *capacità termica* (CM) e le *Rules Images* derivanti dall'applicazione del classificatore *Spectral Angle Mapper* (SAM).

### Inerzia Termica Apparente e Capacità Termica

Alcune delle disomogeneità superficiali citate possono essere rilevate mettendo a confronto gli spettri nella regione della radiazione elettromagnetica riflessa (dal Visibile all'Infrarosso vicino) con quelli nella regione della radiazione emessa (Infrarosso termico). A tale scopo dai dati calibrati MIVIS è stata calcolata l'*Inerzia Termica Apparente* (ATI), utilizzando le strisciate registrate alle 12.30 e alle 7.15.

L'ATI rappresenta un'approssimazione dell'*Inerzia Termica* [Kahle *et al.*, 1981; Pratt e Ellyet, 1979], variabile fisica connessa alla conduttività, alla densità ed alla capacità termica dei materiali. L'ATI nelle applicazioni di telerilevamento [Sabins, 1987; Drury, 1987] viene definita come il rapporto tra l'energia assorbita dai materiali superficiali (nella regione del visibile e dell'infrarosso vicino) e la variazione di temperatura, riferite allo stesso intervallo di tempo. Nel caso dei dati MIVIS di Selinunte, l'ATI appare significativa in quanto l'area di studio presenta rilievi morfologici modesti con limitati coni d'ombra locali. Essa è stata calcolata secondo la seguente formula:

$$ATI = (1-A) / (T1-T2)$$

dove A rappresenta l'albedo media della scena, calcolata sui valori di riflettanza delle prime 13 bande del MIVIS (0.43 - 0.69  $\mu\text{m}$ ), T1 e T2 sono, invece, i valori di temperatura al suolo alle 12.30 ed alle 7.15, come ricavati dalla banda MIVIS 93 (8.21-8.56  $\mu\text{m}$ ) selezionata, tra i 10 canali disponibili, per il suo elevato valore di SNR.

Per ottenere questa carta tematica si è dovuto procedere a una coregistrazione delle due riprese che, come ipotizzabile, non ha permesso la sovrapposizione di ogni singolo pixel. L'immagine risultante, infatti, evidenzia solo l'incrocio principale della *plateia 0*, sulla collina di Munuzza in quanto le *plateiae* hanno una larghezza di 7 m, mentre non sono riconoscibili gli *stenophoi* (2 m circa). Per ovviare a questo inconveniente si è assunto che il termine T2 sia la temperatura della scena in piena notte, condizione di buio e di temperatura costante, pertanto T2 si è posta uguale a una costante T0, pari alla temperatura minima (Tmin) presente nella scena delle 12.30, diminuita di 1/10 dell'intera dinamica termica secondo la seguente formula [Tonelli, 1995; Tonelli, 1999]:

$$\text{Capacità termica} = CM = (1-A) / T1 - T_{\text{min}} - [0.1(T1 - T_{\text{min}})]$$

In tale carta tematica (Fig. 4) è ben riconoscibile l'incro-

cio principale della *plateia 0*, sulla collina di Munuzza, ma anche quelli secondari con gli *stenophoi*.

### ***Spectral Angle Mapper***

Per sfruttare pienamente il contenuto informativo delle immagini MIVIS, è stata applicata a questi dati una tecnica di classificazione "supervised" denominata *Spectral Angle Mapper* (SAM), [Kruse *et al.*, 1993; Yukas e Goetz, 1993], che consente di esprimere l'analogia tra due spettri in base alla mutua distanza angolare (espressa in radianti tra 0 e  $\pi/2$ ) calcolata nello spazio a N dimensioni delle bande. La tecnica SAM offre il vantaggio, rispetto ad altri metodi di classificazione multispettrale, di fornire un criterio di similarità tra due spettri indipendentemente dai valori assoluti dei singoli pixels. Il risultato finale della procedura è costituito da un numero di immagini, definite *Rules Images* (RI), pari al numero delle classi spettrali selezionate. Nelle RI i toni scuri individuano pixel caratterizzati da uno spettro simile a quello di riferimento, mentre i toni chiari identificano pixel che presentano spettro dissimile. L'informazione contenuta nelle

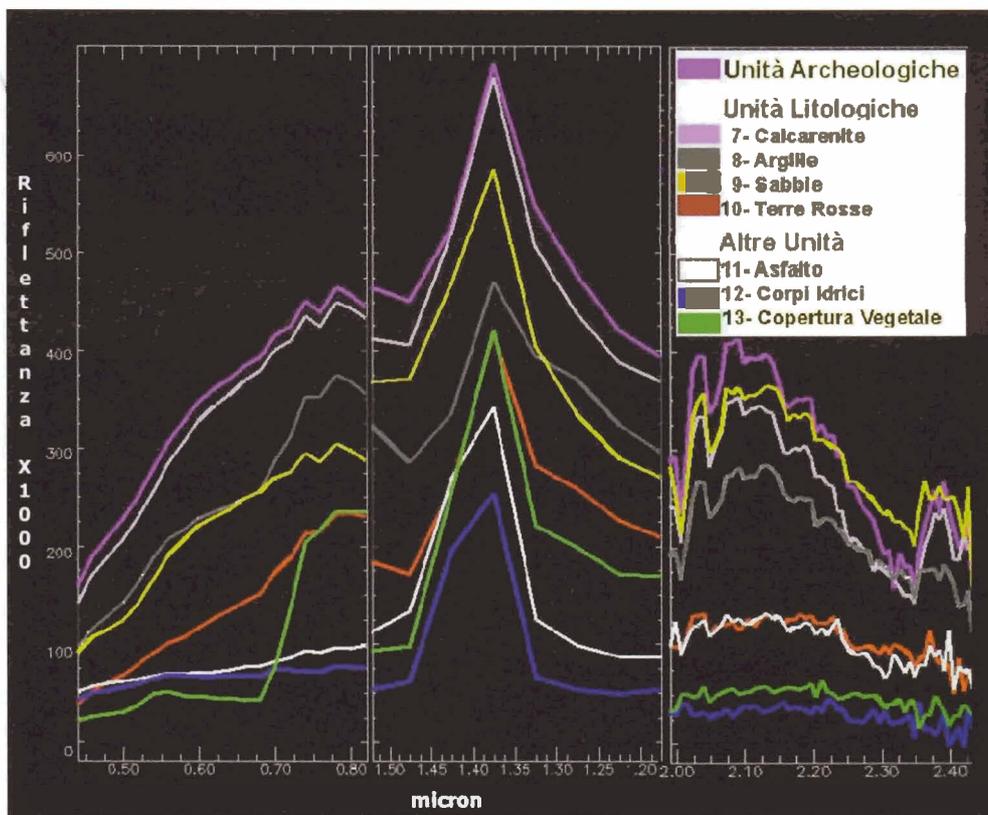
single RI viene poi condensata in un'unica immagine tematica, che permette di descrivere con colori diversi le classi di unità superficiali prescelte.

Per il Parco Archeologico di Selinunte la classificazione SAM è stata applicata a entrambe le scene, registrate all'alba e a mezzogiorno, estraendo spettri medi direttamente dai dati MIVIS, a partire da aree delimitate e corrispondenti a peculiari tipologie di terreno, definite *Regioni di Interesse* (ROI). Le ROI selezionate corrispondono ai seguenti materiali superficiali (Fig. 5):

- reperti archeologici costituiti da calcarenite a diversi gradi di alterazione (RI n. 1-6);
- affioramenti di unità litologiche fresche ed alterate [da Amadori *et al.*, 1992]: calcarenite (RI n. 7), argille (RI n. 8), sabbie (RI n. 9) e terreni residuali calcarenitici (terre rosse, RI n. 10);
- materiale di copertura delle principali strade moderne (asfalto, RI n. 11);
- corpi idrici (RI n. 12);
- copertura vegetale: ulivi, cespugli, macchia mediterranea (RI n. 13).



**Figura 4** - Immagine della capacità Termica ricavata utilizzando solo la strisciata MIVIS delle 12.30 (Concessione SMA 357 del 18.07.96).



**Figura 5** - Spettri medi corrispondenti ai materiali superficiali selezionati come ROI (Regioni di Interesse) per l'applicazione dell'algoritmo di classificazione SAM. Il grafico mostra in ordinata le lunghezze d'onda in micron suddivise per i diversi spettrometri e in ascissa la riflettanza moltiplicata per un fattore 1000.

Per la definizione delle ROI si è utilizzata la combinazione di bande spettrali MIVIS 13 (0.671-0.694  $\mu\text{m}$ )-7 (0.531-0.573  $\mu\text{m}$ )-1 (0.431-0.452  $\mu\text{m}$ ).

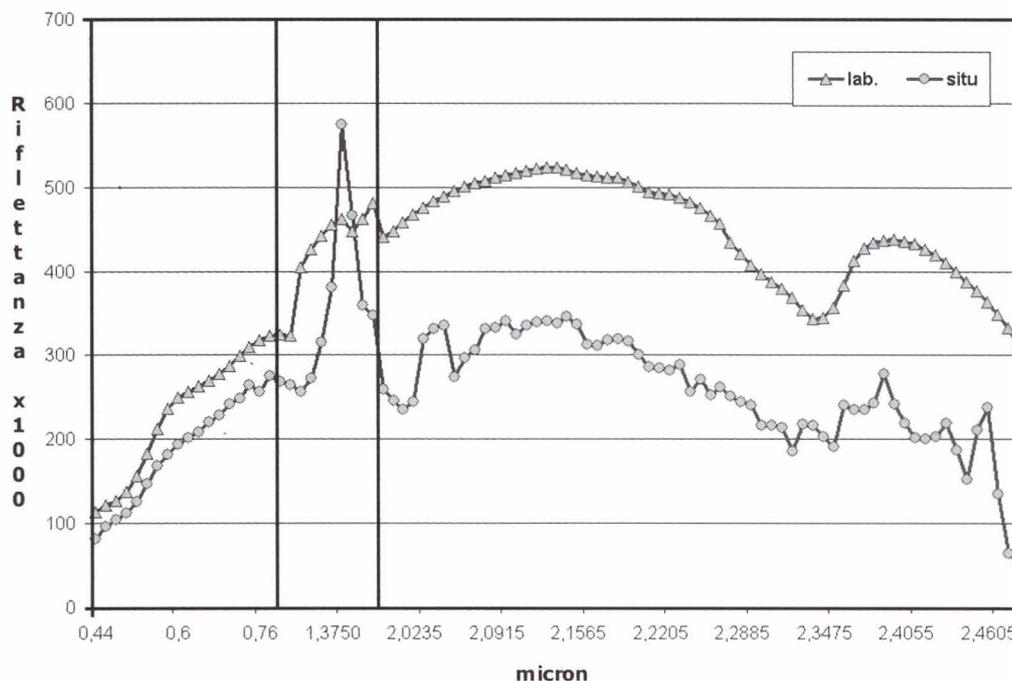
L'attendibilità degli spettri definiti dalle ROI è stata verificata raccogliendo in campagna dei campioni il cui spettro è stato misurato in laboratorio; sono state scelte quattro categorie superficiali: calcarenite, brecciolino, sabbie e reperti archeologici. Dal confronto tra questi spettri e quelli ricavati dai dati MIVIS, corretti con ATREM, si può notare una loro elevata corrispondenza, soprattutto nelle regioni spettrali coperte dal 1° e 3° spettrometro (Fig. 6). L'alta correlazione tra gli spettri, di laboratorio e derivati sull'immagine, testimonia la correttezza delle procedure di calibrazione adottate e consente di considerare gli spettri delle ROI come effettivi spettri delle varie unità superficiali.

### Discussione dei risultati ed interpretazione archeologica

Sulle immagini ATI e CM (Fig. 4) i toni chiari corrispondono al mare ed alla vegetazione, quelli scuri alle sabbie,

alle dune litoranee, agli affioramenti e depositi di calcarenite; le formazioni argillose sono descritte invece con toni di grigio chiaro. E' anche possibile riconoscere i limiti areali delle formazioni litologiche, che rispecchiano quelli riportati sulla carta geologica di Amadori et al.[1992]. Infine, sulla parte settentrionale della collina di Manuzza sono osservabili strutture lineari con tonalità scura, riferibili ad uno degli incroci dell'antico impianto viario di Selinunte.

Informazioni archeologiche più precise e puntuali sono emerse dall'interpretazione degli output della classificazione SAM della ripresa MIVIS delle ore 12.30. La carta tematica risultante presenta una particolare accuratezza nella definizione areale degli affioramenti litologici e dei suoli. I principali affioramenti di terre rosse ed argille sulla collina di Manuzza sono racchiusi all'interno di aree omogenee con contorni ben definiti, mentre nel settore orientale di Manuzza e lungo i versanti occidentali della Collina Orientale sono presenti depositi sparsi di terre rosse e calcareniti dispersi in un matrice argilloso-sabbiosa. Inoltre, appaiono chiaramente individuate,



**Figura 6** - Confronto tra lo spettro della sabbie estratto dalla scena MIVIS, corretta con ATREM, delle 12.30 e quello ricavato in laboratorio. Il grafico mostra in ordinata le lunghezze d'onda in micron suddivise per i diversi spettrometri e in ascissa la riflettanza moltiplicata per un fattore 1000.

sull'Acropoli e sulla Collina Orientale, le classi relative ai "reperti archeologici" e sulla Collina di Manuzza le aree di scavo.

Sulla carta tematica ottenuta dalla classificazione SAM non sono visibili tracce antropiche a causa della codifica non parametrica delle classi (ROI), che non tiene in considerazione la distanza reale del pixel dalla classe più vicina. Anomalie lineari sono invece evidenti sulle diverse immagini RI, perché in queste ultime la distanza classe-pixel rende conto di piccole variazioni spettrali dovute a differenze chimico-fisiche all'interno della classe, mettendo così in evidenza anche cambiamenti minimi delle caratteristiche dei materiali che coprono i resti archeologici. Tali strutture sono state poi enfatizzate sulle immagini RI applicando tecniche di filtraggio spaziale di tipo laplaciano e direzionale.

Le linee individuate sulle immagini sono state analizzate dai punti di vista archeologico e topografico e quindi interpretate come tracce relative all'impianto viario urbano dell'antica *polis*, in gran parte ancora sepolto. In particolare, si è cercato di attribuire un preciso significato di ogni singola anomalia, confrontandola, per il momento solo visivamente, con i tracciati viari di cui gli studiosi hanno in parte ricostruito l'orientamento ed il

percorso tramite puntuali saggi di scavo.

Le RI ottenute dai dati MIVIS delle ore 12.30 hanno restituito tracce più marcate rispetto a quelle del volo delle 7.15 sull'intera estensione dell'area indagata, eccetto che sul rilievo collinare a nord di Manuzza (Casa Paola) e lungo il fianco occidentale della "Acropoli".

Sulla collina di Manuzza le immagini RI n. 1, 3, 6, 7, 9, 13 del volo delle 12:30 hanno reso possibile il riconoscimento di 11 assi stradali con direzione NNO-SSE (Fig. 7). Tra essi assumono particolare rilievo la *Plateia 0* e lo *Stenophos I Ovest* [Rallo, 1984], di cui è possibile seguire il percorso fino al limite meridionale della collina. Altrettanto visibili sono i due assi, con andamento OSO-ENE, che intersecano perpendicolarmente tali strade, delimitando due blocchi di isolati.

Estendendo l'indagine verso nord, oltre la sella che separa la collina di Manuzza da quella di Galera Bagliazzo, si è riscontrato come nei pressi di Casa Paola, lungo il versante orientale della collina, sia chiaramente visibile, su quasi tutte le RI del volo delle 7.15 (l'unico disponibile per quest'area) una traccia irregolare con andamento all'incirca NO-SE. La stessa anomalia era stata recentemente individuata sulle foto aeree della zona [Zoppi, 1996] ed interpretata come probabile struttura muraria.



**Figura 7** - Immagine RI n. 1 (resti archeologici) risultante dall'applicazione dell'algoritmo di classificazione SAM con sovrapposte le strutture archeologiche identificate (in bianco sono evidenziate le tracce ricavate dai dati MIVIS delle 12:30, in fucsia quelle ricavate dai dati delle 7.15) (Concessione SMA 357 del 18.07.96).

Tracce analoghe sono visibili anche ad ovest di Casa Paola.

Sul pianoro ad est della Casa sono inoltre evidenti, nelle RI n. 7 e 9 del volo delle 7.15, tre lineazioni parallele il cui orientamento, circa NNO-SSE, corrisponde a quello dell'impianto urbano di Manuzza. Perpendicolari a queste tracce ne sono state individuate altre due, molto brevi, su tutte le RI dello stesso volo. Questo risultato appare interessante perché potrebbe testimoniare l'estensione dell'impianto urbano oltre i limiti naturali del pianoro di Manuzza.

Ad occidente del sistema collinare "Acropoli-Manuzza", lungo la sponda sinistra del torrente Modione, su numerose RI derivate dai dati MIVIS di entrambi i voli, ma con maggiore chiarezza da quello delle 7.15, sono osservabili strutture lineari con andamento E-O, che sembrano coincidere con una serie di strade orientate secondo il sistema dell'Acropoli. L'esistenza di tali percorsi, non visibili sulle foto aeree della zona, è resa certa da saggi di scavo condotti negli anni '80 [La Genière e Theodorescu, 1979; La Genière, 1980, 1981, 1982; La Genière e Rougetet, 1986]: di tali percorsi non è stata mai portata alla luce l'intera estensione.

Scendendo in dettaglio, sulle RI rappresentanti i reperti archeologici e le calcareniti (dalla 1 alla 7) sono stati individuati i tratti occidentali, cioè esterni al perimetro dell'Acropoli, delle strade C1, B1 e A1. Di queste vie solo la A1, mai scavata, è visibile sulle RI n. 8, 10 e 13 del volo delle 12.30.

Lungo la riva destra del torrente Cottone, ad est dell'Acropoli e della collina di Manuzza, sono presenti su diverse RI di entrambi i voli lineazioni non visibili sulle foto aeree: esse potrebbero essere riferibili ad assi stradali di cui solo in parte è già stata accertata la presenza e l'andamento. Infatti, oltre al tratto fuori le mura delle strade A2 (visibile nelle RI dei "reperti archeologici" e della "vegetazione") C2 (RI dei "reperti archeologici"), D2 (riconoscibile nella RI n. 13) ed E2 (nelle RI dell'"argilla" e dei "reperti archeologici"), le RI sembrano mostrare parte del percorso di due vie che potrebbero essere identificate con la 2 (visibile nelle RI n. 1, 7, 9) e la 6 (osservabile in numerose RI). In particolare, quest'ultima era un'arteria fondamentale dell'antica Selinunte, asse portante dell'intero sistema urbanistico [La Genière e Rougetet, 1986]. Su alcune RI del volo delle 7:15 si possono riscontrare, anche se con minore chiarezza, lineazioni che presentano il medesimo orientamento di quelle sopra citate.

Inoltre, le immagini delle RI n. 1, 9 e 13 delle 12:30 e della RI n. 1 delle 7.15 mettono in evidenza un tracciato, a est di Baglio Florio, che potrebbe costituire un segmento della larga *Plateia II*. Il risultato merita attenzione perché se fosse confermato con saggi di scavo il prolungamento di tale percorso fino alla Collina Orientale, la *Plateia II*, come già ipotizzato, rappresenterebbe un'asse privilegiato nella struttura viaria della *polis*, mettendo in comunicazione l'area sacra orientale con l'*Agorà* [Di Vita, 1996].

Infine sui dati MIVIS delle 12.30 sono state individuate alcune discontinuità tonali, all'interno di un uliveto posto nella parte nord della Collina Orientale, che potrebbero confermare la presenza di un insediamento rustico di epoca romana, già ipotizzata a seguito di campagne archeologiche e geofisiche [AA.VV., 1992; Baggio *et al.*, 1998; Colosi *et al.*, 1995].

## Conclusioni

Sfruttando le elevate risoluzioni spaziale e spettrale dei dati MIVIS è stato possibile individuare strutture archeologiche sepolte in forma più puntuale e definita rispetto ai classici metodi di analisi basati su fotografia aerea e telerilevamento satellitare. In particolare, applicando ai dati MIVIS acquisiti sul sito di Selinunte il metodo di classificazione iperspettrale SAM, si sono prodotte immagini, denominate *Rules*, che hanno consentito di individuare una serie di lineazioni, corrispondenti plausibilmente con l'ipotizzato impianto viario dell'antica colonia megarese. L'identificazione di queste lineazioni su un'immagine RI è funzione del diverso grado di similarità spettrale, rispetto alla classe di riferimento (ROI), del materiale affiorante sulla lineazione e di quello costituente i terreni circostanti. Ad esempio, le strutture lineari individuate su Manuzza sono state delineate sulle RI delle classi archeologiche con toni scuri, mostrando che il materiale proprio delle lineazioni ha uno spettro più simile a quello medio

dei resti archeologici rispetto alle "terre rosse" circostanti, largamente presenti sulla collina. Gli stessi lineamenti, invece, appaiono con toni chiari sulle RI della vegetazione, poiché presentano uno spettro più dissimile dalla classe vegetazione rispetto ai terreni di copertura della collina di Manuzza.

I risultati esposti sembrano incoraggianti per la definizione di strutture archeologiche sepolte, solo parzialmente individuate con metodi tradizionali di indagine e costituiscono, perciò, un interessante punto di riferimento per la pianificazione di future campagne di scavo.

## Bibliografia

- AA. VV. (1992) - *Monograph on the geophysical exploration of the Selinunte Archaeological Park*. BGTA, XXXIV, nn. 134-135.
- Amadori M.L., Feroci M. e Versino L. (1992) - *Geological outline of Selinunte Archaeological Park*. BGTA, XXXIV, 134-135: 87-99.
- Baggio P., Birocco C.A., Colosi F., Piro S., Versino L. e Zamboni C. (1998) - *Telerilevamento, ricognizioni archeologiche e prospezioni geofisiche sulla Collina Orientale di Selinunte*. I Congress International on "Science and technology for the safeguard of cultural heritage in the Mediterranean basin". Novembre 27 - Dicembre 2 1995, Catania- Siracusa (Italia), vol. I.
- Bianchi R., Cavalli R.M., Fiumi L., Marino C.M. e Pignatti S. (1996) - *Airborne imaging spectrometry: a new approach to environmental problems*. Proceeding of the XVIII ISPRS Congress, Vienna (Austria), 9-19 Luglio 1996, Vol. I, pp. 128-132.
- Colosi F., Pompeo L., Sangiorgio M. e Zamboni C. (1995) - *Elaborazione ed interpretazione di immagini telerilevate per lo studio sistematico delle testimonianze antropiche nel territorio*. I casi di Palmyra e Selinunte. *Archeologia e calcolatori*, 6: 35-60.
- Di Vita A. (1996) - *L'urbanistica della Sicilia greca*. in AA.VV., *I greci in Occidente*. Bompiani, Venezia (Italia), pp. 263-308.
- Drury S.A. (1987) - *Image Interpretation in Geology*. Chapman & Hall, Cambridge, UK, pp. 283.
- Kahle A.B., Scheildge J.P., Abrams M.J., Alley R.E. e LeVine C.J. (1981) - *Geological application of thermal inertia imaging using HCMM data*. JPL Publ, 81-55.
- Kruse F.A., Lefkof A.B., Boardman J.W., Heidebrecht K.B., Shapiro A.T., Barloon J.P. e Goetz A.F.H. (1993) - *The spectral image processing system (SIPS) - Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data*. *Remote Sensing of Environment*, 44: 145-163
- La Genière de J. e Theodorescu D. (1979) - *Ricerche topografiche nell'area di Selinunte*. RAL, serie VIII, XXXIV, pp. 385-395.
- La Genière de J. (1980) - *A propopòs de deux sondages extramuros de l'acropole de Sélinonte*. *Philius Charin. Miscellanea di studi classici in onore di E. Manni*, 4, Roma (Italia), pp. 1293-1299.
- La Genière de J. (1981) - *Nuove ricerche sulla topografia di Selinunte*. RAL, s. VIII, XXXVI, pp. 211-217.
- La Genière de J. (1982) - *Sélinonte. Recherches sur la topographie urbaine*. ASNP, s. III, XII, pp. 471-479.
- La Genière de J. e Rougetet J. (1986) - *Recherches sur la topographie de Sélinonte*. Campagne 1985. *RendLinc*, 40: 289-297.
- Mertens D. (1989) - *Die Mauern von Selinunt*. *Vorbericht der Arbeiten des Deutschen Archeologischen Instituts Rom 1971-75 und 1985-87*. RM, 96: 87-154.
- Piro S. e Versino L. (1995) - *Geological survey in the archaeological area of Selinunte*. *Annali di Geofisica*, 38: 893-906.
- Pratt D.A. and Ellyet C.D. (1979) - *The thermal inertia approach to mapping of soil moisture and geology*. *Rem. Sensing Environment*, 8: 151-168.
- Rallo A. (1977) - *Scavi e ricerche nella città antica di Selinunte*. *Relazione preliminare*. Kokalos, 22-23, pp.720-723.
- Rallo A. (1984) - *Nuovi aspetti dell'urbanistica seluntina*. *ASAtene*, 46, pp.81-96.
- Sabins F. F. Jr. (1987) - *Remote Sensing Principles and Interpretation*. 2nd Edition, Freeman and Company, New York, pp. 449.
- Schmiedt G. (1957) - *Applicazioni della fotografia aerea in ricerche estensive di topografia antica in Sicilia*. *Kokalos*, 3:18-30.
- Tonelli A. (1995) - *Metodi di Telerilevamento da postazione fissa nella caratterizzazione di superfici e del primo spessore di massa*. *Rivista Italiana di Telerilevamento*, 2:13-22.

---

**Tonelli A.** (1999) - *Alcune applicazioni attuali del telerilevamento operativo*. Seminario: Il Telerilevamento come crogiolo di cultura scientifica. Palermo 22 novembre 1999.

**Yukas R.H. e Goetz, A.F.H.** (1993) - *Comparison of airborne (AVIRIS) and spaceborne (TM) borne imagery data for discriminating among semi-arid landscape endmem-*

*bers*. Proceedings of the Ninth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, ERIM, Ann Arbor (MI-USA), pp. 503-511.

**Zoppi C.** (1996) - *Note selinuntine. 1. La necropoli di contrada Galera-Bagliazzo ed il limite nord dell'abitato di Manuzza*. Monografia Selinunte 3 (Intesa di programma CNR-MISM), Bulzoni, Roma, pp.137- 152.

# Applicazioni dati MIVIS in ambienti marini e lagunari

Luigi Alberotanza<sup>(1)</sup>, Vittorio E. Brando<sup>(2)</sup> e Angelo Zandonella<sup>(3)</sup>

Vengono illustrati i risultati conseguiti utilizzando immagini MIVIS negli ambienti marini e lagunari, focalizzando l'attenzione sulle esigenze della ricerca in ambienti acquatici e sulle procedure operative definite per tali ambienti. In particolare, vengono presentate le procedure per il riconoscimento delle macroalghe della laguna di Orbetello, discutendone la scelta dei vari passi (correzioni atmosferiche, geometriche ed estrazione dei parametri geofisici) sulla base della qualità dei dati e delle misure 'in situ' disponibili.

## Introduzione

Il sensore MIVIS è stato fatto volare su aree marine, costiere e lagunari per poter disporre di precisi elementi di valutazione sulle possibili applicazioni, tenendo presenti vari elementi di valutazione per definire i livelli di operatività del sistema, in relazione alle caratteristiche ed alle dinamiche di alcune fenomenologie presenti in tali ambienti. Le procedure di impiego del MIVIS differiscono fortemente se si opera in mare o su terra. Sul mare sono molto importanti il rispetto degli orari e dei tempi di volo, le calibrazioni strumentali e le correzioni per gli assetti di volo. Infatti, i fenomeni in mare hanno evoluzioni rapide, specie se dipendono dalle oscillazioni mareali, l'altezza del sole è importante per poter avere sufficiente segnale emergente dal corpo idrico, ma si debbono allo stesso tempo evitare le riflessioni speculari. Inoltre, le procedure di riconoscimento e classificazione sono realizzate e validate sulla base delle caratteristiche specifiche dell'ambiente geografico in cui si opera. Ad esempio, le procedure di riconoscimento delle macroalghe validate per la laguna di Orbetello non sono applicabili a quella di Venezia.

## Attività sperimentali

L'attività di telerilevamento svolta presso l'ISDGM di Venezia è sempre stata indirizzata alla sperimentazione di

(1) CNR - Istituto Studio Dinamica Grandi Masse,  
San Polo 1364, 30125 Venezia

(2) Dipartimento di Scienze Ambientali, Università  
di Venezia, Dorsoduro 2137, 30123 Venezia

(3) AdTech, Via Traversi 36, 00154 Roma

Ricevuto il 30/06/00 - Accettato il 27/10/00

*Results obtained using MIVIS imagery on marine and lagoon environments are depicted, focusing on the research needs in aquatic environments and on the operational procedures set up for those environments.*

*In particular, the procedures for submerged vegetation recognition in the Orbetello Lagoon are presented, discussing the selection of the several steps (geometric and atmospheric correction, extraction of the geophysical parameters) based on data quality and on the available 'in situ' measurements.*

nuovi sensori e, più in particolare, della spettrometria ad immagini. Fino dagli anni 80 si è avuta l'occasione di sperimentare sensori quali TIMS, ATM, FLI, GER e sono in programma prossime sperimentazioni con DAIS, ROSIS, ALI, HYPERION. E' stata pertanto sviluppata una consolidata conoscenza delle problematiche e delle fenomenologie tipiche della laguna di Venezia e del nord Adriatico che rappresentano quasi dei target di riferimento. In particolare la piattaforma oceanografica "Acqua Alta" ad 8 miglia al largo dalla costa è un punto di calibrazione/validazione per le immagini SeaWiFS in cui vengono effettuate acquisizioni di dati di verità-mare specifiche, iniziate nel '95 e tuttora in corso. Da tale sito sono acquisiti, in continuo, parametri ottici atmosferici e, durante campagne ripetute mensilmente, parametri ottici lungo la colonna d'acqua e prelievo di campioni per le determinazioni di laboratorio.

Sulla base delle esperienze maturate negli ambienti marini e lagunari utilizzando immagini MIVIS, si ritiene utile formulare alcune considerazioni relative a:

- esigenze della ricerca in ambienti acquatici;
- prodotti della ricerca;
- procedure operative.

## Esigenze della ricerca

Esistono attualmente ancora delle limitazioni nell'uso di dati MIVIS, per un impiego su corpi idrici, derivanti essenzialmente dalla necessità di disporre di dati pretrattati in termini di correzioni radiometriche, geometriche e di un controllo di qualità per correggere alcuni tipi di rumore del sensore.

I prodotti infatti devono essere geocodificati, tenendo conto dei seguenti dati:

- navigazione (posizione: latitudine, longitudine e quota; assetto: beccheggio, rollio e imbardata);
- DEM (modello digitale del terreno);
- caratteristiche di ciascun sensore (FOV, IFOV, frequenza di scansione, etc.);
- punti di controllo a terra lungo la direzione del volo.

I prodotti devono essere radiometricamente corretti con eventuali rimozioni (durante la fase di correzione) di alcuni tipi di rumore come lo striping.

Infine con un controllo di qualità, prima della consegna dei dati, (se necessario) si potrebbe intervenire per correggere:

- eventuali rumori residui (striping residuo);
- linee mancanti o saturate;
- angolo di illuminazione;
- rumore atmosferico.

Molto banalmente un rollio non compensato nelle bande termiche modifica le temperature ai bordi anche di 1° C.

### **Prodotti della ricerca**

Su dati provenienti da un volo eseguito nell'ambito del progetto PRISMA 2, tra la bocca di Lido di Venezia e la piattaforma oceanografica sono state effettuate una serie di elaborazioni che, sulla base di dati in situ disponibili, hanno permesso la realizzazione di un paio di prototipi di prodotti ("innovativi") che sicuramente potranno essere utilizzati per una miglior conoscenza delle caratteristiche di trasparenza delle acque (coefficiente di attenuazione diffusa "k") e sulla presenza di "onde interne" ovvero sulla dinamica di masse d'acqua diverse convergenti tra di loro.

Tali prodotti sono stati ottenuti estraendo da un'immagine relativa ad una zona di mare, le bande spettrali caratteristiche per differente capacità di penetrazione della luce in acqua. A tali bande è stato applicato un metodo basato su l'interferenza generata tra frequenze basse e medio-alte nell'immagine del corpo d'acqua acquisita [Alberotanza e Zandonella, 1999].

### **Procedure operative**

Gli spettrometri ad immagine sono stati introdotti nei primi anni '90 come sensori aerotrasportati ed è previsto che nei prossimi anni siano lanciati i primi sensori sperimentali su satellite, ad esempio CHRIS PROBA che sarà lanciato dall'ESA nel 2001. E' importante sottolineare che al recente sviluppo dei sensori iperspettrali, non ha ancora fatto seguito uno sviluppo maturo delle metodologie di trattamento dei dati iperspettrali [Goetz, 1992; Hoffbeck e Landgrebe, 1996; Kruse et al., 1997]. Quindi, considerato che la letteratura specifica è relativamente carente, emerge la necessità di studi specifici che portino alla definizione di procedure semi-operative. Molte delle procedure definite per l'analisi dei dati iperspettrali, sono messe a punto per il riconoscimento di materiali superficiali, rocce o minerali, poiché le caratteristiche di assorbimento

possono essere considerate diagnostiche [Yuhás et al., 1992; Kruse et al., 1993 Hoffbeck e Landgrebe, 1996], o sono tentativi di applicazioni di queste stesse metodologie agli ambienti acquatici [Kruse et al., 1997].

In questo lavoro è presentato un caso di studio riguardante la messa a punto di due procedure di trattamento dei dati MIVIS per mappare la vegetazione sommersa della Laguna di Orbetello [Brando, 2000].

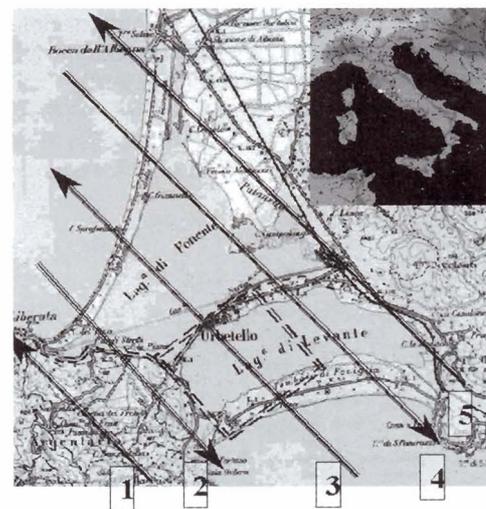
### **Mappe della vegetazione sommersa dai dati iperspettrali MIVIS**

I metodi tradizionali utilizzati per descrivere la distribuzione spaziale della vegetazione acquatica sommersa sono basati sui metodi dei transetti e dei quadrati, che sono molto simili a quelli usati per la vegetazione terrestre. L'applicazione di questi metodi per mappare accuratamente la distribuzione delle macroalghe e macrofite in grandi aree richiede molto tempo-uomo. Il telerilevamento può offrire una valida alternativa per la costruzione di mappe della distribuzione e composizione della vegetazione sommersa, fornendo rapidamente la visione sinottica necessaria su grandi scale per descrivere fenomeni a rapida evoluzione. Le immagini telerilevate di ambienti lagunari sono, a prima vista, suggestive e ricche di informazioni, tuttavia nella realtà, presentano grosse difficoltà per l'interpretazione qualitativa dei fenomeni. Infatti, tutta una serie di fattori concorrono in diversa misura e con grande variabilità a formare il segnale dell'irradianza emergente dalla superficie marina. La luce, penetrando in acqua, viene assorbita in maniera selettiva a seconda della colorazione di questa (che funziona alla stregua di un monocromatore), viene diffusa dal particolato in sospensione e viene infine riflessa dal fondale. Inoltre le variazioni mareali e gli eventi meteorologici rendono più complessa la fenomenologia da interpretare. Per ottenere mappe della vegetazione sommersa, sono state utilizzate tecniche di fotografia aerea, spesso integrate con analisi sul campo. Tale tecnica è stata adottata anche per seguire la dinamica della vegetazione sommersa nella laguna di Orbetello [Lenzi e Mattei, 1998] tra il 1994 e il 1998. Dalle fotografie aeree è possibile solo rilevare i banchi sommersi di macroalghe e di valutare la loro estensione, mentre per il riconoscimento delle specie è necessario il rilievo in campo ed eventualmente il riconoscimento in laboratorio [Lenzi e Bombelli, 1985]. Per ottenere una mappa accurata della laguna di Orbetello (27 km<sup>2</sup>) mediante rilievi diretti, sono necessari dai 5 ai 10 giorni uomo, ma può essere necessario diluire il lavoro anche in un mese per avere condizioni meteorologiche favorevoli e la colonna d'acqua trasparente [Lenzi, comunicazione personale]. L'applicazione delle tecniche di telerilevamento per la mappatura delle specie algali e per una stima delle biomasse è un problema relativamente poco studiato [Malthus e George, 1997]. Diversi autori hanno fatto uso di immagini rilevate da satellite a bande larghe

uso di immagini rilevate da satellite a bande larghe (Landsat 5 – Thematic Mapper) ma hanno dovuto definire algoritmi e procedure ‘regionali’ per far fronte alle difficoltà dovute a bande spettrali ridondanti e non contigue, che non permettono di discriminare le caratteristiche spettrali [Goetz et al., 1985; Dekker et al., 1992]. Ad esempio, per il riconoscimento delle macroalghe della laguna di Venezia sono state messe a punto e confrontate una serie di metodologie, quali i rapporti tra bande, le reti neurali e l’analisi vettoriale per l’analisi dei dati del Landsat 5-TM [Zibordi et al., 1990; Alberotanza et al., 1991]. Anche per il riconoscimento delle macroalghe della laguna di Orbetello era stata definita una procedura regionale che sfruttava le caratteristiche morfologiche del bacino, in particolare la profondità costante e la variazione mareale contenuta in pochi centimetri [Alberotanza e Zandonella, 1987]. Con tali presupposti è stata applicata una classificazione basata su metriche del colore ad immagini Landsat 5-TM, caratterizzando la diversità dei colori di tipi di alghe e di fondale con la definizione di misure di similarità in colore di una classe e misure di diversità di colore tra due classi, a seguito di una caratterizzazione spettrale in campo. Tuttavia, la mappatura della vegetazione acquatica sommersa analizzando dati telerilevati pone dei problemi, tra cui i principali sono costituiti dalla difficoltà di avere una conoscenza dettagliata delle proprietà spettrali della vegetazione sommersa, macroalghe e macrofite, e dell’effetto della colonna d’acqua. Infatti l’effetto della colonna d’acqua influisce notevolmente sugli spettri acquisiti in campo, in quanto l’assorbimento dell’acqua appiattisce notevolmente gli spettri, soprattutto nel primo infrarosso [Peñuelas et al., 1993].

### ***I rilievi iperspettrali da aereo in Laguna di Orbetello***

Nell’ambito delle attività di ricerca e monitoraggio promosse tra il 1994 e il 1996, durante la gestione commissariale finalizzata al risanamento ambientale della Laguna di Orbetello, sono state effettuate sette campagne di acquisizione di dati MIVIS al fine di stimare la distribuzione della vegetazione sommersa e valutarne le variazioni stagionali e annuali. Tutte le missioni di acquisizione effettuate sulla laguna di Orbetello sono state eseguite seguendo la stessa metodica. La quota di volo era di 2000 metri, quindi la risoluzione spaziale del pixel al suolo risulta pari a 4 m x 4 m. Le immagini sono state acquisite in cinque strisciate parallele con una sovrapposizione di circa il 25 – 30 %, con direzioni alternate (SE-NW, NW-SE), come riportato in Figura 1. Per minimizzare gli effetti dello scattering atmosferico sulla radianza rilevata al sensore, l’acquisizione avveniva tra le 9 e le 11 del mattino, con il volo nella direzione del sole e in quella opposta.



**Figura 1.** Piano di volo definito per tutte le missioni di acquisizione MIVIS sulla Laguna di Orbetello. (Le frecce indicano direzione, verso e lunghezza delle strisciate, i numeri ne contrassegnano l’ordine).

### ***Caratterizzazione Spettrale della vegetazione sommersa***

In occasione del passaggio del MIVIS del 23 luglio 1996, sono state effettuate una serie di misure di radianza in situ il 23 e 24 luglio 1996 per caratterizzare spettralmente le macroalghe in situ e per permettere un confronto qualitativo con i dati MIVIS, sfruttando le peculiarità delle immagini spettrali che permettono l’uso contemporaneo di informazioni spaziali e spettrali per analisi integrate e offrono la possibilità di confrontare dati di immagini calibrate con dati di misure spettrali in campo [Goetz, 1992; Kruse et al., 1993]. Infatti, sebbene gli spettri di riflettanza dei corpi d’acqua siano stati spesso caratterizzati in termini di assorbimento e diffusione della luce da parte dei costituenti principali della colonna d’acqua sia in mare aperto [Morel e Prieur, 1977; Gordon e Morel, 1983] che in acque costiere e interne [Klemas e Hardisky, 1987; Dekker et al. 1997; Rijkeboer et al., 1998], la riflettanza della vegetazione sommersa è stata poco studiata, anche a causa delle difficoltà di interpretazione dipendenti dall’assorbimento dell’acqua, soprattutto nell’infrarosso [Peñuelas et al., 1993]. Una caratterizzazione in situ delle macroalghe della laguna di Orbetello era stata fatta nel 1987 [Alberotanza e Zandonella, 1987] con uno spettrometro con una risoluzione spettrale di 25nm.

Gli spettri delle specie algali sono stati raccolti da una piccola imbarcazione con un radiometro multispettrale portatile PR-650 (Photo Research®) che opera tra i 380 e i 780 nm con una risoluzione spettrale di 4 nm. Con lo spettrometro sono stati misurati gli spettri della

radianza uscente dall'acqua (water-leaving radiance) di ognuna delle specie algali predominante nel bacino. Per poter stimare la riflettanza apparente è stata misurata anche la radianza di un pannello bianco calibrato [Alberotanza et al., 1993]. Inoltre, i siti di campionamento spettrale sono stati georeferenziati con un GPS portati-

le.

### Analisi spettrale della vegetazione sommersa

Per analizzare le caratteristiche spettrali della vegetazione sommersa presente nel bacino e per valutare l'accuratezza spettrale del MIVIS, in Figura 2, sono riportati gli spettri rilevati in situ e gli spettri estratti dai pixel dell'immagine MIVIS di alcune specie macroalgali.

Dal confronto degli spettri, è possibile osservare una corrispondenza generale nel trend, dato che gli spettrometri ad immagine possono misurare accuratamente e adeguatamente l'informazione della firma spettrale desiderata poiché raccolgono quasi tutta l'informazione spettrale [Dekker et al., 1992]. In particolare, per tutti gli spettri si osservano bassi valori di radianza, nella regione tra 430 e 510 nm, dovuti all'assorbimento da parte della materia organica disciolta e particellata e dei pigmenti fotosintetici (clorofilla a,  $\beta$ -carotene), mentre i valori di radianza più alti, tra 510 e 600 nm, sono dovuti alla presenza di pigmenti algali.

Gli spettri delle Chlorophyceae (*Chaetomorpha* sp., *Ulva* sp. e *Enteromorpha* sp.) (figura 2a, b, c), risultano simili, infatti si riscontra un minimo tra 670 e 690 nm, dovuto all'assorbimento della clorofilla-a [Stumpf e Tyler, 1988; Quibell, 1992]; risulta, poi, evidente un picco di radianza a 700-710 nm, dovuto ad un minimo nelle curve di assorbimento combinate di alghe e acqua [Dekker et al., 1992; Gitelson, 1992], nonché alla fluorescenza indotta dalla radiazione solare sulle molecole di clorofilla-a in vivo [Gordon, 1979; Gower et al., 1984].

Inoltre, per quanto riguarda l'*Ulva* sp. (Fig. 2b), le posizioni dei picchi sono spostate tra loro di 20 o 30 nm. Tale situazione si ritiene dovuta alla presenza di sostanza organica disciolta nella colonna d'acqua ed alla sedimentazione del detrito che si verifica nei talli delle alghe [Mann, 1988; Bucci et al. 1991; Lavery et al. 1992]; di conseguenza si verifica un aumento del coefficiente di assorbimento nella regione del blu che altera la curva spettrale.

Lo spettro di radianza di *Enteromorpha* sp. (Fig. 2c) presenta un range di valori dieci volte maggiore dei range misurati per gli altri taxa, e per quanto riguarda la lunghezza d'onda si osserva un alto valore di radianza tra 710 e 770 nm; tale situazione si origina in presenza di talli galleggianti a pochi centimetri dalla superficie dell'acqua. A causa del suo caratteristico contenuto di ficobiliproteine, quali pigmenti accessori alla fotosintesi, la *Gracilaria* sp. (Fig. 2d) mostra uno spettro della radianza senza il minimo a 670 nm, e il picco di 700-710 nm [Gantt, 1990].

### Procedure di classificazione

La caratterizzazione spettrale delle macroalghe ha mostrato un buon accordo tra le misure effettuate in campo e gli spettri estratti dalle immagini MIVIS. Infatti, l'alta definizione dei dati iperspettrali permette di discer-

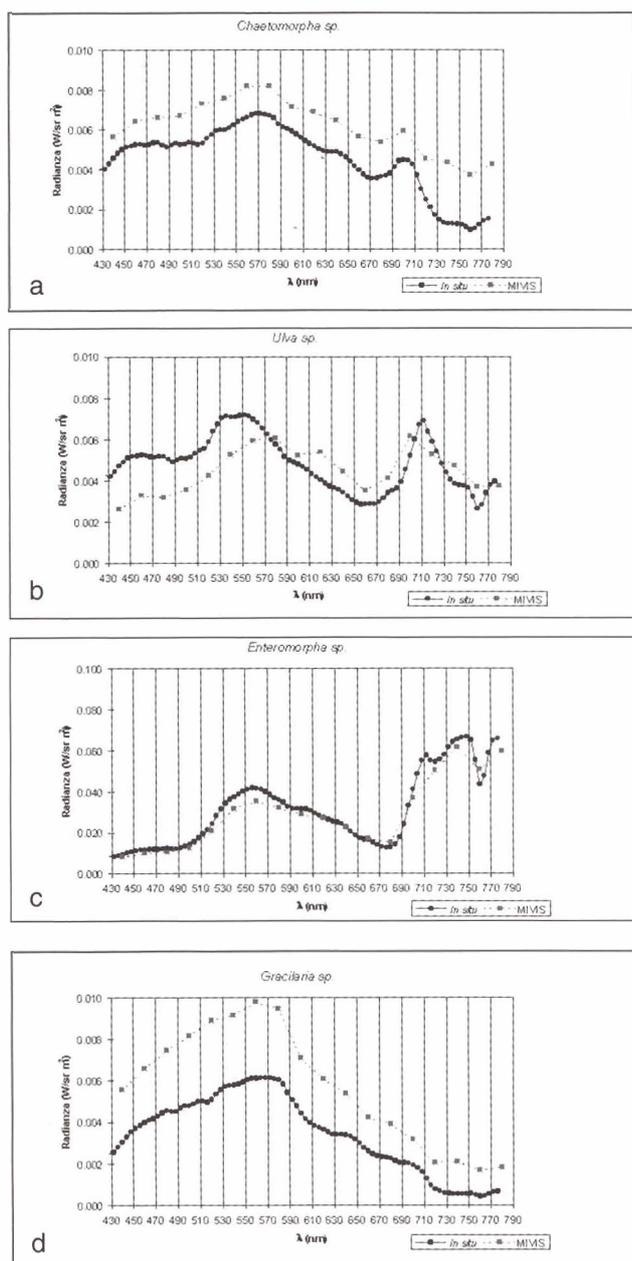


Figura 2 - Confronto tra spettri di radianza rilevati in situ e spettri estratti dalle immagini MIVIS per le specie algali dominanti: *Chaetomorpha* sp. (a), *Ulva* sp. (b), *Enteromorpha* sp. (c) e *Gracilaria* sp. (d).

nere ed identificare le caratteristiche peculiari delle specie della vegetazione sommersa.

Per mappare la vegetazione sommersa di Orbetello sono state messe a punto due procedure di trattamento dei dati MIVIS, che sfruttano le particolari caratteristiche della laguna e che rendono possibile e significativo il confronto tra le radianze misurate in campo e i dati MIVIS. Infatti, la debole escursione di marea, la morfologia del fondale, piatto e poco profondo, e una circolazione idrodinamica povera, danno luogo a condizioni accettabili di trasparenza dell'acqua ed un livello quasi costante di altezza della colonna d'acqua.

Una prima procedura è stata definita per la classificazione della vegetazione sommersa per le immagini del luglio 1996, utilizzando la caratterizzazione spettrale effettuata in campo [Alberotanza et al., 1999]. Per descrivere la variazione della distribuzione e della composizione vegetazionale avvenuta nel bacino tra il 1995 e il 1996, tale procedura è stata poi estesa alle immagini del luglio 1995 (per le quali non esistevano misure effettuate in campo contemporaneamente al volo) e si sono utilizzate le informazioni spettrali del 1996 [Alberotanza et al., 1998].

Le due procedure si differenziano principalmente per lo schema di correzione atmosferica adottato. Per i dati del 1996, si era scelto di definire una procedura semi-operativa e quindi è stato adottato il metodo della sottrazione del minimo. Tale metodologia semplificata si può utilizzare quando non è necessaria la calibrazione dei dati, cioè quando si lavora con un solo set di dati e non è necessario fare confronti spettrali quantitativi. Nel caso in cui sia necessario fare confronti multitemporali, come per l'analisi delle immagini del 1995, è necessario introdurre degli schemi di correzione atmosferica basati sulla teoria del trasferimento radiativo.

### Procedura con dati 'in situ' contemporanei

La procedura usata per la classificazione della vegetazione sommersa è stata elaborata per i dati MIVIS del 23 luglio 1996, utilizzando la caratterizzazione spettrale effettuata in campo il 23 e il 24 luglio 1996. La metodologia [Alberotanza et al. 1999] è suddivisa nelle seguenti fasi:

- Estrazione del sub-set di 28 canali (spettrometri 1 e 2), dal data-set completo del MIVIS. Le bande dell'InfraRosso Vicino e dell'InfraRosso Medio sono state prese in considerazione benché non abbiano alcuna penetrazione ottica nell'acqua, perché permettono di discriminare i pixel relativi all'acqua da quelli della superficie emersa e perché evidenziano la presenza di alcuni prodotti secondari del metabolismo anaerobio di degradazione ( $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $H_2$ ), che avviene soprattutto a seguito degli eventi distrofici;
- Costruzione del mosaico delle immagini ottenute nelle diverse bande spettrali lungo tutte le strisciate. Le procedure di mosaicatura sono state effettuate sui dati geo-

metricamente corretti. A causa delle interferenze radio sul ricevitore GPS, in diverse zone della laguna, per queste correzioni sono stati utilizzati i valori medi relativi ad ogni strisciata di beccheggio, imbardata e direzione di volo [Avanzi et al., 1995];

- Correzioni dello scattering atmosferico eseguite con il metodo della sottrazione del minimo valore della scena, che vengono applicate indipendentemente per ogni banda spettrale [Chavez, 1988; Gastellu-Etchegorry e Stancalie, 1994], per ottenere una stima delle radianze uscenti dall'acqua (water leaving radiances) dalle radianze misurate al sensore;
- Costruzione di una libreria spettrale per la classificazione. Gli spettri di riferimento per la vegetazione sommersa sono stati selezionati con un confronto qualitativo tra gli spettri collezionati insitu e le radianze emergenti dall'acqua (water-leaving radiances), estratte dalle immagini MIVIS. Gli spettri di riferimento sono stati selezionati in immagini a colori quasi naturali (composizione delle bande MIVIS 13, 7 e 1 in Rosso, Verde e Blu rispettivamente), con le localizzazioni GPS, e basandosi sulle indicazioni fornite da Lenzi (comunicazione personale);
- La classificazione è stata eseguita usando la tecnica Spectral Angle Mapper (SAM). Il SAM è un metodo automatico di classificazione che permette di valutare le similarità spettrali tra gli spettri dell'immagine e gli spettri di riferimento [Yuhus et al., 1992; Kruse et al., 1993]. Un algoritmo determina la similarità tra i due spettri calcolando l'angolo spettrale esistente tra loro, trattandoli dunque come vettori in uno spazio con dimensione pari al numero delle bande spettrali utilizzate [Kruse et al., 1993]. Questa tecnica è relativamente poco sensibile agli effetti dell'illuminazione e dell'albedo, dato che l'angolo tra i due vettori è invariante rispetto alla lunghezza dei vettori stessi [Kruse et al., 1997].

Durante la selezione degli spettri di riferimento per la classificazione, è stato osservato che gli spettri di radian-

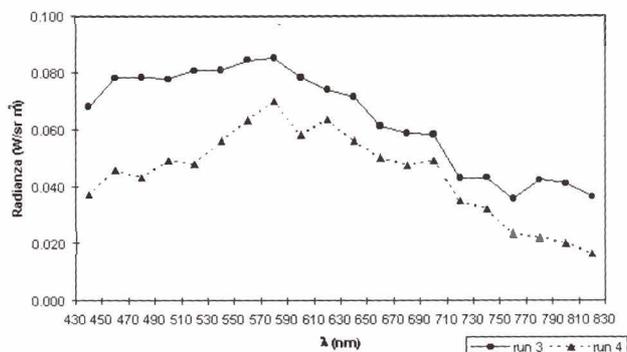
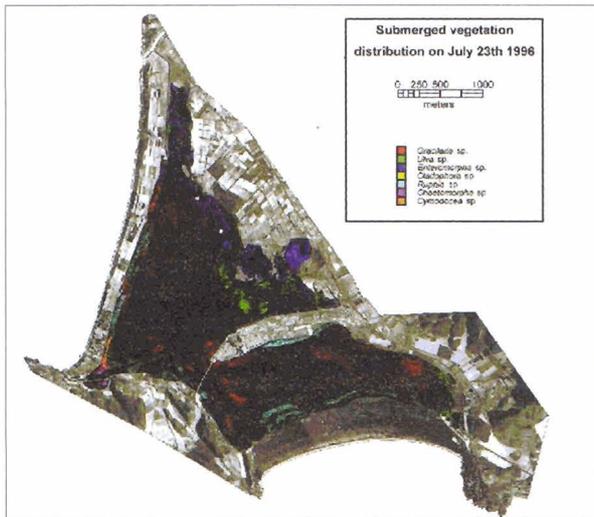


Figura 3 - Confronto tra due spettri in radianza dello stesso target estratti dalla zona di sovrapposizione di due strisciate MIVIS adiacenti.

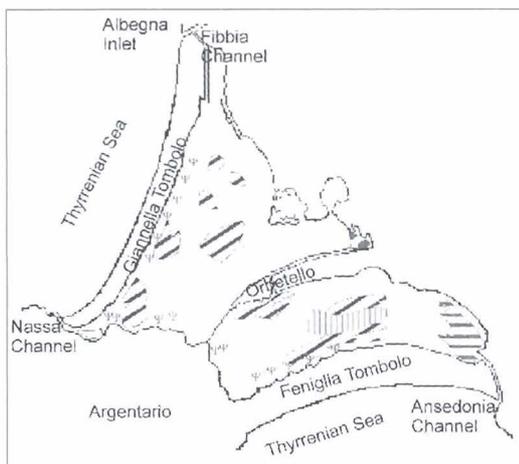
za al sensore riguardanti gli stessi target estratti dalle zone di sovrapposizione laterale tra strisciate contigue mostrano alcune apprezzabili differenze.

### Risultati e discussione

In Figura 3 sono riportati, a titolo di esempio, due spettri estratti da pixel di due strisciate contigue riguardanti lo stesso target. Tali spettri mostrano lo stesso comportamento qualitativo nell'intervallo di lunghezze d'onda tra 510 e 770 nm; in particolare, sono evidenti il largo picco



**Figura 4** - Mappa della vegetazione sommersa riconosciuta utilizzando la procedura adottata (Aut. SMA n 240, 13/6/1996).



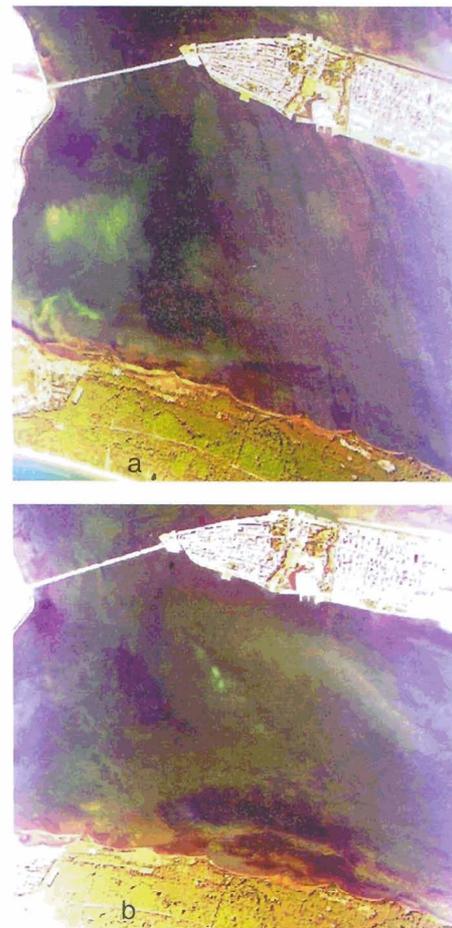
**Figura 5** - Sketch di distribuzione della vegetazione sommersa basato su analisi in sito, campionamenti in laguna e sull'analisi delle biomasse algali raccolte durante la rimozione delle alghe dal bacino (*Rhuppia Cirrosa*; *Cladophora*; *Ulva*; *Gracilaria*; *Enteromorpha*; *Chaetomorpha*) (Alberotanza 1999b).

centrato a 570 nm, il minimo a 685 nm e il picco a 700-710 nm. Infatti il differente angolo di esposizione al sole potrebbe amplificare l'effetto della materia sospesa sullo scattering della luce, in particolare in questa regione spettrale.

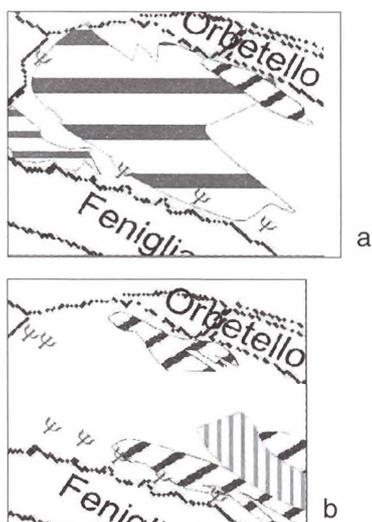
Inoltre, parte di questi effetti potrebbe essere imputabile ai limiti intrinseci dello schema di correzione atmosferica adottato, piuttosto operativo, che non assicura la possibilità di fare confronti tra immagini.

Per tale ragione, la procedura di classificazione è stata applicata alle singole strisciate, utilizzando gli spettri di riferimento estratti dagli stessi dati. Dopo che la procedura di classificazione è stata applicata alle cinque strisciate, è stata assemblata la mappa tematica per la distribuzione algale.

I risultati della classificazione mostrati in Figura 4 risultano in accordo con la partizione della laguna in diversi ecotoni, dipendentemente dai gradienti di salinità, tempe-



**Figura 6** - Composizione in colori pseudo-naturali [bande 13 (671-694  $\mu\text{m}$ ), 7 (551-572  $\mu\text{m}$ ) e 1 (430-450  $\mu\text{m}$ ) in RGB] della zona in esame: (a) luglio 1995; (b) luglio 1996 (Aut. SMA n 240, 13/6/1996).



**Figura 7** - Distribuzione vegetazione sommersa nella zona in esame: a) luglio 1995; b) luglio 1996 (*Rhuppia Cirrosa*; *Cladophora*; *Ulva*; *Gracilaria*; *Enteromorpha*; *Chaetomorpha*), (particolare estratto da Brando 2000).

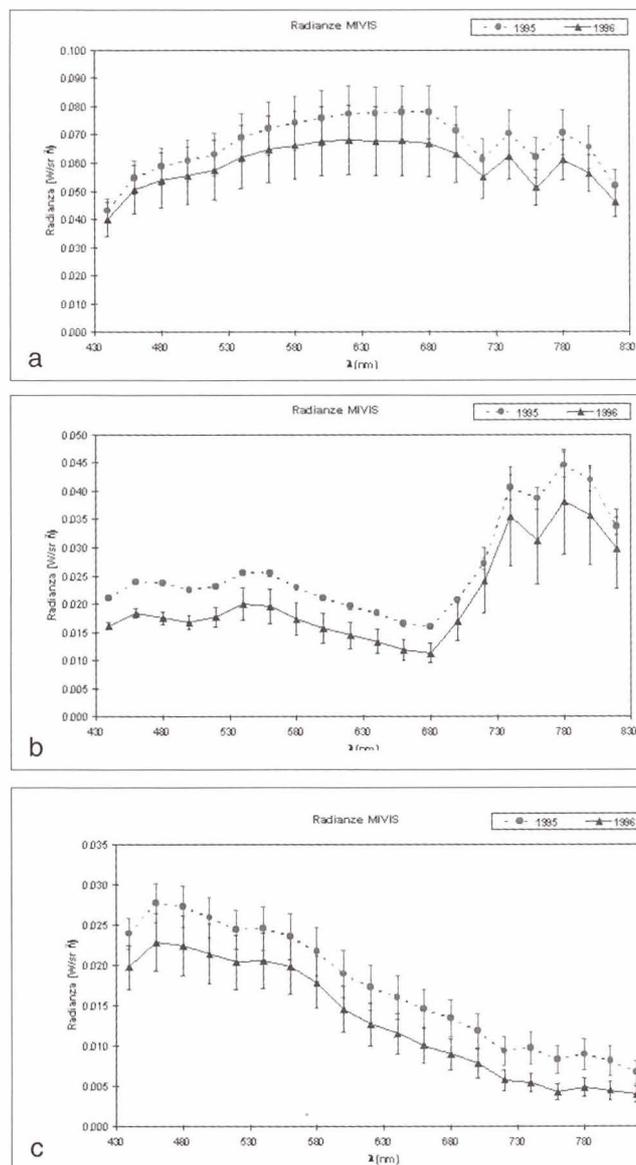
ratura dell'acqua e concentrazione dei nutrienti, così come descritto da TEI [1989] e dall'abbondanza di vegetazione sommersa e dalla dominanza rilevata in campo (rappresentata in Figura 5), come riportato da Lenzi e Mattei [1998] con le metodologie descritte in Bombelli e Lenzi [1995, 1996]. Alcuni errori nella classificazione potrebbero essere dovuti alla registrazione della localizzazione del sito di campionamento sull'immagine MIVIS. Inoltre, a causa delle caratteristiche peculiari delle lagune, più di una specie di alghe potrebbero essere adiacenti o le popolazioni algali potrebbero essere mescolate.

### Estensione della procedura

Per descrivere la variazione della distribuzione e della composizione vegetazionale avvenuta nel bacino tra il 1995 e il 1996, sono state analizzate due immagini MIVIS (22 luglio 1995 e 23 luglio 1996). Tale analisi è stata effettuata su una porzione della Laguna di Levante in cui le variazioni della condizione ecologica sono state molto evidenti [Alberotanza et al.; Brando 2000].

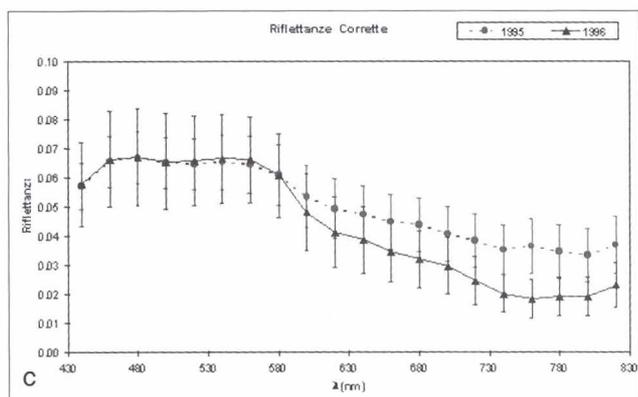
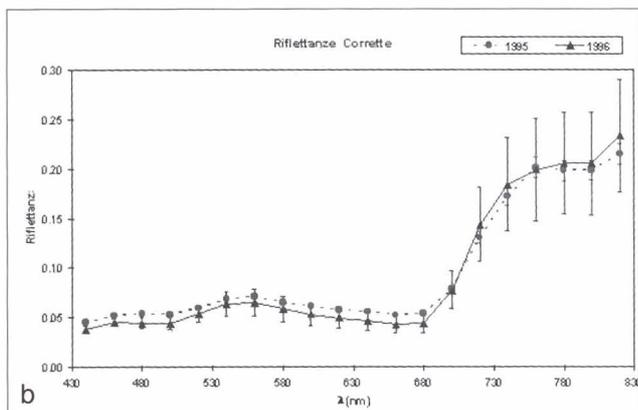
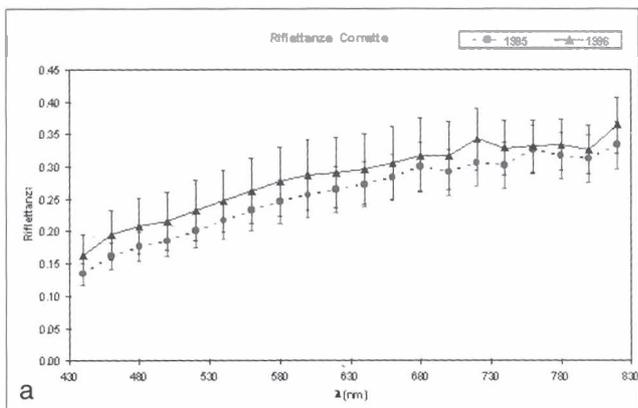
Durante entrambe le missioni le condizioni atmosferiche erano buone, il 23 luglio 1996 la qualità delle immagini acquisite è stata eccellente, la visibilità orizzontale era di circa 20 km, mentre il 22 luglio 1995 la visibilità era di 25 km. I dati relativi alla visibilità orizzontale sono stati forniti dalla stazione meteorologica dell'Aviazione Militare Italiana sita sul monte Argentario.

In Figura 6 sono riportate le composizioni in colori quasi naturali (MIVIS 13,7,1, in RGB) della zona in esame per le due date (luglio 1995 e luglio 1996), corrispondenti alla

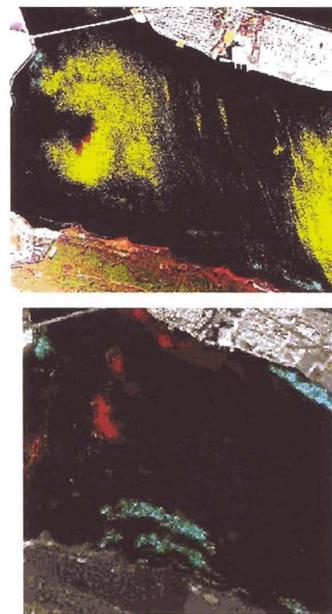


**Figura 8** - Confronto tra spettri di radianza MIVIS del dataset del luglio 1995 e del luglio 1996 per: (a) asfalto di un parcheggio; (b) Pineta del tombolo della Feniglia; (c) media degli spettri dei pixel d'acqua della scena.

porzione della terza strisciata, come rappresentato con il riquadro in Figura 1. In Figura 7 sono riportati le mappe effettuate con i rilievi in campo relativi al luglio 1995 (Fig. 7a) e 1996 (Fig. 7b). Dal confronto si rileva che, in questa zona, la *Cladophora* è scomparsa durante la primavera - estate del 1996, la *Gracilaria* è ricomparsa durante il 1996, e i banchi di *Ruppia*, che erano minimi nel 1995,



**Figura 9** - Confronto tra spettri di riflettanza atmosfericamente corretta calcolata dalla radianza MIVIS del dataset del luglio 1995 e del luglio 1996 per (a) asfalto di un parcheggio; (b) Pineta del tombolo della Feniglia; (c) media degli spettri dei pixel d'acqua della scena.



**Figura 10** - Risultati della classificazione di una porzione del bacino di levante: (a) luglio 1995; (b) luglio 1996. (*Rhupia Cirrosa*; *Cladophora*; *Ulva*; *Gracilaria*; *Enteromorpha*; *Chaetomorpha*)

sono aumentati durante il 1996 [Lenzi e Mattei, 1998].

### Verifica dello schema di correzione atmosferica

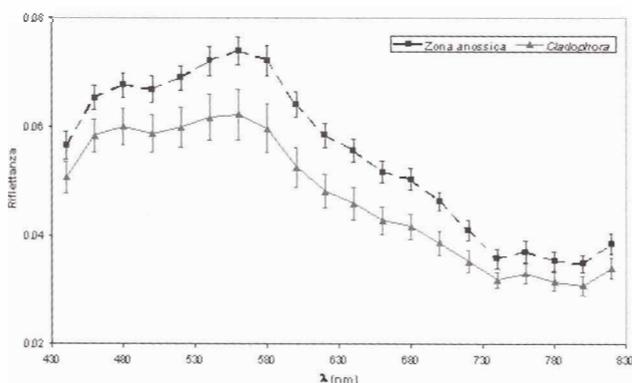
Per poter estendere la procedura di riconoscimento algale ad immagini a cui non si può associare una serie di misure spettrali insitu contemporanee (come quella del luglio 1995), è stato necessario verificare se lo schema di correzione atmosferica adottato fosse sufficiente, o se fosse necessario fare ricorso a modelli di trasferimento radiativo per il calcolo delle riflettanze atmosfericamente corrette.

A tal fine, in Figura 8 si riportano gli spettri della radianza estratti da entrambe le immagini del MIVIS relativi a due target considerati radiometricamente stabili, l'asfalto di un parcheggio (Fig. 8a) e la pineta del tombolo della Feniglia (Fig. 8b), e poi la media degli spettri dei pixel d'acqua della scena (Fig. 8c). Si può notare che le forme degli spettri per classi corrispondenti sono abbastanza simili da permettere un riconoscimento qualitativo, ma differiscono per un fattore di scala e gli spettri corrispondenti sono ognuno fuori delle barre d'errore dell'altro. Dunque, si è verificato che lo schema operativo di correzione atmosferico fosse abbastanza robusto applicando la procedura di classificazione alle immagini di radianza al sensore, ma i risultati non hanno mostrato un appropriato livello di accuratezza. Sebbene ci fossero condizioni di

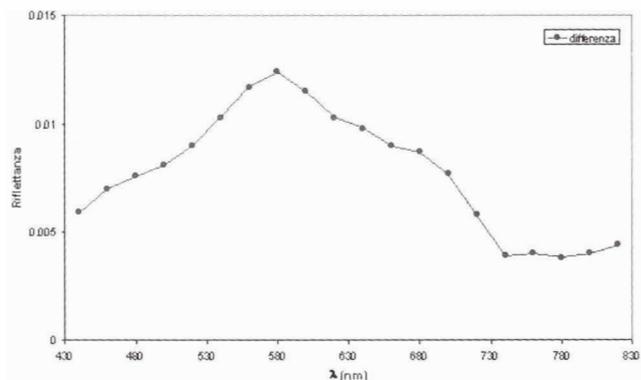
buona visibilità durante entrambi i voli, è emersa quindi la necessità di rendere ininfluenti, o quasi, gli effetti delle condizioni di illuminazione e gli effetti dell'atmosfera. Quindi, per estendere la procedura ad immagini acquisite in assenza di misure spettrali insitu contemporanee (come quella del luglio 1995), sono state introdotte la correzione atmosferica e il calcolo delle riflettanze. Il modello di trasferimento radiativo 6S [Vermote et al.1997] è stato applicato ad ognuna delle bande MIVIS del primo spettrometro (430-830 nm), per calcolare le riflettanze atmosfericamente corrette per le due date. Come input per la densità degli aerosol, sono stati utilizzati i dati di visibilità orizzontale rilevati con cadenza oraria dalla stazione meteorologica dell'Aeronautica Militare sita sul Monte Argentario.

La Figura 9 riporta le riflettanze corrette per l'atmosfera relative agli stessi target della Figura 9. Per i due set di dati, gli spettri dei target radiometricamente stabili (Fig. 9a e 9b) corrispondono abbastanza bene. Le medie, relative ai due anni, degli spettri dei pixel d'acqua (Fig. 9c) appaiono sovrapposte nella regione spettrale del blu-verde, ma non alle regioni del rosso e dell'infrarosso vicino. A seguito di un'attenta analisi delle informazioni relative alle specie algali presenti nel bacino è ragionevole affermare che tale differenza, nella regione tra i 600 e gli 800 nm, è dovuta al cambiamento avvenuto nella composizione della vegetazione della laguna, che ha visto la sostituzione di *Cladophora* (Clorophyceae), che ha uno spettro abbastanza simile a quello di *Ulva* e *Chetomorpha* (figg. 2a e 2b), con *Gracilaria* che ha un comportamento spettrale differente nella regione del rosso, per i suoi caratteristici pigmenti accessori alla fotosintesi (Figura 2d).

Lo schema della correzione atmosferica è sembrato dare buoni risultati, poiché gli spettri dei due target stabili sono sovrapposti. Quindi, la procedura già descritta è stata cambiata per rendere possibile il confronto tra le due



**Figura 11** - Spettri di riflettanza atmosfericamente corrette, estratti dall'immagine MIVIS del 1995, delle aree classificate come *Cladophora* e dalla zona in cui sono stati riconosciuti gli effetti della crisi distrofica.



**Figura 12** - Differenza spettrale tra gli spettri di riflettanza atmosfericamente corrette, estratti dall'immagine MIVIS del 1995, delle aree classificate riconosciuta come *Cladophora* e dalla zona anossica.

immagini. Una libreria spettrale di riflettanze atmosfericamente corrette è stata ottenuta dalla libreria spettrale di radianza relativa all'immagine del luglio 1996 (Fondale/vegetazione, *Cladophora*, *Ruppia*, *Gracilaria* e *Ulva*), e la procedura di classificazione è stata applicata ad entrambe le immagini.

## Risultati e discussione

Per verificare la validità della procedura così modificata, i risultati della classificazione effettuata sulla scena selezionata (figg. 10 a, b) sono stati confrontati con gli sketch della distribuzione sommersa, basati sulle analisi in sito relative ad un'area del bacino di Levante (Fig. 7a, b), in cui le variazioni ecologiche erano molto evidenti [Alberotano et al., 1998; Lenzi e Mattei, 1998]. I risultati ottenuti dalle classificazioni sono concordi con la distribuzione della vegetazione sommersa campionata in campo, e sembrano riconoscere i cambiamenti vegetazionali avvenuti tra i due anni. I pixel non classificati possono avere una vegetazione rada o avere elevata quantità di solidi sospesi in colonna d'acqua, poiché in entrambi i casi mancano le informazioni caratteristiche della vegetazione sommersa.

Dal confronto tra i risultati della classificazione per l'immagine del luglio 1996 (Figura 11a) e la distribuzione della vegetazione rilevata in campo agli inizi di luglio (Figura 9a), si nota una differenza per la copertura della *Cladophora* sul lato destro della mappa. Infatti, la mappa rilevata in campo presenta una forma convessa, contrassegnata con un tratteggio, mentre i risultati della classificazione dei dati telerilevati mostrano una concavità evidente, contrassegnata dal tratteggio. Tale area si riconosce anche nella Figura 6a, in composizione a colori quasi naturali, perché è caratterizzata da un colore biancastro caratteristico dei solidi sospesi e della massa algale in fermentazione. L'estensione dell'area interessata dagli effet-

ti dell'anossia è stata stimata in modo approssimato intorno a 5000 pixel, pari a 8 ettari.

In tale area si è verificato un evento distrofico [Lenzi, comunicazione personale], e per l'algoritmo di classificazione la suddetta zona è risultata un'area priva di alghe come risultato di un 'cambio di colore' dovuto ai processi di fermentazione nelle masse algali nel periodo intercorso tra la mappatura insitu e le acquisizioni di immagini iperspettrali.

Per interpretare gli effetti spettrali della crisi distrofica e valutare il 'cambio di colore' in Figura 11 si riportano gli spettri di riflettanza delle zone classificate come *Cladophora* e della zona in cui è avvenuta la crisi anossica. Lo spettro riferito alla zona anossica presenta dei valori di riflettanza più alti su tutto il range spettrale, e soprattutto tra i 530 e i 630 nm. In Figura 12 è raffigurata la differenza spettrale tra i due spettri della Figura 11, al fine di analizzare l'effetto spettrale dei processi di fermentazione verificatisi sulle biomasse algali. Tale effetto può essere descritto principalmente con un aumento del backscattering dovuto all'aumento del particolato presente nella colonna d'acqua a causa dell'attività batterica.

La caratterizzazione spettrale dei processi di fermentazione ha permesso quindi di aggiungere una classe alla libreria spettrale per la classificazione supervised di ulteriori immagini spettrali

## Bibliografia

- Alberotanza L. e Zandonella A.** (1987) - *Alga classification in lagoon environments: a methodology of TM data processing based on color metrics*. Proceeding of Remote Sensing from Space, Oldenburg (FRG), March 31-April 3: 150-161.
- Alberotanza L., Pavanati M., Zibordi G. e Zandonella A.** (1991) - *Landsat 5/Thematic Mapper images used to identify macroalgae vegetation in the Venice Lagoon*. In: Wijnen, M.M., C.A. Brebbia (Eds.), Water pollution: modelling, measuring and prediction, Southampton, Computational Mechanics Publications, 355-368.
- Alberotanza L., Canossi I., Pavanati M., Ramasco C. e Zibordi G.** (1993) - *Spettri di riflettanza di superfici naturali: metodologia di misura ed applicazione ad acque lagunari*. - Rivista Italiana di Telerilevamento, 2: 17-20.
- Alberotanza L., Brando V.E., Ferro Milone G., Pavanati M. e Ravagnan G.** (1998) - *Airborne hyperspectral imagery as operational tool of the ecological status of a coastal lagoon*. Fifth International Conference Remote sensing and Coastal Environment. S. Diego (Ca, USA), October 5-7, 1998, 127-134.
- Alberotanza L. e Zandonella A.** (1999) - *Detection of in-water and underwater structures from MIVIS airborne data*. Proceedings of EUROPTO 99, SPIE vol. 3868, 662-626.
- Alberotanza L., Brando V.E., Ravagnan G. e Zandonella A.** (1999) - *Hyperspectral aerial images. A valuable tool for submerged vegetation recognition in the Orbetello Lagoons, Italy*. International Journal of Remote Sensing 20: 523-533.
- Avanzi G., Bianchi R., Capece M., Cavalli R.M., Marino C.M. e Pignatti S.** (1995) - *Studio metodologico per la referenziazione geografica dei dati MIVIS*. In: Zaghi, A., M. Gomasca (Eds.), Telerilevamento, GIS e cartografia al servizio dell'informazione territoriale, Torino, CSEA, 367-372.
- Bombelli V. e Lenzi M.** (1995) - *Evoluzione del sistema laguno-costiero di Orbetello: rapporto tra eutrofizzazione, struttura dei popolamenti e produttività*. Biol. Mar. Medit. 2: 31-36.
- Bombelli V. e Lenzi M.** (1996) - *Italy-The Orbetello lagoon and the Tuscan coast*. In: Schramm, W., P.H. Nienhuis (Eds.), Marine benthic vegetation. Recent changes and the effects of eutrophication, Springer-Verlag, 331-337.
- Brando V.E.** (2000) - *I dati telerilevati iperspettrali e i modelli trofici quali strumenti descrittivi della condizione ecologica della Laguna di Orbetello*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Modellistica dei Sistemi Ambientali - Ciclo XII. Università di Padova, pp.135.
- Chavez P.S.** (1988) - *An improved dark-object subtraction technique for atmospheric correction of multispectral data*. Remote Sensing of Environment, 24: 459-479.
- Dekker A.G., Malthus T.J.M., Wijnen M.M. e Seyhan E.** (1992) - *The effect of spectral band width and positioning on the spectral signature analysis of inland waters*. Remote Sensing of Environment, 41: 211-226.
- Dekker A.G., Hoogenboom H.J., Goddijn L.M. e Malthus T.J.M.** (1997) - *The relation between inherent optical properties and reflectance spectra in turbid inland waters*. Remote Sensing Reviews, 15: 59-74.
- Gantt E.** (1990) - *Pigmentation and photoacclimation*. In: Cole, K.M., R.G. Sheat (Eds.), Biology of the red algae, Cambridge, University Press, 203-219.
- Gastellu-Etchegorry J.P. e Stancalie G.** (1994) - *Correction of atmospheric effects for the high resolution airborne spectrometry data*. First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France, 12-15 September, ERIM, Ann Arbor.
- Gitelson A.** (1992) - *The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration*. International Journal of Remote Sensing 13: 3367-3373.

- Goetz A.F.H., Vane G., Solomon J.E. e Rock B.N.** (1985) - *Imaging spectrometry for earth remote sensing*. Science, 228: 1147-1153.
- Goetz A.F.H.** (1992) - *Principles of narrow band spectrometry in the visible and IR: instruments and data analysis*. In: Toselli, F., J. Bodechtel (Eds.), *Imaging spectrometry: fundamentals and prospective applications*, Dordrecht, Kluwer, 21-32.
- Gordon H.R.** (1979) - *Diffuse reflectance of the ocean: the theory of its augmentation by chlorophyll-a fluorescence at 685 nm*. Applied Optics 18: 1161-1167.
- Gordon H.R. e Morel A.** (1983) - *Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: a review*, Springer-Verlag, New York, pp.114.
- Gower J.F.R., Lin S. e Borstadt G.A.** (1984) - *The information content of different optical spectral ranges for remote chlorophyll estimation in coastal waters*. International Journal of Remote Sensing 5: 349-364.
- Hoffbeck J.P. e Landgrebe D.A.** (1996) - *Classification of remote sensing images having high spectral resolution*. Remote Sensing of Environment, 57: 119-126.
- Klemas V. e Hardisky M.A.** (1987) - *Remote sensing of estuaries: an overview*. 21st Symp. on Rem. Sens. of Environm, 10 -1987, Ann Arbor, Michigan, p. 183-203.
- Kruse F.A., Lefkoff A.B., Boardman J.W., Heidebreche K.B., Shapiro A.B., Barloo P.J. e Goetz A.F.H.** (1993) - *The Spectral ImagProcessing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data*. Remote Sensing of Environment, 44: 145-163.
- Kruse F.A., Richardson L.L. e Ambrosia V.G.** (1997) - *Techniques developed for geological analysis of hyperspectral data applied to near-shore hyperspectral ocean data*. Fourth International Conference on Remote Sensing and Coastal Environments, Orlando, Florida, 17-19 March.
- Lavery P.S., Lukatelich R.J. e McComb A.J.** (1992) - *Changes in the biomass and species composition of macroalgae in a eutrophic estuary*. Estuarine Coastal and Shelf Science 33: 1-22.
- Lenzi M. e Bombelli V.** (1985) - *Prime valutazioni della biomassa macrofittica della laguna di Orbetello (GR), in considerazione di uno sfruttamento industriale*. Nova Thalassia, 7 (suppl. 3): 335-360.
- Lenzi M. e Mattei N.** (1998) - *Risultati di quattro anni di gestione dell'ecosistema lagunare di Orbetello attraverso la raccolta delle biomasse algali*. Biologi Italiani, 2: 7-12.
- Malthus T.J.M. e George D.G.** (1997) - *Airborne remote sensing of macrophytes in Cefni Reservoir, Anglesey, UK*. Aquatic Botany, 58: 317-332.
- Mann K.H.** (1988) - *Production and use of detritus in various freshwater, estuarine and coastal marine ecosystems*. Limnology and Oceanography, 33: 910-930.
- Morel A. e Prieur L.** (1977) - *Analysis of variations in ocean colour*. Limnology Oceanography, 22: 709-722.
- Peñuelas J., Gamon J.A., Griffiin K.L. e Field C.B.** (1993) - *Assessing Community Type, Plant Biomass, Pigment Composition, and Photosynthetic Efficiency of Aquatic Vegetation from Spectral Reflectance*. Remote Sensing of Environment, 46: 110-118.
- Quibell G.** (1992) - *Estimating chlorophyll concentration using upwelling radiance from different freshwater algal genera*. International Journal of Remote Sensing, 13: 2611-2621.
- Rijkeboer M., Dekker A.G. e Gons H.J.** (1998) - *Subsurface irradiance reflectance spectra of inland waters differing in morphometry and hydrology*. Aquatic ecology, 31: 313-323.
- Stumpf R.P. e Tyler M.A.** (1988) - *Satellite Detection of Bloom and Pigment distribution in Estuaries*. Remote Sensing of Environment, 24: 385-403.
- TEI Ingegneria dell'Ambiente SpA** (1989) - *Intervento globale di risanamento delle lagune di Orbetello dal fenomeno dell'eutrofizzazione del corpo idrico*. Rapporto Finale.
- Vermote E., Tanre D., Deuze J.L., Herman M. e Morcrette J.J.** (1997) - *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview*. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 35: 675-686.
- Yuhas R.H., Goetz A.F.H. e Boardman J.W.** (1992) - *Discrimination among semiarid landscape endmembers using the Spectral Angle Mapper (SAM) algorithm*. Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, 1 June, Pasadena, CA, Jet Propulsion Laboratory, 147-149.
- Zibordi G., Parmiggiani F. e Alberotanza L.** (1990) - *Application of aircraft multispectral scanner data to algae mapping over the Venice Lagoon*. Remote Sensing of Environment, 34: 49-54.

# Applicazione dei dati MIVIS al monitoraggio dei laghi: discussione su alcuni risultati sperimentali e prospettive

Monica Pepe<sup>(1)</sup>, Claudia Giardino<sup>(1)</sup> e Eugenio Zilioli<sup>(1)</sup>

Alcuni parametri bio-fisici di qualità delle acque, come la concentrazione di clorofilla-a, il carico di solidi sospesi e la temperatura superficiale sono stati mappati sul Lago di Iseo utilizzando immagini MIVIS acquisite il 16 settembre 1997. Lo studio è stato rivolto a verificare i legami che intercorrono fra le proprietà ottiche apparenti dell'acqua, derivate dalle immagini iperspettrali, tramite procedure di correzione atmosferica ed i parametri tradizionalmente utilizzati in limnologia, per poter ottenere informazioni spazialmente distribuite relative alla qualità delle acque. Sono stati investigati diversi modelli empirici di correlazione fra indici derivati dalle riflettanze spettrali MIVIS e misure in situ effettuate contemporaneamente al sorvolo, i risultati ottenuti sono stati valutati in un'ottica di potenzialità operative del sensore per il monitoraggio degli ecosistemi lacustri.

## Introduzione

La qualità dell'acqua nella maggior parte dei bacini e riserve d'acqua dolce del mondo è in continuo peggioramento a causa dell'apporto di materiali in sospensione originati dall'erosione dei suoli e ai fenomeni di eutrofizzazione di origine antropica. I laghi naturali e artificiali rappresentano la principale fonte di acqua dolce per diversi e molteplici utilizzi della risorsa: uso potabile, valore estetico, economico e scientifico. Il progresso e il perfezionamento dei metodi di monitoraggio e la gestione razionale dei laghi sono divenuti una priorità ai fini della prevenzione di inquinamento e della conseguente perdita di usi vantaggiosi, nonché per assicurare alle generazioni future di poter beneficiare di una risorsa non depauperata. Tradizionalmente alcuni parametri biofisici (temperatura, conducibilità, trasparenza), biochimici ed idrobiologici dell'acqua (pH, ossigeno disciolto, sostanza organica ed inorganica in sospensione e disciolta, contenuto algale) vengono ricavati tramite campionamento a diverse profondità e successive analisi condotte sia in situ che in laboratorio.

L'avvento di sensori aviotrasportati e satellitari ad alta risoluzione per l'osservazione terrestre ha reso possibile

*Some bio-physical parameters, such as chlorophyll-a concentration, Secchi disk depth and water surface temperature were mapped in the Subalpine Lake Iseo using MIVIS hyperspectral data acquired on 16<sup>th</sup> September 1997. The study is aimed to investigate relationships between water-Apparent Optical Properties (AOPs) at the lake surface, derived by simple atmospheric correction procedures applied to hyperspectral data, and traditional limnological parameters, in order to obtain spatially distributed information regarding water quality. Several empirical regression models were tested to correlate MIVIS-derived indexes and in situ measurements collected synchronously to the overflight. Results are evaluated as regards the operative potentials of the airborne sensor for monitoring the lake ecosystems.*

l'applicazione delle tecniche di telerilevamento anche allo studio della qualità della acque interne.

Lo sviluppo di modelli analitici od empirici per poter ricavare informazioni riguardanti alcuni parametri di qualità (riflettività) che inerenti (attenuazione, assorbimento, diffusione) è alla base di tali applicazioni [Alföldi, 1982; Dekker, 1993; Goodin et al., 1993; Han et al., 1994; Bukata, 1995; Rundquist et al., 1996; Han e Rundquist, 1997; Zilioli e Brivio, 1997; Fraser, 1998; Lindell et al., 1999]. In natura, la radianza ascendente dall'acqua di un lago naturale o artificiale è l'integrazione del contributo di radianza dovuto a tutti i costituenti della colonna d'acqua, fra questi materia organica ed inorganica in sospensione e pigmenti. Nelle situazioni più prossime o più generalmente di acque basse anche il fondo può contribuire alla radianza dell'acqua. Dati tutti i contributi di diversa origine alla radianza dell'acqua a livello superficiale, il riconoscimento di quanta parte del segnale totale sia attribuibile a singoli parametri responsabili in maniera più o meno diretta dei fenomeni di eutrofizzazione è l'obiettivo finale di questo settore applicativo del telerilevamento.

Verranno qui presentati i risultati relativi ad una campagna sperimentale effettuata nel 1997 con sensore MIVIS aerotrasportato sui laghi subalpini italiani, in particolare sul lago di Iseo, all'interno del progetto comunitario SALMON (*Satellite Remote Sensing for Lake Monitoring*).

<sup>(1)</sup> CNR-IRRS Telerilevamento, Via Bassini, 15 - 20133 Milano

Ricevuto il 30/07/00 - Accettato il 26/09/00

## Area di studio

Il lago di Iseo (o Sebino) è ubicato nella fascia subalpina, tra le provincie di Bergamo e Brescia e si estende su di una porzione di territorio compresa tra 9°57'-10°07' di longitudine Est e 45°39'-45°50' di latitudine Nord.

La completa circolazione delle acque non avviene ogni anno, ma solo durante inverni particolarmente rigidi e ventosi, per cui il lago d'Iseo può essere classificato come lago oligomittico, con stratificazione termica durante i mesi estivi. Il lago, per quanto riguarda la produttività algale, è mesotrofico con proliferazione di macrofite infestanti nelle acque più basse e valore medio della concentrazione totale di fosforo pari a 32 mg/m<sup>3</sup> [Premazzi, comunicazione personale]. In accordo con il protocollo proposto da Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), i parametri fisici (trasparenza delle acque), biologici (produzione di bio-massa algale o concentrazione di clorofilla-a) e chimici (contenuto totale di fosforo) delle sue acque sono illustrati nella Tabella 1.

## Materiali e metodi

### Breve descrizione del sensore MIVIS

MIVIS (*Multispectral infrared and Visible Imaging Spectrometer*) è uno spettrometro a immagini Deadalus AA5000 implementato nell'ambito del progetto LARA (*Laboratorio Aereo per Rilievi Ambientali*) del Consiglio Nazionale delle Ricerche, costituito da 4 spettrometri elementari che registrano simultaneamente 102 bande: 20 nel visibile e vicino infrarosso (IR-infrared), 8 nel vicino infrarosso, 64 nell'infrarosso medio (SWIR - Short Wave Infrared) e 10 nell'infrarosso termico (TIR-Thermal IR) con diverse risoluzioni spettrali, come riportato in Tabella 2.

Il campo totale di vista è pari a 71.059° con 1.64 mrad di passo di acquisizione (*sample rate*). I dati vengono acquisiti in modo analogico e immediatamente digitalizzati in formato 12-bit. Lo specchio rotante dispone di 5 velocità di scansione in modo da permettere l'acquisizione di linee di scansione contigue trasversali alla direzione di volo.

La risoluzione spaziale, dipendente dalla quota di volo, può variare nell'intervallo fra 1 e 24 metri.

Il 16 settembre 1997, il sensore iperspettrale MIVIS ha sorvolato il lago di Iseo con 2 strisciate ad una quota media di 16.500 piedi, corrispondente ad un pixel al suolo di 10 metri x 10 metri. Contemporaneamente, in corrispondenza di 8 stazioni pelagiche (Fig. 1), sono stati con-

dotti rilievi ottici e limnologici in situ da apposita imbarcazione, dove hanno operato ai rilievi due gruppi di competenze:

- ricercatori del Reparto di Telerilevamento del IRRS-CNR di Milano per i rilievi ottici relativi all'acqua ed all'atmosfera;
- personale tecnico del CCR di Ispra e del Dipartimento di Biologia dell'Università degli Studi di Milano per le misure limnologiche.

La totalità dei dati MIVIS acquisiti su tutte le 102 bande, includendo il Lago di Garda, è stata immagazzinata in 52 file per un totale di 3.5 Gbyte.

La scelta del periodo tardo-estivo è collegata alla caratterizzazione della fioritura algale, ed alla corrispondenza di passaggi del Landsat 5 TM. La localizzazione delle stazioni è stata registrata a mezzo di un GPS portatile (Garmin GPS II) operante sulla barca.

Le otto stazioni pelagiche di misura sono collocate lungo tutto il lago, di cui 4 nella parte meridionale del lago, caratterizzata da un'alta concentrazione di fitoplancton.

### Osservazioni limnologiche e ottiche

Il campionamento limnologico è stato condotto, in ciascuna stazione, a tre diverse profondità, partendo dalla superficie: 0m, 2.5m ed un campione integrato sul primo metro della colonna d'acqua. Oltre alla concentrazione di clorofilla-a, sono stati raccolti dati diretti relativi ad altri parametri limnologici quali: trasparenza, temperatura, conducibilità, pH, solidi sospesi, TOC, DOC, feofitina, sostanza gialla, analisi qualitativa e quantitativa del fitoplancton. La clorofilla-a, il carico sospeso, la trasparenza mediante il disco di Secchi e la temperatura sono stati scelti come parametri principali su cui svolgere l'analisi comparativa dei dati considerata la loro estrema importanza come indicatori di eutrofizzazione, in accordo con le ultime direttive europee riguardanti le acque (Directive proposal COM(98)76 final, Febbraio 1998).

Le misure ottiche sono state condotte simultaneamente al prelievo limnologico utilizzando uno spettroradiometro ASD FieldSpec FR 634 - operante fra 350nm e 2500nm, con 2nm di risoluzione - per le misure di radianza ascendente dall'acqua (*water leaving radiance*) condotte a 1 metro dalla superficie, montando un'ottica di 1°; nelle stesse condizioni geometriche è stata misurata la radianza di un pannello di riferimento Spectralon calibrato e, tramite il rapporto tra i valori misurati, sono state ottenute le

**Tabella 1** - Valori di riferimento proposti da OECD per la definizione delle categorie trofiche dei laghi [Vismara,1992].

Stato trofico	Disco di Secchi (m)		Clorofilla (mg/m <sup>3</sup> )		Fosforo (mg/l)
	valor medio	max	valor medio	max	valor medio
Mesotrofico	6-3	3-1.5	2.5-8	8-25	10-35
Eutrofico	3-1.5	1.5-0.7	8-25	25-75	35-100

**Tabella 2** - Caratteristiche principali del sensore MIVIS.

Spettrometro	Bande #	Limite inf. •m	Limite sup. •m	Ampiezza banda •m
1 VIS+NIR	1 - 20	0.43	0.83	0,02
2 NIR	21 - 28	1.15	1.55	0.05
3 SWIR	29 - 92	1.98	2.47	0.008
4 TIR	93-102	8.18	12.7	0.34-0.54

riflettanze spettrali dell'acqua. Al fine delle analisi comparative con le riflettanze spettrali ottenute dalle misure MIVIS nel primo spettrometro, tali valori sono stati integrati sugli intervalli spettrali corrispondenti alle prime 20 bande.

Inoltre è stato misurato lo spessore ottico dell'atmosfera durante la ripresa aerea con un fotometro operante in corrispondenza di quattro picchi di lunghezza d'onda dello spettro elettromagnetico (368nm, 500nm, 675nm, 778 nm).

### Elaborazione dei dati iperspettrali telerilevati

La pre-elaborazione dei dati ha riguardato:

- correzioni radiometriche (calibrazione: conversione da DN a radianze, correzione effetto radiometrico lungo scansione, valutazione dell'accuratezza di calibrazione);
- correzioni geometriche (compensazione delle distorsioni, georeferenziazione);
- correzioni atmosferiche (direzione di volo, scattering e assorbimento atmosferici, illuminazione).

### Correzioni radiometriche

I dati sono stati forniti già convertiti in radianza al sensore [ $W\ cm^{-2}\ sr^{-1}\ nm^{-1}$ ], e moltiplicati per un fattore  $10^9$  per poter essere archiviati a 16 bit. La procedura è stata condotta con il software MIDAS (*Multispectral Interactive Data Analysis System*) dal laboratorio del LARA-CNR, di Pomezia secondo la procedura riportata di seguito.

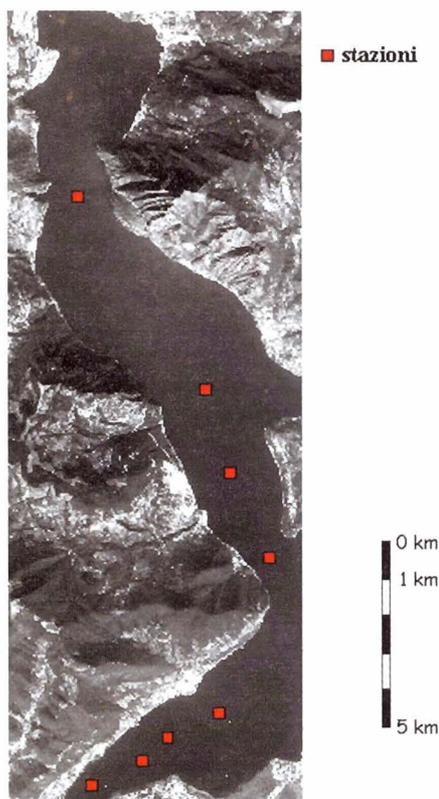
Il sistema di calibrazione si basa sui dati provenienti dalla calibrazione su banco ottico effettuata prima del volo e su quelli acquisiti in volo dal MIVIS-IRC (Internal Radiometric Calibration), tramite due corpi neri di riferimento interni.

I valori di radianza riflessa nelle prime 92 bande sono ottenibili dalla seguente relazione:

$$L(\lambda) = (DN(\lambda) - R_1(\lambda)) / (f \cdot g \cdot a) \quad [W\ cm^{-2}\ sr^{-1}\ nm^{-1}]$$

dove  $L(\lambda)$  è il valore di radianza spettrale corretta dalle sorgenti interne in [ $W\ cm^{-2}\ sr^{-1}\ nm^{-1}$ ],  $DN(\lambda)$  è il valore indice (Digital Number) registrato in ciascuna banda,  $R_1(\lambda)$  è la corrente di fondo registrata dalla lettura del corpo nero di riferimento interno,  $f$  è il fattore di scala fra valore indice e radianza,  $g$  è il guadagno selezionato prima del volo che può assumere i valori [1, 10, 100],  $a$  è il fattore di attenuazione (0.4 - 1.0). Il prodotto ( $f \cdot g \cdot a$ ) è costante per ciascuna banda e per ogni volo. Nel caso specifico il guadagno prescelto è 100, considerata la bassa riflettività dell'acqua.

L'IRC sulle bande dell'infrarosso termico (93-102) richiede che l'utente selezioni una temperatura minima ( $T_{min}$ ) e un valore di sensibilità ( $T_{per}\ D_{out}$ ), da utilizzare come valore nullo e fattore di scala, rispettivamente, nell'immagine risultante. La temperatura per ciascun pixel viene



**Figura 1** - Posizione delle otto stazioni pelagiche, per i campionamenti limnologici e radiometrici del 16 settembre 1997 sul Lago di Iseo, come ripreso dal sensore MIVIS nella banda 13.

(Concessione S.M.A., n.525 del 4/11/97)

ricavata tramite seguente relazione:

$$DN_{out} = C + (DN_i - REF_1) \times D$$

dove  $DN_{out}$  rappresenta il valore indice in uscita e  $DN_i$  il valore indice in ingresso per il pixel  $i$ ,  $REF_1$  il valore indice del primo corpo nero di riferimento e  $C$  e  $D$  sono dati dalle relazioni:

$$C = (T_1 - T_{min}) / T_{per} D_{out}$$

$$D = T_{per} D_{ref} / T_{per} D_{out}$$

dove

$$T_{per} D_{ref} = (T_2 - T_1) / (REF_2 - REF_1)$$

con  $T_2$  e  $T_1$  temperature in gradi Celsius, e  $REF_2 - REF_1$  i valori indice per ciascuna linea di scansione, osservati per i due corpi neri di riferimento interni.

Ai fini della mappatura di qualità (clorofilla-a, solidi sospesi, profondità del disco di Secchi, temperatura) sono stati creati dei nuovi file, mosaicando i file spazialmente per ottenere le intere strisciate, e considerando un sub-set spettrale relativo solo al primo spettrometro (visibile e vicino infrarosso, 20 bande da 430 a 830 nm) e al quarto spettrometro (infrarosso termico, 10 bande da 8180 a 12680 nm).

La scelta del solo primo spettrometro nella regione del riflesso è stata dettata dalle ben note caratteristiche di assorbimento dell'acqua in lunghezze d'onda più lunghe dell'infrarosso vicino.

Problematiche sono risultate le variazioni lungo la direzione di scansione (*across-track variations*); a tal fine sono stati condotti profili orizzontali in alcune porzioni di immagini totalmente occupate da acqua, e si è evidenziata una variazione *across-track* abbastanza apprezzabile nelle 20 bande dello spettrometro 1, con radianze via via crescenti spostandosi dal centro ai bordi immagine. Tale analisi è stata condotta sulle diverse strisciate con la stessa direzione di volo rispetto al sole. Benchè l'effetto fosse sempre presente in tutte le immagini, esso non aveva sempre le stesse caratteristiche, nè si presentava simmetrico rispetto al centro immagine (radianza ricevuta dal sensore al nadir), non risultando sistematico. A causa di questo comportamento variabile non è stato possibile trovare una funzione o un algoritmo, tipo ad esempio un *polynomial least square adaptive method* [Östlund, 1997], che descrivesse la variazione di radianza nella direzione di scansione.

### Correzioni geometriche

Le immagini sono state acquisite non corrette (rettificate) dagli effetti di distorsione dipendenti dalle variazioni di assetto dell'aereo durante la ripresa; si è tentata una georeferenziazione con numerosi punti di controllo, ma per ottenere un errore quadratico medio accettabile, l'unica

soluzione era utilizzare polinomi di grado superiore al secondo su piccole porzioni di immagine, il che rendeva poi impossibile la mosaicatura delle aree dei laghi per le distorsioni ai bordi. Le stazioni sui due laghi collocate correttamente sulla carta erano comunque riconoscibili sulle immagini in modo sufficientemente accurato. Si è ritenuto quindi opportuno non georeferire le immagini e mappare i parametri di qualità senza ulteriori correzioni geometriche.

### Correzioni Atmosferiche

La riflettanza alla superficie dell'acqua a partire dai dati telerilevati nel primo spettrometro (430-830 nm) è stata calcolata con la seguente formula:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi(L_{\lambda} - L_{\lambda, path})}{kE_{0\lambda} T_{\lambda \downarrow} \cos \theta_0} \quad (1)$$

dove  $L_{\lambda}$  è la radianza spettrale al sensore ricavata dalla calibrazione radiometrica del segnale, nel nostro caso direttamente dall'immagine come fornita,  $L_{\lambda, path}$  è la radianza spettrale dell'atmosfera dovuta alla diffusione della radiazione solare causata dai costituenti l'atmosfera (principalmente aerosol),  $T_{\lambda \downarrow}$  è la trasmittanza atmosferica lungo il cammino ottico tra il Sole e la superficie rilevata,  $E_{0\lambda}$  è la irradianza spettrale solare extra-atmosferica,  $\theta_0$  è lo zenit del Sole e  $k$  è un fattore che tiene conto della variazione della distanza Terra-Sole dovuta all'eccentricità dell'orbita terrestre.

La radianza spettrale al sensore,  $L_{\lambda}$ , include sia la radianza ascendente dalla superficie dell'acqua, quella che serve a descrivere le caratteristiche del bacino indagate, sia il contributo atmosferico, ovvero  $L_{\lambda, path}$ . L'energia retrodiffusa dall'atmosfera verso il sensore può essere di notevole entità e deve essere sottratta dalla radianza spettrale al sensore per ottenere il segnale proveniente effettivamente dall'acqua.

La trasmittanza atmosferica,  $T_{\lambda \downarrow}$ , fornisce informazioni sull'attenuazione che la radiazione elettromagnetica solare subisce nel suo passaggio attraverso l'atmosfera per fenomeni di assorbimento provocati dai costituenti atmosferici (gas e aerosol).

Dato che i valori di riflettanza solare extra-atmosferica alle diverse lunghezze d'onda si trovano tabulati [Brockmann e Schiller, 1994], le incognite della [1], rispettivamente la radianza  $L_{path}(\lambda)$  e la trasmittanza  $T_{\lambda}$  dell'atmosfera, sono state derivate con due metodi di seguito descritti. Le risultanti riflettanze spettrali medie alla superficie sono state confrontate in termini di valori ed andamenti con quelle acquisite in situ con spettroadiometro.

Il primo metodo di correzione usato è il codice 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) che permette di stimare la radiazione retrodif-

fusa dall'atmosfera verso il sensore per mezzo di un modello di trasporto radiativo [Vermote et al., 1997]. La trasmittanza atmosferica è stata ottenuta dal programma inserendo come misura della concentrazione di aerosol, lo spessore ottico dell'atmosfera misurato con il fotometro in situ, ed estrapolato a 550 nm.

Il secondo metodo di correzione considerato, il metodo dark pixel improved [Chavez, 1996], non si basa su un modello di trasporto radiativo, ma sulle informazioni contenute nell'immagine, ovvero è di tipo "image-based."

In tale metodo valori di riflettanza atmosfericamente corretti vengono calcolati secondo la [1], dove la radianza atmosferica viene stimata attraverso i valori di radianza spettrale al sensore corrispondenti all'oggetto più scuro (*dark-object*) identificabile nell'immagine, nell'ipotesi che la radianza al sensore proveniente da una superficie a bassa riflettanza sia unicamente dovuta a fenomeni di retrodiffusione atmosferica, e quindi che il segnale rilevato in corrispondenza di tali superfici offra la quantificazione desiderata del contributo atmosferico. Gli oggetti comunemente usati come *dark pixel* sono i laghi oligotrofici, le foreste di conifere e le ombre dei rilievi montuosi [Chavez, 1988; Chavez, 1989]. Essendo il lago l'oggetto di studio i valori dei *dark pixel* utilizzati provengono dall'ombra di un rilievo montuoso prossimo al lago stesso. I corrispondenti valori di radianza nelle prime 13 bande del primo spettrometro MIVIS, sono stati sottratti dalle radianze spettrali al sensore su tutta l'immagine. Ci si è limitati alla porzione di spettro corrispondente al visibile (13 bande), in quanto l'ombra assumeva un riflettività non trascurabile nel vicino infrarosso, dovuta alla presenza di vegetazione boschiva.

Questa tecnica, che si basa sulle ipotesi sopra descritte, valuta sempre la radianza dell'atmosfera per mezzo del dark pixel, ma fornisce anche una stima della trasmittanza atmosferica assumendola pari all'angolo di incidenza del sole,  $\theta_z$  [Chavez, 1996]. Avendo a disposizione nel nostro caso misure di spessore ottico in situ, le riflettanze spettrali superficiali sono state calcolate sia valutando la trasmittanza atmosferica con il metodo del coseno dello

zenit solare, sia calcolandola a partire dalle misure di spessore ottico condotte durante il sorvolo, ed estrapolata a tutto l'intervallo considerato.

La Tabella 3 riporta i risultati di correzione sotto forma di differenza fra le riflettanze medie misurate sull'acqua nelle prime 13 bande MIVIS e le riflettanze medie ottenute dai due metodi, metodo *dark-pixel improved*, nelle due varianti riguardanti la trasmittanza atmosferica e applicazione del codice 6S.

La fig. 2 riporta i risultati di correzione sotto forma di firme spettrali medie sulle otto stazioni di misura, come misurate a terra (Field Spec) e come attenute dalle correzioni con dark-pixel - con coseno dello zenit (DP cos), con trasmittanza da rilievo (DP T) - e con il codice di trasferimento radiativo (6S).

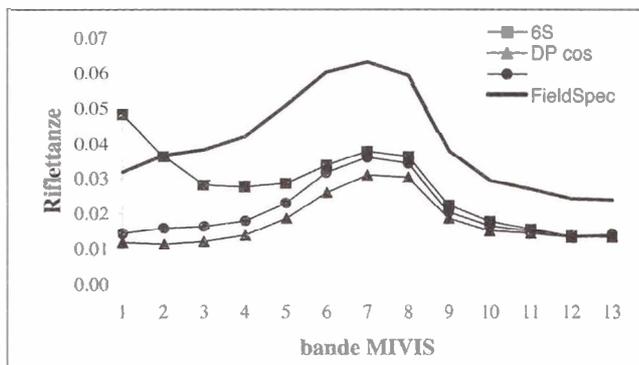
Dall'analisi dei risultati in termini quantitativi di valori (Tab. 3) e qualitativi di andamenti (figura 2), i risultati del metodo dark-pixel con trasmittanza misurata presentano scarti minori rispetto alle riflettanza media a terra, ed un andamento medio della firma spettrale più prossimo a quello rilevato. In tutti e tre i casi si evidenzia una sottostima della riflettanza così come ottenuta dalle immagini telerilevate corrette, e nel caso del codice 6S un andamento anomalo nelle prime 5 bande.

Dopo aver condotto un'analisi di sensibilità del modello 6S relativamente ai parametri inseriti in ingresso, ed aver verificato che la loro influenza non è sufficiente a giustificare gli scarti registrati fra riflettanze misurate al suolo e riflettanze corrette, si è giunti alla conclusione che i dati a disposizione non sono sufficientemente affidabili da permettere l'uso di un codice di trasferimento radiativo, quale il 6S, e che il metodo image-based con trasmittanza misurata, benché non fornisca la soluzione esatta, risulta il più adeguato.

Per quanto concerne le correzioni delle 10 bande del quarto spettrometro (infrarosso termico), dominate da fenomeni di emissione, considerando l'influenza di questi ultimi fra la superficie del lago e la quota di volo, nonché il formato dei dati, non si sono operate ulteriori correzioni oltre a quella radiometrica, utilizzando per le analisi suc-

**Tabella 3** - Risultati di correzione atmosferica sulle strisciate e differenze fra le riflettanze spettrali medie misurate con spettrometro ( $R_{\text{riferimento}}$ ) nelle prime 13 bande MIVIS, e le riflettanze spettrali ottenute con il metodo dark-pixel improved, con trasmittanza ottenuta dal coseno dello zenit solare ( $R_{\text{cos(zenit)}}$ ) o da spessore ottico misurato ( $R_{\text{Tmis}}$ ), e tramite applicazione del codice di correzione 6S ( $R_{\text{6S}}$ ).

b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9	b10	b11	b12	b13
<i>(R_riferimento) -- (R_cos(zenit))</i>												
0.0143	0.0158	0.0163	0.0179	0.0230	0.0318	0.0360	0.0344	0.0205	0.0165	0.0150	0.0137	0.0140
<i>(R_riferimento) -- (R_Tmis)</i>												
0.0119	0.0114	0.0121	0.0139	0.0187	0.0261	0.0311	0.0304	0.0187	0.0150	0.0144	0.0133	0.0136
<i>(R_riferimento) -- (R_6S)</i>												
0.0483	0.0362	0.0283	0.0277	0.0288	0.0338	0.0377	0.0362	0.0225	0.0178	0.0155	0.0136	0.0134



**Figura 2** - Firme spettrali medie sulle 8 stazioni: come rilevate a terra (Field Spec), come prodotte da correzione atmosferica dei dati MIVIS con il codice 6S (6S), e con il metodo del Dark Pixel con trasmittanza misurata (DP T) e calcolata a partire dal coseno dello zenit solare (DP cos).

cessive il dato espresso in gradi Celsius.

### Analisi di correlazione

Analogamente a molti studi di questo tipo [Lathrop e Lillesand 1986; Mayo et al. 1995; Baban 1993; Giardino et al., in stampa] per determinare le relazioni esistenti fra l'energia elettromagnetica riflessa dalla superficie del lago e i parametri di qualità, e fra l'energia emessa e la temperatura superficiale dell'acqua, sono state utilizzate analisi statistiche di regressione. A partire da tali relazioni empiriche i parametri di qualità delle acque misurati nelle stazioni pelagiche sono stati spazialmente distribuiti sull'intero bacino lacustre dell'Iseo, ottenendo diverse mappature.

I parametri considerati nello studio sono clorofilla-a, sedimenti solidi sospesi, profondità del disco di Secchi e temperatura, i primi tre utilizzando il visibile e vicino infrarosso, l'ultimo utilizzando le bande dell'infrarosso termico (spettrometro 4) del MIVIS. Per i primi tre parametri sono state prese in considerazione le misure effettuate alle tre profondità di campionamento limnologico (0 m, 2.5 m e campione integrato 0-1 m) per verificare l'eventualità di una profondità privilegiata.

Le analisi di correlazione per tutti i parametri sono state condotte sulle bande dello spettrometro 1 e 4 del MIVIS, considerando le firme spettrali estratte da regioni di 5x5 pixel centrate sulla stazione di misura. Sono stati sperimentati diversi modelli di correlazione, includendo relazioni lineari, esponenziali e logaritmiche, basati su:

- singole bande;
- coppie di bande (multiple);
- coordinate cromatiche (esclusa la temperatura);
- derivata prima della riflettanza a 676 nm (per la sola clorofilla-a).

Le correlazioni empiriche con bande o con coppie di

bande sono state esaminate a partire dalla conoscenza del comportamento spettrale medio delle componenti dell'acqua e dalla letteratura disponibile, orientata principalmente al telerilevamento da satellite.

Il metodo delle coordinate cromatiche, concepito inizialmente per sensori satellitari (Landsat MSS e TM) e largamente ed efficacemente utilizzato soprattutto per applicazioni oceanografiche, è stato adattato all'analisi dei dati MIVIS tramite l'integrazione delle riflettanze spettrali su intervalli di banda più ampi, in accordo con la letteratura [Alföldi, 1982; Bukata et al., 1983].

Il metodo della derivata prima della riflettanza spettrale [Rundquist et al., 1996; Han e Rundquist, 1997; Fraser, 1998], si basa sulla maggior sensibilità di questa firma alle variazioni dei parametri idrobiologici rispetto a quella di riflettanza, la lunghezza d'onda cui ci si è riferiti corrisponde ad un minimo locale di riflettanza dovuto all'assorbimento del pigmento e dell'acqua, ed è stato evidenziato come miglior parametro di correlazione per la clorofilla-a, indipendentemente dalle concentrazioni, in base alle analisi di proprietà ottiche apparenti del Lago di Iseo svolte durante 8 campagne in situ nell'arco del biennio 1997-98 [Pepe et al., in stampa].

### Risultati

I risultati di correlazione per i parametri relativi alle concentrazioni di pigmenti, carico sospeso e trasparenza dell'acqua sono riportati in tabella 4 a mezzo dei valori del coefficiente di determinazione ( $r^2$ ). Per ciascun parametro è riportato solo il modello che ha prodotto i migliori risultati, insieme alla profondità di campionamento relativa, e all'intervallo di valori assunti da ciascun parametro limnologico nelle stazioni di riferimento. Gli algoritmi empirici così individuati sono stati quindi utilizzati per la mappatura dei relativi parametri per l'intero bacino lacustre.

Le concentrazioni di clorofilla-a si presentano in correlazione multipla logaritmica nella regione del verde con le bande 5 e 6, (lunghezza d'onda di picco, 520 nm e 540 nm, rispettivamente), e con un coefficiente di determinazione pari a 0.74 per la profondità di campionamento 2.5 metri.

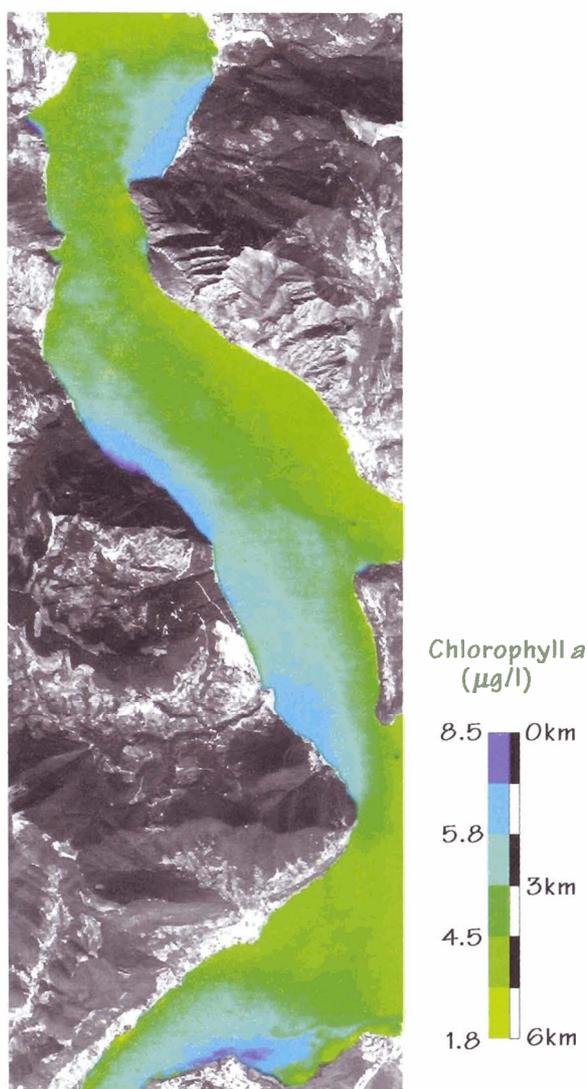
La relazione è stata applicata all'intera superficie del lago, producendo la mappa riportata in figura 3. Le concentrazioni più elevate si presentano nella parte meridionale del lago con concentrazioni superiori agli 8  $\mu\text{g/l}$ , e sulla sponda occidentale.

Il sedimento solido sospeso si presenta in correlazione multipla con le bande 7 e 12 (lunghezza d'onda di picco 560 nm e 660 nm), confermando il comportamento ottico di questo parametro, legato sia alla regione spettrale del verde che a quella del rosso, con coefficiente di determinazione di 0.78 per il campione integrato sul primo metro della colonna d'acqua.

La trasparenza è legata da correlazione lineare con la coordinata cromatica Z-blu con un coefficiente di deter-

**Tabella 4** - Risultati delle analisi di correlazione per alcuni parametri di qualità delle acque (gli intervalli delle misure sono riportati fra parentesi), nei termini dei modelli più validi e dei relativi coefficienti di determinazione.

Parametro	Prof.	Modello	r <sup>2</sup>
Clorofilla-a (1.36 - 7.33 µg/l)	2.5 m	log (bande 5, 6)	0.74
Sedimento Solido Sospeso (0.7 - 4 mg/l)	int 0-1 m	lin (bande 7, 12)	0.7758
Profondità Disco di Secchi (3.7 - 4.2 m)	/	lin (Z-blu)	0.7194



**Figura 3** - Mappatura di clorofilla-a del Lago di Iseo ottenuta dalle immagini MIVIS del 16 settembre 1997. (Concessione S.M.A., n.525 del 4/11/97)

minazione pari a 0.72.

Queste due relazioni hanno portato alla produzione delle 2 mappe riportate in Figura 4.

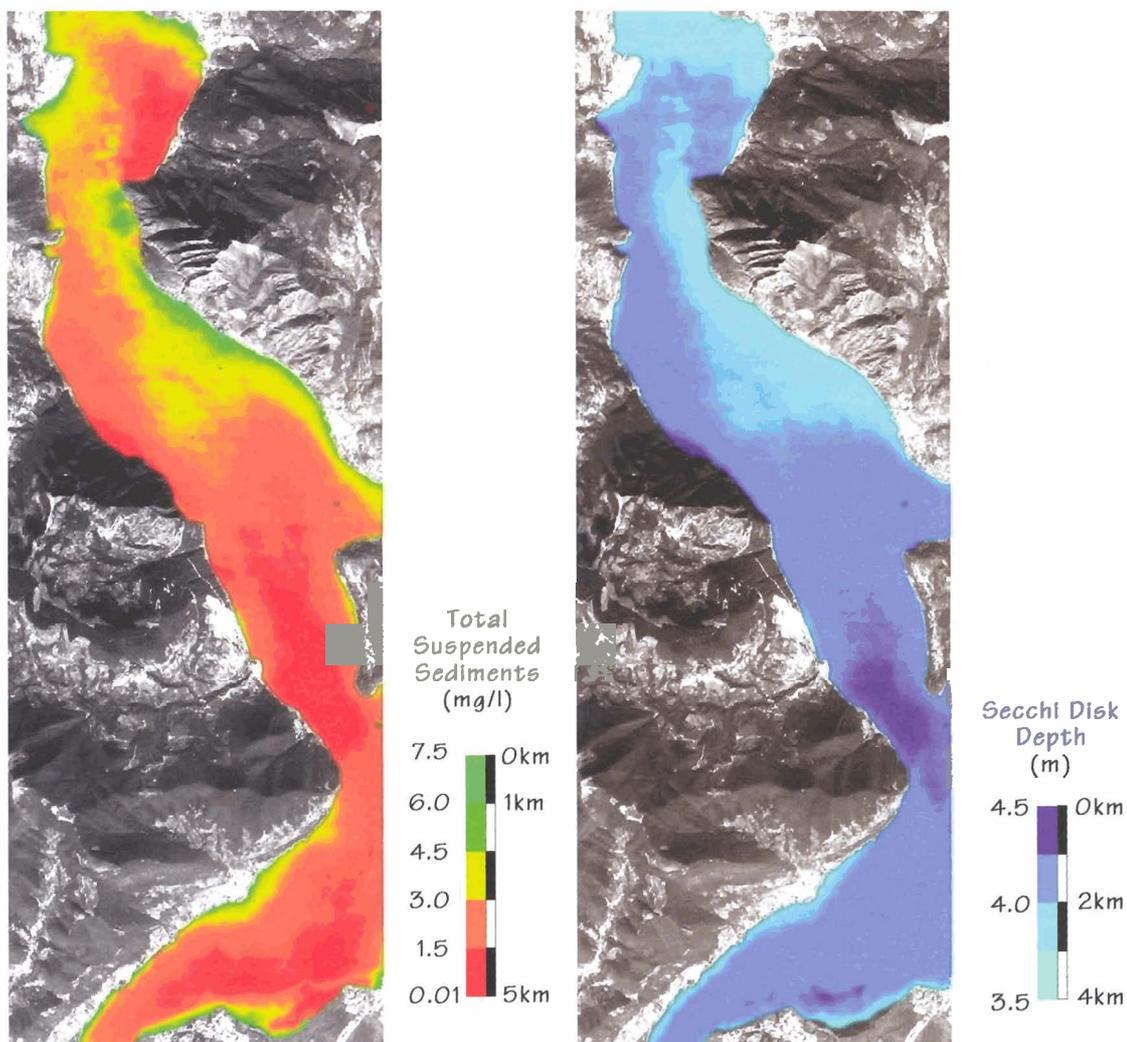
L'osservazione delle due distribuzioni sottolinea l'influenza dell'affluente, il Fiume Oglio, sulla torbidità dell'acqua del lago nella sua parte settentrionale, mentre le acque più limpide si osservano nella parte centrale del bacino lacustre, comunque limitata dalla situazione di fioritura algale e con un picco di trasparenza intorno ai 4.5 metri.

Relativamente alla temperatura i migliori risultati di correlazione sono stati ottenuti da una regressione lineare multipla con la banda 97 (9830 -10180 nm) ed il suo quadrato, indice introdotto in studi svolti con sensori satellitari [Bartolucci e Lozano-Garcia, 1985] e adattato allo spettrometro 4 del MIVIS. Nonostante le temperature registrate si presentassero in un intervallo estremamente ristretto, 20.4 - 22.2°C, il coefficiente di determinazione ottenuto è molto elevato, pari a 0.912, indicando un'ottima sensibilità del modello nella descrizione delle temperature a partire dai dati telerilevati. La Figura 5 mostra le temperature superficiali spazialmente distribuite sul bacino a partire dalla relazione individuata. Le acque più calde si ritrovano in corrispondenza del bacino meridionale, dove la profondità del lago è inferiore.

### Conclusioni e Prospettive

Analisi statistiche di regressione sono state condotte con modelli empirici per mappare alcuni parametri bio-fisici di qualità delle acque - la concentrazione di clorofilla-a, il carico di solidi sospesi, la trasparenza e la temperatura superficiale - a partire da dati telerilevati MIVIS e contemporanee misure limnologiche in 8 stazioni pelagiche sul Lago di Iseo.

I risultati confermano che lo stato trofico del Lago di Iseo è meso-eutrofico, in accordo con i precedenti studi limnologici condotti con metodi tradizionali. Le potenzialità di monitoraggio offerte dall'integrazione fra campionamenti limnologici tradizionali e dati iperspettrali telerilevati, come proposte in questo studio, divengono applicative quando si abbiano a disposizione delle misure in situ ai fini della calibrazione degli approcci statistici utilizzati



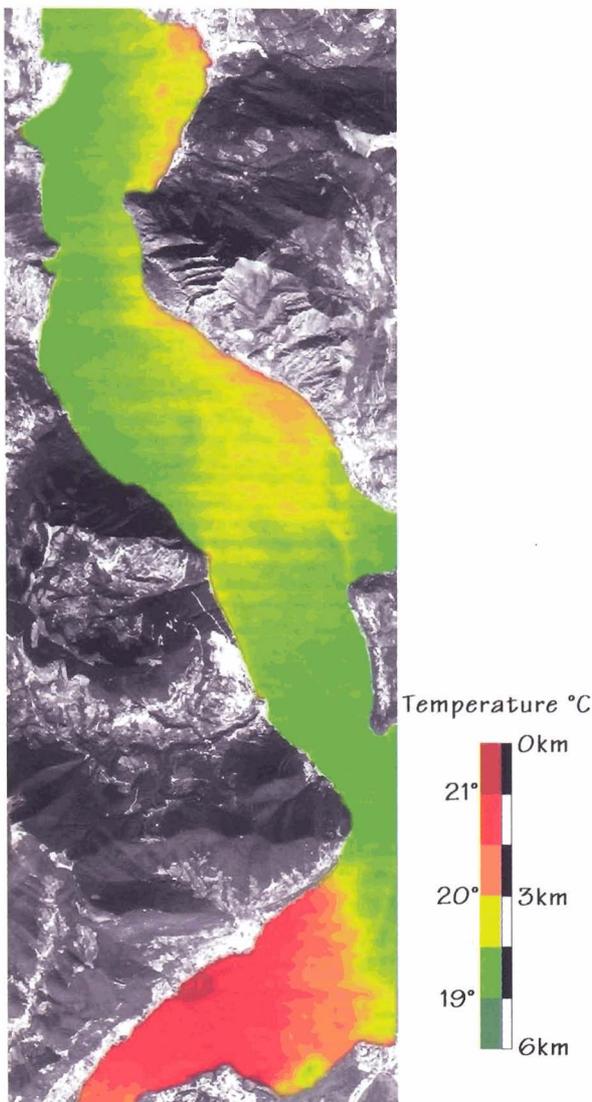
**Figura 4** - Mappatura di sedimento solido sospeso (Total Suspended Sediments, a sinistra) e profondità del disco di Secchi (Secchi Disk Depth, a destra) del Lago di Iseo ottenute dalle immagini MIVIS del 16 settembre 1997. (Concessione S.M.A., n.525 del 4/11/97)

per l'estrazione degli algoritmi predittivi da un lato, e dei metodi di correzione operati sui dati telerilevati dall'altro. I modelli empirici di correlazione hanno permesso di determinare la distribuzione spaziale superficiale dei parametri considerati, con un grado di accuratezza soddisfacente (coefficienti di determinazione fra 0.72 e 0.77) relativamente a clorofilla-a, carico solido e trasparenza, inoltre la descrizione delle temperature superficiali offre notevole affidabilità con coefficiente di determinazione pari a 0.91.

Da un punto di vista operativo le potenzialità del telerilevamento come strumento di monitoraggio completo debbono però essere distinte dall'applicabilità degli approcci empirici presentati in questo studio. Questi ultimi infatti

presentano delle limitazioni legate a diverse fonti di errore: la possibile mancanza di rappresentatività delle stazioni di misura relativamente alle aree-immagine associate; l'incertezza nella localizzazione esatta delle stazioni; le complesse interdipendenze fra le sostanze organiche disciolte, quelle inorganiche sospese e la clorofilla che non vengono modellate; gli effetti del fondo nelle parti meno profonde del bacino lacustre; la limitata significatività statistica di 8 punti per l'analisi di regressione.

Questi fattori riducono l'accuratezza raggiungibile per la mappatura dei parametri di qualità legati alle proprietà ottiche apparenti dell'acqua, ovvero clorofilla, solidi sospesi, trasparenza, e per questo sarebbe necessario lo sviluppo di modelli analitici. Finora pochi autori hanno



**Figura 5** - Mappatura di temperature superficiali del Lago di Iseo ottenuta dalle immagini MIVIS del 16 settembre 1997. (Concessione S.M.A., n.525 del 4/11/97)

affrontato la strada analitica, data la notevole complessità della modellistica degli ambienti di acqua dolce e per il semplice fatto che solo in tempi relativamente recenti si sono resi disponibili strumenti adeguati. Allo stesso tempo i semplici modelli empirici basati su analisi di regressione/correlazione sono molto più semplici da utilizzare e talvolta portano a risultati altrettanto soddisfacenti, anche se inferiori per affidabilità. Questa può essere comunque validata sperimentalmente, ma richiede la ripetizione dei rilievi simultanei in corrispondenza di situazioni ecologiche diversificate.

Per quanto riguarda la mappatura di temperatura superficiale l'algoritmo individuato presenta una buona applica-

bilità, pur richiedendo l'utilizzo di stazioni di riferimento a terra, cui in futuro si potrebbe ovviare approntando una calibrazione completa del dato rilevato nell'infrarosso termico.

Sempre in un'ottica operativa bisogna tenere presente che, pur offrendo grandi potenzialità, l'utilizzo dei dati iperspettrali telerilevati richiede un notevole sforzo in termini di pre-elaborazione. I risultati ottenuti in questo studio confermano l'affidabilità del metodo image-based per la correzione atmosferica, che permette di operare la correzione anche senza il supporto di dati ottici a terra. Allo stesso tempo, però l'uso di modelli di trasporto radiativo - tipo 6S - che si presenterebbe necessaria per l'applicazione di modelli analitici di mappatura è risultata critica, soprattutto nelle lunghezze d'onda corte, evidenziando la problematicità del bersaglio acqua dolce nella regione spettrale corrispondente al blu. Per ovviare a tali inconvenienti si devono operare ulteriori verifiche sulle scelte di calibrazione e configurazione del sensore, anche mediante sorvoli multi-stage.

### Ringraziamenti

Il presente lavoro di ricerca è stato co-finanziato dalla Commissione della Comunità Europea nell'ambito del progetto SALMON (*Satellite Remote Sensing for Lake Monitoring*), IV programma quadro RTD, contratto n° ENV4-CT960311. Si ringraziano Gabriele Borsani ed Enrico Rodari per i rilevamenti limnologici, Alessandro de Carli, Lucio Bolzan e Mauro Musanti per quelli fotometrici e radiometrici.

### Bibliografia

**Alföldi T.** (1982) - *Remote sensing for water quality monitoring, in Remote sensing for resource management.* Eds Soil Conservation Society of America, New York, USA, pp. 317-326.

**Baban S.M.J.** (1993) - *Detecting water quality parameters in the Norfolk Broads, U.K., using Landsat imagery.* Int. J. of Remote Sensing, 14: 1247-1267.

**Bartolucci L. A., e Lozano-Garcia D. F.** (1985) - *Calibration of Landsat 4 and 5 TM thermal-IR data for earth surface temperature mapping.* Proceedings of the 11th international symposium on machine processing of remotely-sensed data, Purdue University, West Lafayette, USA, 25-27 June 1985, pp.128-129.

**Brockmann. C e Schiller H.** (1994) - *Full resolution system corrected data.* Earth-net On Line, European Space Agency.

**Bukata R.P., Burton J.H. e Jerome, J.H.** (1983) - *Use of chromaticity in remote measurements of water quality.*

Remote Sens. Environ., 13: 161-177.

**Bukata R. P., Jerome J.H. e Kondratyev K.Y. e Pozdnyakov D.V.** (1995) - *Optical properties and remote sensing of inland coastal waters*. eds CRC Press, Inc., 2000 Corporate Blvd, Boca Raton, Florida, pp. 167-182.

**Chavez P.S.** (1988) - *An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data*. Remote Sens. Environ., 24: 459-479.

**Chavez P.S.** (1989) - *Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images*. Photogramm. Eng. Remote Sens., 55: 1285-1294.

**Chavez P.S.** (1996) - *Image-based atmospheric corrections-revisited and improved*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 62:1025-1036.

**Dekker A.G.** (1993) - *The use of the Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing*. Ph.D. Thesis, Free University, Amsterdam.

**Fraser R.S.** (1998) - *Multispectral remote sensing of turbidity among Nebraska Sand Hills lakes*, Int. J. of Remote Sensing, 19: 3011-3016.

**Giardino C., Pepe M., Brivio P.A., Ghezzi P. e Zilioli E.** (in press) - *Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a Subalpine lake using Landsat imagery*, the Science of Total Environment Journ.

**Goodin D.G., Han L., Fraser R.N., Rundquist D.C., Stebbins W.A. e Schalles J.F.** (1993) - *Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 59:505-510.

**Han L. e Rundquist D.C.** (1997) - *Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: a case study in a turbid reservoir*, Remote Sensing of Environment, 62:253-261.

**Han L., Rundquist D.C., Liu L.L., Fraser R.N. e Schalles J.F.** (1994) - *The spectral response of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sedi-*

*ment*, International Journal of Remote Sensing, 15: 3707-3718.

**Lathrop R.G. e Lillesand T.M.**, (1986) - *Use of Thematic Mapper data to assess water quality in Green Bay and Central Lake Michigan*. Photo Eng e Remote Sensing, 52: 671-680.

**Lindell T., Pierson D., Premazzi G. e Zilioli E.** (1999) - *Manual of lake monitoring in Europe by means of the remote sensing techniques*. EUR Report n. 16665 EN, European Commission, Strasbourg, Ed. Arte Stampa, Varese, pp. 161.

**Mayo M., Gitelson A., Yacobi Y.Z. e Ben-Avraham Z.** (1995) - *Chlorophyll distribution in lake Kinneret determined from Landsat Thematic Mapper data*. Int J of Remote Sensing; 16: 175-182.

**Östlund C.** (1997) - *Analysis of Imaging Spectrometer Data from Norwegian Lakes*, in Centre for Image Analysis, Report no. 22.

**Pepe M., Giardino C., Borsani G., Cardoso A.C., Premazzi G., Rodari E. e Zilioli E.** - (in press) *Relationship between apparent optical properties and photosynthetic pigments in the sub-alpine Lake Iseo*, the Science of Total Environment Journ.

**Rundquist D.C., Han L., Schalles J.F., e Peake J.S.** (1996) - *Remote measurement of algae chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690 nm*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 62:195-200.

**Vermote E., Tanrè D., Deuzé J.L., Herman M. e Morcrette J.J.** (1997) - *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview*. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 35: 675-686.

**Vismara R.** (1995) - *Ecologia Applicata*, Ulrico Hoepli Editore S.p.A., Milano, Italy, pp 279-286.

**Zilioli E. e Brivio P.A.** (1997) - *The satellite derived optical information for the comparative assessment of lacustrine water quality*. the Science of the Total Environment J., 196: 229-245.

# Il MIVIS per lo studio dei fenomeni nello Stretto di Messina

Rosa Maria Cavalli<sup>(1-2)</sup>, Vito La Norte<sup>(3)</sup>, Stefano Pignatti<sup>(2-3)</sup>, Carla Santella<sup>(2)</sup> e Filippo Azzaro<sup>(1)</sup>

In questo lavoro vengono presentati i risultati preliminari di una linea di ricerca mirata alla applicazione delle tecniche di telerilevamento iperspettrale, realizzate con lo scanner passivo aviotrasportato MIVIS (Multispectral Infrared Visible Imaging Spectrometer), all'ambiente marino; l'area presa in esame è lo Stretto di Messina.

Lo Stretto separa due bacini le cui acque hanno caratteristiche chimico-fisiche diverse ed entrambe con percentuali di Parametri Otticamente Attivi che permettono di classificarle come acque di caso 1. Caratteristica peculiare del sito è la turbolenza delle acque superficiali.

La determinazione degli algoritmi per la stima dei parametri marini di interesse è stata preceduta dalla messa a punto di una procedura di calibrazione dei dati. Le carte tematiche derivate dalla elaborazione dei dati sono descritte in riferimento alla particolare caratteristiche dello Stretto.

## Introduzione

Lo studio e il monitoraggio integrato dei processi fisici e biologici che governano le acque marine rappresentano un importante campo di attività rivolto, non solo al sostegno della ricerca scientifica, ma anche alla salvaguardia del patrimonio ambientale marittimo ed al controllo della qualità delle acque. Negli ultimi decenni il tradizionale metodo di raccolta dei dati tramite campagne di misura in loco è stato affiancato da attività di telerilevamento effettuate prevalentemente con sensori satellitari (CZCS, AVHRR, SeaWiFS).

L'obiettivo di questo lavoro è di verificare le potenzialità dei dati iperspettrali aviotrasportati MIVIS per lo studio dell'ambiente marino in acque di caso 1 (acque dove predominano le caratteristiche indotte dalle particelle clorofillacee) [Morel, 1997] e di valutare la possibilità del loro utilizzo come ausilio ad altre tecniche e dispositivi di rilevamento del mare [Lee et al., 1994].

Le specifiche del sensore MIVIS sono state definite principalmente per lo studio della superficie terrestre (72 bande nel Vicino e Medio Infrarosso), anche se l'elevato numero di bande nel Visibile (20) e nell'Infrarosso

<sup>(1)</sup> CNR IST, Spianata S. Raineri, 98122 Messina

<sup>(2)</sup> CNR IIA-LARA Via Mt. d'Oro 11, 00040 Pomezia - Roma

<sup>(3)</sup> CNR IMAA, S. Loya, 85050 Tito Scalo - Potenza

Ricevuto il 28/07/00 - Accettato il 27/11/00

*This paper presents the preliminary results of an experimental research on oceanography by means of MIVIS airborne passive sensor. The Straits of Messina divides two basins whose waters have different chemical-physical characteristics and percentages of Optically Active Parameters which allow to classify them as case 1 waters. A peculiar feature of the Straits is the turbulence of the superficial waters.*

*Before determining the algorithms for assessing the relevant sea parameters, starting from data collected during a campaign over the Straits of Messina, the problem of the data calibration has been faced.*

*The thematic maps derived from MIVIS have been described with respect to the Straits of Messina characteristics.*

Termico (10) lo rendono adeguato anche per studi di carattere oceanografico s.l.

Dall'elaborazione dei dati nelle lunghezze d'onda del Visibile, infatti, analizzando il "colore del mare", è possibile riconoscere e determinare la presenza di fitoplacton, sedimento, sostanza organica in soluzione e coefficiente di attenuazione diffusa (il "colore del mare" è funzione dai materiali in esso disciolti e/o sospesi).

L'elevata risoluzione spettrale del MIVIS e le caratteristiche geometriche dell'ottica del sensore, inoltre, lo rendono uno strumento adatto allo studio, a scala locale, delle relazioni tra i diversi Parametri Otticamente Attivi (OAP). Il sito scelto, per la stima e lo studio delle concentrazioni degli OAP in acque di caso 1, è lo Stretto di Messina costantemente monitorato dal CNR-Istituto Sperimentale Talassografico di Messina, attraverso un natante opportunamente attrezzato che registra in continuo temperatura, salinità e fluorescenza delle acque superficiali.

La prima campagna congiunta MIVIS (CNR-LARA) e natante (CNR-IST) (Fig. 1) è stata condotta il 25 settembre 1999 alle ore 14.00. Il monitoraggio ha interessato tutta l'area dello Stretto che è stata ripresa con tre strisciate, con direzione SSE-NNW, alla quota di 4000 m. La data del 25 settembre è stata scelta perché in corrispondenza della fase lunare di sизigia, quando le correnti di marea raggiungono le massime intensità.

## Descrizione dell'area di studio

Lo studio prende in esame l'intera area dello Stretto di

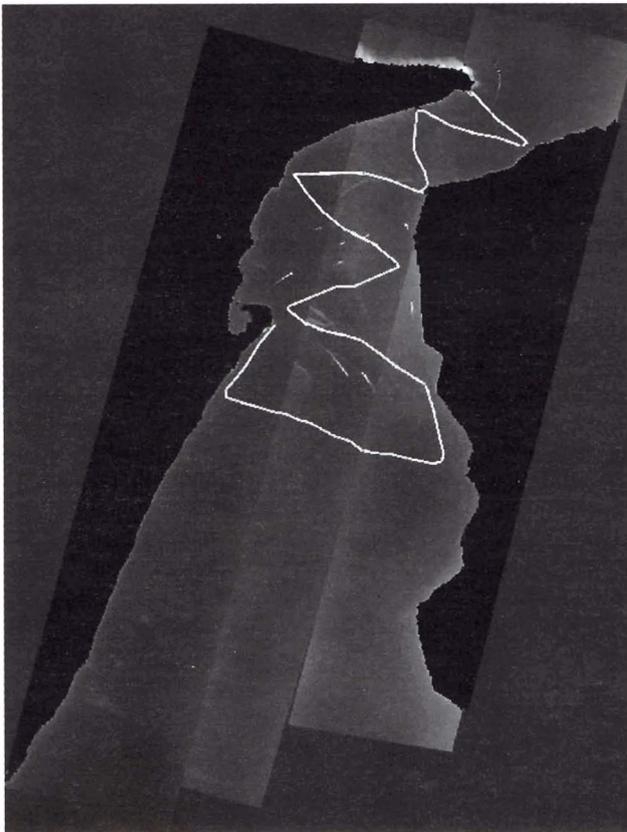


Figura 1 - Mosaico delle tre strisciate MIVIS con sovrapposto il percorso del natante. (SMA n.413 del 07/12/99).

Messina (Fig. 2), dove la confluenza di correnti provenienti dal Mar Tirreno e dallo Ionio e le diverse caratteristiche di salinità e temperatura dei due mari creano una particolare situazione oceanografica, sia dal punto di vista biologico che dinamico [Magazzù et al., 1995; De Domenico, 1987].

La turbolenza delle acque superficiali dello Stretto è influenzata principalmente da due tipi di circolazione marina, una corrente stazionaria ed una corrente ascensionale: entrambe le forzanti provocano variazioni sostanziali allo strato superficiale delle acque. La corrente stazionaria (fino ad un nodo) è determinata dalla circolazione generale del Mediterraneo, che nell'area in esame assume in superficie (fino a 30 metri) una direzione prevalentemente N-S (discendente). La forzante verticale porta in superficie acque ioniche profonde più fredde, più salate e ricche di nutrienti, rispetto alle acque tirreniche ed è generata dalla cooscillazione mareale (max 50cm) dei due bacini che hanno ampiezze delle maree quasi analoghe (circa sei ore e un quarto), ma in opposizione di fase. Questo comporta un'alternanza armonica delle acque tirreniche che fluiscono nel bacino ionico (discendente) e delle acque ioniche che, viceversa, fluiscono nel bacino tirrenico (montante); al termine di ciascuna fase segue un breve intervallo di stanca.

Le campagne di misura oceanografiche vengono eseguite in corrispondenza delle fasi stazionarie (a corrente tidale pressoché nulla), in modo da individuare il fenomeno *upwelling* (affioramento di acque profonde), in assenza di movimenti orizzontali degli strati d'acqua. Le massime differenziazioni chimico-fisiche, infatti, si manifestano

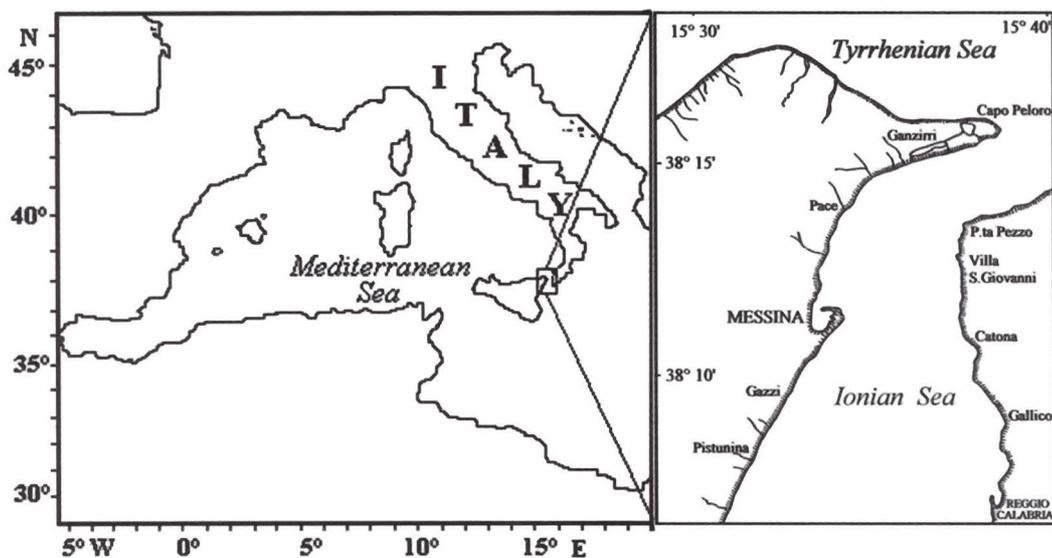


Figura 2 - Localizzazione geografica dell'area di studio.

quando fluiscono acque che hanno subito rimescolamenti meno intensi e meglio conservano i caratteri delle zone di provenienza.

L'*upwelling* riveste una notevole importanza nei processi produttivi dell'area perché conduce in superficie acque più fredde, più salate, ma soprattutto ricche di nutrienti; acque capaci, pertanto, di sostenere un elevato carico biologico, dai primi anelli della catena trofica fino agli organismi predatori superiori.

### Calibrazione dei dati MIVIS

I dati MIVIS, dopo una prima fase di calibrazione radiometrica, sono stati corretti atmosfericamente e geometricamente. In particolare la correzione atmosferica, alle lunghezze d'onda del Visibile, ha richiesto una specifica attenzione in quanto non erano a disposizione, in letteratura, procedure di correzione applicabili ai dati MIVIS che, utilizzando l'equazione di transfert radiativo, derivassero con precisione, sul mare, la quantità di radiazione riflessa.

Il *geocoding* di precisione delle scene MIVIS è stato realizzato per il corretto posizionamento sull'immagine dei dati fisici e biologici prelevati a mare e per poter realizzare carte tematiche della distribuzione areale dei parametri marini derivati ad una scala cartografica compatibile con la risoluzione spaziale del pixel.

### Assorbimento e scattering in atmosfera dovuti ai costituenti atmosferici e agli aerosol

Per la correzione atmosferica dei dati MIVIS sullo Stretto si è fatto uso, inizialmente, di codici software di generica applicabilità (cioè non vincolati all'esistenza o meno di particolari canali, Modtran e 6S), ma il loro utilizzo non ha consentito il raggiungimento di risultati del tutto soddisfacenti. Dall'analisi dei prodotti ottenuti è risultato evidente che il dato MIVIS necessita di una quantificazione rigorosa della riflettanza superficiale in funzione delle caratteristiche strumentali del sensore.

Per alcuni sensori iperspettrali le procedure di correzione atmosferica sono ormai consolidate. Per esempio, per il sensore AVIRIS del NASA JPL è stato sviluppato un pacchetto di correzione atmosferica denominato ATREM (ATmospheric REMoval), che utilizza i canali a 0,94 micron e a 1,14 micron dove è evidente l'assorbimento da parte dell'acqua [Gao e Goetz, 1990]. Le proprietà di linearità della riflettanza nell'intorno dei suddetti canali permettono di correggere atmosfericamente la curva di riflettanza. In tal modo per ogni singolo pixel il software ATREM stima il contenuto colonnare di vapore d'acqua. L'applicazione di ATREM ai dati MIVIS è resa difficile dalla mancanza dei suddetti canali. Simulazioni condotte sui dati MIVIS e AVIRIS hanno dimostrato che il canale a 0,72 micron, non essendo sensibile al contenuto di acqua quanto i canali a 0,94 e a 1,14 micron, non solo sottostima il valore del vapore d'acqua sul pixel, ma non

riesce a derivare un pattern di vapore d'acqua coerente con la scena e con la morfologia del territorio ripreso. Soddisfacenti risultati, invece, sono riportati dall'applicazione di ATREM sui dati MIVIS ed AVIRIS utilizzando il canale 0,82 micron, in quanto, il pattern di distribuzione del vapore d'acqua, derivato dalla 0,82, è del tutto simile a quello ricavato utilizzando le bande a 0,94 a 1,14 micron. Per perfezionare la stima del valore di vapore d'acqua con dati MIVIS si stanno conducendo delle simulazioni per la realizzazione di una banda sintetica a 0,84 micron che potrebbe essere utilizzata come riferimento della zona di assorbimento a 0,82 micron.

La procedura di correzione ATREM con il canale a 0,82 micron, dopo la simulazione sui dati AVIRIS, è stata applicata, come ulteriore verifica, sui dati MIVIS ripresi a bassa quota. Infatti, durante la campagna del 25 settembre sulla costa siciliana è stato effettuato un volo a minor quota (1500 m) e contemporaneamente sono stati raccolti degli spettri su siti omogenei di grandi dimensioni: lastrico solare di un edificio (12x8 m), prato (4x6 m) e due siti lungo il litorale di cui sono stati misurati, successivamente, anche gli spettri in laboratorio. Il confronto tra gli spettri dell'immagine MIVIS, così corretta, e spettri presi a terra ha confermato la validità della procedura, che pertanto è stata applicata a tutte le strisciate a quota maggiore.

### Sun Glint

Durante la fase della correzione atmosferica per superfici particolarmente riflettenti come il mare è da tenere in considerazione il contributo del *Sun Glint*. Questo fenomeno è particolarmente evidente nelle riprese della campagna del 25 settembre. Per la sua determinazione è stato implementato il modello di Cox e Munk [Montagner e Billat, 2000] che definisce la superficie del mare come un insieme di piccole superfici a diversa inclinazione ed in cui la probabilità di distribuzione delle superfici riflettenti è funzione della velocità del vento e della sua direzione.

Il contributo del *Sun Glint* viene così definito:

$$\rho\gamma(\theta, \omega, \theta\Sigma, \Delta\phi) = \frac{\pi\rho(\omega)}{4\cos\theta_S \cos\theta_v \cos^4\beta} p(z^x, z^y)$$

Il significato di ogni termine dell'equazione è rappresentato nella figura 3 [Montagner e Billat, 2000]. Il contributo del *Sun Glint* è stato calcolato solo per la strisciata registrata per ultima (14:33), per le altre tale contributo è minimo.

Inserendo nel modello la direzione e la velocità del vento (dati forniti dall'Ente Nazionale di Assistenza al Volo CAAV di Reggio Calabria), il contributo del *Sun Glint* è stato isolato e corretto (Fig. 4). Rimane da definire una procedura corretta di calcolo della *path radiance*, che risulta sottostimata se calcolata con i codici 6S ed ATREM per FOV a  $\pm 35^\circ$ .

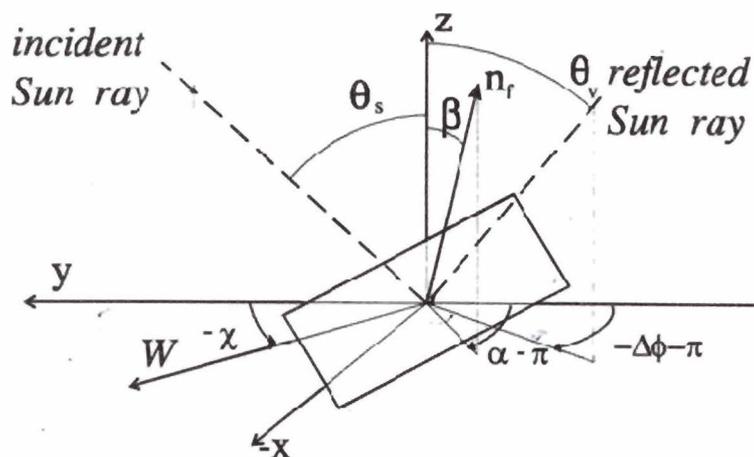


Figura 3 - Geometria utilizzata nel modello di Cox e Munk [Montagner e Billat, 2000].

### Algoritmi per la stima delle concentrazioni dei Parametri Otticamente Attivi

Nel mare, innescate dalla luce solare, si intrecciano relazioni complesse fra esseri viventi, materiale organico e materiale inorganico. Oltre all'acqua di mare pura (si definisce in questo modo l'acqua pura con i sali marini in soluzione), gli elementi che sotto la superficie interagiscono con la radiazione proveniente dal sole vengono generalmente raggruppati in tre classi principali:

- fitoplancton;
- particelle non clorofillacee (sedimenti);
- sostanza organica in soluzione (sostanza gialla).

Tali elementi vengono comunemente definiti "Parametri Otticamente Attivi" (OAP) e dipendentemente dalla loro composizione e concentrazione, contribuiscono alla determinazione del colore degli oceani. Essendo la radiazione elettromagnetica riflessa o trasmessa attraverso una certa massa d'acqua, la radiazione riflessa è dovuta all'interazione delle particelle presenti in acqua con la radiazione incidente [Zaneveld, 1995]. I dati telerilevati possono dunque, opportunamente elaborati, rappresentare un indice della variabilità delle concentrazioni degli OAP nel dominio spazio-temporale della ripresa [Platt. e Sathyendranath., 1988].

Il legame tra i dati rilevati dal sensore e le concentrazioni degli OAP è definito tramite algoritmi ampiamente utilizzati in letteratura della forma

$$\log(\text{OAP}) = a_0 + \sum a_k \cdot \log(\text{VAR}_k)$$

dove  $\text{VAR}_k$  è la media delle riflettanze nelle bande del visibile o un rapporto tra riflettanze medie su due bande diverse del sensore.

I coefficienti degli algoritmi di stima delle concentrazioni sono derivati attraverso regressioni realizzate tra dati di verità mare raccolti nello Stretto di Messina contestualmente al sorvolo e i valori di riflettanza ricavati dalle immagini MIVIS. Questo ha consentito di derivare algoritmi dipendenti dal luogo, dalle modalità e dai tempi di raccolta dei dati *in situ*.

In particolare per la stima della concentrazione (espressa in  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) di pigmenti (clorofilla *a* ed altri pigmenti contenuti nel fitoplancton) si è utilizzata la retta di regressione tra il logaritmo decimale del rapporto dei valori di riflettanza nelle bande 4 (0.490-0.512  $\mu\text{m}$ ) e 7 (0.551-0.573  $\mu\text{m}$ ) (rapporto "blu su verde") e le corrispondenti misure *in situ*. L'algoritmo ottenuto è il seguente:

$$\log C = -1,01944 + 0,394245 \log R_{\text{blu}}/R_{\text{verde}}$$

I valori di concentrazione così calcolati sono stati riportati su mappe digitali al fine di rappresentare l'andamento del parametro osservato nella zona geografica in esame (Fig. 5).

### Discussione dei risultati

I dati misurati dal natante, lungo il tracciato evidenziato in Figura 1, e i dati iperspettrali sono stati opportunamente elaborati ed integrati per produrre carte tematiche della temperatura superficiale del mare e della distribuzione spaziale della concentrazione della clorofilla (Fig. 5).

La carta della temperatura superficiale derivata dal MIVIS (Fig. 5 B) mostra chiaramente il fenomeno della risalita di acque più fredde (*upwelling*) al centro dello Stretto e caratterizzate da temperature inferiori ai 21°C, rispetto ai 25°C misurati a nord dello Stretto in prossimità della costa calabrese. La carta tematica evidenzia, inol-

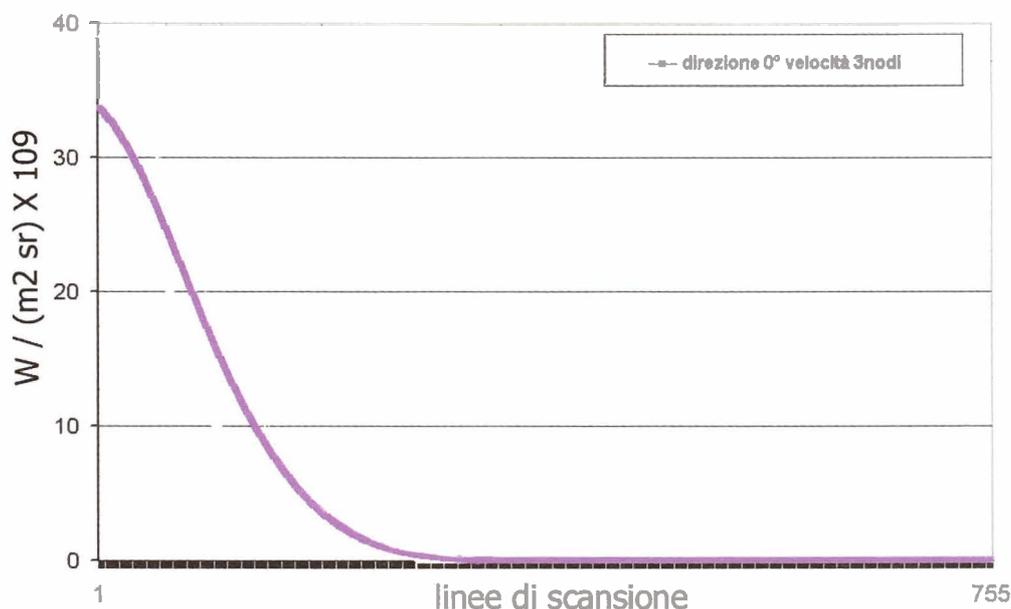


Figura 4 - Contributo della Sun Glint per la strisciata MIVIS del 25 settembre 1999 ripresa alle 14.33; in ascissa sono riportate l'indice della colonna e in ordinata il contributo della Sun Glint in  $W/(m^2 \text{ sr})$  moltiplicato per  $10^9$ .

tre, ulteriori aree di risalita sia lungo il litorale siciliano a sud di Messina e sia su quello calabrese (Villa San Giovanni). Le aree di *upwelling* lungo la costa calabrese presentano una ridotta estensione areale ed un gradiente di temperatura minore rispetto a quelle situate sul versante siciliano.

L'insieme delle mappe di temperatura superficiale (Fig. 5 A e B) derivate dal MIVIS e dalla strumentazione del natante mostrano che l'area di *upwelling* più importante è situata al centro dello Stretto. Tale fenomeno è ugualmente ben campionato da entrambe i sistemi di monitoraggio anche se sono evidenti delle variazioni nella determinazione della temperatura dell'acqua. In generale nelle zone di *upwelling* le temperature misurate con il natante risultano, in valore assoluto, sistematicamente maggiori di circa  $0,5^\circ\text{C}$  rispetto a quelle del MIVIS. Questa discrepanza è dovuta alla diversa metodologia di raccolta del dato, infatti i dati raccolti dalla strumentazione del natante sono mediati lungo un percorso di circa 150 m (ogni 30 sec), mentre il MIVIS registra la temperatura media del pixel (risoluzione del pixel a terra 8 m).

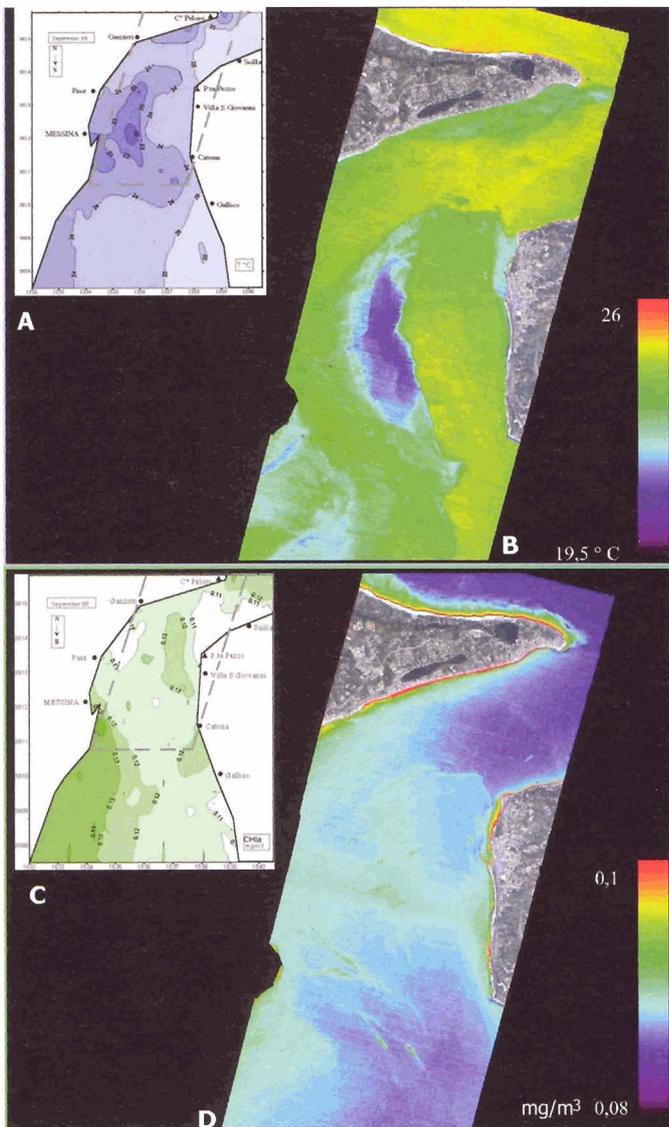
Le carte della distribuzione spaziale di clorofilla (Fig. 5 C e D), ricavate rispettivamente dai dati MIVIS (D) e dai dati di verità a mare (C), mostrano due settori più ricchi di clorofilla. Il primo, al centro dello Stretto, è caratterizzato da valori di circa  $0,093\text{mg}/\text{m}^3$  di clorofilla (MIVIS), e maggiori di  $0,12\text{mg}/\text{m}^3$  (natante); il secondo, invece, localizzato lungo le coste siciliane a sud di Messina pre-

senta valori più alti di clorofilla  $0,1\text{mg}/\text{m}^3$  (MIVIS) e  $0,14\text{mg}/\text{m}^3$  (battello).

In generale dal confronto tra le mappe di distribuzione spaziale della concentrazione della clorofilla (Fig. 5 C e D) si riscontra una sottostima dei valori calcolati dei dati MIVIS (tra  $0,1$  a  $0,08\text{mg}/\text{m}^3$ ) rispetto a quelli misurati dal natante (tra  $0,15$  e  $0,09\text{mg}/\text{m}^3$ ), questa diminuzione è ascrivibile alla diversa tipologia della misura. Il natante campiona a circa 50 cm dal pelo dell'acqua mentre il MIVIS media il valore della colonna l'acqua (circa tra 0-20 m).

Dal confronto delle mappe della temperatura superficiale e della distribuzione della clorofilla, derivate con entrambe le strumentazioni, si evidenzia come le aree con anomalie positive di clorofilla sono localizzate in prossimità delle zone di *upwelling* in quanto gli organismi fitoplanctonici trovano, in queste zone, maggiore disponibilità di nutrienti [Azzaro et al., 1995; Cescon et al., 1997; Azzaro et al., in stampa].

Confrontando le carte di uno stesso tematismo, derivate dal MIVIS e dalla strumentazione in carico al battello, bisogna considerare che il battello nel realizzare il percorso ha impiegato 3 ore, mentre il MIVIS 40 minuti per registrare tre strisciate coprendo l'intera area che è caratterizzata da una notevole turbolenza delle acque superficiali. Dove le due piattaforme di rilevamento campionavano la stessa porzione d'acqua (P.ta Pezzo), infatti, si osserva una maggiore corrispondenza nella distribuzione



**Figura 5** - Particolare del mosaico della distribuzione della temperatura superficiale del mare espressa in °C (B) e della distribuzione della concentrazione della clorofilla in  $\text{mg}/\text{m}^3$  (D) così come derivate dalla elaborazione delle immagini MIVIS. In figura A e C sono rappresentate le mappe riassuntive (temperatura espressa in °C e clorofilla in  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) del rilevamento realizzato con il battello a mare. Sulle immagini la linea tratteggiata evidenzia la porzione del mosaico MIVIS corrispondente alle Figure B e D (SMA n.413 del 07/12/99).

spaziale di entrambi i parametri, che diminuisce all'allontanarsi da P.ta Pezzo.

## Conclusioni

In questo lavoro sono stati presentati i primi risultati ottenuti da una campagna sperimentale avente come obiettivo l'utilizzo del sensore MIVIS nel campo dell'analisi delle acque di caso 1 dello Stretto di Messina.

L'area monitorata da entrambe le piattaforme di rilevamento ha evidenziato al centro dello Stretto una principale area di *upwelling* associata a una maggiore concentrazione di organismi fitoplanctonici.

Il MIVIS ha evidenziato, inoltre, zone di risalita lungo la costa siciliana, a sud di Messina, mai individuate con tecniche tradizionali di monitoraggio in continuo.

La forte variabilità spazio temporale dei parametri fisico-chimici e biologici delle acque dello Stretto, infatti, limita fortemente la validità areale e temporale del monitoraggio da mezzi navali, mentre le tecniche di monitoraggio offerte dai dati iperspettrali MIVIS forniscono una visione sinottica ed istantanea della distribuzione areale dei parametri chimico-fisici delle acque dello Stretto.

I promettenti risultati sin qui ottenuti suggeriscono di proseguire la linea di ricerca sin qui condotta integrando misure telerilevate e misure raccolte dal natante migliorando, comunque, le procedure di raccolta dati di verità *in situ*. La ricerca, all'interno delle attività di monitoraggio previste dal programma di ricerca "CLUSTER 10" del MURST, prevede di effettuare, durante l'intero ciclo annuale, il monitoraggio congiunto MIVIS e natante, allo scopo di ottenere una migliore visione della circolazione marina e dei suoi effetti sull'attività biologica del sistema durante le variazioni stagionali.

## Bibliografia

**Azzaro F., Decembrini F. e Crisafi E. (2000)** - *Yearly changes of phytoplanktonic fluorescence in relationship to upwelling of the Straits of Messina*. Continental Shelf Research, 1-7, in stampa.

**Azzaro F., Decembrini F. e Crisafi E. (1995)** - *Continuous survey of upwelling in the Straits of Messina*. Rapport Commission International pour l'Exploration Scientifique Mer Mediterranee 34, 167.

**Cescon B., Azzaro F., Creazzo S., Decembrini F. e Magazzù G. (1997)** - *Processes affecting upwelling and primary productivity of the Straits of Messina*. Boll. Geof. Teor. Appl., 38 (1-2): 137-147.

**De Domenico V. (1987)** - *Caratteristiche fisiche e chimiche delle acque nello Stretto di Messina*. Doc et Trav. IGAL, Paris, 11: 225-235.

**Gao B. e Goetz A. (1990)** - *Column atmospheric vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging spectrometer data*. Journal of Geophysical Research, Vol 95: 3549-3564.

---

**Lee Z., Carder K.L., Hawes S.K., Steward R.G, Peacock T.G. e Davis C.O. (1994)** - *Model for the interpretation of hyperspectral remote-sensing reflectance*. Appl. Optics, 33(24): 5721-5732.

**Magazzù G., Aubert M. e Decembrini F. (1995)** - *The effect of tidal movements on planktonic transfer through the Straits of Messina*. In: Guglielmo L., Manganaro A. e De Domenico E. (eds), *The Strait of Messina Ecosystem*, Proceedings of the Symposium held in Messina, 4-6 aprile 1991: 191-202.

**Montagner F. e Billat V. (2000)** - *Sun glint flag Algorithm*. ACRI, MERIS ESL, 1-13.

**Morel, A. (1997)** - *Optical properties of oceanic Case 1 waters, revisited*. In *Ocean Optics XIII*, edited by S. G. Ackleson and R. Frovin, Proc. SPIE, 2963: 108-114.

**Platt, T. e Sathyendranath S. (1988)** - *Oceanic primary production: Estimation by remote sensing at local and regional scales*. Science, 241: 1613-1620.

**Zaneveld J.R.V. (1995)** - *A theoretical derivation of the dependence of the remotely sensed reflectance of the ocean on the inherent optical properties*. Journal of Geophysical Research, vol.100, C7: 13135-13142.

# Correzioni atmosferiche dei dati MIVIS

Sergio Teggi <sup>(1)</sup>, Sergio Pugnaghi <sup>(1)</sup>, Maria Fabrizia Buongiorno <sup>(2)</sup>, Maria Paola Bogliolo <sup>(3)</sup>,  
Stefano Corradini <sup>(1)</sup>, Valerio Lombardo <sup>(2)</sup> e Luca Merucci <sup>(2)</sup>

In questa presentazione sono brevemente illustrate le procedure di correzione atmosferica utilizzate nell'elaborazione dei dati MIVIS acquisiti sull'Etna e sull'isola di Vulcano nel 1994 e nel 1997. I metodi utilizzati sono basati su modelli di trasferimento radiativo e differiscono a seconda della regione spettrale considerata. In particolare, nella regione spettrale 0.4 + 2.5  $\mu\text{m}$  la procedura sviluppata fa un uso combinato dei modelli di trasferimento radiativo 6S e MODTRAN, mentre per i canali nell'infrarosso termico è usato esclusivamente il MODTRAN. Nel primo caso le correzioni atmosferiche sono state utilizzate per la valutazione della riflettanza superficiale, nel secondo caso per la mappatura termica e per valutazione del flusso di  $\text{SO}_2$  emesso dall'Etna.

## Introduzione

Lo spettrometro MIVIS [Bianchi et al., 1996], grazie ai suoi 102 canali operanti in diverse regioni spettrali, è uno strumento che offre notevoli potenzialità in diversi settori di ricerca. Nella maggior parte delle applicazioni l'utilizzatore, prima di passare all'estrazione e interpretazione dell'informazione dalle immagini, deve correggere i dati originali dagli effetti atmosferici. La scelta del metodo di correzione atmosferica dipende sia dal tipo di applicazione sia dai canali utilizzati. In altri casi invece il contributo atmosferico è il dato dal quale estrarre direttamente l'informazione ricercata (in questo caso il termine correzione non sarebbe appropriato ma è comunemente usato),

come avviene per esempio negli studi sulla qualità dell'aria effettuati con dati telerilevati. In questo lavoro verranno mostrate le procedure di correzione atmosferica sviluppate nell'ambito degli studi effettuati dagli autori su immagini MIVIS negli ultimi anni. Queste procedure

- <sup>(1)</sup> Università di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Sc. dell'Ingegneria, Sez. Oss. Geofisico, Modena
- <sup>(2)</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma
- <sup>(3)</sup> Istituto Superiore per la Prevenzione E la Sicurezza del Lavoro, Monteporzio Catone (Roma)

Ricevuto il 08/06/00 - Accettato il 06/09/00

*In this work, the atmospheric corrections procedures used for the elaboration and for the interpretation of the MIVIS images, acquired on Mount Etna and on the Vulcano island in 1994 and 1997, are shown. The procedures are based on radiative transfer models, and differ depending on the spectral region. In particular, in the spectral range 0.4 + 2.5  $\mu\text{m}$  the radiative transfer models 6S and MODTRAN are used simultaneously, while for the thermal infrared channels only the MODTRAN code is used. In the first case, the atmospheric corrections are employed for surface reflectance retrieval, in the second for thermal mapping and for the evaluation of the  $\text{SO}_2$  flux emitted by Mount Etna.*

sono state mirate a diverse applicazioni, in particolare allo studio delle prestazioni e potenzialità dello strumento

stesso, alla determinazione della riflettanza superficiale, alla mappatura termica e allo studio delle emissioni vulcaniche di  $\text{SO}_2$ . La presentazione dei metodi sarà fatta in due parti: la prima parte sarà relativa ai primi 92 canali (visibile - infrarosso riflesso), la seconda riguarderà gli ultimi 10 canali nell'infrarosso termico.

## Correzioni atmosferiche per i canali 1 + 92

I primi 92 canali del MIVIS operano, con discontinuità, nella regione dello spettro elettromagnetico compresa tra 0.44  $\mu\text{m}$  e 2.47  $\mu\text{m}$ . In questa regione spettrale l'atmosfera influenza il dato telerilevato sia tramite processi di diffusione che di assorbimento. In questo caso il procedimento sviluppato per le correzioni atmosferiche ricalca, a grandi linee, la metodologia utilizzata dal modello di trasferimento radiativo 6S [Vermote et al., 1997], che, a differenza del MODTRAN [Berk et al., 1989], tiene conto anche degli effetti di riflessione ambientale. Inoltre, è stata aggiunta la correzione del cambiamento di illuminazione legato alla topografia. Assumendo di essere in assenza di nubi e di avere una superficie Lambertiana, la riflettanza di un pixel, ad una data lunghezza d'onda ( $\lambda$ ), può essere legata alla sua riflettanza apparente dalla relazione [Liu et al., 1996; Rahman e Dedieu, 1994; Horn and Sjoberg, 1979; Zagolski e Gastellu-Etchegorry, 1995]:

$$\rho^* = Tg \left\{ \rho_a + \frac{\rho \left[ \beta e^{-\tau_s/\mu_s} e^{-\tau_v/\mu_v} + \eta t_{d,s} e^{-\tau_v/\mu_v} \right]}{1 - \langle \rho_e \rangle s} + \frac{\langle \rho_e \rangle \left[ e^{-\tau_s/\mu_s} t_{d,v} + t_{d,s} \cdot t_{d,v} \right]}{1 - \langle \rho_e \rangle s} \right\} \quad (1)$$

dove:  $\rho^*(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi_{sv}, z) = (\pi L_m) / (\mu_s E_s)$  è la riflettanza apparente;  $\rho(\lambda)$  è la riflettanza del pixel;  $L_m(\lambda)$  è la radianza misurata dal sensore in un dato canale;  $E_s(\lambda)$  è il flusso solare esotmosferico;  $\mu_s$  e  $\mu_v$  sono i coseni dell'angolo zenitale solare ( $\theta_s$ ) e dell'angolo zenitale di vista ( $\theta_v$ ), rispettivamente;  $\phi_{sv}$  è l'angolo azimutale fra la direzione del sole e la direzione di vista;  $z$  è la quota della superficie;  $\rho_a(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi_{sv}, z)$  è la riflettanza atmosferica intrinseca;  $\langle \rho_e \rangle(\lambda)$  è la riflettanza ambientale media;  $Tg(\lambda, \theta_s, \theta_v, z)$  è la trasmittanza dovuta all'assorbimento dei gas del cammino sole-superficie-sensore;  $e^{-\tau_s/\mu_s}$  e  $\tau_{d,s}(\lambda, \mu_s, z)$  sono rispettivamente la trasmittanza diretta e diffusa verso il basso dovute alla diffusione;  $e^{-\tau_v/\mu_s}$  e  $\tau_{d,v}(\lambda, \mu_s, z)$  sono le trasmittanze analoghe alle due precedenti per il cammino verso l'alto;  $\tau(\lambda, z)$  è lo spessore ottico verticale dell'atmosfera dovuto alla diffusione;  $s(\lambda, z)$  è l'albedo sferica dell'atmosfera;  $\beta = \cos(\theta_n) + \tan(\theta_s) \sin(\theta_n) \cos(\phi_s - \phi_n)$  è il fattore di riduzione della radiazione diretta incidente su un piano inclinato;  $\eta = (1 + \cos(\theta_n))/2$  è il fattore di riduzione della radiazione diffusa incidente su un piano inclinato;  $\theta_n$  e  $\phi_n$  sono rispettivamente l'angolo zenitale e azimutale (*slope* e *aspect*) della superficie.

I termini atmosferici che compaiono nell'equazione (1) sono stati calcolati utilizzando due modelli di trasferimento radiativo diversi: il 6S e il MODTRAN. Il 6S è usato per il calcolo di tutti i termini legati alla diffusione atmosferica mentre il MODTRAN è usato per la modellazione dell'assorbimento atmosferico. In linea di principio si potrebbe usare solamente il 6S in quanto anch'esso fornisce la valutazione delle trasmittanze legate agli assorbimenti dei gas, questo calcolo viene fatto però solo sui sei gas atmosferici principali e con una risoluzione spettrale di 10 cm<sup>-1</sup>, mentre il MODTRAN considera un numero di gas maggiore e la risoluzione spettrale è di 2 cm<sup>-1</sup>. L'importanza dell'uso contemporaneo dei modelli di trasferimento radiativo verrà discussa in seguito. Dagli output dei due modelli di trasferimento radiativo è possibile estrarre i termini  $\rho_a(\lambda)$ ,  $s(\lambda)$ ,  $(Tg_s \cdot Tg_v)(\lambda)$ ,  $\exp(-\tau_s/\mu_s)(\lambda)$ ,  $\exp(-\tau_v/\mu_v)(\lambda)$ ,  $\tau_{d,s}(\lambda)$  e  $\tau_{d,v}(\lambda)$  nell'intervallo spettrale 0.4 + 2.5 μm, ogni 2.5 nm; questi sono successivamente convolti con le funzioni risposta dei canali del MIVIS in

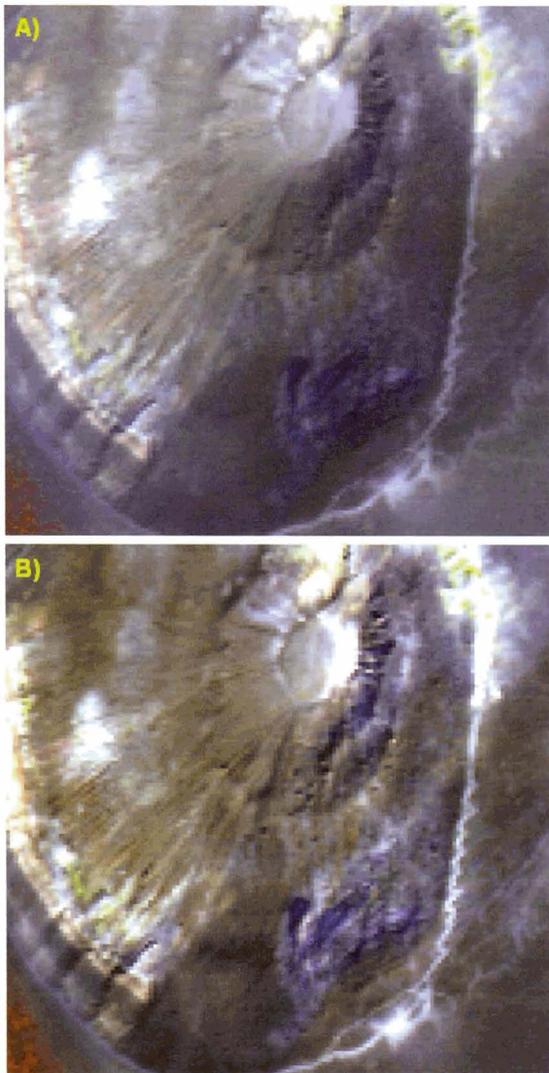
modo da poter valutare l'equazione (1) per ogni singolo canale del sensore.

La geometria del cammino ottico cambia continuamente sull'immagine e questo comporta che, in teoria, i termini atmosferici dovrebbero essere calcolati per ogni pixel, con conseguenti tempi di calcolo estremamente lunghi. Per risolvere questo problema si è adottato l'approccio delle *lookup table*. Questo metodo consiste nel calcolare i termini atmosferici per valori discreti di  $\theta_v$ , di  $\phi_{sv}$ , e di  $z$ , ottenendo in tal modo una tabella di termini atmosferici da cui calcolare i valori per ogni singolo pixel, cioè per la specifica geometria ( $\theta_v, \phi_{sv}, z$ ), mediante interpolazione. I valori discreti delle variabili sono stati scelti dopo avere analizzato la variazione di ogni termine atmosferico e sono di 5° da 0° a 40° per  $\theta_v$  e di 100 m dalla quota minima a quella massima della zona ripresa per  $z$ . Per quanto riguarda  $\phi_{sv}$  esso può assumere solo due valori a seconda che si consideri la semiscansione a destra o quella sinistra rispetto alla direzione di volo.

I termini che descrivono il cambio di illuminazione della superficie dovuto alla topografia,  $\beta$  e  $\eta$ , sono calcolati, per ogni pixel, noti gli angoli di posizione del sole e gli angoli di pendenza e orientamento del pixel. Questi ultimi sono estratti da un modello digitale del terreno (DEM) registrato sull'immagine.

Uno dei termini più difficoltosi da valutare nell'equazione (1) è la riflettanza ambientale. In letteratura è possibile reperire diversi metodi più o meno raffinati per il calcolo di  $\langle \rho_e \rangle$  (per esempio Zagolski e Gastellu-Etchegorry [1995]) i quali tengono conto di fattori come la distribuzione spaziale dei diversi tipi di copertura e l'efficienza di intrappolamento della radiazione dell'atmosfera. Tutti questi metodi però sono molto laboriosi e comportano una consistente dilatazione dei tempi di calcolo. Per questo motivo si è scelto di adottare il metodo iterativo proposto da Richter [1990]: in un primo passaggio si calcola l'immagine in riflettanza assumendo  $\langle \rho_e \rangle = 0$ ; dall'immagine così ottenuta si fa una valutazione approssimata, per ogni pixel, di  $\langle \rho_e \rangle$  assumendola uguale al valor medio delle riflettanze di una finestra, centrata sul pixel, di larghezza  $W$  predefinita; infine, si ripete il calcolo dell'immagine in riflettanza utilizzando la  $\langle \rho_e \rangle$  stimata. Le iterazioni proseguono fino a che non si registrano più variazioni significative dei valori forniti dall'equazione (1) (criterio di convergenza). Il valore di  $W$  utilizzato (40 pixel, circa 160 m) è stato deciso in base all'analisi dei risultati ottenuti con diversi valori.

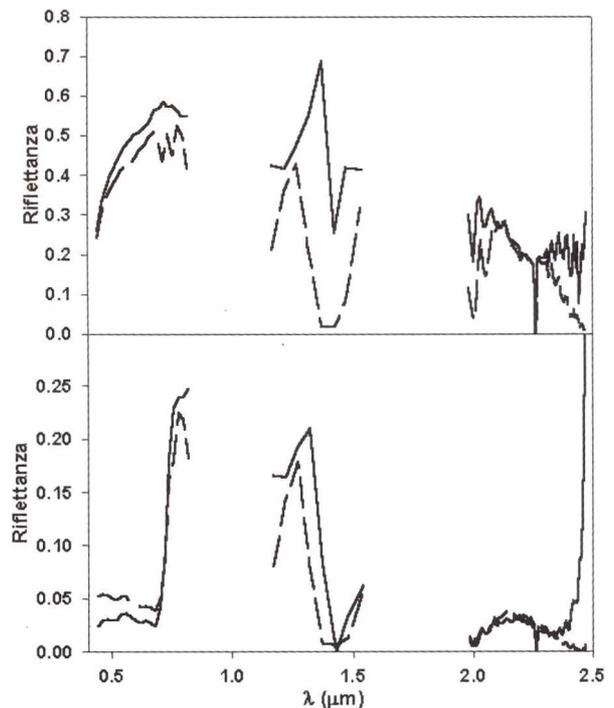
Il metodo di correzione atmosferica e topografica descritto è stato utilizzato per il calcolo delle immagini in riflettanza da immagini MIVIS acquisite sull'isola di Vulcano nel 1994 [Abrams et al., 1997]. In Figura 1a è riportato un particolare del cratere La Fossa dell'isola di Vulcano estratto dall'immagine MIVIS convertita in riflettanza apparente. L'immagine a colori è la composizione RGB dei canali 19-8-2. In Figura 1b è riportata la stessa zona,



**Figura 1** - Particolare del cratere La Fossa (isola di Vulcano. Composizione RGB dei canali MIVIS 19-8-2 in riflettanza apparente (a) e in riflettanza superficiale (b). (Concessione SMA 591 del 22/12/95)

con la stessa combinazione RGB, estratta dall'immagine in riflettanza al suolo calcolata col metodo descritto. Dal confronto delle due immagini risulta evidente l'aumento del contrasto e la drastica diminuzione dell'effetto della variazione di illuminazione legato alla topografia.

In Figura 2 sono riportati gli spettri di riflettanza apparente e di riflettanza al suolo estratte da un'area sulla sommità del cratere e da un'area ricoperta da vegetazione (valori medi). L'effetto delle correzioni atmosferiche è particolarmente evidente negli ultimi canali del primo spettrometro, dove scompaiono quasi totalmente le bande di assorbimento dovute al vapore acqueo. Una possibile



**Figura 2** - Spettri di riflettanza apparente (linea tratteggiata) e di riflettanza al suolo (linea continua) estratte da un'area (valori medi) sulla sommità del cratere (sopra) e da un'area ricoperta da vegetazione (sotto).

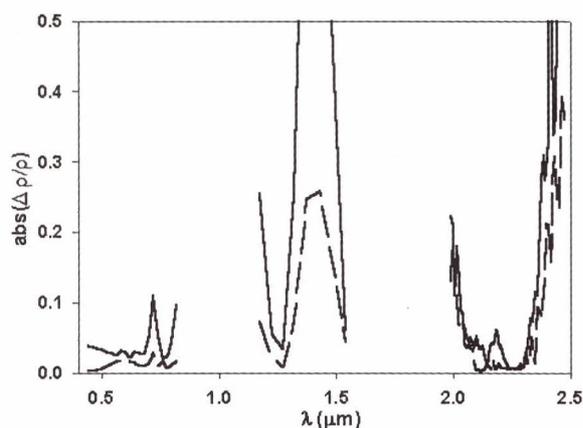
spiegazione del fatto che comunque rimanga una traccia di queste bande nello spettro corretto è fornita nei paragrafi successivi. In alcuni canali del secondo (canali 25 e 26) e del terzo spettrometro (la maggior parte dei canali oltre i 2.35  $\mu\text{m}$ ) le valutazioni sono in generale molto difficili, come appare evidente nell'ultima parte dello spettro della vegetazione. La scarsa attendibilità dei risultati ottenuti in questi canali è essenzialmente dovuta al fortissimo, e quindi difficilmente modellabile, assorbimento atmosferico (oltre i 2.35  $\mu\text{m}$  la trasmittanza è quasi ovunque  $< 0.5$ ). A questa causa va aggiunto l'elevato rumore strumentale dei dati MIVIS in queste regioni spettrali [Bogliolo et al., 1998].

#### *Alcune fonti di errore nella stima di $\rho$*

Il metodo adottato per il calcolo della riflettanza superficiale è basato sull'inversione delle leggi fisiche del trasferimento radiativo in atmosfera. Formalmente questo approccio è il più corretto, però la qualità dei risultati è fortemente legata alla precisione con cui vengono forniti i molti dati in input, quali le misure atmosferiche (profili verticali di pressione, temperatura e umidità, lo spessore ottico e il tipo di aerosol, ecc.), la topografia (registrazione del DEM) e le funzioni risposta del sensore.

L'incertezza su questi dati si propaga sul risultato con un peso relativo dipendente dalla collocazione spettrale dei vari canali. Alcune analisi di questo problema [Bogliolo et al., 1998] hanno messo in evidenza alcune regioni spettrali nelle quali l'applicazione del metodo adottato è critica. Di seguito sono riportati i risultati di uno studio sulla dipendenza della bontà del risultato dall'accuratezza della valutazione della trasmittanza atmosferica dei gas e dall'accuratezza della misura dei centri banda dei canali.

Fra tutti i termini atmosferici la trasmittanza dei gas è sicuramente quello più difficile da valutare; essa dipende da numerose altre grandezze quali ad esempio la concentrazione e la distribuzione verticale dei gas assorbenti (soprattutto il vapore acqueo) e i profili atmosferici di pressione e temperatura. Dall'inversione dell'equazione (1) si può verificare che, trascurando una leggera dipendenza legata al termine  $\rho_a$ , una variazione relativa di  $T_g$  produce una uguale e opposta variazione relativa di  $\rho$ :  $\Delta T_g/T_g = -\Delta\rho/\rho$ . Tramite questa relazione è stata valutata la variazione relativa di  $\rho$  ottenuta utilizzando le  $T_g$  calcolate nei casi di atmosfera standard (alle medie latitudini) invernale e estiva. I risultati ottenuti sono mostrati nel grafico con linea continua in Figura 3, in cui è evidente l'esistenza di alcune regioni spettrali, coincidenti con le bande di assorbimento atmosferico, nelle quali le eventuali imprecisioni nella stima di  $T_g$  producono errori rilevanti nella valutazione di  $\rho$ . In particolare i canali MIVIS maggiormente influenzati da questo effetto sono il 15 (0.723  $\mu\text{m}$ ), il 20 e il 21 (0.822  $\mu\text{m}$  e 1.175  $\mu\text{m}$ ), dal 24 al 26 (da 1.325  $\mu\text{m}$  a 1.425  $\mu\text{m}$ ), dal 29 al 34 (da 1.990  $\mu\text{m}$  a 2.031  $\mu\text{m}$ ) e dal 74 al 92 (da 2.348  $\mu\text{m}$  a 2.474  $\mu\text{m}$ ). Con una prova dello stesso tipo di quella appena vista è inoltre possibile valutare l'importanza dell'uso del MOD-



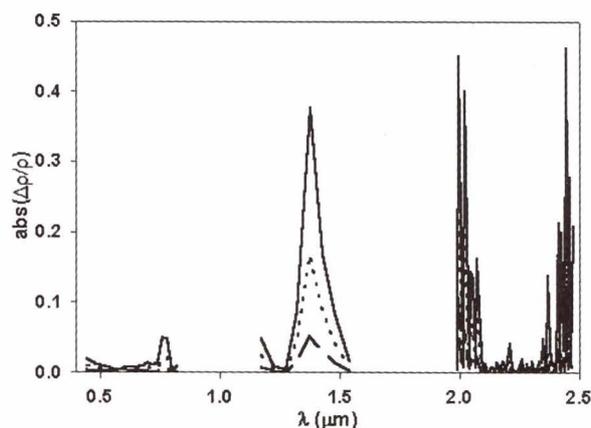
**Figura 3** - Linea continua: differenza relativa fra le riflettanze ottenute usando la trasmittanza di un'atmosfera (standard) estiva oppure invernale (vedere testo). Linea tratteggiata: stessa differenza ottenuta usando la trasmittanza calcolata col MODTRAN oppure col 6S.

TRAN anziché del 6S per il calcolo di  $T_g$ . La curva tratteggiata in Figura 3 mostra la variazione relativa di  $\rho$  ottenuta utilizzando le  $T_g$  calcolate coi due modelli di trasferimento radiativo; le differenze che si osservano e le considerazioni che ne derivano sono del tutto simili a quelle del caso precedente.

Un'altra informazione estremamente importante per il calcolo di  $\rho$  è la funzione risposta di ogni singolo canale. Poiché l'unico termine dell'equazione (1) che presenta forti discontinuità spettrali è la trasmittanza dei gas è facile dimostrare che l'imprecisione sui centri banda si riflette essenzialmente sulla stima di  $T_g$  e quindi sul calcolo di  $\rho$ . L'analisi di questo effetto è stata fatta confrontando, sempre in termini di differenze relative, le trasmittanze, e conseguentemente le riflettanze, ottenute usando centri banda traslati (verso le basse lunghezze d'onda) di quantità note: -1 nm, -2 nm e -3 nm. I risultati sono mostrati in Figura 4. Anche in questo caso sono evidenti alcune regioni spettrali per le quali l'accuratezza della misura dei centri banda è fattore molto importante, in particolare quelle in cui sono collocati i canali MIVIS 25 e 26 (1.375  $\mu\text{m}$  e 1.425  $\mu\text{m}$ ), quelli dal 30 al 41 (da 1.998  $\mu\text{m}$  a 2.092  $\mu\text{m}$ ), e quelli dal 77 al 92 (da 2.371  $\mu\text{m}$  a 2.474  $\mu\text{m}$ ).

### Correzioni atmosferiche per i canali 93 +102

Gli ultimi 10 canali del MIVIS sono tutti posizionati nell'infrarosso termico, da 8.39  $\mu\text{m}$  a 12.47  $\mu\text{m}$ . La maggior parte degli utilizzatori di dati telerilevati acquisiti in questa regione spettrale è interessata alla valutazione della temperatura del suolo e/o dell'emissività superficiale. L'area di ricerca in cui gli autori utilizzano i dati MIVIS comprende anche la valutazione del contenuto di  $\text{SO}_2$  in plumes vulcanici da immagini MIVIS nell'infrarosso termico, resa possibile dall'assorbimento che questo gas presenta fra 8.1 e 9.4  $\mu\text{m}$ . Per questo motivo il metodo di cor-



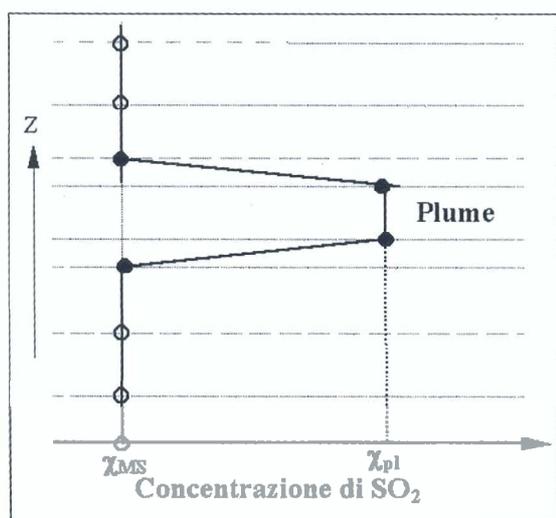
**Figura 4** - Variazione di riflettanza dovuta ad una traslazione dei centri banda di -1 nm (linea tratteggiata), -2 nm (linea a tratteggio fine), -3 nm (linea continua).

reazione atmosferica sviluppato (in questo caso il termine correzione non è del tutto appropriato) tiene conto anche della presenza di un plume di SO<sub>2</sub> il cui contenuto colonnare rappresenta un'ulteriore incognita. La relazione di base che descrive, per ogni lunghezza d'onda, la radianza ricevuta dal sensore è

$$L_M = L_u + (1 - \epsilon)L_d \cdot \tau + \epsilon \cdot B \cdot \tau \quad (2)$$

dove:  $L_M(\lambda, \theta_v, z)$  è la radianza al sensore;  $L_u(\lambda, \theta_v, z, c_S)$  è la radianza emessa dall'atmosfera verso il sensore;  $c_S$  è il contenuto colonnare di SO<sub>2</sub> del plume;  $\epsilon$  è l'emissività della superficie;  $L_d(\lambda, \theta_v, z, c_S)$  è la radianza dell'atmosfera emessa verso il basso;  $\tau(\lambda, \theta_v, z, c_S)$  è la trasmittanza atmosferica lungo il tragitto superficie-sensore;  $B_s(\lambda, T_s)$  è la funzione di Planck;  $T_s$  è la temperatura del suolo.

Tutti i termini atmosferici dell'equazione (2) ( $L_u$ ,  $L_d$  e  $\tau$ ) sono valutati, per un data configurazione delle variabili ( $\theta_v, z, c_S$ ), con il MODTRAN (il 6S non copre questa regione spettrale) ogni cm<sup>-1</sup> (anche se la risoluzione spettrale reale di calcolo è di 2 cm<sup>-1</sup>). I dati così ottenuti sono successivamente convolti con le funzioni risposta dei canali del MIVIS in modo da poter scrivere l'equazione (2) per ogni singolo canale del sensore. Uno dei passaggi più importanti della fase di calcolo dei termini atmosferici è l'inserimento del plume di SO<sub>2</sub> nell'insieme di dati forniti in input al MODTRAN. Questa operazione viene fatta inserendo nei profili standard di SO<sub>2</sub> del MODTRAN quattro ulteriori livelli (Fig. 5) con valori di concentrazione di SO<sub>2</sub> tali da definire uno strato ben confina-

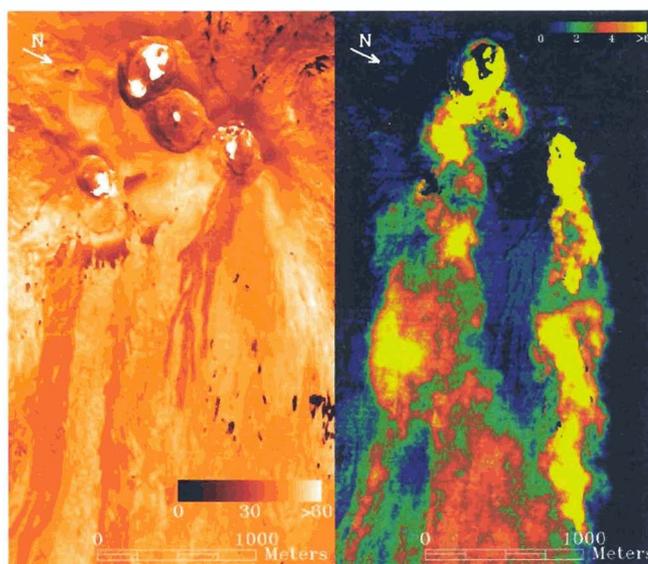


**Figura 5** - Simulazione di un plume di SO<sub>2</sub>: al profilo standard del MODTRAN (cerchietti) vengono inseriti 4 nuovi livelli (dischetti neri) a concentrazione di SO<sub>2</sub> tale da ottenere un contenuto colonnare prestabilito.

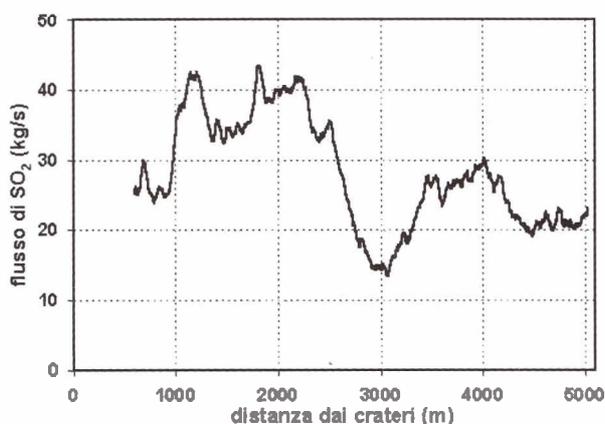
to in verticale e con contenuto colonnare di SO<sub>2</sub> ( $c_S$ ) prestabilito. In questo modo sono facilmente simulabili tre possibili geometrie di plume: ad altezza e spessore costante, con base al suolo e spessore costante ed infine con base al suolo e cima ad una quota costante.

Anche in questo caso, come nel caso trattato nel capitolo precedente, al fine di evitare il calcolo tramite il MODTRAN per ogni singolo pixel, si fa ricorso alla costruzione di look up table. I termini atmosferici  $L_u$ ,  $L_d$ , e  $\tau$  sono calcolati per valori di  $\theta_v$  compresi fra 0° a 40° ogni 5°, per valori di  $z$  compresi fra le quote estreme dell'area studiata ogni 100 m e per valori di  $c_S$  compresi fra 0 g m<sup>-2</sup> e 20 g m<sup>-2</sup> ogni 0.5 g m<sup>-2</sup>. La scelta della geometria del plume è uno dei passaggi più critici della procedura in quanto l'osservazione diretta di parametri che la definiscono (forma, spessore e quota) sono raramente disponibili.

La procedura di calcolo della temperatura superficiale, dell'emissività superficiale e del contenuto colonnare di SO<sub>2</sub>, nonché del flusso totale di SO<sub>2</sub> emesso dal vulcano, è molto complessa e pertanto non viene qui riportata, una sua descrizione dettagliata è reperibile nei lavori di Realmuto et al. [1994], Realmuto et al. [1997] e Teggi et al. [1999]. Questo metodo è stato applicato alle immagini acquisite dal MIVIS sull'Etna durante due campagne di misure fatte nel 1994 [Abrams et al., 1997] e nel 1997 [Buongiorno et al., 1999]. A titolo di esempio in Figura 6 e in Figura 7 sono raggruppati i principali risultati ottenuti dall'immagine del 16/06/97. Tenuto conto delle osservazioni effettuate durante le riprese MIVIS e dopo varie prove, si è assunto un plume ad una quota (costante)



**Figura 6** - Elaborazioni delle immagini acquisite il 16/07/97 sul Monte Etna: a sinistra è riportata la mappa di temperatura (°C), a destra la mappa di contenuto colonnare di SO<sub>2</sub> (g m<sup>-2</sup>). (Concessione SMA 528 del 4/11/97)



**Figura 7** - Flusso totale di SO<sub>2</sub> emesso dall'Etna calcolato dalle immagini MIVIS del 16/07/97 lungo tutte le sezioni perpendicolari alla direzione del plume.

uguale a quella dei crateri sommitali e con uno spessore di 100 m. In Figura 6 a sinistra è mostrata la mappa di temperatura superficiale in cui si distinguono le varie colate che, soprattutto a causa della diversa rugosità, hanno temperature differenti. Sono inoltre localizzabili alcune aree particolarmente scure ( $T_s \approx 10^\circ\text{C}$ ) che erano ricoperte da neve e le zone estremamente calde (bianche,  $T_s > 400^\circ\text{C}$ ) all'interno dei crateri. L'immagine a destra in Figura 6 mostra la mappa di contenuto colonnare di SO<sub>2</sub>, da cui è stato calcolato su tutte le sezioni perpendicolari alla direzione di diffusione del plume il flusso totale di SO<sub>2</sub> emesso dall'Etna; il risultato è graficato in Figura 7. Il valore medio, lungo l'asse, del flusso è di  $28 \pm 9 \text{ kg s}^{-1}$  che è in buon accordo con le misure fatte simultaneamente, ma solo su alcune sezioni, da uno spettrometro COSPEC operante su aereo ( $32 \pm 2 \text{ kg s}^{-1}$ ) e da un altro strumento uguale a terra ( $36 \pm 9 \text{ kg s}^{-1}$ ) [Buongiorno et al., 1999].

#### **Alcune considerazioni sulla qualità dei risultati**

L'accuratezza con cui si riescono a determinare e separare la temperatura del suolo e l'emissività superficiale da immagini telerilevate è stata ampiamente studiata da vari autori. Per quanto riguarda il MIVIS, gli autori hanno effettuato un'analisi della propagazione nella valutazione di  $T_s$  dell'errore nella misura dei profili verticali di umidità [Teggi et al., 1998]. I risultati ottenuti hanno mostrato che, in alcuni casi, è sufficiente una variazione di  $0.5 \text{ g cm}^{-2}$  di contenuto colonnare di vapore acqueo per generare una variazione di alcuni K sulla stima di  $T_s$ . Questo effetto è maggiore per i canali 93, 94, 101 e 102 ed aumenta all'aumentare del contrasto termico fra atmosfera e superficie.

Per quanto riguarda il calcolo del contenuto di SO<sub>2</sub> si è cercato anzitutto di valutare qual è la variazione minima di  $c_s$  che è possibile quantificare con questo metodo.

Questo tipo di studio non è ancora stato portato a termine, ma da prime valutazioni è emerso che questo valore è compreso fra  $0.5 \text{ g m}^{-2}$  e  $1 \text{ g m}^{-2}$ . Dall'analisi dei risultati ottenuti nei diversi casi si è visto che l'imprecisione sulla quota del plume è una delle principali fonti di errore, unitamente alle imprecisioni su  $T_s$  e su  $\epsilon$  e che si propagano nella stima di  $c_s$ . Dato l'elevato numero di variabili che entrano in gioco e la complessità della procedura è molto difficile dare delle valutazioni quantitative con valenza generale di questi errori.

#### **Considerazioni conclusive**

In questo lavoro sono stati presenti gli approcci alle correzioni atmosferiche scelti dagli autori per l'analisi delle immagini MIVIS.

Le procedure sviluppate sono basate sull'uso dei modelli di trasferimento radiativo 6S e MODTRAN e sono essenzialmente due: una per i dati acquisiti nei primi 92 canali ( $0.44 \mu\text{m} + 2.47 \mu\text{m}$ ), l'altra per gli ultimi dieci canali nell'infrarosso termico.

Per le correzioni atmosferiche nei primi 92 canali, mirate al calcolo della riflettanza superficiale, è stata sviluppata una procedura in grado di compensare anche gli effetti di cambio di illuminazione dovuti alla topografia.

Nel caso delle correzioni atmosferiche nell'infrarosso termico il metodo costruito contiene alcuni moduli appositi per la modellazione dei plume vulcanici di SO<sub>2</sub> e per la conseguente valutazione del flusso totale di SO<sub>2</sub> emesso dal vulcano da immagini MIVIS.

Le procedure mostrate sono state applicate alle immagini MIVIS acquisite nel 1994 e nel 1997 sull'Etna e sull'isola di Vulcano e i risultati ottenuti sono soddisfacenti. Ciononostante, i casi studiati hanno evidenziato l'esistenza di alcune regioni spettrali, in cui vi è un forte assorbimento atmosferico, nelle quali l'uso di metodi basati sui modelli di trasferimento radiativo è critico.

I metodi descritti non hanno l'ambizione di rappresentare una procedura generale per le correzioni atmosferiche delle immagini MIVIS, tuttavia costituiscono una valida esperienza utile a chiunque si trovi ad affrontare questo problema.

#### **Bibliografia**

- Abrams M.J., Bianchi R. e Buongiorno M.F.** (1997) - *Next-generation spectrometer aids study of Mediterranean.*, Eos Trans. AGU, 78 (31), 317.
- Berk A., Bernstein L.S. e Robertson D.C.** (1989) - *MODTRAN: a moderate resolution model for Lowtran7*, GL-TR-89-0122, AFG Lab., Hanscom Air Force Base, MA 01731-5000, USA.
- Bianchi R., Cavalli R.M., Fiumi L., Marino C.M. e Pignatti S.** (1996) - *Airborne remote sensing: Results of*

two years of imaging spectrometry for the study of environmental problems. In Remote Sensing (A. Spitteri ed.), A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 269-273.

**Bogliolo M.P., Teggi S., Buongiorno M.F. e Pugnaghi S.** (1998) - *Retrieving ground reflectance from MIVIS data: a case study on Vulcano island (Italy)*, Proc. of 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Remote Sensing Lab., Univ. of Zurich, Switzerland, 6-8 October 1998, pp. 403-416.

**Buongiorno M.F., Merucci L., Doumaz F., Salvi S., Bogliolo M.P., Pugnaghi S., Teggi S., Corradini S., Lombroso L., Sterni A., Caltabiano T., Corradini S. e Carrere V.** (1999) - *MVRRS campaign: MIVIS mission on Sicilian volcanoes and ground measurements*, Quaderni di Geofisica, Istituto Nazionale di Geofisica Ed., Roma.

**Horn B. K. P. e Sjoberg R. W.** (1979) - *Calculating the reflectance map*, App. Optics, 18: 11, 1770-1779.

**Liu C.H., Chen A. J. e Liu G. R.** (1996) - *An image-based retrieval algorithm of aerosol characteristics and surface reflectance for satellite images*, Int. J. Remote Sensing, 17: 3477-3500.

**Rahman H. e Dedieu G.** (1994) - *SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum*, Int. J. Remote Sensing, 15, num. 1, 123-143.

**Realmuto V.J., Abrams M.J., Buongiorno M.F. e Pieri D.C.** (1994) - *The use of multispectral thermal infrared image data to estimate the sulfur dioxide flux from volca-*

*noes: A case study from Mount Etna, Sicily, July 29, 1986.* J. Geophys. Res., 99 (B1): 481-488.

**Realmuto V.J., Sutton A.J. e Elias T.** (1997) - *Multispectral thermal infrared mapping of sulfur dioxide plumes: A case study from the East Rift Zone of Kilauea volcano, Hawaii.* J. Geophys. Res., 102: 15057-15072.

**Richter R.** (1990) - *A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat TM images.* Int. J. Remote Sensing, 159-166.

**Teggi S., Bogliolo M.P., Buongiorno M.F. e Pugnaghi S.** (1998) - *Influence of non-representative atmospheric profiles on estimates of land surface temperature by MIVIS data using radiative transfer models.* Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 60: 1059-1070.

**Teggi S., Bogliolo M.P., Buongiorno M.F., Pugnaghi S. e Sterni A.** (1999) - *Evaluation of SO<sub>2</sub> emission from Mount Etna using diurnal and nocturnal multispectral IR and visible imaging spectrometer thermal IR remote sensing images and radiative transfer models.* J. Geophys. Res., 104: 20069-20079.

**Vermote E. F., Tanré D., Deuzé J. L., Herman M. e Morcrette J. J.** (1997) - *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S): user guide, version 2*, University of Maryland, Dept. Of Geography / Laboratoire d'Optique Atmospherique.

**Zagolski F. e Gastellu-Etchegorry J. P.** (1995) - *Atmospheric correction of AVIRIS images with a procedure based on the inversion of the 5S model.* Int. J. Remote Sensing, 16: 3115-3146.

# Effetti della geometria della ripresa e della radianza dell'atmosfera sull'interpretazione di dati MIVIS

Claudia Giardino<sup>(1)</sup>, Pietro Alessandro Brivio<sup>(1)</sup> e Maria Sgavetti<sup>(2)</sup>

Per l'estrazione dai dati iperspettrali telerilevati delle proprietà bio-fisiche delle superfici terrestri sono elementi critici i fattori di path radianza atmosferico, la natura della superficie al suolo e la geometria della ripresa. In questo lavoro viene analizzata l'influenza di questi fattori sulle caratteristiche spettrali misurate dal MIVIS su un'area di litorale sabbioso per il quale si dispone di misure radiometriche, sia della superficie che dell'atmosfera, contemporanee al sorvolo.

## Introduzione

Le caratteristiche radiometriche, spettrali e geometriche dei sensori iperspettrali aviotrasportati consentono di sviluppare ricerche molto avanzate per lo studio delle dinamiche ambientali [Leone e Sommer, 1999; Kallio et al., 1998; Hill et al., 1998; Jong, 1998; George, 1997]. Le quantità fisiche che si possono estrarre dai dati telerilevati attraverso la correzione radiometrica sono rappresentate dalla temperatura e dalla riflettanza delle superfici. Inoltre, esistono anche altri parametri (Tab. 1) che sono facilmente determinabili a partire dalle grandezze radiometriche fondamentali e che rivestono una notevole importanza nello studio delle proprietà bio-fisiche delle superfici osservate. Tutte le grandezze illustrate nella tabella sono variabili nel dominio spazio-temporale e quindi, attraverso misure telerilevate integrate con dati a terra, si possono ottenere descrizioni più rappresentative rispetto a misure acquisite al suolo in corrispondenza di alcune stazioni. In funzione dell'obiettivo della correzione radiometrica, si possono distinguere un approccio applicativo, per cui la calibrazione strumentale è nota e mediante modelli di correzione atmosferica si determinano riflettanza e temperatura delle superfici e un approccio ingegneristico per cui, note le proprietà delle superfici, si determina la radianza al sensore da confrontare con il risultato della calibrazione radiometrica. Inoltre, in funzione della metodologia, la correzione radiometrica può

*Retrieval of bio-physical properties of terrestrial surfaces from hyperspectral data requires accurate corrections because the atmospheric path radiance, the solar-target-view geometry of the acquisition and the optical properties of the targets. Impacts of these factors on the MIVIS data have been investigated for a sandy surface located in the northern Adriatic coast. In coincidence with the aerial survey radiometric properties of atmosphere and sand were measured either for the correction or validation of hyperspectral data.*

essere risolta secondo un approccio empirico (regressioni con dati a terra contemporanei al passaggio), oppure analitico (modellistica fisica) che consente la correzione dell'effetto atmosferico, topografico e la correzione del comportamento non lambertiano delle superfici poiché, tutte le superfici naturali hanno infatti un forte comportamento anisotropo nel dominio della radiazione riflessa (ed emessa) [Greuell e Ruyter de Wildt, 1999; Martonchik et al., 1998].

Nell'ambito di questa ricerca è stato seguito l'approccio applicativo, utilizzando modelli fisici, per la determinazione della riflettanza delle superfici a partire da dati del sensore iperspettrale Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer (MIVIS). In particolare, l'analisi è stata limitata al primo (0.43-0.83  $\mu\text{m}$ ) e al secondo spettrometro (1.15-1.55  $\mu\text{m}$ ) tra quelli disponibili nel dominio della radiazione riflessa.

## Materiali e metodi

### Area di Studio

L'area di studio di questa ricerca è situata nella zona di litorale sabbioso dell'alto Adriatico, prospiciente la città di Grado (Gorizia), nella laguna friulana di Marano. Le sabbie che caratterizzano la spiaggia sono di composizione prevalentemente carbonatica, di granulometria fine e, al momento del rilievo, non ancora contaminate dalle sabbie di riporto dei vicini fondali marini atte ad ampliare e integrare l'arenile in vista della stagione balneare.

Il giorno 22-03-2000, intorno alle 10.50 TUC il sensore iperspettrale MIVIS ha sorvolato l'area di studio in direzione Nord-Sud, ad una quota di volo di circa 1500 m a cui corrisponde un pixel al suolo di 3m  $\times$  3m. Le condizioni meteorologiche al suolo al momento dell'acquisizione dell'immagine erano buone, la pressione atmosferica intorno a 1013 mbar, la temperatura dell'aria compre-

<sup>(1)</sup> CNR-Reparto Telerilevamento, via Bassini 15, 20133 Milano

<sup>(2)</sup> Università degli Studi di Parma, Facoltà di Scienze M.FF.NN-Scienze Geologiche, Parco Area delle Scienze 157A, 43100 Parma

Ricevuto il 20/06/00 - Accettato il 26/09/00

**Tabella. 1** - Esempi di grandezze fisiche e indici spettrali determinabili dai dati telerilevati e loro rilevanze in alcuni processi che interessano la biosfera (NDVI = indice di vegetazione normalizzato;  $R_{NIR/RED}$  = riflettanza infrarosso-vicino/riflettanza rosso;  $R_{B/G}$  = riflettanza blu/riflettanza verde).

<i>Grandezza/Indice</i>	<i>Superficie</i>	<i>Dinamica Ambientale</i>
temperatura, albedo	qualsiasi	bilanci energetici [Goodin, 1995]
NDVI, albedo	vegetazione	scambi di CO <sub>2</sub> tra biosfera e atmosfera [Running et al., 1999]
albedo	ghiacciaio	ritiro dei fronti dei ghiacciai alpini [Knap and Carleen, 1998]
$R_{NIR/RED}$	lago	contenuto di clorofilla [Han and Rundquist, 1997]
$R_{B/G}$	oceano	contenuto di sostanze otticamente attive [Maul, 1995]

sa tra 16-17 °C e completa assenza di vento. Le condizioni di illuminazione, individuate dagli angoli zenitali (AZS) e azimutali (AAS) solari erano pari, rispettivamente, a 45.76° e 176.86°.

### *Parametri atmosferici*

Durante la mattinata in cui è avvenuto il sorvolo è stata misurata l'attenuazione della radiazione solare diretta, comprensiva della componente circumsolare diffusa, per mezzo dello fotometro EKO da cui, attraverso il metodo della retta di Langley [Maracci e Zibordi, 1990] è stato ricavato lo spessore ottico ( $d$ ) degli aerosoli per i quattro picchi di lunghezza d'onda (368, 500, 675 e 778 nm) in cui opera lo strumento. Nella Tabella 2 sono riportati gli spessori ottici dei costituenti l'atmosfera da cui, attraverso un'interpolazione che utilizza una funzione di potenza, è stato calcolato lo spessore ottico degli aerosoli a 550 nm. Questo parametro è richiesto in ingresso dal codice di trasferimento radiativo 6S [Vermote et al., 1997] utilizzato in questo studio per correggere i dati MIVIS.

In corrispondenza del sorvolo sono state inoltre misurate, con un Remote Cosine Receptor (RCR) connesso allo spettroradiometro FieldSpec FR, le componenti di irradianza solare diretta e diffusa, quest'ultima ottenuta oscurando con un pannello il disco solare.

I valori misurati sono stati confrontati con le componenti diretta e diffusa simulate dal 6S e, variando i valori percentuali degli aerosoli, si è cercato di minimizzare gli

scarti tra le irradianze simulate e quelle misurate: il modello di estinzione che meglio simula i valori di irradianza diretta e diffusa misurati con lo spettroradiometro è quello "marittimo" (Fig. 1). Questo modello si adatta bene alla stima della componente diffusa della radiazione solare su tutta la porzione di spettro, mentre tende a sovrastimare la componente diretta nella regione visibile dove l'attenuazione di tipo molecolare è maggiore. La Figura 1 mostra anche l'effetto di attenuazione della radiazione solare in corrispondenza degli assorbimenti di H<sub>2</sub>O (1.175, 1.375  $\mu$ m) e di O<sub>2</sub> (0.76  $\mu$ m).

### *Correzione atmosferica*

Il codice 6S è stato impiegato per correggere l'immagine MIVIS e validarla attraverso le misure spettroradiometriche raccolte col FieldSpec sulla spiaggia di Grado, in corrispondenza di quattro diversi siti. Per ciascun sito si sono misurate le riflettanze in corrispondenza dei vertici di un quadrato di circa 1.5 m di lato e il loro valore medio è stato confrontato col valore del pixel centrato sulla stazione. Le misure sono state eseguite dalla posizione nadirale, nel piano solare principale.

La simulazione con il 6S è stata fatta con valori degli angoli di vista zenitali (AZV) e azimutali (AAV) pari a 0° e 180°, pertanto le riflettanze sono calcolate secondo una visione nadirale per rispettare la geometria della misurazione a terra. D'altronde i quattro siti sono posizionati secondo un angolo di visione laterale del MIVIS di soli 5°

**Tabella. 2** - Spessori ottici dell'atmosfera misurati per la correzione atmosferica dei dati MIVIS.

<i>Lunghezza d'onda (nm)</i>	<i><math>d_{Rayleigh}</math></i>	<i><math>d_{Ozono}</math></i>	<i><math>d_{Aerosol}</math></i>
368	0.4945	0	0.5941
500	0.1391	0.0114	0.0529
675	0.0410	0.0144	0.0996
778	0.0231	0	0.0871
<b>550 (input 6S)</b>			<b>0.1323*</b>

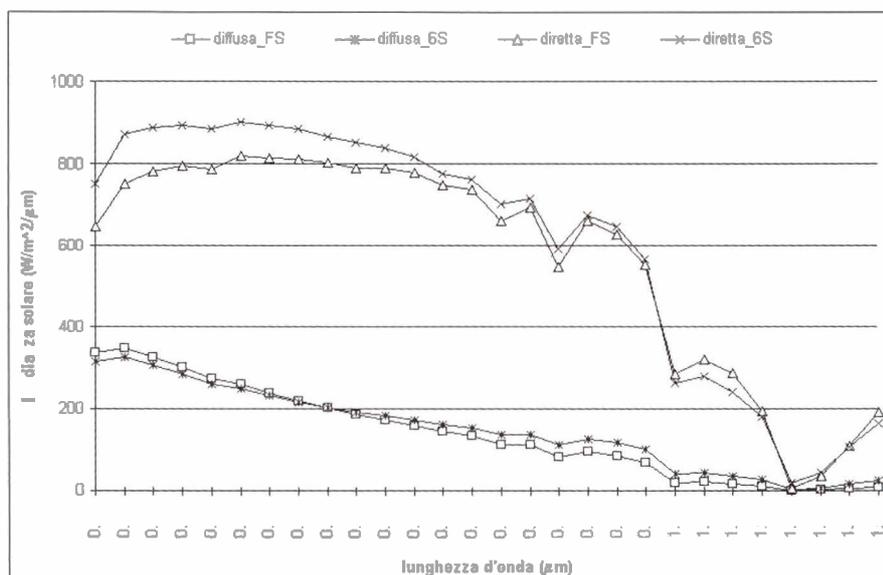


Figura 1 - Andamento delle componenti diretta e diffusa della radiazione solare: valori misurati col FieldSpec (nome\_FS) integrati sulle bande del primo e secondo spettrometro MIVIS e valori simulati dal 6S (nome\_6S) con modello "marittimo" di estinzione degli aerosoli.

(Fig. 3) e l'ipotesi di visione nadirale, secondo quanto dimostrato più avanti, è verosimile. La Tabella 3 riassume la bontà della correzione atmosferica, attraverso indici statistici ottenuti dal confronto fra le riflettanze MIVIS corrette atmosfericamente e le riflettanze FieldSpec integrate sulle bande MIVIS, relative ai quattro siti. La Figura 2 mostra invece un esempio dell'effetto della correzione atmosferica relativo alla stazione 1. Le riflettanze del primo spettrometro sono in accordo con i dati a terra ( $R^2 > 0.95$  per tutti e quattro siti) mentre i risultati relativi al secondo spettrometro non sono altrettanto buoni.

Limitando l'analisi al primo spettrometro si evince che, nel caso di un sorvolo a bassa quota (1500 m), il disturbo atmosferico sui dati iperspettrali è abbastanza ridotto (Fig. 2) anche se, spostandosi verso le lunghezze d'onda del giallo-rosso (0.58-0.70  $\mu\text{m}$ ) fino all'infrarosso (0.82  $\mu\text{m}$ ) la correzione atmosferica sembra divenire necessaria.

L'effetto di "innalzamento" delle riflettanze apparenti verso valori che diventano confrontabili con i dati a terra è dovuto alla drastica diminuzione dell'irradianza solare (diretta e diffusa) che raggiunge la superficie terrestre ad opera dei gas  $\text{O}_2$  (in particolare per le bande MIVIS 13 e 17) e  $\text{H}_2\text{O}$  (in particolare per le bande MIVIS 13, 15 e 20) responsabili dell'assorbimento del flusso solare radiante (vedi Fig. 1): il valore di questa grandezza è infatti uno dei denominatori nella formula del 6S per il calcolo della riflettanza [Vermote et al., 1997; Kaufman, 1989]. La diminuzione dei valori di irradianza solare al suolo è dovuto inoltre alla costante solare medesima che inco-

mincia a ridursi da 0.52  $\mu\text{m}$ .

I risultati apparentemente meno buoni relativi al secondo spettrometro meritano comunque un'analisi: interpolando infatti i dati MIVIS al fine di mediare gli andamenti discontinui che d'altronde interessano già le radianze al sensore non corrette atmosfericamente, si osserva un offset costante per tutte le lunghezze d'onda e per tutte e quattro le stazioni, pari a circa  $0.11 \pm 0.02$  in termini di coefficiente di riflessione. Tale valore potrebbe essere semplicemente legato ad un problema di inter-calibrazione tra il primo e il secondo spettrometro MIVIS oppure ad una scarsa "operatività" del modello di correzione atmosferica, assumendo che la firma spettrale delle sabbie misurate col FieldSpec sia il riferimento, che risulta in accordo con dati della letteratura [Bowker et al., 1985].

### Riflettanza bidirezionale

Per quanto riguarda il primo spettrometro, si sono infine confrontate le riflettanze delle sabbie per diverse geometrie di acquisizione delle immagini. Per uno studio completo della funzione di distribuzione della riflettanza bidirezionale (BRDF) bisognerebbe idealmente disporre del medesimo bersaglio visto da direzioni diverse nello stesso istante. Sfortunatamente i dati MIVIS permettono, ad un tempo  $t$ , una sola osservazione da una singola direzione. Pertanto, si è cercato di trovare la stessa tipologia di superficie in diverse porzioni dell'immagine, cosicché venga osservata da diversi angoli zenitali (AZV) [Wu et al., 1995]. Per quanto riguarda questo tipo di sorvolo l'angolo AZV poteva variare tra  $0^\circ$  al nadir sino a  $\pm 37.05^\circ$

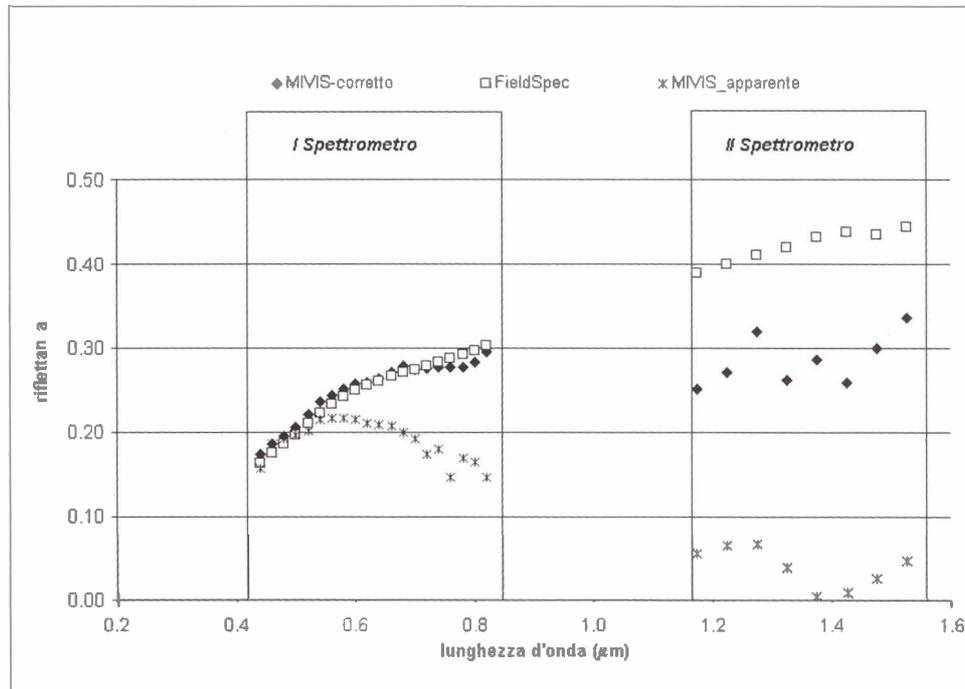
**Tabella 3** - Coefficienti di determinazione ( $R^2$ ) ed errori standard ( $S_y$ ) nella misura della riflettanza dai dati MIVIS calcolati con i dati FieldSpec a terra per i quattro siti e considerando i dati del primo e secondo spettrometro, insieme e separati.

Stazione	$R^2$ (I e II Spett.)	$s_y$ (I e II Spett.)	$R^2$ (I Spett.)	$s_y$ (I Spett.)	$R^2$ (II Spett.)	$s_y$ (II Spett.)
1	0.53	0.06251	0.98	0.00665	0.15	0.02401
2	0.58	0.04384	0.96	0.00547	0.21	0.01689
3	0.56	0.04634	0.95	0.00631	0.45	0.01292
4	0.67	0.04420	0.96	0.00617	0.41	0.01480

a bordo strisciata. La ricerca della stessa tipologia di superficie (sabbia asciutta, granulometria fine, composizione prevalentemente carbonatica, non smossa) ha permesso di identificare tre diverse geometrie di acquisizione con  $AZV=7^\circ-10^\circ-15^\circ$  e tutte con  $AAV=90^\circ$ . In tutti i casi le caratteristiche di illuminazione erano le stesse:  $AAS=176.86^\circ$  e  $AZS=45.76^\circ$ ; in queste condizioni l'angolo azimutale relativo ( $AAR$ ) tra il sole e la ripresa era di  $AAR=(AAS-AAV)=86^\circ.86$ . In prima approssimazione, si può concludere che il volo è avvenuto nel piano solare principale e la scansione nel piano ad esso perpendicola-

re (Fig. 3).

Al fine di analizzare la variabilità spettrale dei dati acquisiti secondo le 3 geometrie di visione zenitale è stato calcolato il fattore di anisotropia (ANIF), dividendo le riflettanze direzionali R7, R10 e R15 per la riflettanza acquisita secondo una geometria nadirale R0 [Sandmaier e Itten, 1999]. Il grafico (Fig. 4) illustra l'andamento del fattore ANIF in funzione della lunghezza d'onda. L'acquisizione con  $AZV=7^\circ$  è quella che, essendo molto prossima all'acquisizione nadirale, non presenta un eccessivo comportamento anisotropo; pertanto aver considerato  $AZV=5^\circ \approx 0^\circ$ ,



**Figura 2** - Confronto delle riflettanze corrette atmosfericamente del primo e secondo spettrometro MIVIS con i dati a terra (stazione 1) misurati nel corso della stessa mattinata con lo spettroradiometro FieldSpec. I valori "MIVIS-apparente" sono relativi alla riflettanza apparente calcolata dalle radianze del MIVIS, non corrette atmosfericamente ma solo per gli effetti dell'illuminazione.

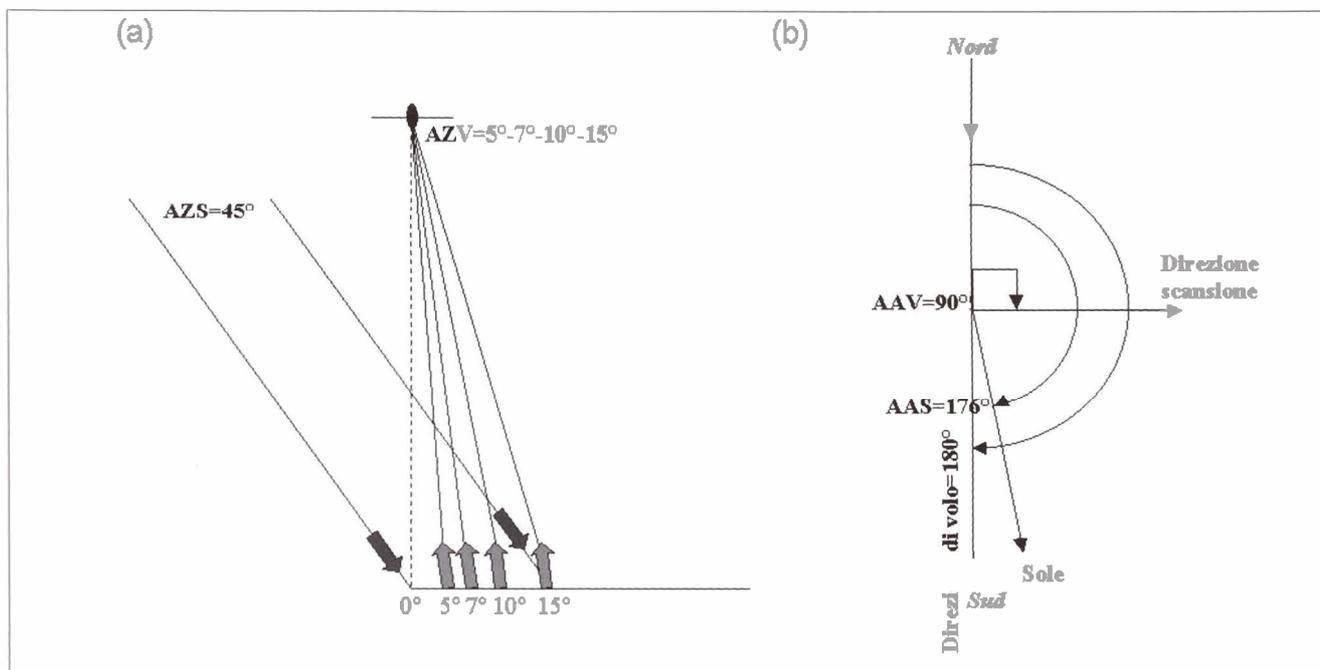


Figura 3 - Geometria della ripresa sole-superficie-sensore: (a) vista frontale; (b) vista dall'alto.

per il confronto tra i dati MIVIS corretti e i dati FieldSpec a terra, non è stata una grossolana approssimazione. Viceversa, allontanandosi dall'acquisizione nadirale, il fattore di anisotropia della superficie sabbia cambia sensibilmente. Si noti che per le geometrie  $AZV=10^\circ$  e  $AZV=15^\circ$ , l'andamento dell'indice ANIF è relativamente

molto simile (correlazione  $>0.97$ ): questo comportamento è stato osservato anche per superfici erbose con angoli di vista compresi tra  $0^\circ$  e  $+60^\circ$  [Sandmaier e Itten, 1999]. I fattori di anisotropia diminuiscono, in valore assoluto, con la lunghezza d'onda e con il crescere dell'angolo zenitale di visione. Per le definite condizioni d'illumina-

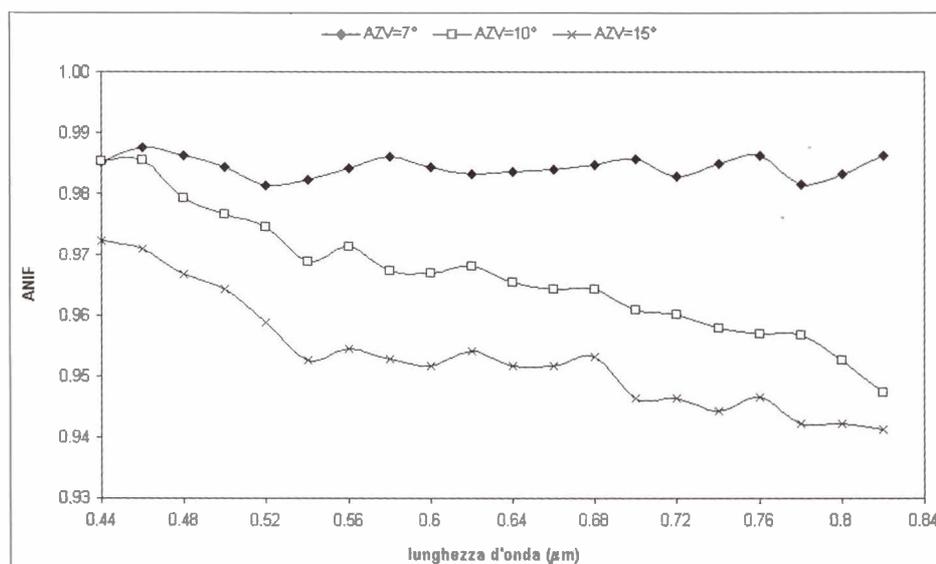


Figura 4 - Fattori di anisotropia (ANIF) per una superficie sabbiosa (non smossa, asciutta, di granulometria fine e composta prevalentemente da carbonati) in funzione della lunghezza d'onda calcolata con dati MIVIS acquisiti secondo 3 diverse geometrie di visione zenitale e con lo stesso azimut ( $AAV=90^\circ$ ), con zenit ed azimut del sole pari a  $45.76^\circ$  e  $176.86^\circ$  ( $\approx 180^\circ$ ).

zione, il comportamento della superficie osservata si allontana dall'ipotesi di distribuzione isotropa della radiazione riflessa all'aumentare dei due suddetti parametri. In particolare la radiazione riflessa dalla superficie reale è minore di quella riflessa dalla superficie lambertiana ottenuta ipotizzando di estendere il vettore della riflessione nadirale sulla semisfera.

## Conclusioni

Il presente lavoro ha mostrato l'effetto della correzione atmosferica sui dati iperspettrali MIVIS per il calcolo della riflettanza di una superficie sabbiosa di composizione prevalentemente carbonatica, localizzata nell'alto Adriatico, evidenziando la necessità di eseguire un'accurata correzione radiometrica per l'analisi quantitativa dei dati iperspettrali. L'effetto della correzione ha mostrato l'accuratezza del primo spettrometro del sensore nella stima della riflettanza della superficie, con condizioni di ripresa nadirali e normali condizioni d'illuminazione. Il confronto statistico tra i dati MIVIS, corretti atmosfericamente con il codice radiativo 6S, e le firme acquisite contemporaneamente con uno spettrometro da campo è risultato, infatti, molto buono per il primo spettrometro ( $R^2 > 0.95$  e  $S_y \sim 0.6\%$ ) e mediocre per il secondo ( $R^2 < 0.45$  e  $S_y \sim 2\%$ ). Inoltre, pur utilizzando un approccio molto semplice e per le definite condizioni d'illuminazione ( $AZS=45^\circ$  e  $AAS \sim 180$ ) è stato messo in evidenza il comportamento anisotropo del suolo sabbioso che tende a crescere in valore assoluto con le lunghezze d'onda e con l'angolo zenitale d'osservazione.

La ricerca sta proseguendo con l'approfondimento dell'analisi della funzione di distribuzione della riflettanza bidirezionale della superficie, l'effetto del comportamento anisotropo delle superfici sui dati MIVIS lo sviluppo di approcci per la relativa correzione.

## Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Ruggero Casacchia per i preziosi suggerimenti in fase di acquisizione e interpretazione delle firme spettrali e inoltre Alessandro de Carli e Mauro Musanti per il supporto nelle campagne di misura. La ricerca è stata co-finanziata dal progetto ASI "Valutazione dei nuovi sensori aerospaziali per il telerilevamento nell'area mediterranea".

## Bibliografia

**Bowker D. E., Davis R. E., Myrick D. L., Stacy K. e Jones W.** (1985) *Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies*. Reference Publication 1139, NASA, pp. 181.

**George D. G.** (1997) - *The airborne remote sensing of phytoplankton chlorophyll in the lakes and tans of the English Lake District*. Int. J. of Remote Sens., 18:1961-1975.

**Goodin D. G.** (1995) - *Mapping the surface radiation budget and net radiation in a sand hills wetland using a combined modeling/remote sensing method and Landsat Thematic Mapper imagery*. Geocarto Int., 2:19-29.

**Greuell W. e Ruyter de Wildt M.** (1999) - *Anisotropic reflection by melting glacier ice: measurements and parametrizations in Landsat TM bands 2 and 4*. Remote Sens. of Env., 70: 265-277.

**Han L. e Rundquist D. C.** (1997) - *Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: a case study in a turbid reservoir*. Remote Sens. of Env., 62: 253-261.

**Hill J., Udelhoven T., Schütt B. e Yair A.** (1998) - *Differentiating biological soil crusts in a sandy arid ecosystem based on hyperspectral data acquired with DAIS 7915*. 1st European Association of Remote Sensing Laboratories Workshop on Imaging Spectroscopy, University of Zurich, 6-8 October, pp. 229-236.

**Jong D.** (1998) - *Imaging spectrometry for monitoring tree damage caused by volcanic activity, California*. ITC J, 1: 1-10.

**Kallio K., Kutser T., Koponen S., Hannonen T. e Herlevi A.** (1998) - *Estimation of water quality in Finnish lakes by an airborne spectrometer*. Fifth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, San Diego, California, 5-7 October, Vol. II, pp. 333-340.

**Kaufman Y. J.** (1989) - *The atmospheric effect on remote sensing and its corrections*. In: Theory and applications of optical remote sensing. Ghassem Asrar Ed., N.A.S.A., Washington D.C, pp. 336-428.

**Knap W. H. e Carleen H. R.** (1998) - *Anisotropy of the reflected field over melting glacier ice: measurements in Landsat TM bands 2 and 4*. Remote Sens. of Env., 16:93-104.

**Leone A. P. e Sommer S.** (1999) - *Evaluation of MIVIS hyperspectral data for mapping soil degradation in upland ecosystem of Southern Italy*. Geocarto Int. 14: 35-43.

**Maracci G. e Zibordi G.** (1990) - *Atmospheric optical thickness from '2p radiometer' data*. Int. J. of Remote Sens., 11:1975-1961.

**Martonchik J. V., Diner D. J., Pinty B., Verstraete M. M., Myneni R. B., Knyazikhin Y. e Gordon H. R.** (1998) - *Determination of land and ocean reflective,*

---

*radiative and biophysical properties using multiangle imaging.* IEEE Trans. on Geo. and Remote Sens., 36: 1266-1281.

**Maul G. A.** (1985) - *Introduction to satellite oceanography.* Martinus Nijhoff Publisher Ed., Dordrecht, The Netherland, pp. 267-268.

**Running S. W., Baldocchi D. D., Turner D. P., Gower S. T., Bakwin P. S. e Hibbard K. A.** (1999) - *A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data.* Remote Sens. of Env., 70: 108-127.

**Sandmaier R. S. e Itten K. I.** (1999) - *A field goniometer system (FIGOS) for acquisition of hyperspectral BRDF data.* IEEE Trans. on Geo. and Remote Sens., 37: 978-986.

**Vermote E. F., Tanrè D., Deizè J. L., Herman M. e Morcrette J.J.** (1997) - *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview.* IEEE Trans. On Geosc. And Remote Sens., 35: 675-686.

**Wu A., Zhanqing L. e Cihlar J.** (1995) - *Effects of land cover type greenness on Advanced Very High Resolution Radiometer bidirectional reflectances: analysis and removal.* J. of Geo. Res., 100: 9179-9192.

# Il progetto Europeo MVRRS per lo studio dei *plumes* vulcanici mediante immagini MIVIS e misure a terra

Maria Fabrizia Buongiorno<sup>(1)</sup>, Sergio Pugnaghi<sup>(2)</sup>, Maria Paola Bogliolo<sup>(3)</sup>, Stefano Corradini<sup>(2)</sup>,  
Valerio Lombardo<sup>(1)</sup>, Luca Merucci<sup>(1)</sup> e Sergio Teggi<sup>(2)</sup>

Il progetto MVRRS (*Mitigation of Volcanic Risk by Remote Sensing*) finanziato dalla Comunità Europea nel triennio 1996-99 ha permesso uno studio dettagliato sui *plumes* emessi da Etna, Stromboli e Vulcano. In tale ambito, nel 1997, il gruppo di ricerca formato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e dall'Osservatorio Geofisico dell'Università di Modena ha effettuato una campagna di acquisizione di dati MIVIS sui vulcani siciliani, affiancata da un'estesa campagna a terra necessaria alla successiva analisi dati. Nel presente lavoro è presentato l'insieme dei dati acquisiti nella campagna del 1997, con particolare riferimento alle procedure di controllo e correzione radiometrica effettuate sui dati MIVIS. Saranno inoltre mostrate alcune valutazioni sulle stime di temperatura ed emissività ricavate dai dati MIVIS relativamente alla zona etnea.

## Introduzione

I vulcani attivi spesso presentano un continuo degassamento dai crateri sommitali che immettono nella bassa atmosfera una notevole quantità di ceneri, aerosol e gas (*plumes*). I gas prodotti sono generalmente costituiti da diverse proporzioni di H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e HCL più altre specie minori. A seconda delle condizioni meteorologiche locali e della generale circolazione di venti, possono anche portare a concentrazioni di gas nocivi o di metalli al suolo pericolose per le popolazioni residenti in aree limitrofe.

L'area test principale è quella relativa al più grande vulcano attivo europeo, il Monte Etna. L'Etna è situato in una zona popolosa della Sicilia orientale ed è tipicamente caratterizzato da attività sommitale quasi continua con sviluppo di un consistente *plume* di degassamento. Saranno comunque studiati anche i *plumes* dello Stromboli ed il *plume* prodotto dalle fumarole del Cratere della Fossa dell'isola di Vulcano.

<sup>(1)</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

<sup>(2)</sup> Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dip. Ingegneria, sez. Osservatorio Geofisico

<sup>(3)</sup> Istituto Superiore per la Prevenzione e Sicurezza del Lavoro (ISPESL)

Ricevuto il 08/06/00 - Accettato il 06/09/00

*The MVRRS (Mitigation of Volcanic Risk by Remote Sensing) Project, financed by the European Community during years 1996-99, allowed a detailed study of plumes emitted by Etna, Vulcano and Stromboli volcanoes. In the frame of this Project, in 1997, the research team formed by the Istituto Nazionale di Geofisica and by the Osservatorio Geofisico of the University of Modena carried out a campaign of MIVIS data acquisition on Sicilian volcanoes, supported by a ground campaign necessary to collect data for successive image analysis. In this work, the data set acquired during the 1997 campaign is presented, focusing on radiometric correction and checking procedures applied on MIVIS data. Moreover, some evaluations about the estimates of temperature and emissivity obtained from MIVIS data for the Etna area are reported.*

## Il progetto MVRRS

Il progetto MVRRS (*Mitigation of Volcanic Risk by Remote Sensing techniques*), finanziato dall'Unione Europea e coordinato dalla Open University (UK), si è svolto nel triennio 1996-1999 ed è stato dedicato allo sviluppo ed applicazione di moderne tecniche di telerilevamento per lo studio del rischio vulcanico relativo ai vulcani europei, utilizzando sistemi su piattaforme aeree e satellitari sia esistenti che future.

L'obiettivo primario del progetto è stato guidato da due considerazioni: 1) il recente rapido sviluppo della scienza del telerilevamento ed i numerosi e sofisticati sensori sviluppati per il prossimo futuro forniscono un potente e nuovo strumento per il monitoraggio dei vulcani; 2) La crescente densità della popolazione nelle vicinanze di vulcani attivi in Europa indica che il rischio vulcanico è in aumento. Questo rischio può comportare incidenti aerei dovuti a nubi eruttive ma anche pericoli per centri abitati e perdite di vite umane durante escursioni sulle strutture vulcaniche.

Molti dei sensori esistenti su satelliti orbitanti non sono stati realizzati con caratteristiche adatte alle osservazioni vulcaniche. In particolare i sensori con alte risoluzioni spaziali (LANDSAT TM, SPOT HRV) non hanno tempi di ricorrenza adatti all'osservazione di fenomeni con rapida evoluzione temporale e costi troppo elevati per monitoraggi di routine. I satelliti meteorologici sono quelli che forniscono dati a basso costo e disponibili in tempi rapidi,

ma con risoluzioni spaziali molto basse che in generale non permettono l'osservazione dei *plumes* troposferici emessi dal degassamento continuo di crateri sommitali e campi fumarolici. Il progetto MVRRS si è prefisso di studiare le emissioni vulcaniche di varia intensità (da nubi esplosive ad emissioni continue vapore e gas acidi) e di sviluppare dei sistemi di osservazione e monitoraggio basati su diverse tipologie di dati telerilevati e misure di campagna.

Lo scorso anno è stato messo in orbita il satellite americano TERRA (EOS-A1) che trasporta un certo numero di sensori dedicati all'osservazione dei fenomeni terrestri. Tra questi l'ASTER che possiede caratteristiche adatte all'osservazione dei vulcani. Il progetto MVRRS si è pertanto occupato anche di sviluppare conoscenze specifiche per l'utilizzo di questi nuovi sensori in Europa.

Lo studio di immagini telerilevate dei *plumes* vulcanici relativi all'Etna, Stromboli e Vulcano è stato affidato, nel progetto MVRRS, a ricercatori dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologica (INGV), dell'Osservatorio Geofisico dell'Università di Modena (OGUM), dell'Università di Cambridge e L'Università du Littoral. Il gruppo di lavoro si è dedicato allo sviluppo dei seguenti obiettivi:

- 1) Sviluppare metodologie efficaci e stabili per la stima della SO<sub>2</sub> emessa dal plume vulcanico dell'Etna, utilizzando dati telerilevati da sensori aerei iperspettrali e misure atmosferiche;
- 2) Organizzare una campagna area di acquisizione di immagini telerilevate sui vulcani siciliani e la relativa campagna di acquisizione di dati atmosferici ed altri dati di superficie;
- 3) Quantificare il flusso di SO<sub>2</sub> nel tempo al fine di analizzare le variazioni in funzione dell'attività eruttiva dell'Etna;
- 4) Iniziare uno studio di fattibilità per la stima della CO<sub>2</sub> emessa nel plume dell'Etna mediante immagini telerilevate da aereo nell'Infrarosso;
- 5) Trasferire le metodologie sviluppate su dati d'aereo a dati telerilevati da satellite;
- 6) Sviluppare un modello di trasferimento radiativo più accurato per l'ambienti vulcanici utilizzando i codici MODTRAN e 6S.

### Stato della ricerca sulle emissioni gassose con sistemi di telerilevamento

Dal 1993 sono stati eseguiti diversi studi basati su dati telerilevati da aereo con spettrometri ad immagine operanti nel range 0.4-14 micron per stimare la concentrazione ed il flusso di alcuni gas contenuti in *plumes* vulcanici troposferici [Realmuto et al. 1994; Buongiorno et al., 1997; Teggi et al., 1999]. Le tecniche utilizzate si basano sull'utilizzo di codici di trasferimento radiativo LOWTRAN/MODTRAN [Berk et al., 1989] e dati atmosferici ottenuti mediante radiosondaggi locali e misure di radian-

za rilevate da sensori remoti. Gli studi fin qui realizzati hanno dimostrato la validità del metodo per la stima della SO<sub>2</sub> nel *plume* dell'Etna e per il Kilauea (Hawaii) [Realmuto, 1997] e dei relativi flussi.

Recentemente si è cercato di valutare la possibilità di stimare anche il contenuto di CO<sub>2</sub> emesso dall'Etna. La tecnica è stata provata sui dati acquisiti sull'Etna durante la campagna MIVIS 94 [Bianchi et al., 1994; Bogliolo et al., 1996] e successivamente su quelli della campagna MIVIS 97 che hanno dimostrato di avere caratteristiche più idonee al successo di questa metodologia di stima (migliori condizioni atmosferiche e migliore radiometria dei dati). Lo studio ancora in corso sembra dimostrare che sia applicabile per vulcani come l'Etna che emettono *plumes* con un elevatissimo contenuto in CO<sub>2</sub> (35.000 t/d da Allard et al., 1991) in quanto la sensibilità di questi strumenti dipende dalla possibilità di rilevare differenze nei valori di radianza misurati dal sensore. Per altri vulcani la stima della CO<sub>2</sub> e di altri gas emessi in quantità limitate può essere realizzata mediante l'utilizzo di interferometri (FTIR) operanti da terra o da piattaforme aeree (elicottero o aereo) che sono in grado di rilevare la presenza di vari gas vulcanici anche in piccole quantità. Misure condotte con l'FTIR sono state effettuate a Montserrat, Etna, Vulcano, Stromboli e Masaya ed hanno dimostrato che questo strumento può essere utilizzato per misurare i rapporti SO<sub>2</sub>:HCL, HCL:HF ed HF:SiF<sub>4</sub> [Francis et al. 1995, 1996, 1998]. Un FTIR da aereo è stato sperimentato per analizzare i gas di scarico di jet, dimostrando un'elevata sensibilità di misura sia per la stima dei gas che per determinare la temperatura delle emissioni [Tank et al., 1995 e 1997].

Parallelamente allo sviluppo delle metodologie di stima basate su immagini telerilevate sono stati affrontati vari studi sulla dispersione del *plume* al fine di costruire delle carte di rischio dovute a concentrazione elevate di gas letali (SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) [Pareschi et al., 1997, 1999b] e fornire modelli tridimensionali dello sviluppo di *plumes* gassosi e nubi vulcaniche.

### La campagna MIVIS 1997

Nell'ambito del progetto MVRRS è stata organizzata una campagna multi-disciplinare per acquisire informazioni sulle caratteristiche del *plume* dell'Etna e di raccogliere dati sui parametri di superficie (temperatura, emissività e riflettanza delle diverse superfici del vulcano).

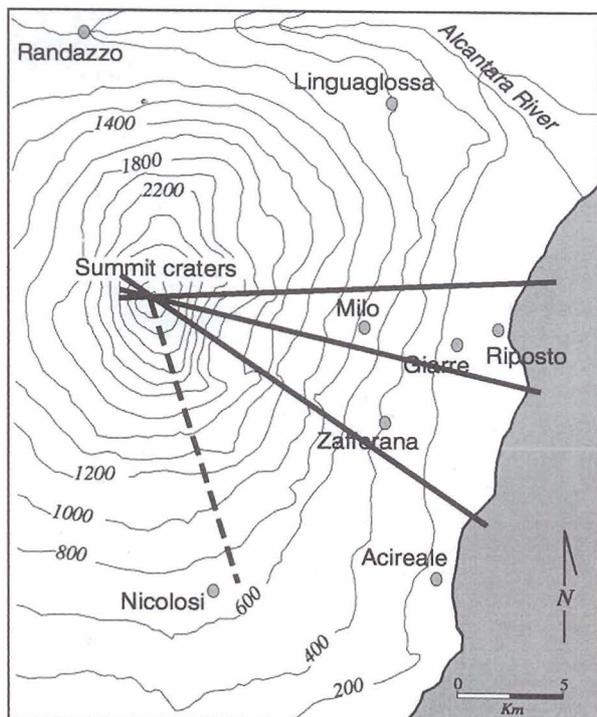
La campagna prevedeva l'acquisizione di diverse strisciate del MIVIS di giorno e di notte su Etna ed Isole Eolie in una finestra temporale di 10 giorni (vedi Tabella 1). I piani di volo sono stati studiati secondo le necessità di ogni particolare osservazione, infatti sia le condizioni climatiche che quelle topografiche hanno richiesto particolari geometrie di volo.

Sull'Etna sono state effettuate 4 missioni durante il giorno ed una di notte al fine di osservare il *plume* di SO<sub>2</sub>. Il

**Tabella 1 - Voli MIVIS 1997**

Area	Obiettivo	N. strisciate	Data	Ora locale	Quota a.s.l.
Etna	SO <sub>2</sub>	4	11/06	9:44-10:15	6500 m
Etna	SO <sub>2</sub>	2	12/06	9:00-10:15	6500 m
Vulcano	Mapping	3	14/06	10:00-10:20	2000/3500 m
Stromboli	Mapping/SO <sub>2</sub>	2	14/06	11:00-11:05	3500 m
Vulcano	Thermal	2	15/06	2:15-3:10	2000/3500 m
Stromboli	Thermal	1	15/06	3:30	3500 m
Etna	Thermal/SO <sub>2</sub>	4	15/06	3:55-4:25	5500 m
Etna	SO <sub>2</sub>	4	16/06	10:25-10:40	5500 m
Etna	SO <sub>2</sub>	3	17/06	9:40-10:00	5500 m

piano di volo generale ha previsto tre strisciate poste radialmente sulla struttura del vulcano. Oltre alle tre strisciate disposte lungo l'asse del *plume* ne è stata aggiunta una quarta per coprire l'area delle misure di calibrazione sul fianco sud-est del vulcano (Fig. 1). La quota di volo era stata fissata inizialmente a 6500 metri s.l.m. e poi modificata a 5500 m s.l.m. per problemi al sistema di registrazione. La risoluzione al suolo delle immagini variava da 6.4 a 13 m (quota di volo 6500 m) e da 4.4 a 11 m (quota di volo 5500 m). L'area coperta da ogni sin-



**Figura 1** - Esempio della disposizione delle strisciate MIVIS per l'Etna: la linea tratteggiata rappresenta la striscia sui siti di calibrazione; quella solida le strisciate lungo l'asse del *plume*.

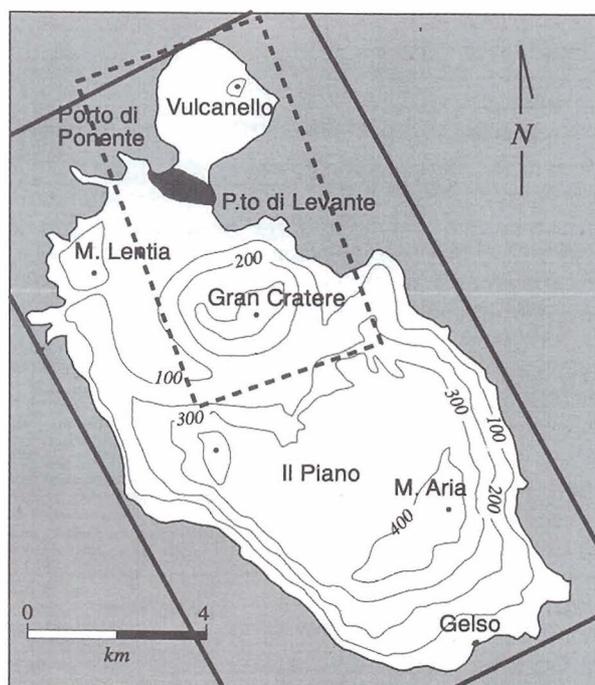
gola *swath* in dipendenza dalla quota topografica e' stata di 7.8 km sulla costa e 3.7 ai crateri (quota di volo 5500 m).

Sulle Eolie è stato fatto un volo diurno e uno notturno su Vulcano e Stromboli. Il piano di volo diurno sull'isola di Vulcano ha previsto una striscia a bassa quota (2000 m s.l.m.) sul Cratere della Fossa e Vulcanello per lo studio dettagliato dei campi fumarolici e due striscie stereoscopiche a 3500 m s.l.m (Fig. 2). Il piano di volo notturno ha previsto una striscia a 2000 m s.l.m. ed una a 3500 m s.l.m. La risoluzione spaziale è stata di 4.-3.3 m (quota di volo 2000 m) e 7-6 m (quota di volo 3500 m); la *swath* e' stata di 4.8 - 4.4 Km.

L'isola di Stromboli è stata sorvolata una volta di giorno ed una di notte a 3500 m con una risoluzione spaziale tra 7 e 5.2 m (Fig. 3).

### Campagna di acquisizione di dati a terra

In concomitanza della campagna MIVIS è stata effettuata un'estesa campagna di acquisizione di dati a terra per la calibrazione e validazione dei dati MIVIS. Molte misure sono state eseguite contemporaneamente ai voli MIVIS e quindi hanno richiesto un notevole sforzo logistico per assicurare il massimo della sovrapposizione con i voli aerei considerando le difficoltà ambientali del vulcano. Oltre alle misure coordinate direttamente dall'ING, dall'OGUM e dall'Istituto Internazionale di Vulcanologia



**Figura 2** - Vulcano: area coperta dal sorvolo MIVIS: linea solida area compresa dal volo a 3500 m di quota; linea tratteggiata area coperta dal volo a 2000 m di quota.

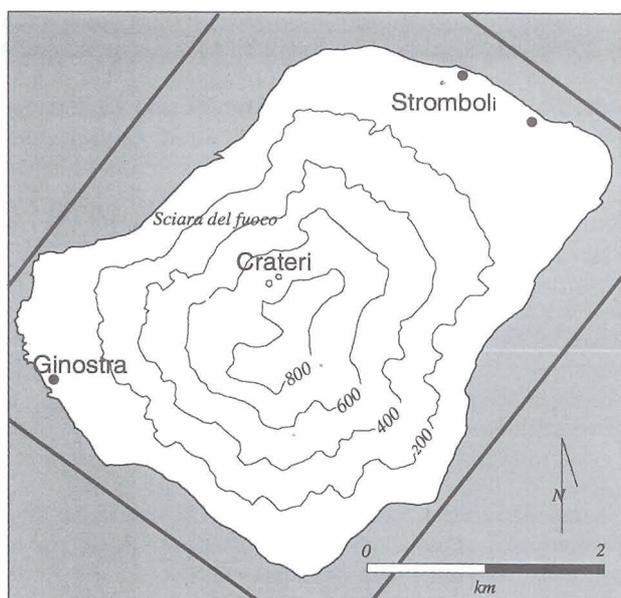


Figura 3 - Stromboli: copertura delle strisciate MIVIS.

di Catania, sono state effettuate misure da Milton Keynes (Open University, U.K.) e da Patrick Allard (LSCE, Laboratoire des Sciences du Climat et Environnement, CEA-CNRS, Orme des Merisiers, France). In particolare

Allard ha effettuato dei voli aerei con campionamento diretto del *plume* di Etna e Stromboli ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e particolato) contemporaneamente al MIVIS (i dati sono ancora in corso di studio).

In Tabella 2 è riportato l'elenco delle misure a terra eseguite durante la missione MIVIS, una completa descrizione delle misure e' riportata in Buongiorno et al., 1999.

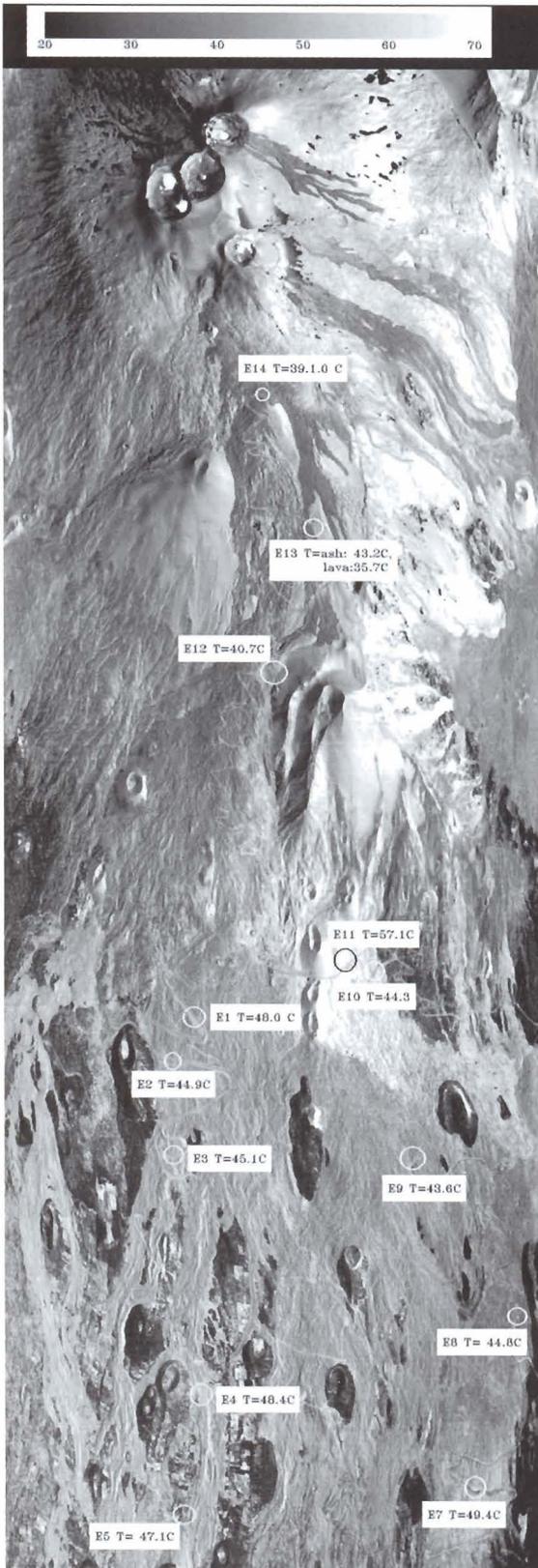
### Misure di temperatura

Le misure di temperatura superficiale sono servite a validare la procedura di calcolo delle temperature superficiali a partire dai dati MIVIS, basata su algoritmi sviluppati da diversi autori [Barducci e Pippi, 1996; Kealy e Hook, 1993; Realmuto, 1990]. Infatti, la stima della temperatura superficiale insieme all'emissività costituiscono i termini di superficie necessari ai fini della stima della concentrazione di  $\text{SO}_2$  nel *plume* [Teggi et al., 1999]. Le misure sono state effettuate per mezzo di un termometro ad infrarosso (EVEREST Intersc. Inc.), programmando l'emissività della superficie a 0.99. Le misure sono state effettuate puntando lo strumento verticalmente verso la superficie alla distanza di 1 metro dal suolo. Per compensare la differenza di dimensione tra il pixel del MIVIS (4-13 m) sono state acquisite 10 misure distribuite nell'area test. Una media delle 10 temperature ha fornito il valore attribuito ad ogni sito (Fig. 4).

L'analisi dei dati acquisiti il 12/06/1997 ha mostrato una

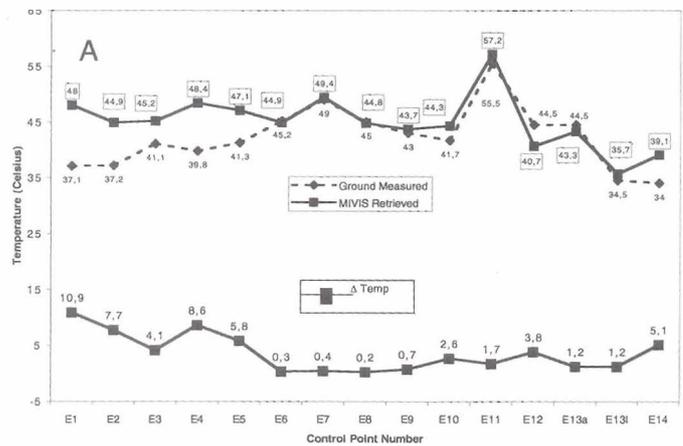
Tabella 2 - Misura a terra effettuate durante i voli MIVIS 1997.

TIPO DI MISURA	UTILIZZO	SITI	COINCIDENZA CON VOLI MIVIS
Profili verticali atmosferici mediante radiosondaggi	Modello del contributo radiativo atmosferico e per il modello 3D del <i>plume</i> etneo; stime di flusso $\text{SO}_2$ .	ETNA VULCANO	SI
Spettri di superfici laviche nel VIS-IR	Caratterizzazione spettrale della superfici interessate dai voli MIVIS, validazione degli algoritmi per il calcolo della riflettanza a partire da dati MIVIS, librerie spettrali di rocce.	ETNA VULCANO	PARZIALE
Misure di temperatura con termometri nell'IR	Misure di temperatura su siti specifici per le calibrazioni dei dati MIVIS, per la validazione dei modelli atmosferici.	ETNA VULCANO	SI
Stime di $\text{SO}_2$ con spettrometro nel TIR	comparazioni con le stime estrapolate con il MIVIS ed il COSPEC	ETNA	SI
Misure di parametri meteorologici al suolo	Parametri atmosferici al livello del suolo, informazioni sulle condizioni meteo alla quota del <i>plume</i> (stazioni installate nell'area sommitale)	ETNA	SI
Misure fotometriche	Informazioni sulle caratteristiche ottiche dell'atmosfera e del <i>plume</i>	ETNA	SI
Misure COSPEC	Stime di riferimento per le concentrazioni di $\text{SO}_2$ stimate dal MIVIS, andamento temporale del flusso di $\text{SO}_2$ emesso dall'Etna.	ETNA VULCANO	PARZIALE
Raccolta di campioni per misure di laboratorio	Acquisizione di spettri nel TIR per la validazione dei dati MIVIS e costruzione di una banca di spettri di emissività di rocce vulcaniche.	ETNA VULCANO	NO

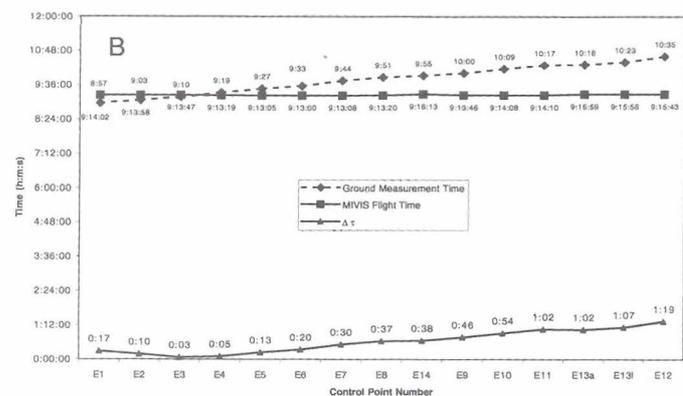


**Figura 4** - Immagine MIVIS dell'Etna che mostra la temperatura diurna relativa al 12/06/1997 sulla quale sono rappresentati punti di controllo sia per la temperatura che per la riflettanza ed emissività (Concessione SMA 528 del 4.11.97).

buona correlazione tra misure a terra e valori stimati dal MIVIS. Nel grafico mostrato in Figura 5a si osserva che all'inizio delle misure le condizioni ambientali (vento in superficie, ombre dei rilievi dovute all'ora dei sorvoli) hanno contribuito a fornire un'elevata differenza tra valori stimati e quelli misurati (Fig. 5 b). Con il trascorrere del tempo e con il progressivo stabilizzarsi delle condizioni termiche della superficie, le misure al terreno mostrano deviazioni molto contenute rispetto a quelle stimate dal



**Figura 5a** - Grafico che mostra l'andamento delle temperature misurate a terra con quelle calcolate dai dati MIVIS, la parte inferiore del grafico mostra la differenza tra la due temperature.



**Figura 5b** - Grafico che mostra i rispettivi orari di misura per le temperature a terra, la parte inferiore mostra le differenze tra i due tempi di acquisizione.

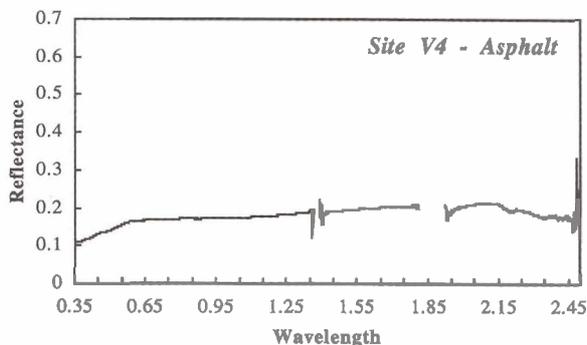


Figura 6a - Spettro di riflettanza medio di un campione di asfalto a Vulcano acquisito con il Fieldspec.

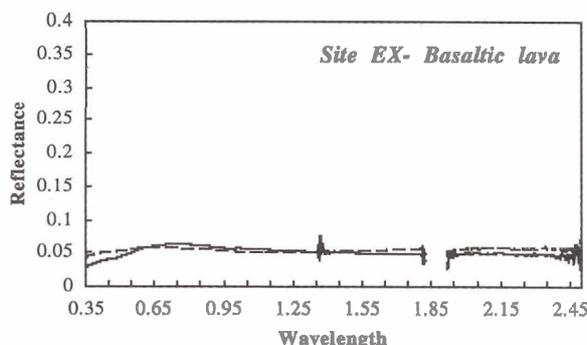


Figura 6b - Spettro di riflettanza relativo alla colata del 1985 dell'Etna acquisito dal Fieldspec; la linea solida è relativa alla superficie alterata; la linea tratteggiata alla superficie fresca.

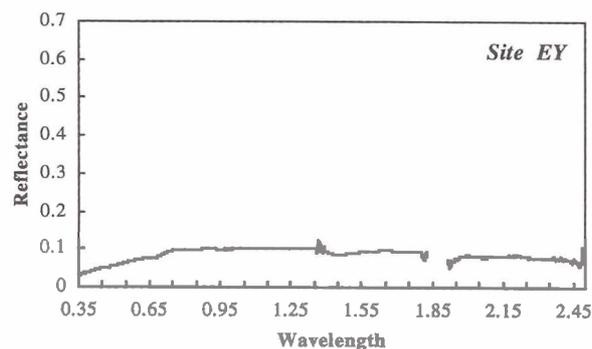


Figura 6c - Spettro di riflettanza acquisito con il Fieldspec e relativo alla colata del 1792 dell'Etna.

MIVIS (Fig. 5a), anche considerando la maggiore differenza di tempo tra le due misure. Le considerazioni sull'instabilità delle temperature misurate a terra e la difficoltà realizzazione di misure contemporanee alla ripresa

delle immagini aeree suggeriscono per le future campagne di validazione dei dati l'installazione di punti di misura fissi con un sistema di registrazione automatico dei dati di temperatura.

### Misure spettrali su rocce vulcaniche

Le misure di spettri di riflettanza sono state effettuate in parte durante la campagna 1997 ed in parte completate successivamente in laboratorio.

Le misure di riflettanza sono state eseguite con il FieldSpec FR (Analytical Spectral Devices Inc.). Lo strumento copre un range spettrale da 350-2500 nm con tre spettrometri separati; il primo ha un passo di campionamento di 1.4 nm; mentre gli altri due hanno un passo di campionamento di 2 nm. Il campo di vista è di 25°.

Gli spettri di riflettanza assoluta (Fig. 6 a,b,c) sono stati ottenuti dal rapporto tra radianza della superficie e radianza di un pannello bianco di riferimento (Spectralon), moltiplicato per la riflettanza assoluta del pannello.

Data la mancanza di strumentazione da campagna, spettri di emissività di superfici laviche nel range 8-14 micron sono stati eseguiti in laboratorio su campioni raccolti sulle colate ben individuabili sulle immagini MIVIS. Gli spettri sono stati successivamente ricampionati sui canali del MIVIS al fine di facilitare la comparazione degli spettri di laboratorio con quelli stimati dalle immagini e confrontati con gli spettri di emissività ricavati dalle immagini.

### Conclusioni

La campagna di misure eseguita nell'ambito del progetto MVRRS ha raccolto una notevole quantità di informazioni sulle caratteristiche atmosferiche e superficiali dei vulcani siciliani al fine di studiare principalmente le emissioni gassose. Il lavoro di comparazione dei diversi dati raccolti non è ancora terminato, soprattutto per quello che riguarda lo studio dei dati campionati da P. Allard. Per quanto riguarda le immagini MIVIS, sono attualmente in fase di studio i dati ripresi nel VIS-IR, per la determinazione dei parametri ottici del plume dell'Etna e possibilmente di Stromboli.

I dati MIVIS hanno costituito un utilissimo banco di prova per lo sviluppo delle procedure di stima della SO<sub>2</sub> e per l'inizio dello studio sulla possibilità di stimare la CO<sub>2</sub> vulcanica; nel prossimo futuro gli algoritmi di stima saranno testati su dati da satellite (ASTER, piattaforma EOS-A1) per dare inizio ad una fase di monitoraggio periodico delle emissioni di SO<sub>2</sub> nel plume etneo.

Nel sottolineare l'importanza delle misure con sistemi di telerilevamento aereo ci auguriamo che il MIVIS possa rappresentare uno dei principali strumenti di indagine e sviluppo della comunità scientifica italiana ed europea; naturalmente ciò implica che lo stato di calibrazione e funzionamento dello strumento debba essere garantito e mantenuto nel tempo.

Nel 2001 è anche prevista una nuova campagna di acqui-

sizione dati sui vulcani siciliani per la sperimentazione di nuovi sensori aerotrasportati nell'ambito di un progetto ASI/ESA.

## Bibliografia

Allard P., Carbonelle J., Dajlevic D., Le Bronec J., Morel P., Robe M.C., Maurenas J.M., Pierret R.F., Martins D., Sabroux J.C., e Zettwoog P. (1991) - *Eruptive and diffusive emission of CO<sub>2</sub> from Mount Etna*. Nature, 351: 387-390.

Barducci A. e Pippi I. (1996) - *Temperature and emissivity retrieval from remotely sensed images using the "Grey Body Emissivity" method*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34(3): 681-691.

Berk, A., Bernstein L.S. e Robertson D.C. (1989) - *MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOW-TRAN7*. AFGL Technical Report GL-TR-89-0122, USA.

Bianchi R., Marino C.M. e Pignatti, S. (1994) - *Airborne hyperspectral remote sensing in Italy*. Proc. EUROPTO Series 'Recent Advances in Remote Sensing and Hyperspectral remote sensing' SPIE, Roma (Italy), September 27-29 1994, 2318: 29-37.

Bogliolo, M.P., Buongiorno M.F., Salvi S., Teggi S., Pugnaghi S., Abrams M.J., Pieri D.C., Realmuto V.J. e Caltabiano T. (1996) - *Ground measurements of physical parameters at Vulcano Island and Mount Etna in support of the MIVIS remote sensing campaign "Sicilia-94"*. Pub. n.577, Istituto Nazionale di Geofisica, Rome, Italy.

Buongiorno M.F., Bogliolo M.P., Caltabiano T., Carrere V., Corradini S., Merucci L., Pugnaghi S., Salvi S., Sterni A. e Teggi S. (1999) - *MVRRS Campaign: MIVIS mission on Sicilian volcanoes and ground measurements*. Quaderni di Geofisica, 7: 1-90.

Buongiorno M.F., Bogliolo M.P., Salvi S., Teggi S., Pugnaghi S. e Sterni A. (1997) - *Combining optical airborne image data and atmospheric measurements to estimate and map SO<sub>2</sub> in tropospheric volcanic plumes*. Proc. of the 4th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications, Firenze, Italy, 227-242.

Francis P.W., Burton M., e Oppenheimer C. (1998) - *Remote measurements of volcanic gas compositions by solar occultation spectroscopy*. Nature, 396: 567-570.

Francis P.W., Chaffin C., Maciejewski A.J.H e Oppenheimer C. (1996) - *Remote determination of SiF<sub>4</sub> in volcanic plumes: a new tool for volcano monitoring*. Geophys. Res. Lett, 23: 249-252.

Francis P.W., Maciejewski A., Chaffin C., Oppenheimer C. e Caltabiano T. (1995) - *SO<sub>2</sub> and HCl ratios in the plumes of Mt. Etna and Vulcano determined by Fourier Transform Spectroscopy*. Geoph. Res. Letters, 22: 1717-1720.

Kealy, P.S. e Hook S.J. (1993) - *Separating Temperature and Emissivity in Thermal Infrared Multispectral Scanner Data: Implications for Recovering Land Surface Temperatures*. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 31: 1155-1164.

Pareschi M.T., e Ranci M. (1997) - *Risk evaluation of SO<sub>2</sub> emission at Vulcano island (Sicily)*. Air Pollution V, Modelling, Monitoring and Management., Editors: H.Power, T.Tirabassi, C.A.Brebbia, Computational Mechanics Publications, 323-332.

Pareschi M.T., Ranci M., Valenza M. e Graziani G. (1999) - *The Assessment of Volcanic gas hazard by means of numerical models: an example from Vulcano Island (Sicily)*. Geophysical Research Letters, 26: 1405-1408.

Realmuto V.J. (1990) - *Separating the effects of temperature and emissivity: Emissivity spectrum normalization*. In: Proc. 2nd Thermal Infrared Multispectral Scanner (TIMS) Workshop, pp. 310-316, E.A. Abbots, JPL Publ. 90-55.

Realmuto V.J., Abrams M.J. Buongiorno M.F. e Pieri C.D. (1994) - *The use of multispectral thermal infrared image data to estimate the sulfur dioxide flux from volcanoes: A case study from Mount Etna, Sicily, July 29, 1986*. Journal of Geophysical Research, 99(B1): 481-488.

Realmuto V.J., Sutton A.J. e Elias T. (1997) - *Multispectral thermal infrared mapping of sulfur dioxide plumes: A case study from the East Rift Zone of Kilauea Volcano, Hawaii*. J. Geophys. Res., 102: 15057-15072.

Tank V., Haschberger P., Lindermeir E., e Matthern K. (1995) - *FTIR airborne measurement of aircraft jet exhaust gas emissions under cruise conditions*. Proc. SPIE 2506: 359-367.

Tank V. (1997) - *Propagation of Calibration Errors in FT-IR Emission Spectroscopy of Gases*. Microchimica Acta, Suppl. 14, Springer Verlag 1997, 311-313.

Teggi S., Bogliolo M.P., Buongiorno M.F., Pugnaghi S. e Sterni A. (1999) - *Evaluation of SO<sub>2</sub> emission from Mt. Etna using diurnal and nocturnal MIVIS TIR remote sensing images and radiative transfer models*. Journal of Geophysical Research, 104: 20069-20079.

# Analisi spettrale di dati MIVIS: un caso di studio sull'isola di Vulcano

Maria Paola Bogliolo<sup>(1)</sup>, Sergio Teggi<sup>(2)</sup>, Maria Fabrizia Buongiorno<sup>(3)</sup>,  
Stefano Corradini<sup>(2)</sup>, Valerio Lombardo<sup>(3)</sup>, Luca Merucci<sup>(3)</sup> e Sergio Pugnaghi<sup>(2)</sup>

Si descrive un caso di studio mirato alla valutazione delle potenzialità del MIVIS in applicazioni di caratterizzazione della superficie. Il data-set è costituito dai canali del Visibile e Infrarosso riflesso di un'immagine del cono vulcanico della Fossa (isola di Vulcano), trasformata in riflettanze superficiali. Lo studio comprende: una valutazione della qualità dei dati, l'applicazione di tecniche di classificazione spettrale, il confronto degli spettri MIVIS di alcune unità classificate con spettri misurati in laboratorio. I risultati mostrano come sia stato possibile individuare diversi tipi di depositi e alterazioni ed estrarre informazioni chimico-mineralogiche basandosi sull'identificazione delle bande di assorbimento, seppure con alcune limitazioni.

## Introduzione

L'identificazione di un particolare costituente della superficie nei dati acquisiti mediante telerilevamento dipende dalla possibilità di ricostruire la sua firma spettrale [Hunt, 1980]; ciò è condizionato da vari fattori, quali il tipo di sostanza da individuare e la sua abbondanza relativa, le caratteristiche dello strumento, le condizioni di acquisizione e il tipo di elaborazione a cui l'immagine viene sottoposta [Vane e Goetz, 1988].

La peculiarità dei dati telerilevati iperspettrali consiste nell'elevato contenuto di informazione spettrale; per sfruttare al meglio questo aspetto, è necessaria una valutazione accurata della riflettanza della superficie e la scelta di un approccio deterministico all'interpretazione, basato sull'analisi spettrale pixel per pixel.

E' inoltre importante valutare la perdita di informazione spettrale causata dal rumore (strumentale e ambientale); infatti, l'interpretazione degli spettri estratti è impossibile se il livello di rumore è elevato rispetto alle dimensioni (profondità e larghezza) delle bande di assorbimento diagnostiche [Smith e Curran, 1996].

<sup>(1)</sup>Istituto Superiore per la Prevenzione E la Sicurezza del Lavoro, Via Fontana Candida, 1  
00040 Monteporzio Catone (Roma)

<sup>(2)</sup>Osservatorio Geofisico - Università di Modena e Reggio Emilia, Via Campi, 213/A - 41100 Modena

<sup>(3)</sup>Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Via di Vigna Murata, 605 - 00143 Roma

Ricevuto il 08/06/00 - Accettato il 06/09/00

*A case study aimed to evaluate MIVIS capability in applications of surface characterisation is described. The data set includes the Visible and reflected Infrared channels of an image acquired on the "La Fossa" volcanic cone (Vulcano island), transformed in surface reflectance. The main steps are: data quality evaluation, application of spectral classification techniques, comparison of MIVIS spectra of the classified units with laboratory spectra. The results show that it was possible to detect different deposits and alterations and to extract chemical-mineralogical information based on identification of the absorption bands, even if with some limitations.*

In questo lavoro, un approccio del tipo sopra descritto è stato usato sui dati acquisiti dal sensore MIVIS [Bianchi et al., 1994] per studiarne le potenzialità in applicazioni di caratterizzazione della superficie. Lo studio si è sviluppato nelle seguenti fasi: 1) una analisi della qualità dei dati MIVIS in termini di rapporto segnale/rumore (SNR); 2) l'applicazione di tecniche di classificazione spettrale sui dati trasformati in riflettanze superficiali assolute [Bogliolo et al., 1998]; 3) l'analisi degli spettri delle unità classificate, per testare l'individuabilità delle bande di assorbimento e dedurre informazioni sulla composizione dei materiali.

## Caso studiato e dati utilizzati

L'immagine in esame è stata ripresa dal MIVIS sull'isola di Vulcano [Bianchi et al., 1996] il 21 luglio 1994 alle ore 8:15 solari da una quota di 2000 m s.l.m., con una risoluzione al suolo tra i 4 e i 3.2 m. Dall'immagine è stata ritagliata una finestra di 480 x 710 pixel in corrispondenza del cono vulcanico della Fossa; i canali utilizzati sono quelli dei primi 3 spettrometri (canali 1 + 92; 0.441+2.473  $\mu$ m). L'immagine grezza (in DN) è stata impiegata per le valutazioni relative al rumore, mentre per l'interpretazione è stata usata l'immagine in riflettanza superficiale assoluta ottenuta mediante l'inversione di un modello di trasferimento radiativo applicato sull'immagine calibrata [Bogliolo et al., 1998].

In questo studio si è fatto uso anche di dati ausiliari messi a disposizione dal Progetto L.A.R.A., fra i quali i risultati delle prove al banco ottico effettuate immediatamente

prima e dopo la campagna di misure e i fattori di calibrazione dell'immagine. Sono state inoltre impiegate misure di riflettanza spettrale effettuate in laboratorio con uno spettroradiometro FieldSpec [ASD Inc.], operante tra 0.35 e 2.5  $\mu\text{m}$ , su campioni raccolti nell'area in studio, e la libreria spettrale di minerali dell'U.S.G.S.

La Fossa è un cono vulcanico alto 390 m, costituito prevalentemente da prodotti piroclastici [De Astis et al., 1997]; l'ultimo episodio eruttivo risale al 1888-1890, mentre attualmente è presente un'intensa attività fumarolica sul bordo e sui fianchi interni del cratere [Frazzetta et al., 1983]. In alcuni affioramenti sono presenti associazioni mineralogiche diverse dai silicati, originate per interazione con l'acqua durante le eruzioni, per alterazione idrotermale o per precipitazione da fasi gassose [Capaccioni e Coniglio, 1995]. Tali mineralizzazioni presentano in genere firme spettrali caratteristiche nell'intervallo 0.4 – 2.5  $\mu\text{m}$  [Hunt e Ashley, 1979], a differenza delle rocce ignee inalterate; le nostre analisi spettrali sono state quindi mirate a distinguere e caratterizzare questi tipi di deposito.

### Valutazioni della qualità dei dati

Le prestazioni del sensore durante l'acquisizione sono state valutate effettuando, sul data-set a disposizione, stime di rumore che sono poi state confrontate con le misure al banco ottico ottenute per la velocità di scansione (25 Hz) usata durante la ripresa dell'immagine. Sono stati applicati e messi a confronto tre metodi riportati in letteratura. Il primo considera la deviazione standard delle dark current misurate linea per linea durante l'acquisizione [Carrere e Abrams, 1988]. Il secondo impiega la deviazione standard di un'area omogenea sull'immagine [Gao, 1993]; nel nostro caso è stata selezionata un'area di 60 pixel in corrispondenza del mare, in modo da minimizzare la variabilità inter-pixel che può condurre a sovrastime [Curran e Dungan, 1989]. Il terzo metodo è quello proposto da Gao [1993]: l'immagine viene divisa in piccole celle, per ciascuna delle quali viene calcolata la deviazione standard; il valore più frequente viene considerato una stima del rumore, in base all'assunzione che l'immagine contenga un gran numero di aree omogenee di piccola estensione [Gao, 1993; Roger e Arnold, 1996]. L'applicazione di questo metodo sull'immagine MIVIS ha rivelato che la dimensione delle celle è un parametro critico per l'ottenimento di stime attendibili e deve essere scelta in funzione della risoluzione dell'immagine: nel caso studiato, celle di 3x3 pixel sono risultate più appropriate di quelle 4x4 utilizzate da Gao su immagini AVIRIS.

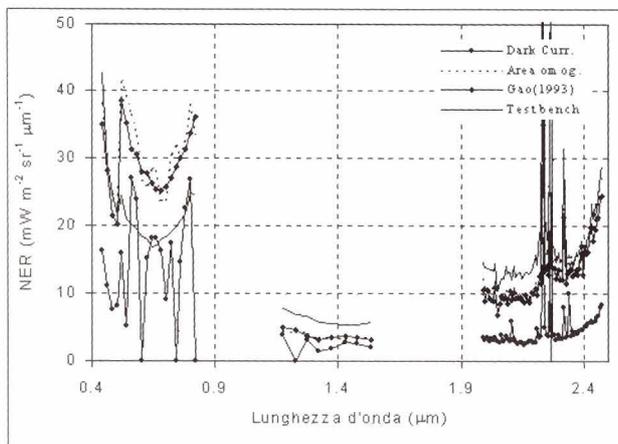
I valori di rumore sono stati calcolati sui dati grezzi (DN) e sono stati poi convertiti in Noise Equivalent Radiances (NER) usando i fattori di calibrazione dell'immagine. In Figura 1 sono riportati i risultati ottenuti: i metodi dell'area omogenea e di Gao hanno fornito valori molto simili,

che approssimano bene le misure al banco ottico nel secondo e terzo spettrometro; l'unica discrepanza rilevante si ha per i canali 5-20 (0.520 - 0.822  $\mu\text{m}$ ); ciò può indicare che la variabilità naturale della scena non è stata completamente eliminata, ma non si possono escludere differenze strumentali, in quanto, proprio per questi canali, sono state usate amplificazioni diverse durante le riprese e al banco ottico. Il metodo delle dark current sembra invece sottostimare il rumore in tutto l'intervallo campionato.

Gli effetti della calibrazione sul livello di rumore dell'immagine sono stati valutati ripetendo le stime sui dati in radianza: in questo caso il metodo dell'area omogenea ha fornito più indicazioni: la NER varia molto poco, eccetto che in alcuni canali del primo spettrometro dove compare un rumore sistematico (non rilevabile con il metodo di Gao, 1993), riscontrabile anche visivamente sull'immagine (line striping). I canali affetti da questo fenomeno corrispondono a quelli in cui è stata rilevata una maggiore deviazione standard delle dark current (Fig. 1).

La qualità dei dati è stata quantificata in termini di rapporto Segnale/Rumore (SNR), calcolato dividendo la radianza media di un'area di circa 100 pixel per la NER ottenuta al banco ottico. Sono stati considerati una superficie a bassa riflettanza (piroclastiti; riflettanze da 4% a 10%) ed una ad alta riflettanza (depositi alterati; riflettanze da 50% a 30%). Questi casi estremi definiscono il campo di SNR incontrato durante la successiva fase di interpretazione. Altri tipi di superficie non geologici sono stati esclusi perché non oggetto di studio in questo lavoro. I risultati sono mostrati in Figura 2. Sebbene i canali del primo spettrometro abbiano un livello di rumore più elevato (Fig. 1), il SNR è alto [Smith e Curran, 1996] anche per la superficie scura, grazie agli elevati valori di irradianza solare a queste lunghezze d'onda. I canali 25 e 26 del secondo spettrometro hanno un SNR particolarmente basso, perché coincidono con il forte assorbimento atmosferico intorno a 1.4  $\mu\text{m}$ . Nel terzo spettrometro il SNR è ovunque basso; ciò è dovuto ad una combinazione di fattori quali l'elevato rumore strumentale, la bassa riflettanza delle superfici in esame, la bassa irradianza solare (peggiolata dall'ora di ripresa) e l'assorbimento atmosferico. In particolare, il SNR diminuisce drasticamente per lunghezze d'onda maggiori di 2.35  $\mu\text{m}$ , dove il rumore aumenta rapidamente (Fig. 1) e la trasmittanza atmosferica è molto bassa. Per i tre canali 59, 63 e 70 i valori bassissimi di SNR sono invece dovuti al loro mancato funzionamento (Fig. 1).

Le curve di SNR hanno costituito la base per stabilire i criteri di applicazione di tecniche di riduzione del rumore e di selezione dei canali da utilizzare nell'analisi spettrale. Tutti i canali del terzo spettrometro sono stati sottoposti a filtraggio spettrale applicando la tecnica della Minimum Noise Fraction [Green et al., 1988], a partire dalle stime di rumore ottenute con la tecnica di Gao



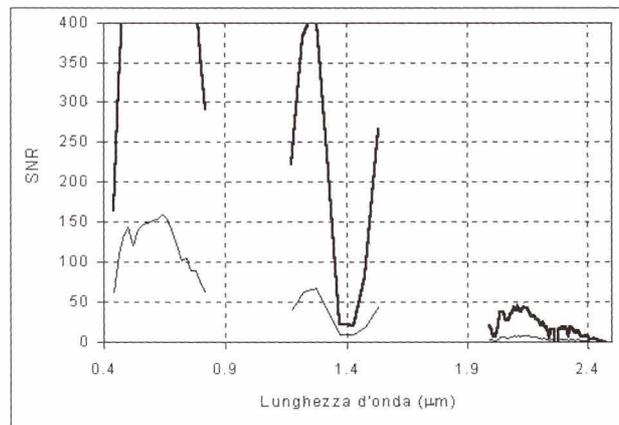
**Figura 1** - Noise Equivalent Radiance per l'immagine MIVIS in esame, calcolate con diversi metodi (vedi testo). Le misure al banco ottico sono state eseguite dopo la campagna di riprese con una frequenza di scansione (25 Hz) pari a quella usata durante l'acquisizione dell'immagine. I valori ottenuti con il metodo di Gao [1993] e dell'area omogenea sono calcolati sui dati grezzi (DN).

[1993]. Sono stati inoltre eliminati i canali aventi un SNR vicino a 0 (tutti i canali al di là di 2.35 μm (75-92) e i già citati canali del secondo e terzo spettrometro).

### Analisi spettrale

I risultati migliori nella mappatura dei depositi legati a processi di alterazione sono stati ottenuti applicando separatamente due tecniche di classificazione spettrale, lo Spectral Angle Mapping (SAM) [Kruse et al., 1993] e il Linear Spectral Unmixing (LSU) [Boardman, 1989], all'immagine in riflettanze, e combinandone successivamente i risultati per costruire la carta tematica. Gli spettri puri (end-members) che queste tecniche richiedono sono stati selezionati sull'immagine in base alle indicazioni ottenute durante i rilievi sul campo e dall'esame degli spettri di riflettanza. La tecnica LSU ha consentito di separare le principali unità superficiali: vegetazione verde, vegetazione secca, lave e piroclastiti non alterate, depositi con zolfo, tufi cineritici rossastri, depositi di alterazione idrotermale; il mare e le ombre residue (ombre gettate) sono state mascherate prima dell'elaborazione. Il metodo SAM è stato usato per mettere in evidenza il diverso grado di alterazione all'interno delle unità alterate già classificate.

La mappatura delle principali unità alterate (Fig. 3) è stata ottenuta tramite una composizione RGB dei risultati dello Spectral Unmixing relativi agli end-members alterazioni idrotermali (rosso), tufi cineritici (verde) e depositi con zolfo (blu); gli altri colori (es. giallo) indicano la presenza contemporanea, in diverse percentuali, di queste unità. L'immagine del quinto canale (0.520 μm) è stata usata

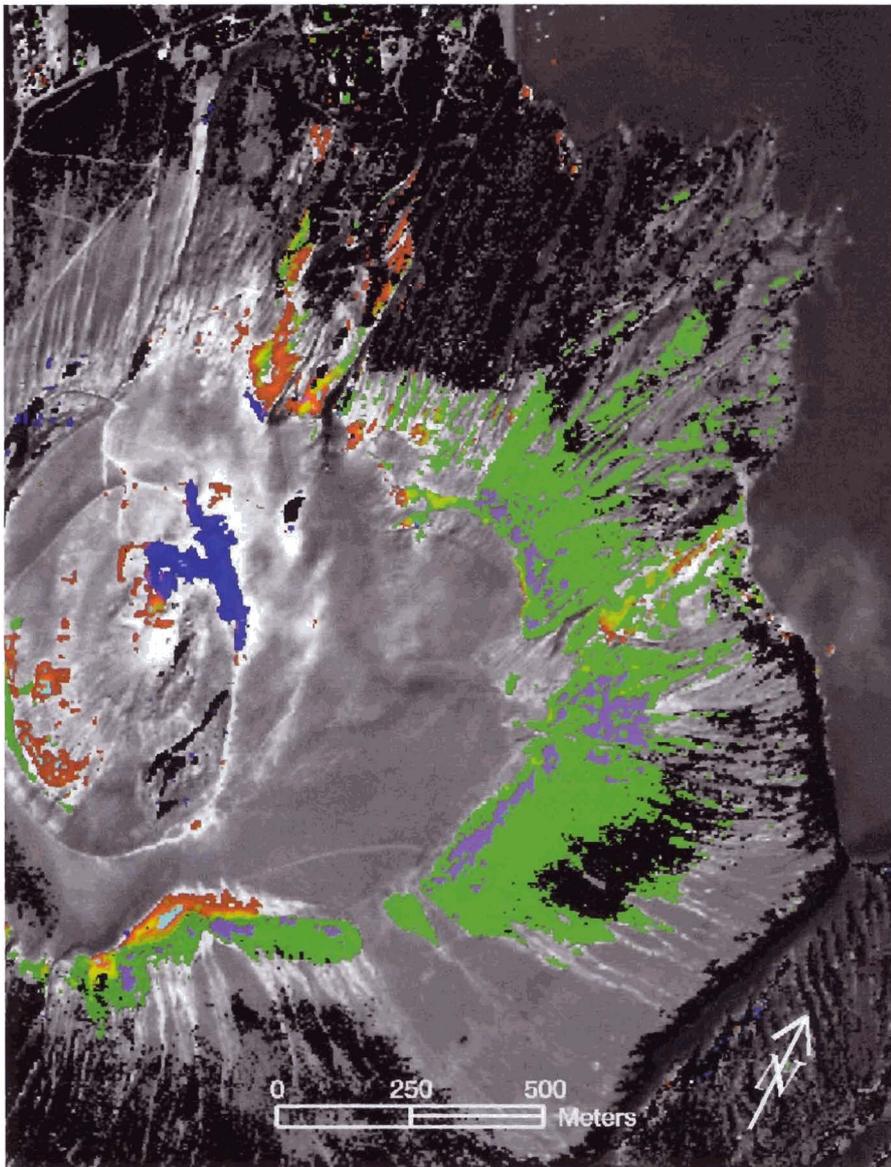


**Figura 2** - Stime del rapporto segnale/rumore per due superfici geologiche con valori di riflettanza estremi per l'area in esame:  $0.3 \leq \rho \leq 0.5$  (linea spessa), e  $0.04 \leq \rho \leq 0.1$  (linea sottile). Nel grafico sono stati tagliati i valori alti per mettere in maggiore evidenza i valori critici del terzo spettrometro.

come sfondo dove le quantità di questi materiali scendono al di sotto di una certa soglia; la vegetazione è stata mascherata utilizzando i risultati dello Spectral Unmixing relativi agli end-members della vegetazione (verde e secca). A questa immagine sono state sovrapposte due classi ottenute con la tecnica SAM: il viola corrisponde a tufi cineritici con minori quantità di ossidi di ferro e argille, caratterizzati da uno spettro più piatto; il celeste corrisponde ad una sub-facies delle alterazioni idrotermali in cui gli assorbimenti dovuti agli ioni ferrici sono più accentuati.

In corrispondenza delle unità classificate, sono stati estratti degli spettri rappresentativi mediando i valori di piccole aree campione; questi spettri sono stati messi a confronto con quelli misurati in laboratorio su campioni provenienti dagli stessi punti (Fig. 4) e analizzati per estrarne informazioni chimico-mineralogiche, anche facendo uso di spettri di minerali provenienti da librerie spettrali (U.S.G.S.).

Gli spettri ottenuti dalle immagini MIVIS presentano alcune anomalie che riducono l'accordo con gli spettri di laboratorio. Il principale elemento anomalo è l'abbassamento delle riflettanze nei canali del terzo spettrometro, che dà luogo negli spettri a un largo affossamento tra 2.1 e 2.3 μm, la cui intensità appare proporzionale alla quantità di radiazione riflessa. Questo elemento non è spiegabile con un assorbimento superficiale, in quanto modifica lo spettro di materiali, quali la vegetazione, la cui firma spettrale è ben nota. Inoltre non è imputabile alle correzioni atmosferiche in quanto si è verificato che essa è già presente negli spettri di riflettanza apparente, inoltre non vi è correlazione fra la curva di trasmittanza atmosferica

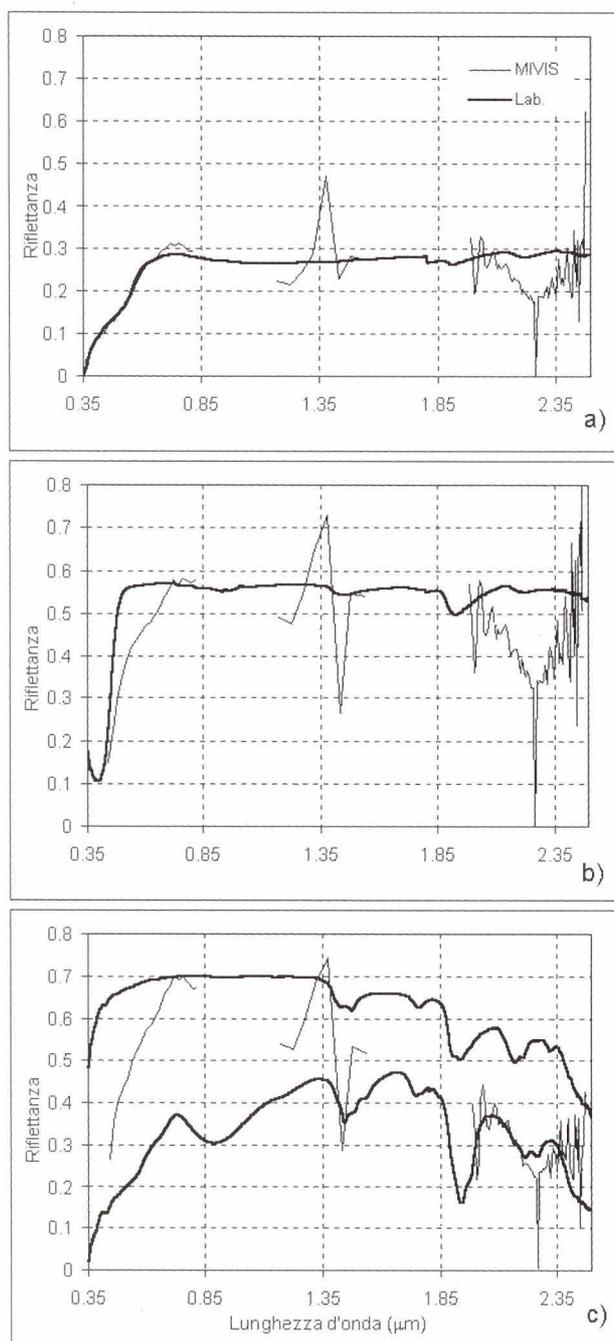


**Figure 3** – La Fossa (isola di Vulcano): risultato della classificazione spettrale per la mappatura dei depositi legati a processi di alterazione (legenda: vedi testo). (Concessione SMA 591 del 22.12.95)

e i valori di riflettanza corretta ( $r = -0.16$ ), e infine è riscontrabile anche nei canali 41 + 68 in cui l'effetto atmosferico è debole (trasmissione atmosferica  $> 0.8$ ). Un altro elemento rilevante è l'elevato livello di rumore dei canali del terzo spettrometro, e l'inattendibilità dei valori ottenuti per alcuni canali del secondo spettrometro, dovuta in entrambi i casi ai bassi valori di SNR. Nonostante i problemi sopra menzionati, l'accordo tra gli spettri MIVIS e quelli di laboratorio è generalmente buono, anche se dipende dal tipo di superficie considerata. Esso è infatti molto buono su formazioni omogenee (come è il caso dei tufi cineritici rossastri) mentre vi sono differenze significative sulle unità in cui la presenza di differenti mineralizzazioni distribuite su una piccola area

fa sì che gli spettri di laboratorio non siano ben rappresentativi dello spettro telerilevato.

Lo spettro di laboratorio dei tufi cineritici rossastri (Fig. 4a) presenta, in forma debole, gli assorbimenti tipici degli ossidi e idrossidi di ferro (caduta della riflettanza al di sotto di  $0.55 \mu\text{m}$ , debole spalla a  $0.65 \mu\text{m}$ , l'ampia banda centrata a circa  $0.92 \mu\text{m}$ ) e dei minerali argillosi (assorbimento a  $2.22 \mu\text{m}$ ) [Hunt et al., 1971a; Hunt et al., 1973], nel complesso indicativi di un debole grado di alterazione. Capaccioni e Coniglio [1995] descrivono questa facies come un deposito di wet-surge, caratterizzato dalla presenza di ioni  $\text{Fe}^{3+}$ , acqua e minerali argillosi originati da fenomeni di alterazione sin-deposizionale. Il corrispondente spettro MIVIS è molto simile, ma l'assorbi-



**Figura 4** - Confronto tra spettri di riflettanza estratti dai dati MIVIS (linea sottile) e misure di laboratorio su campioni (linea spessa). (a) Tufi cineritici. (b) Depositi con zolfo. (c) Depositi di alterazione idrotermale.

mento presente nell'Infrarosso è imputabile, almeno in parte, all'anomalia già citata.

I depositi di zolfo marcano la presenza di aree fumaroli-

che attive; lo spettro misurato in laboratorio (Fig. 4b) presenta il netto calo di riflettanza sotto i 0.5  $\mu\text{m}$  caratteristico dello zolfo [Hunt et al., 1971b]. Lo spettro MIVIS è molto meno netto e mostra assorbimenti legati alla presenza di ioni ferrici che non sono presenti nello spettro di laboratorio, misurato su un campione di zolfo cristallino. I depositi alterati presenti sul fianco Sud del cono della Fossa sono il risultato dell'attività fumarolica sui tufi cineritici rossastri e mostrano spettri molto caratteristici (Fig. 4c). In particolare, gli spettri misurati in laboratorio su diverse sub-facies di questa unità sono chiaramente dominati dalla presenza di alunite (bande di assorbimento a 1.43 e 1.47  $\mu\text{m}$ , 1.76  $\mu\text{m}$ , 2.17 e 2.21  $\mu\text{m}$ , e 2.32  $\mu\text{m}$ ) e jarosite (il piccolo e netto assorbimento a 0.43  $\mu\text{m}$ , la spalla a circa 0.65  $\mu\text{m}$ , assorbimenti a 0.90  $\mu\text{m}$ , 1.47 e 1.53  $\mu\text{m}$ , 2.215 e 2.26  $\mu\text{m}$ ). Questi minerali sono solfati idrati, rispettivamente di alluminio e di ferro, e sono fra i prodotti tipici della cosiddetta facies di alterazione "advanced argillitic" [Hunt e Ashley, 1979]. Lo spettro MIVIS è interpretabile come una composizione di queste due specie, ma molte delle bande descritte non sono individuabili perché fuori dall'intervallo di operatività dello strumento (0.43  $\mu\text{m}$ , 0.90  $\mu\text{m}$ , 1.76  $\mu\text{m}$ ), o perché vicine alle principali bande di assorbimento del vapore acqueo (1.43, 1.47, 1.53  $\mu\text{m}$ ), oppure perché mascherate dal rumore (2.32  $\mu\text{m}$ ); inoltre, il forte decremento delle riflettanze tra 2.1 e 2.3  $\mu\text{m}$  riscontrato sull'immagine in esame maschera gli assorbimenti in questa regione.

## Conclusioni

In questo lavoro abbiamo analizzato un'immagine MIVIS nelle bande del Visibile e Infrarosso riflesso per studiare le potenzialità dello strumento in applicazioni di caratterizzazione della superficie.

Data l'importanza della qualità dei dati per il riconoscimento spettrale degli elementi di superficie, buona parte del lavoro è stata mirata a studiare questo aspetto. Diversi metodi di stima del livello di rumore sono stati messi a confronto, per trovare un metodo adatto ad ottenere valutazioni per ogni singola immagine, indipendentemente dalle prove di laboratorio: il metodo di Gao [1993] e il metodo dell'area omogenea appaiono affidabili, essendo in buon accordo con le misure al banco ottico. Le discrepanze ottenute nei primi canali non invalidano l'utilizzo pratico di questi metodi poiché questo intervallo è raramente caratterizzato da valori critici di SNR.

I valori di rapporto segnale/rumore ottenuti sono legati alle condizioni particolarmente sfavorevoli del caso studiato, quali la bassa riflettanza delle rocce vulcaniche e la bassa elevazione solare durante l'acquisizione; ciononostante, alcuni risultati possono essere considerati di validità generale. Tutti i canali del primo e secondo spettrometro, con esclusione del 25 e 26, possono essere considerati utili per l'analisi spettrale; più attenzione deve essere posta ai canali del terzo spettrometro. Il basso rapporto

segnale/rumore trovato in questi canali è dovuto all'azione combinata di vari fattori: bassa irradianza solare, bassa riflettanza delle superfici geologiche a queste lunghezze d'onda, scarsa ampiezza di banda, assorbimento atmosferico. Per rendere questo intervallo utile per l'analisi spettrale è necessario applicare ai dati acquisiti in questi canali delle tecniche di riduzione del rumore. I canali che acquisiscono a lunghezze d'onda maggiori di 2.35  $\mu\text{m}$  (75-92) hanno valori di SNR talmente bassi che il loro impiego deve essere valutato caso per caso.

La mappatura delle facies alterate sul cono vulcanico della Fossa è stata ottenuta con tecniche di classificazione spettrale, impiegando end-members estratti dall'immagine; la tecnica del Linear Spectral Unmixing è risultata utile per separare classi con spettri molto diversi tra loro; lo Spectral Angle Mapping ha consentito di evidenziare variazioni più sottili, ed è stato usato per raffinare la classificazione. Il risultato dimostra le potenzialità del MIVIS per la mappatura della superficie; il dettaglio ottenuto nella carta prodotta rappresenta un incremento di informazione sia rispetto alle carte geologiche disponibili [Keller, 1970], sulle quali i depositi fumarolici e le alterazioni superficiali non sono riportati, sia rispetto ai risultati ottenuti in passato con altri sensori aerotrasportati a minor risoluzione [Bianchi et al., 1995].

Dall'analisi condotta sugli spettri si può concludere che è possibile, con il MIVIS, estrarre informazioni chimico-mineralogiche. E' stato possibile individuare molte bande di assorbimento significative, soprattutto nell'intervallo acquisito dal primo spettrometro, anche se alcuni elementi spettrali importanti per l'identificazione di minerali di alterazione sono stati individuati solo sugli spettri misurati in laboratorio, perché posizionati fuori dall'intervallo di operatività del MIVIS o perché mascherati dal rumore.

## Bibliografia

- Bianchi R., Marino C. M. e Pignatti S.** (1994) - *Airborne hyperspectral remote sensing in Italy*. Proc. of the European Symp. on Satellite Remote Sensing. EUROPTO Series, 2318:29-37.
- Bianchi R., Pignatti S. e Cavalli R. M.** (1995) - *Analisi di dati multispettrali (TMS) dell'isola di Vulcano (Isole Eolie)*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 5:23-34
- Bianchi R., Cavalli R. M., Fiumi L., Marino C. M. e Pignatti S.** (1996) - *Airborne remote sensing: results of two years of imaging spectrometry for the study of environmental problems*. Remote Sensing'96. Spiteri (Ed.) Balkema, Rotterdam, 269-273.
- Bogliolo M.P., Teggi S., Buongiorno M.F. e Pugnaghi S.** (1998) - *Retrieving ground reflectance from MIVIS data: a case study on Vulcano island (Italy)*. 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, EARSeL, Paris, 403-416.
- Boardman J. W.** (1989) - *Inversion of imaging spectrometry data using singular value decomposition*. Proc. IGARSS'89, 12th Canadian Symp. on Remote Sensing, 4:2069-2072.
- Capaccioni B. e Coniglio S.** (1995) - *Varicoloured and vesiculated tuffs from La Fossa volcano, Vulcano island (Aeolian Archipelago, Italy): evidence of syndepositional alteration processes*. Bull. Volcanology 57:61-70.
- Carrere V. e Abrams M.** (1988) - *An assessment of AVIRIS data for hydrothermal alteration mapping in the Goldfield district, Nevada*. Proc. AVIRIS Performance evaluation Workshop. G. Vane Ed., NASA/JPL Pub. 88-38, pp. 134-154.
- Curran P. J. e Dungan J.** (1989) - *Estimation of signal-to-noise: a new procedure applied to AVIRIS data*. IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens., 27:620-628.
- De Astis G., La Volpe L., Peccerillo A. e Civetta L.** (1997) - *Volcanological and petrological evolution of Vulcano island (Aeolian arc, southern Tyrrhenian Sea)*. J. Geophysical Research, 102:8021-8050.
- Frazzetta G., La Volpe L. e Sheridan M. F.** (1983) - *Evolution of the Fossa cone*. J. Volcanology Geothermal Research, 17: 329-360.
- Gao B.** (1993) - *An operational method for estimating signal to noise ratios from data acquired with imaging spectrometers*. Remote Sens. Environ., 43: 23-33.
- Green A. A., Berman M., Switzer P. e Craig M. D.** (1988) - *A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 26: 65-74.
- Hunt G. R.** (1980) - *Electromagnetic radiation: the communication link in remote sensing*. In: Remote Sensing in Geology (B. Siegal and A. Gillespie, Eds.) Wiley, New York, Chap. 2.
- Hunt G. R., Salisbury J. W. e Lenhoff C.** (1971) - *Visible and Near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides*. Modern Geology, 2: 195-205.
- Hunt G. R., Salisbury J. W. e Lenhoff C.** (1971) - *Visible and Near-infrared spectra of minerals and rocks: IV. Sulphides and sulphates*. Modern Geology, 3:1-14.

---

**Hunt G. R., Salisbury J. W. e Lenhoff C. (1973)** - *Visible and Near-infrared spectra of minerals and rocks: VI. Additional silicates*. *Modern Geology*, 4:85-106.

**Hunt G. R. e Ashley R. P. (1979)** - *Spectra of altered rocks in the Visible and Near infrared*. *Economic Geology* 14: 1613-1629.

**Keller J. (1970)** - *Carta geologica dell'isola di Vulcano*. Scala 1:10000. Lit. Artist. Cart. Firenze.

**Kruse F. A., Lefkoff A. B., Boardman J. B., Heidebrecht K. B., Shapiro A. T., Barloon P. J. e Goetz A. F. H. (1993)** - *The Spectral Image Processing System*

*(SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data*. *Remote Sens. Environ.*, 44: 145-163.

**Roger R. E. e Arnold J. F. (1996)** - *Reliably estimating the noise in AVIRIS hyperspectral images*. *Int. J. Remote Sensing*, 17: 1951-1962.

**Smith G. M. e Curran P. J. (1996)** - *The signal-to-noise ratio (SNR) required for the estimation of foliar biochemical concentrations*. *Int. J. Remote Sensing*, 17: 1031-1058.

**Vane G. e Goetz A.F.H. (1988)** - *Terrestrial Imaging Spectroscopy*. *Remote Sens. of Environment*. 24:1-29.

# Tecniche d'inversione per la stima dell'emissione di anidride solforosa dell'Etna dalle immagini telerilevate dal MIVIS nell'infrarosso termico

Sergio Pugnaghi<sup>(1)</sup>, Maria Paola Bogliolo<sup>(2)</sup>, Maria Fabrizia Buongiorno<sup>(3)</sup>,  
Valerio Lombardo<sup>(3)</sup>, Luca Merucci<sup>(3)</sup>, Stefano Corradini<sup>(1)</sup> e Sergio Teggi<sup>(1)</sup>

Nell'ambito del Progetto Europeo *Mitigation of Volcanic Risk by Remote Sensing* (MVRRS) è stata effettuata una campagna di misure nell'area etnea (SICILIA '97) e diversi gruppi di ricerca hanno effettuato misure a terra contemporaneamente ai voli dell'Infrared and Visible Imaging Spectrometer (MIVIS). Nella presente memoria vengono descritte una soluzione analitica dell'equazione del trasferimento radiativo ed un algoritmo, basato sulla tecnica Split-Window, per la determinazione del contenuto colonnare di SO<sub>2</sub> nel plume dell'Etna. Entrambe queste procedure derivano da una precedente soluzione numerica dell'equazione di trasferimento radiativo, soluzione ottenuta utilizzando le simulazioni dei termini atmosferici effettuate con il modello di trasferimento radiativo MODTRAN 3.5. I contenuti colonnari di SO<sub>2</sub>, valutati con le metodologie descritte nel presente lavoro, hanno poi permesso, assieme alla misura della velocità orizzontale del vento all'altezza del plume, di stimare il flusso di SO<sub>2</sub> emesso dall'Etna. I flussi medi ottenuti da ogni singola immagine MIVIS sono stati confrontati con le simultanee misure COSPEC effettuate da terra e da un aereo ultraleggero che volava al di sotto del plume. I valori ottenuti: circa 45 kg/s il 12 giugno 1997 e circa 30 kg/s il 16 giugno risultano in ottimo accordo con le misure COSPEC citate.

## Introduzione

Diversi lavori riportati in letteratura [Realmuto et al., 1994; Realmuto et al., 1997; Teggi et al., 1999] descrivono, con tagli e caratteristiche differenti, metodologie mediante le quali stimare il contenuto colonnare di SO<sub>2</sub> utilizzando dati telerilevati nell'infrarosso termico (TIR) da radiometri aereotrasportati (TIMS e MIVIS). Tutti questi lavori utilizzano procedure numeriche, più o meno complesse, che consentono l'inversione dell'equazione di trasferimento radiativo sulla base della simulazione MODTRAN [Kneizys et al., 1996] dei termini atmosferici che vi compaiono.

- <sup>(1)</sup> Università di Modena e Reggio Emilia, Dip. Sc. Ing. Sez. Osservatorio Geofisico, Modena
- <sup>(2)</sup> Istituto Superiore per la Prevenzione E la Sicurezza del Lavoro, Monteporzio Catone, Roma
- <sup>(3)</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma

Ricevuto il 08/06/00 - Accettato il 06/09/00

*In the framework of the Mitigation of Volcanic Risk by Remote Sensing (MVRRS) European Project an international field campaign (SICILY '97) took place in the Mt. Etna area. Different research teams performed measurements contemporaneously with the Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer (MIVIS) flights. In this paper we show an analytical inversion of the radiative transfer equation and a Split-Window algorithm; both to estimate the sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) columnar content of the plume of the Mt. Etna as obtained by the MIVIS Thermal Infrared (TIR) remotely sensed images. Both these two procedures derive by a previously used numerical inversion obtained simulating the radiance at the MIVIS by means of MODTRAN 3.5 radiative transfer code. The mean SO<sub>2</sub> flux obtained by the MIVIS data has been compared with the COSPEC measurements carried out at the ground by T. Caltabiano and carried out from a light aircraft flying under the plume by P. Allard. The mean SO<sub>2</sub> flux was about 45 kg/s on June 12, 1997 and only about 30 kg/s on June 16, 1997; they agree the quoted COSPEC measurements.*

In questo lavoro, che deriva da quelli citati, verrà mostrata una soluzione analitica dell'equazione di trasferimento radiativo ed un semplice algoritmo basato sulla tecnica denominata Split-Window. La tecnica d'inversione utilizza alcune semplificazioni dei termini atmosferici: trasmittanza, radianza di percorso e radianza atmosferica riflessa. I vantaggi derivanti dall'inversione analitica, oltre ad una più chiara visione dei meccanismi fisici coinvolti, sono una rapida analisi delle immagini telerilevate (il tempo-macchina d'elaborazione si riduce a circa 1/100 di quello richiesto dalla procedura numerica) ed un'analisi facilitata degli effetti dei singoli parametri di input sul risultato finale. Il secondo algoritmo descritto si basa sul differente assorbimento, dovuto all'SO<sub>2</sub>, in due distinti canali TIR del MIVIS. Le approssimazioni introdotte in questo caso sono maggiori rispetto a quello precedente e conseguentemente comportano un risultato maggiormente approssimato. Il tempo-macchina richiesto per l'analisi dei dati diminuisce ulteriormente ma non in modo così significativo come per il passaggio dalla soluzione

ne numerica a quella analitica. I principali vantaggi di quest'algoritmo, basato sulla tecnica dello Split-Window, derivano dal fatto che non è più necessario disporre di un Modello di Elevazione Digitale (DEM) del terreno e di una sua registrazione all'immagine telerilevata; è inoltre presumibile che solo poche misure meteorologiche siano richieste al posto dei complessi e costosi profili meteorologici. I parametri che compaiono nelle due metodologie proposte sono stati ottenuti dalle simulazioni MODTRAN mediante processi di minimizzazione.

I risultati ottenuti con queste due procedure sono stati confrontati con quelli ottenuti dall'inversione numerica [Teggi et al., 2000] e con le misure COSPEC effettuate a terra da T. Caltabiano [Buongiorno et al., 1999] e con quelle fatte da un aereo ultraleggero che volava sotto il *plume* da P. Allard [Comunicazione privata, 1999].

## MIVIS

Il *Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer* (MIVIS), che vola a bordo dell'aereo CASA C212, dispone di 102 canali; dieci di tali canali si trovano nell'infrarosso termico (8-14  $\mu\text{m}$ ). In Tabella 1 sono riportati, per i dieci canali TIR (canali 93-102), gli estremi inferiori e superiori del range elettromagnetico di ogni canale e le dieci lunghezze d'onda medie, pesate con la funzione risposta del canale considerato.

Il MIVIS ha un *Instantaneous Field of View* (IFOV) di 2 mrad ma il segnale è campionato, lungo la scansione, ogni 1.64 mrad; l'angolo totale corrispondente ad una scansione (755 pixel) è  $\pm 35.55^\circ$ .

I primi tre canali di Tabella 1 (canali 93, 94, 95) risentono dell'assorbimento/emissione dell' $\text{SO}_2$  e permettono di stimarne il contenuto colonnare. I risultati riportati in questa memoria riguardano il *plume* dell'Etna e sono stati ottenuti analizzando le immagini TIR del MIVIS telerilevate durante la campagna SICILIA '97 [Buongiorno et al., 1999] effettuata nel giugno 1997 (11-17) nell'ambito del Progetto Europeo *Mitigation of Volcanic Risk by Remote Sensing* (MVRRS) coordinato da Peter Francis. Durante la citata campagna il MIVIS ha volato a quote comprese tra 5000 e 6000 m s.l.m.; la risoluzione geometrica a terra per la superficie vulcanica d'interesse (compresa tra 2000 e 3000 m slm) è minore di 10 m.

## Equazione del trasferimento radiativo

In assenza di nubi ed assumendo (come usualmente assunto nell'infrarosso termico) trascurabile lo scattering da parte degli aerosols, la radianza che giunge al sensore è data dalla

nota equazione di Schwarzschild:

$$L_\lambda = L_{0\lambda} \cdot e^{-\mu \cdot \delta_{0\lambda}} + \int_0^{\delta_{0\lambda}} e^{-\mu(\delta_{0\lambda} - \delta_\lambda)} \cdot B_\lambda(T) \cdot \mu \cdot d\delta_\lambda \quad (1)$$

Dove  $L_\lambda$  è la radianza spettrale al sensore;  $\mu = 1/\cos(\theta)$  e  $\theta$  è l'angolo zenitale;  $\delta_\lambda$  è lo spessore ottico verticale ( $\delta_{0\lambda}$  è lo spessore ottico verticale totale, dalla superficie al sensore);  $B_\lambda(T)$  è la funzione di Planck alla temperatura  $T$  e  $L_{0\lambda}$  è la radianza spettrale che lascia la superficie. Quest'ultima ( $L_{0\lambda}$ ) ha due componenti: la radianza emessa dalla superficie ( $\epsilon_\lambda B_\lambda(T_s)$ ) e quella emessa dall'atmosfera verso il basso e riflessa dalla superficie. Assumendo la superficie lambertiana ed utilizzando la legge di Kirchoff:

$$L_{0\lambda} = \epsilon_\lambda \cdot B_\lambda(T_s) + (1 - \epsilon_\lambda) \cdot E_{d\lambda} / \pi \quad (2)$$

Dove  $\epsilon_\lambda$  è l'emissività spettrale della superficie;  $T_s$  è la temperatura superficiale ed  $E_{d\lambda}$  l'irradianza atmosferica verso il basso.

Infine, l'integrale nel lato destro dell'equazione (1) rappresenta l'emissione atmosferica verso il sensore (path radiance). Riscrivendo l'equazione (1):

$$L_\lambda = \left[ \epsilon_\lambda \cdot B_\lambda(T_s) + (1 - \epsilon_\lambda) \cdot L_{d\lambda} \right] \cdot \tau_\lambda + L_{u\lambda} \quad (3)$$

Dove  $L_{d\lambda} = E_{d\lambda}/\pi$  è la radianza dovuta al flusso atmosferico verso il basso (downwelling);  $\tau_\lambda$  è la trasmittanza atmosferica (dalla superficie al sensore) e  $L_{u\lambda}$  è la radianza verso l'alto o di percorso (upwelling o path radiance).

## Termini atmosferici

I termini atmosferici che compaiono nell'equazione (3), e cioè  $\tau_\lambda$ ,  $L_{u\lambda}$  e  $L_{d\lambda}$ , sono stati ottenuti, come descritto da Teggi et al. [2000], mediante la simulazione del *plume* dell'Etna tramite il MODTRAN 3.5. Le circa 4000 simulazioni MODTRAN (vedi la parametrizzazione riportata in Tabella 2) effettuate per ogni giorno di volo del MIVIS (11, 12, 16, 17 Giugno, 1997) hanno fornito le look-up-tables (circa 120.000 dati ciascuna) utilizzate nell'inversione numerica.

Il *plume* dell'Etna è stato assunto ad altezza media costante (3350 m s.l.m.) e con spessore costante (100 m); ovviamente lo spessore del *plume* non è costante e, normalmente, aumenta all'aumentare della distanza dai crateri (circa 50 m/km) [Allard, comunicazione privata, 1999; Edner et al., 1995]. È stato inoltre verificato [Sterni, 1996] che, se l'altezza media del *plume* rimane costante, piccole variazioni del

Canale MIVIS	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102
estremo superiore ( $\mu\text{m}$ )	8.21	8.61	9.05	9.41	9.86	10.21	10.74	11.24	11.74	12.24
estremo inferiore ( $\mu\text{m}$ )	8.56	8.96	9.39	9.77	10.18	10.67	11.12	11.66	12.15	12.70
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	8.38	8.74	9.17	9.56	10.01	10.42	10.92	11.41	11.89	12.41

**Tabella.1** - Canali MIVIS nell'infrarosso termico: estremi e lunghezze d'onda medie pesate.

suo spessore influenzano poco la stima del contenuto colonnare di SO<sub>2</sub>.

In base alla schematizzazione di Figura 1 sono state definite le funzioni che approssimano i tre termini atmosferici dell'equazione (3). In Figura 1 Z rappresenta l'altezza del pixel visto dal MIVIS, z\* la quota di volo del MIVIS, θ l'angolo sotto cui il pixel è visto dal MIVIS e C è il contenuto colonnare verticale di SO<sub>2</sub> del plume nel punto d'intersezione plume-congiungente-pixel-MIVIS.

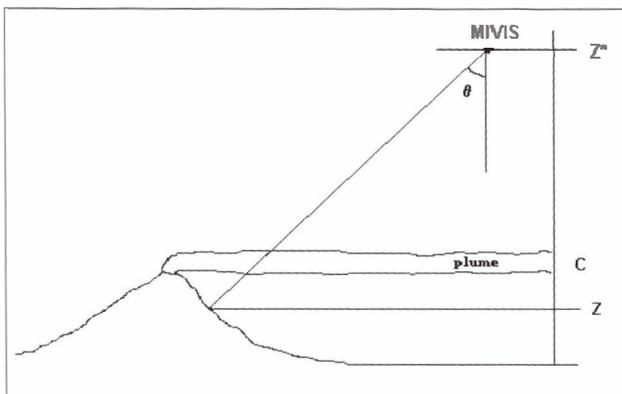
### Trasmittanza Atmosferica (τ<sub>λ</sub>)

La trasmittanza dello strato atmosferico pixel-MIVIS è stata ipotizzata una funzione esponenziale dello spessore ottico. Lo spessore ottico è stato, a sua volta, ipotizzato dipendere solamente da due assorbitori: il vapor d'acqua (comprendente anche gli assorbitori atmosferici minoritari) e il biossido di zolfo. L'acqua precipitabile della colonna atmosferica presenta in genere un andamento esponenziale funzione dell'altezza del pixel; per il ridotto strato atmosferico pixel-MIVIS (da circa 2000 a circa 6000 m) lo spessore ottico del vapor d'acqua (δ<sub>wλ</sub>) è stato approssimato con una parabola funzione dell'altezza del pixel mentre quello del biossido di zolfo (δ<sub>pλ</sub>), concentrato nel plume, è stato assunto costante in quanto tutti i pixel si trovano ad altezze inferiori a quella del plume.

$$\tau_{\lambda} = e^{-\mu \cdot \delta_{\lambda}} = e^{-\mu \cdot (\delta_{w\lambda} + \delta_{p\lambda})} = e^{-\mu \cdot (a_{0\lambda} + a_{1\lambda} \cdot Z + a_{2\lambda} \cdot Z^2 + a_{3\lambda} \cdot C)} = \tau_{a\lambda} \cdot \tau_{p\lambda} \quad (4)$$

**Tabella. 2** - Parametrizzazione del plume dell'Etna utilizzata per le simulazioni MODTRAN.

Parametro	Range	Step
Altezza	2000 - 3200 (m slm)	100 (m)
Angolo	0 - 40 (gradi)	5 (gradi)
Contenuto colonnare di SO <sub>2</sub>	0 - 15 (g/m <sup>3</sup> )	0.5 (g/m <sup>3</sup> )



**Figura 1** - Schematizzazione dell'area di misura.

Dove a<sub>0λ</sub>, a<sub>1λ</sub>, a<sub>2λ</sub> sono i parametri relativi allo spessore ottico dell'aria (cioè, come detto, principalmente relativi al vapor d'acqua) mentre a<sub>3λ</sub> rappresenta il coefficiente d'assorbimento dell'SO<sub>2</sub>; τ<sub>aλ</sub> and τ<sub>pλ</sub> individuano rispettivamente la trasmittanza dell'aria e del plume.

Corradini [1999] ha calcolato, per il caso del giorno 12 giugno 1997 e per i dieci canali TIR del MIVIS, la distribuzione delle differenze relative percentuali (cioè 100(τ<sub>MOD,λ</sub> - τ<sub>fit,λ</sub>)/τ<sub>MOD,λ</sub>) tra le trasmittanze ottenute dalle simulazioni MODTRAN e quelle calcolate con l'equazione (4), indicata con τ<sub>fit,λ</sub>. λ è la lunghezza d'onda riportata in Tabella 1. In Tabella 3 sono riportate, per ogni canale, le standard deviations delle citate differenze.

### Radianza atmosferica verso il sensore (L<sub>wλ</sub>)

Come detto precedentemente, la path radiance corrisponde all'integrale del termine di destra dell'equazione (1). Utilizzando come variabile d'integrazione la trasmittanza atmosferica anziché lo spessore ottico si ha:

$$L_{w\lambda} = \int_{\tau_{\lambda}}^1 B_{\lambda}(T) \cdot d\tau_{\lambda} = B_{\lambda}(T_a) \cdot (1 - \tau_{\lambda}) \quad (5)$$

Dove T<sub>a</sub> è una sorta di temperatura atmosferica dello strato considerato. Poiché la derivata della trasmittanza atmosferica, almeno per i canali trasparenti all'SO<sub>2</sub>, ha il suo massimo valore in prossimità della superficie, la temperatura equivalente T<sub>a</sub> è prossima a T(z) ≈ T<sub>0</sub> + γ z; (γ ≈ -7 K/km). Linearizzando la funzione di Planck B(T<sub>a</sub>) cioè sviluppando in serie attorno a T<sub>0</sub> e fermanosi al primo termine si ha:

**Tabella. 3** - Deviazioni standard delle differenze relative percentuali tra simulazioni e fit per i tre termini atmosferici (12/06/1997)

Canale	σ <sub>τ</sub> (%)	σ <sub>L<sub>w</sub></sub> (%)	σ <sub>L<sub>d</sub></sub> (%)
93	1.12	2.04	3.27
94	0.91	1.96	5.01
95	0.32	1.38	2.29
96	0.16	1.13	0.41
97	0.12	0.92	0.41
98	0.14	1.15	1.17
99	0.18	1.37	1.41
100	0.25	1.53	1.42
101	0.33	1.60	1.36
102	0.65	1.95	1.04

$$B(T_a) = B(T_0) + \left( \frac{\partial B}{\partial T} \right)_{T=T_0} a (T - T_0) = B(T_0) + \left( \frac{\partial B}{\partial T} \right)_{T=T_0} (T_0 + \gamma \cdot z - T_0) = B(T_0) - \gamma \cdot \left( \frac{\partial B}{\partial T} \right)_{T=T_0} z$$

ovvero

$$L_{u\lambda} = (b_{0\lambda} + b_{1\lambda} \cdot z) \cdot (1 - \tau_\lambda) \quad (6)$$

In presenza del plume di SO<sub>2</sub> la situazione risulta più complicata. In questo caso una ragionevole approssimazione, che tiene conto anche della situazione precedente (canali trasparenti all'SO<sub>2</sub>:  $\tau_{p\lambda}=1$ ) è:

$$L_{u\lambda} = (b_{0\lambda} + b_{1\lambda} \cdot z) \cdot (1 - \tau_{a\lambda}) \cdot \tau_{p\lambda} + b_{2\lambda} \cdot (1 - \tau_{p\lambda}) \quad (7)$$

Corradini [1999] ha calcolato, per il caso del giorno 12 giugno 1997 e per i dieci canali TIR del MIVIS, la distribuzione delle differenze relative percentuali (cioè  $100 \cdot (L_{u,MOD,\lambda} - L_{u,fit,\lambda}) / L_{u,MOD,\lambda}$ ) tra le radianze ( $L_{u\lambda}$ ) ottenute dalle simulazioni MODTRAN e quelle calcolate con l'equazione (7), indicata con  $L_{u,fit,\lambda}$ .  $\lambda$  è la lunghezza d'onda riportata in Tabella 1. In Tabella 3 sono riportate, per ogni canale, le standard deviations delle citate differenze.

### Radianza Atmosferica Riflessa ( $L_{d\lambda}$ )

La radianza atmosferica riflessa dipende dal flusso atmosferico verso il basso (downwelling):  $L_{d\lambda} = E_{d\lambda} / \pi$ .

$$E_{d\lambda} = \iint \left( \int_{\tau}^1 B_\lambda(T) \cdot d\tau_\lambda \right) \cdot \cos \theta \cdot d\omega \quad (8)$$

Linearizzando la trasmittanza atmosferica:  $\tau = 1 - \mu \cdot \delta$  si ha:

$$E_{d\lambda} = \iint B_\lambda(T_a) \cdot \delta_\lambda \cdot d\omega = 2 \cdot \pi \cdot B_\lambda(T_a) \cdot \delta_\lambda \cdot \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cdot d\theta = 2 \cdot \pi \cdot B_\lambda(T_a) \cdot \delta_\lambda = 2 \cdot \pi \cdot L_{uv,\lambda}^d \quad (9)$$

$L_{uv,\lambda}^d$  rappresenta la radianza atmosferica verso il basso nella direzione verticale.

In base all'equazione (9) la radianza atmosferica riflessa è stata approssimata con la seguente espressione:

$$L_{d\lambda} = d_{0\lambda} + d_{1\lambda} \cdot L_{uv,\lambda} \quad (10)$$

Dove  $L_{uv,\lambda}$  corrisponde alla radianza atmosferica verso l'alto nella direzione verticale.

Corradini [1999] ha calcolato, per il caso del giorno 12 giu-

gno 1997 e per i dieci canali TIR del MIVIS, la distribuzione delle differenze relative percentuali (cioè  $100 \cdot (L_{d,MOD,\lambda} - L_{d,fit,\lambda}) / L_{d,MOD,\lambda}$ ) tra le radianze ( $L_{d\lambda}$ ) ottenute dalle simulazioni MODTRAN e quelle calcolate con l'equazione (10), indicata con  $L_{d,fit,\lambda}$ .  $\lambda$  è la lunghezza d'onda riportata in Tabella 1. In Tabella 3 sono riportate, per ogni canale, le standard deviations delle citate differenze. Per le radianze atmosferiche riflesse le differenze, almeno per i canali affetti da SO<sub>2</sub>, risultano consistenti (deviazioni standard anche del 5 %). Occorre però ricordare che tale termine è quello che meno influenza la radianza al sensore; infatti, vedi equazione (3), questo termine è moltiplicato per  $(1 - \varepsilon)$ .

### Soluzione analitica per la stima del contenuto colonnare di SO<sub>2</sub>

Utilizzando per i tre termini atmosferici:  $\tau_\lambda$ ,  $L_{u\lambda}$  e  $L_{d\lambda}$ , le espressioni (4), (7) e (10) ne segue che l'equazione del trasferimento radiativo (3) contiene come unica incognita la trasmittanza del plume di SO<sub>2</sub>:

$$L_\lambda = A'_\lambda \cdot \tau_{p,\lambda} \cdot \tau_{pv,\lambda} + B'_\lambda \cdot \tau_p + D'_\lambda \quad (11)$$

Dove  $A'_\lambda$ ,  $B'_\lambda$ ,  $D'_\lambda$  sono delle costanti che dipendono dai parametri  $a_\lambda$ ,  $b_\lambda$ ,  $d_\lambda$  che compaiono nelle equazioni (4), (7) e (10);  $\tau_{pv,\lambda}$  è la trasmittanza del plume lungo la verticale.

L'equazione (11) è trascendente ma risulta risolvibile mediante la soluzione di due equazioni di secondo grado ed uno sviluppo in serie di Taylor. L'equazione finale che si ottiene è:

$$C = -(\cos \theta / a_3) \cdot \log_e [X_0 \cdot (1 + Y)] \quad (12)$$

Dove  $X_0$  è la soluzione della (11), cioè la trasmittanza  $\tau_{p,\lambda}$ , nel caso più semplice (prima equazione di secondo grado); vale a dire con  $\tau_{p,\lambda} = \tau_{pv,\lambda}$  (ovvero con  $\theta=0$ );  $Y = X'/X_0$  è la soluzione della seconda equazione di secondo grado, equazione che si ottiene dopo lo sviluppo in serie di Taylor; la trasmittanza  $\tau_{p,\lambda}$  è stata posta uguale a  $X = X_0 + X'$ .

$X_0$ ,  $Y$  ed ovviamente  $a_3$  dipendono dalla lunghezza d'onda pertanto la (12) fornisce tre valori del contenuto colonnare di SO<sub>2</sub>; uno per ogni canale non trasparente all'SO<sub>2</sub>. Il secondo dei canali TIR del MIVIS (canale 94) è quello meno trasparente ed anche quello che fornisce le migliori stime del contenuto colonnare C. Volendo sfruttare tutti e tre i canali che risentono dell'SO<sub>2</sub> si può effettuare una media pesata dei primi tre canali TIR (93, 94, 95).

### Stima del contenuto colonnare di SO<sub>2</sub> mediante la tecnica Split-Window

Utilizzando le equazioni (5) e (9), l'equazione del trasferimento radiativo (3) può essere scritta nel modo seguente:

$$L_\lambda = \varepsilon_\lambda \cdot \tau_\lambda \cdot B_\lambda(T_s) + (1 - \varepsilon_\lambda) \cdot \tau_\lambda \cdot d \cdot B_\lambda(T_a) \cdot (1 - \tau_v) + B_\lambda(T_a) \cdot (1 - \tau_\lambda) \quad (13)$$

Sviluppando  $L_\lambda$ ,  $B_\lambda(T_s)$  e  $B_\lambda(T_a)$  attorno a  $T_a$  (la temperatura di brillanza, quella superficiale e quella dell'aria in prossimità della superficie non sono tra loro molto diverse) e fermandosi al primo termine si giunge alla seguente relazione:

$$T_s = \frac{T_b - (1 - \varepsilon \cdot \tau)}{\varepsilon \cdot \tau} - \Delta T \quad (14)$$

Dove  $T_s$  è la temperatura superficiale,  $T_b$  la temperatura di brillanza e  $\Delta T = [(1-\varepsilon)/\varepsilon] \cdot [\lambda \cdot (d \cdot \delta - 1) \cdot T_a^2 / C^2]$ ,  $d$  è una costante che vale circa 2 e  $C_2$  è il secondo coefficiente della legge di Planck.

Utilizzando due canali, uno in finestra atmosferica (nel presente lavoro il quarto canale TIR del MIVIS ovvero il canale 96 di Tabella 1) ed uno che risente dell'assorbimento dovuto all' $SO_2$  (nel presente lavoro il secondo canale TIR del MIVIS ovvero il canale 94 di Tabella 1), si hanno due equazioni del tipo (14) che uguagliate portano alla seguente relazione finale:

$$C = k_0 + k_1 \cdot \log_e \left[ \left( \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_4} \right) \cdot \left( \frac{T_{b4} - T_a + k_2}{T_{b2} - T_a} \right) \right] \quad (15)$$

$T_{b2}$  e  $T_{b4}$  sono le temperature di brillanza ottenute dalle misure MIVIS effettuate nei rispettivi canali 2 e 4 (94 e 96);  $\varepsilon_2$  ed  $\varepsilon_4$  sono le emissività superficiali del pixel considerato;  $T_a$  è la temperatura equivalente dell'aria che, assieme a  $k_0$ ,  $k_1$  e  $k_2$ , costituisce il set di parametri stimati per minimizzazione dalle simulazioni MODTRAN precedentemente citate.

I parametri  $k_0$ ,  $k_1$  e  $k_2$  non sono esattamente delle costanti ma dipendono dalle condizioni atmosferiche presenti ed in particolare:

$$k_0 = \frac{\delta_{w4} - \delta_{w2}}{a_{3,2}}; k_1 = \frac{1}{a_{3,2}}; k_2 = (\Delta T_2 - \Delta T_4) \cdot \varepsilon_4 \cdot e^{-\mu \cdot \delta_4}$$

Per l'applicazione di questo algoritmo di tipo Split-Window sono stati scelti i canali 2 e 4 (94 e 96 di Tabella 1) del MIVIS in quanto la presenza dell'ozono troposferico fa sentire il suo effetto assorbitore nel canale 4; effetto che compensa il maggiore assorbimento del vapor d'acqua nel canale 2 rispetto al 4. La compensazione citata comporta valori molto simili degli spessori ottici  $\delta_{w4}$  e  $\delta_{w2}$  ovvero valori molto piccoli del parametro additivo  $k_0$ . La vicinanza spettrale dei due canali implica inoltre piccole differenze di lunghezze d'onda,  $\Delta T$  molto simili e conseguentemente piccoli valori anche del parametro  $k_2$ . Infine  $k_1$  è quasi una costante in quanto rappresenta l'inverso del coefficiente d'assorbimento dell' $SO_2$  che risentirà in parte delle variazioni di pressione e temperatura alla quota del plume.

In Tabella 4 sono riportati, per i giorni 11, 12 e 16 giugno 1997, i valori dei parametri  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  e  $T_a$  dell'algoritmo descritto; sono inoltre state riportate le deviazioni standard

**Tabella 4** - Valori dei parametri dell'algoritmo descritto nel testo e misure di temperatura ed acqua precipitabile effettuate a Torre del Filosofo.

giorno (giugno 1997)	$k_0$ (g/m <sup>2</sup> )	$k_1$ (g/m <sup>2</sup> )	$k_2$ (K)	$T_a$ (K)	$\sigma_C$ (g/m <sup>2</sup> )	$T_{TF}$ (K)	$W_{TF}$ (g/cm <sup>2</sup> )
11	0.97	38.1	0.6	277.3	0.10	284.6	0.58
12	0.57	37.6	0.5	279.3	0.11	286.1	0.69
16	-0.01	37.7	0.4	281.2	0.11	288.3	0.81

delle differenze del contenuto colonnare  $C$  tra le simulazioni MODTRAN ed il fit tramite il quale sono stati ottenuti i parametri. Infine, le ultime due colonne riportano la temperatura dell'aria misurata a Torre del Filosofo al passaggio del MIVIS e l'acqua precipitabile calcolata, in base ad una relazione empirica, da misure sempre a Torre del Filosofo, di temperatura ed umidità relativa.

Come si può vedere da Tabella 4, mentre i parametri  $k_1$  e  $k_2$  sono sostanzialmente costanti, il parametro  $k_0$ , che dipende dal vapore presente in atmosfera e  $T_a$ , che ovviamente dipende dalla temperatura dell'aria, mostrano una netta variazione nel tempo, ottimamente correlata con l'acqua precipitabile e la temperatura dell'aria a Torre del Filosofo rispettivamente.

## Conclusioni

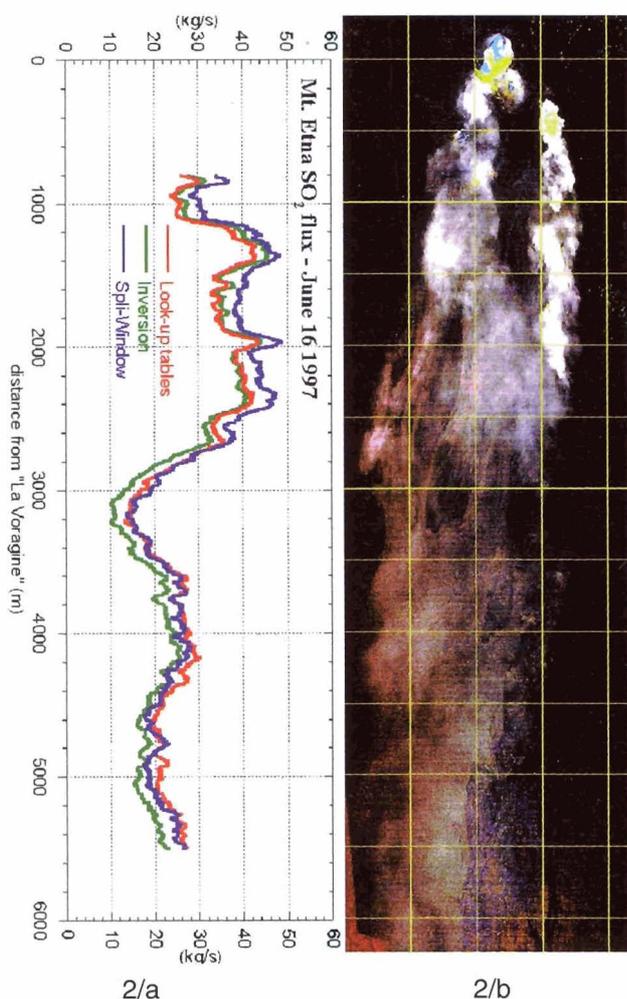
La possibilità di misurare il contenuto colonnare dell' $SO_2$  presente nel plume dell'Etna mediante spettrometri aerotrasportati e operanti nell'infrarosso termico era già stata verificata mediante lavori precedenti [Realmuto et al., 1994; Realmuto et al., 1997; Teggi et al., 1999]. Nel presente articolo sono state mostrate due distinte procedure per la determinazione del contenuto colonnare di  $SO_2$ : una mediante un'inversione analitica ed una basata sulla tecnica Split-Window. Il primo sostanziale vantaggio delle procedure descritte consiste nel notevole risparmio di tempo per l'elaborazione dei dati: circa 1/100 di quello richiesto dalla procedura numerica. La seconda procedura (Split-Window), anche se con notevoli approssimazioni, fornisce un buon risultato senza la necessità d'introdurre dati ausiliari quali elevazione del terreno e profili atmosferici; i parametri dell'algoritmo non sono però costanti nel tempo ed alcune misure atmosferiche minimali risultano comunque necessarie. L'inversione analitica consente infine una facile analisi degli effetti dei dati di input e/o errori di misura sul risultato finale (contenuto colonnare di  $SO_2$ ).

La misura della velocità del vento alla quota del plume e l'integrale del contenuto colonnare lungo i transetti ortogonali all'asse del plume consentono infine la stima del flusso di  $SO_2$  emessa dall'Etna. In tabella 5 sono riportati per i giorni 11 e 16 giugno 1997 i flussi medi stimati con l'inversione numerica (LUT), con quella analitica (INV), con lo Split-Window (S-W) e le misure effettuate da terra da T. Caltabiano e dall'aereo da P. Allard.

Per il giorno 16 giugno 1997, è mostrato in Figura 2b il plume di  $SO_2$  dell'Etna. L'immagine riporta in tonalità rossa i risultati dell'inversione numerica (LUT), in tonalità verde i

**Tabella. 5** - Flussi medi stimati dalle tre procedure citate nel testo e dalle misure sperimentali.

Procedura e/o misura	12 giugno 1997 (kg/s)	16 giugno 1997 (kg/s)
LUT	45 ± 8	28 ± 9
INV	41 ± 12	26 ± 10
S-W	42 ± 15	29 ± 10
T. Caltabiano	40 ± 10	36 ± 9
P. Allard	44 ± 4	32 ± 2



**Figura 2a** - Andamento del flusso di SO<sub>2</sub> per le tre diverse procedure.

**Figura 2b** - Immagine del plume di SO<sub>2</sub> (R=LUT, G=INV, B=SW). Concessione SMA 528 del 04/11/97.

risultati dell'inversione analitica (INV) ed in tonalità blu quelli dello Split-Window (S-W). In Figura 2a è riportato, con gli stessi colori indicati sopra (vedi legenda), l'andamento del flusso di SO<sub>2</sub> lungo l'asse del plume.

## Bibliografia

Allard P. (1999) - *Communication at the MVRRS Final Meeting*, Cambridge, UK, June 1999.

Buongiorno M. F., Merucci L., Doumaz F., Salvi S., M. P. Bogliolo, S. Pugnaghi, S. Teggi, S. Corradini, L. Lombroso, A. Sterni, T. Caltabiano e V. Carrere, (1999) - *MVRRS Campaign: MIVIS mission on sicilian volcanoes and ground measurements*. Quaderni di Geofisica, 7: 1-90.

Corradini S. (1999) - *Stima del flusso di SO<sub>2</sub> dell'Etna da immagini telerilevate nell'infrarosso termico e misure atmosferiche (campagna di misure MVRRS "Sicily '97")*. Tesi di laurea in fisica, Università di Modena e Reggio Emilia, Anno Accademico 1997-1998, (1999).

Edner H., Ragnarson P., S. Svanberg, E. Wallinder, R. Ferrara, R. Cioni, B. Raco e G. Taddeucci (1995) - *Volcanic gas emission studies using optical remote sensing techniques, Sensors and Environmental Applications of Remote Sensing*. Balkema, Rotterdam, 357-362.

Kneizys F. X., L. W. Abreu, G. P. Anderson, J. H. Chetwynd, E. P. Shettle, A. Berk, L. S. Bernstein, D. C. Robertson, P. Acharya, L. S., Rothman, J. E. A. Selby e W. O. Gallery (1996) - *The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN model*. Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, Hanscom AFB, MA 01731-3010.

Realmuto V.J., Abrams M.J., Buongiorno M.F. e Pieri D.C. (1994) - *Multispectral Infrared Mapping of sulfur dioxide plumes: a case study from Mount Etna, Sicily, July 29, 1986*. Journal of Geophysical Research, 99: 481-488.

Realmuto V.J., Sutton A.J. e Elias T. (1997) - *Multispectral thermal infrared mapping of sulfur dioxide plumes: A case study from the East Rift Zone of Kilauea volcano, Hawaii*, Journal of Geophys. Res., 102 (B7): 15057-15072.

Sterni A. (1996) - *Misure atmosferiche e modelli di trasferimento radiativo in atmosfera per lo studio dei plumes vulcanici mediante telerilevamento*. Tesi di laurea in fisica, Università di Modena, Anno Accademico 1995-1996.

Teggi S., Bogliolo M.P., Buongiorno M.F., Pugnaghi S. e Sterni A. (1999) - *Evaluation of SO<sub>2</sub> emission from Mt. Etna using diurnal and nocturnal MIVIS TIR remote sensing images and Radiative transfer models*. Journal of Geophysical Research, vol. 104, n. B9: 20069-20079, September 10.

Teggi S., Pugnaghi S., Buongiorno M.F., Bugliolo M.P., Corradini S., Lombardo V e Merucci L., (2000) - *Correzioni atmosferiche dei dati MIVIS* (2001). Questo volume;

# Simulazioni di immagini ASTER da immagini MIVIS per la stima del flusso di SO<sub>2</sub> dell'Etna

Stefano Corradini,<sup>(1)</sup> Sergio Pugnaghi,<sup>(1)</sup> Maria Fabrizia Buongiorno<sup>(2)</sup>, Maria Paola Bogliolo<sup>(3)</sup>,  
Valerio Lombardo<sup>(2)</sup>, Luca Merucci<sup>(2)</sup> e Sergio Teggi<sup>(1)</sup>

Lo scopo di questo lavoro è la verifica della possibilità di determinare il flusso di SO<sub>2</sub> emesso dall'Etna da immagini simulate ASTER nel TIR. L'ASTER è uno degli strumenti montati a bordo di Terra, il primo satellite del progetto EOS lanciato il 18 dicembre del 1999, le cui immagini non sono ancora disponibili. La simulazione delle immagini ASTER è stata eseguita utilizzando le immagini MIVIS acquisite durante la campagna di misura "Sicily '97". Le mappe di contenuto colonnare di SO<sub>2</sub>, mostrate in questo lavoro, sono state ottenute utilizzando un algoritmo basato sulla tecnica *Split-Window* e precedentemente applicato alle immagini MIVIS. I risultati sono in ottimo accordo con quelli ottenuti direttamente dalle procedure d'inversione delle immagini MIVIS e alle misure COSPEC effettuate durante la campagna di misura.

## Introduzione

La stima del flusso di SO<sub>2</sub>, ed in particolare la sua evoluzione temporale, è un parametro molto importante per il monitoraggio dei vulcani in stato di quiescenza, in quanto è considerato uno dei precursori delle eruzioni vulcaniche; vi sono studi che dimostrano che da quattro a sei settimane prima di un evento eruttivo si assiste ad una consistente diminuzione del flusso di SO<sub>2</sub> [Caltabiano et al., 1994; Mc Gee e Sutton, 1994]. In più la stima di questa grandezza permette una valutazione più accurata del contributo naturale alla presenza di questo gas in atmosfera e il confronto con l'emissione di origine antropica.

Il principale strumento tuttora utilizzato per la stima del flusso di SO<sub>2</sub> è il *Correlation Spectrometer* (COSPEC) che lavora nell'ultra-violetto (UV) [Malinconico, 1979; Casadewall et al., 1981, 1983, 1987; Stoiber et al., 1983, 1987; Allard et al., 1991]. Negli ultimi anni sono state proposte nuove tecniche, basate sull'inversione dell'equazione di trasferimento radiativo nell'infrarosso termico

*The aim of this paper is to show the feasibility of the SO<sub>2</sub> flux evaluation emitted by Mt. Etna volcano, using simulated ASTER-TIR images. ASTER is one of the instruments on board of Terra, the first EOS satellite launched on December 18 1999, which images are not yet available. The ASTER images have been simulated using the MIVIS images acquired during the "Sicily '97" campaign. The SO<sub>2</sub> columnar content maps, shown in this paper, have been obtained by means of an algorithm based on the Split-Window technique previously applied on MIVIS images. The results are in good agreement with that obtained by the inversion procedure of the MIVIS data and with the COSPEC measurements performed during the campaign.*

(TIR), applicate alle immagini telerilevate da aereo del *Thermal Infrared Multispectral Scanner* (TIMS) [Realmuto et al., 1994, 1997] e del *Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer* (MIVIS) [Teggi et al., 1999]. Stime di contenuto colonnare di SO<sub>2</sub> in stratosfera sono state effettuate da satellite, utilizzando il *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS) [Krueger et al., 1983, 1990, 1995] e il *Global Ozone Monitoring Experiment* (GOME) [Eisinger e Burrows, 1998; ESA, 1993]. L'Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER), montato sul satellite Terra, è il primo strumento a presentare caratteristiche spettrali e di risoluzione geometrica al suolo adatte allo studio dell'emissione troposferica di SO<sub>2</sub> dei vulcani in stato di quiescenza.

In questo lavoro s'intende applicare la tecnica *Split-Window*, elaborata per le immagini MIVIS, alle immagini simulate ASTER, per la stima del flusso di SO<sub>2</sub> emesso dall'Etna. La simulazione delle immagini ASTER viene fatta utilizzando immagini MIVIS acquisite durante la campagna di misura "Sicily '97" [Buongiorno et al., 1999].

## Caratteristiche ASTER e MIVIS

Terra, il primo satellite del progetto *Earth Observing System* (EOS) della NASA lanciato il 18 dicembre del 1999, è un satellite polare eliosincrono orbitante a circa 705 km dal suolo ed avente un ciclo di acquisizione di circa 16 giorni. A bordo di Terra ci sono cinque strumen-

<sup>(1)</sup> Osservatorio Geofisico dell'Università di Modena e Reggio Emilia, Via Campi 213/A, 41100 Modena, Italy.

<sup>(2)</sup> Istituto Nazionale di Geofisica, Via di Vigna Murata, 605, 00143, Roma, Italy.

<sup>(3)</sup> ISPEL Via Fontana Candida 1 Monte Porzio Catone, 00040, Roma, Italy.

Ricevuto il 08/06/00 - Accettato il 06/09/00

ti tra i quali l'ASTER. L'ASTER ha quattordici canali: tre nel visibile e vicino infrarosso (VNIR: 0.52-0.86  $\mu\text{m}$ ), sei nel medio infrarosso (SWIR: 1.60-2.43  $\mu\text{m}$ ) e cinque nell'infrarosso termico (TIR: 8.125-11.65  $\mu\text{m}$ ). Il suo angolo di vista totale (FOV) è di  $\pm 2.44^\circ$  corrispondente a circa 60 km a terra, mentre l'angolo di vista istantaneo (IFOV), al nadir e nel TIR, è di 127.8 *mrad* corrispondente ad una risoluzione al suolo di 90 m.

Il MIVIS ha 102 canali in un *range* spettrale che va dal visibile all'infrarosso termico. Nel TIR presenta 10 canali (Tab. 1), il FOV è  $\pm 35.55^\circ$  corrispondenti a 755 pixel e l'IFOV è 1.64 *mrad* (Fig. 1).

In Tabella 1 è mostrato un confronto tra i canali TIR dell'ASTER e del MIVIS mentre in Figura 1 sono mostrate le rispettive caratteristiche geometriche.

### Simulazioni di immagini ASTER

Considerando una superficie lambertiana, utilizzando la legge di Kirchoff e considerando trascurabile lo scattering atmosferico, l'equazione di trasferimento radiativo, che descrive la radianza ricevuta dal sensore nei canali TIR, diventa:

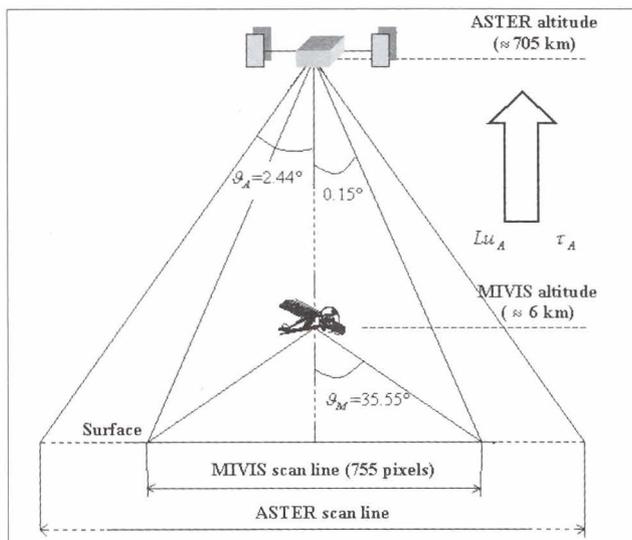


Figura 1 - Caratteristiche geometriche dell'ASTER e del MIVIS.

$$L_i = \varepsilon_i \cdot B_i(T_s) \cdot \tau_i + Lu_i + Ld_i \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot \tau_i \quad (1)$$

dove  $i$  indica il canale considerato,  $L_i$  è la radianza al sensore,  $\varepsilon_i$  è l'emissività superficiale,  $B_i(T_s)$  è la funzione di Planck alla temperatura superficiale  $T_s$ ,  $\tau_i$  è la trasmittanza atmosferica,  $Lu_i$  rappresenta la radianza dello strato di atmosfera compreso tra il sensore e la superficie terrestre (*path radiance*) e infine  $Ld_i \cdot (1 - \varepsilon_i)$  è la radianza riflessa dalla superficie terrestre (Fig. 2).

La simulazione dell'immagine ASTER in radianza deve essere effettuata tenendo conto delle differenze spettrali e geometriche tra l'ASTER stesso e il MIVIS; essa viene fatta in tre step:

- 1) calcolo, dall'immagine in radianza MIVIS ( $L_M$ ), di una nuova immagine in radianza ( $L'_M$ ) considerando l'angolo di vista dell'ASTER (Fig. 1);
- 2) ricampionamento spaziale e spettrale dell'immagine ottenuta per tenere conto della risoluzione a terra e delle caratteristiche radiometriche dell'ASTER (Fig. 1 e Tab. 1);
- 3) aggiunta dello strato di atmosfera compreso tra il MIVIS e l'ASTER (Fig. 1).

#### step 1)

Per calcolare l'immagine  $L'_M$  la *path radiance* e la trasmittanza vengono approssimate dalle seguenti relazioni analitiche:

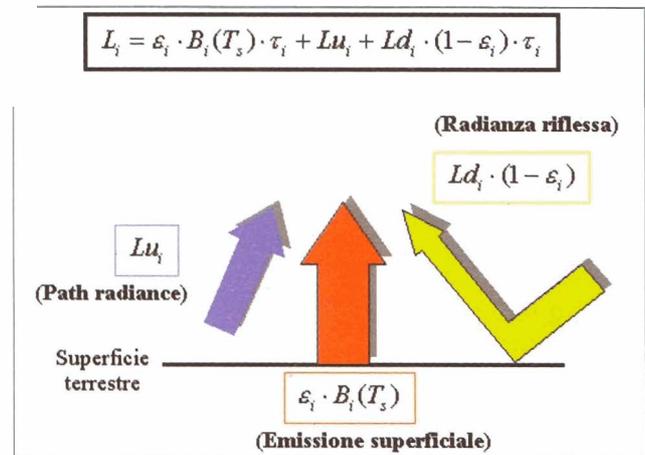


Figura 2 - Equazione del trasferimento radiativo nel TIR.

Tabella 1 - Bande TIR dell'ASTER e del MIVIS.

ASTER										
channel	10	11	12	13	14					
$\lambda(\mu\text{m})$	8.29	8.64	9.08	10.66	11.29					
MIVIS										
channel	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102
$\lambda(\mu\text{m})$	8.38	8.75	9.18	9.57	10.00	10.43	10.93	11.42	11.91	12.42

$$Lu_i = B_i(T_a) \cdot (1 - \tau_i) \quad (2)$$

$$\tau_i = 1 - \delta_i \cdot \mu \quad (3)$$

dove:  $B_i(T_a)$  è la funzione di Planck alla "temperatura atmosferica"  $T_a$ ,  $d_i$  è lo spessore ottico,  $\mu = 1/\cos(\theta)$  e  $\theta$  è l'angolo di vista ( $\theta_M$  e  $\theta_A$  rispettivamente per il MIVIS e l'ASTER).

Sostituendo la (2) e la (3) nell'equazione di trasferimento radiativo (1) e tenendo conto che la linea di scansione del MIVIS è "vista" dall'ASTER sotto un angolo di  $\pm 0.15^\circ$  (Figura 1) si ottiene:

$$L'_{M,i} = L_{M,i} \cdot \cos(\theta_M) + b_i \cdot (1 - \cos(\theta_M)) \quad (4)$$

$$\text{dove } b_i = \varepsilon_i \cdot B_i(T_s) + L_{d,i} \cdot (1 - \varepsilon_i)$$

Il termine  $b_i$  è quindi dato dalla somma di due contributi: l'emissione superficiale e la radianza riflessa dalla superficie terrestre. Nel nostro caso il secondo termine è trascurabile rispetto al primo quindi si ha:

$$b_i \approx \varepsilon_i \cdot B_i(T_s) \quad (5)$$

Questo parametro è calcolato, pixel per pixel, utilizzando i valori di temperatura superficiale ottenuti dai dati MIVIS; l'algoritmo utilizzato per il calcolo della temperatura superficiale è basato sulla tecnica *Split-Window* ed è simile a quello proposto da Ulivieri et al. [1994]. L'emissività è stata ottenuta dalla stessa immagine MIVIS utilizzando l'*Emissivity Spectrum Normalization method* (ESN) [Realmuto, 1990] assumendo  $\varepsilon_{\max} = 0.97$ .

#### step 2)

Il ricampionamento spaziale è stato fatto all'altezza del plume tenendo conto della risoluzione dell'ASTER, mentre il ricampionamento spettrale è stato eseguito mediante una interpolazione lineare. Questa operazione fornisce la radianza  $L'_{A,j}$ , dove  $j$  indica il canale ASTER.

#### step 3)

Tenuto conto dello strato di atmosfera compreso tra i due strumenti, la radianza dell'ASTER è data da:

$$L_{A,j} = L'_{A,j} \cdot \tau_{A,j} + Lu_{A,j} \quad (6)$$

dove  $\tau_{A,j}$  e  $Lu_{A,j}$  sono rispettivamente la trasmittanza e la path radiance della porzione di atmosfera compresa tra i due sensori (Fig. 1).

Le immagini MIVIS utilizzate per la simulazione sono quelle acquisite il 12 e il 16 giugno 1997 durante la campagna di misura "Sicily '97".

### Tecnica *Split-Window*

La tecnica *Split-Window* si basa sulla differenza di assorbimento atmosferico relativa a due lunghezze d'onda.

Essa è stata sviluppata da Saunders [1967] e Anding e Kauth [1970] ed è stata utilizzata per il calcolo di diversi parametri quali la temperatura superficiale degli oceani [McMillin, 1975; Prabhakara et al., 1974], l'emissività superficiale [Schmugge et al., 1991] [Gillespie et al., 1998], l'acqua precipitabile [Andersen et al., 1996; Oettle et al., 1997], e l'SO<sub>2</sub> [Pugnaghi et al., *submitted*].

L'algoritmo utilizzato per la stima del contenuto colonnare di SO<sub>2</sub> si ottiene considerando l'equazione di trasferimento radiativo, scegliendo due canali, uno affetto e l'altro non affetto dall'assorbimento dell'SO<sub>2</sub>, e considerando una forma analitica approssimata della trasmittanza atmosferica. Poiché, nel caso dell'ASTER, i canali prescelti sono il 2 e il 5 la relazione finale è la seguente:

$$c_s = k_{0c} + k_{1c} \cdot \ln[(\varepsilon_2 \cdot (T_{b,5} - T_a + k_{2c})) / (\varepsilon_5 \cdot (T_{b,2} - T_a))] \quad (7)$$

dove  $c_s$  è il contenuto colonnare di SO<sub>2</sub>,  $k_{0c}$ ,  $k_{1c}$ ,  $k_{2c}$  e  $T_a$  sono parametri,  $T_{b,2}$ ,  $\varepsilon_2$  e  $T_{b,5}$ ,  $\varepsilon_5$  sono rispettivamente le temperature di brillanza e le emissività dei canali 2 e 5.

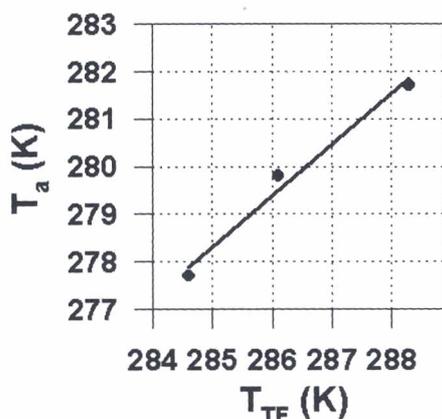
I parametri  $k_{0c}$ ,  $k_{1c}$ ,  $k_{2c}$  e  $T_a$  vengono calcolati utilizzando le simulazioni eseguite con il MODTRAN 3.5 considerando il *plume* ad una altezza di 3300 m e 100 m di spessore. I valori di emissività per i cinque canali ASTER sono stati ottenuti da una interpolazione lineare dei valori di emissività del MIVIS. I risultati, per tre giorni (11, 12 e 16 giugno 1997), sono riportati in Tabella 2 assieme alla loro deviazione standard. La temperatura  $T_{TF}$  mostrata in Tabella 2 è la temperatura dell'aria misurata da una stazione meteorologica automatica posta a Torre del Filosofo a circa 2920 m s.l.m. Dall'analisi della Tabella 2 si può osservare che i valori dei parametri  $k_{0c}$ ,  $k_{1c}$  e  $k_{2c}$  per i tre giorni esaminati, sono circa costanti, mentre i valori della temperatura  $T_a$  mostrano piccole variazioni legate alle differenti condizioni ambientali. Tuttavia della Figura 3 si può osservare una relazione lineare tra  $T_a$  e la temperatura misurata a Torre del Filosofo ( $T_{TF}$ ).

### Stima del flusso di SO<sub>2</sub>

Le mappe di contenuto colonnare ottenute applicando l'equazione (7) alle immagini ASTER, simulate dalle immagini MIVIS del 12 e 16 giugno, sono mostrate in Figura 4 e 5 rispettivamente. Individuato l'asse del *plume* e i transetti (sezioni perpendicolari all'asse del *plume*), il flusso di SO<sub>2</sub> viene calcolato integrando i valori del contenuto colonnare lungo i transetti e moltiplicando questo valore per la velocità del vento ottenuta dalla radiosonda lo stesso giorno, alla stessa ora e alla stessa altezza. Nelle Figure 6 e 7 viene mostrato l'andamento del flusso lungo l'asse del *plume*. Il flusso è stato valutato a partire da circa 800 m dai crateri per tenere conto del fatto che in prossimità degli stessi le condizioni di equilibrio termodinamico non sono verificate. Nelle stesse due figure vengono mostrati anche i flussi di SO<sub>2</sub> ottenuti direttamente dalle immagini

**Tabella 2** - Valori dei parametri  $k_{0c}$ ,  $k_{1c}$ ,  $k_{2c}$  e  $T_a$  per i giorni di misura,  $s$  è la deviazione standard,  $T_{TF}$  la temperatura dell'aria misurata da una stazione meteorologica automatica posta a Torre del Filosofo a circa 2920 m s.l.m..

GIORNO (GIUGNO 1997)	$k_{0c}$ ( $g/m^2$ )	$k_{1c}$ ( $g/m^2$ )	$k_{2c}$ (K)	$T_a$ (K)	$\sigma$ ( $g/m^2$ )	$T_{TF}$ (K)
11	-1.3	34.7	-1.7	277.7	0.2	284.6
12	-1.3	34.1	-1.8	279.8	0.1	286.1
16	-1.2	33.7	-1.8	281.7	0.1	288.3



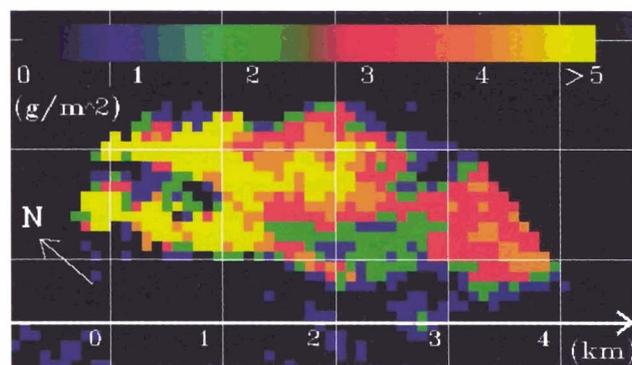
**Figura 3** - Correlazione tra i valori della "temperatura atmosferica"  $T_a$  e i valori della temperatura dell'aria misurata a Torre del Filosofo  $T_{TF}$  (2920 m slm).

MIVIS alle quali è stata applicata la procedura sviluppata da Teggi et al.[1999].

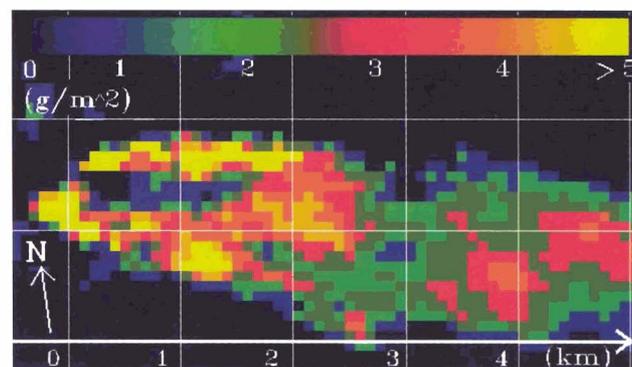
I dati riportati in Tabella 3 mostrano il valore medio del flusso valutato utilizzando le immagini ASTER simulate, le immagini MIVIS e le altre misure effettuate durante la campagna.

**Tabella 3** - Flussi medi valutati con le diverse procedure.

METODI E STRUMENTI UTILIZZATI	FLUSSO DI $SO_2$ ( $kg/s$ ) (12 GIUGNO 1997)	FLUSSO DI $SO_2$ ( $kg/s$ ) (16 GIUGNO 1997)
ASTER (Tecnica Split-Window)	$42 \pm 9$	$33 \pm 7$
MIVIS (MODTRAN-LUT)	$45 \pm 8$	$28 \pm 9$
COSPEC (T. Caltabiano)	$49 \pm 10$	$36 \pm 9$
COSPEC (P. Allard)	$44 \pm 3.6$	$32 \pm 2.1$



**Figura 4** - 12 giugno 1997 - Immagine ASTER, in contenuto colonnare di  $SO_2$ , del plume dell'Etna.



**Figura 5** - 16 giugno 1997 - Immagine ASTER, in contenuto colonnare di  $SO_2$ , del plume dell'Etna.

## Conclusioni

In questo lavoro è stata verificata la possibilità di utilizzare le immagini TIR dell'ASTER per la stima del flusso di  $SO_2$  dell'Etna. Le immagini ASTER sono state simulate a partire da immagini MIVIS acquisite durante la campagna di misura "Sicily '97". L'algoritmo utilizzato per la stima del contenuto colonnare di  $SO_2$  è stato ottenuto utilizzando la tecnica dello *Split-Window* precedentemente applicata alle immagini MIVIS. I parametri dell'algorit-

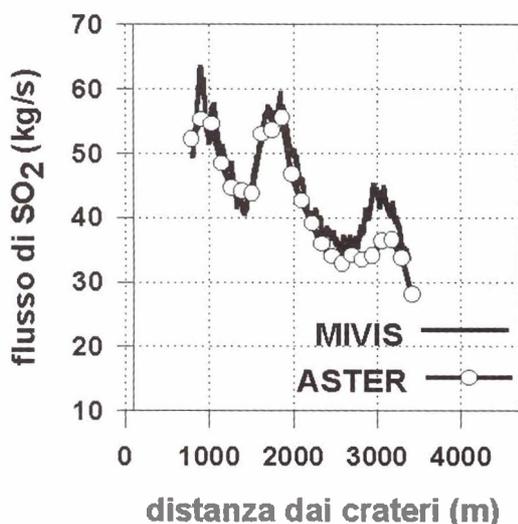


Figura 6 - 12 giugno 1997 - Andamento del flusso di SO<sub>2</sub> lungo l'asse del plume calcolato dall'immagine ASTER simulata e ottenuto direttamente dalle immagini MIVIS.

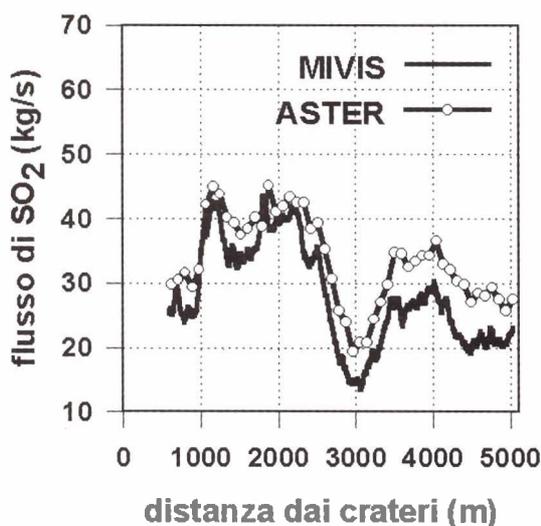


Figura 7 - 16 giugno 1997 - Andamento del flusso di SO<sub>2</sub> lungo l'asse del plume calcolato dall'immagine ASTER simulata e ottenuto direttamente dalle immagini MIVIS.

mo sono stati determinati, per tre differenti giorni, attraverso simulazioni MODTRAN 3.5 considerando il *plume* ad un'altezza di 3300 m e di spessore costante pari a 100 m (Tabella 2); i primi tre parametri risultano circa costanti mentre, il quarto mostra un andamento lineare con il valore di temperatura dell'aria misurata a Torre del Filosofo (2920 m s.l.m.) da una stazione meteorologica automatica (Figura 3). Questi aspetti dovranno essere studiati più in dettaglio considerando un *range* temporale maggiore.

Dalle mappe in contenuto colonnare di SO<sub>2</sub> e dalla velocità del vento all'altezza del plume è stato ottenuto il flusso emesso dall'Etna. Nelle Figure 6 e 7 vengono mostrati i confronti tra gli *andamenti* del flusso relativi alle immagini ASTER e quelli ottenuti dall'elaborazione diretta delle immagini MIVIS; si può notare che l'andamento delle curve risulta simile.

Infine i flussi medi, 42 kg s<sup>-1</sup> per il 12 e 33 kg s<sup>-1</sup> per il 16 giugno, sono in buon accordo con quelli ottenuti direttamente dalle immagini MIVIS e dalle misure COSPEC.

### Bibliografia

Allard P., Carbonelle J., Dajlevic D., Bronec J. Le, Morel P., Robe M. C., Maurenas J. M., Pierret R. F., Martins D., Sabroux J. C., e Zettwoog P. (1991) - *Eruptive and diffuse emissions of CO<sub>2</sub> from Mount Etna*. Nature, 351: 387-391.

Andersen H. S. (1996) - *Estimation of precipitable water from NOAA-AVHRR data during the Hapex Sahel experiment*. Int. J. Remote Sens., 17; 2783-2801.

Anding D. e Kauth R. (1970) - *Estimation of sea surface temperature from space*. Remote Sensing Environment, 1, 217-220.

Buongiorno M.F., Bogliolo M. P., Caltabiano T., Carrere V., Corradini S., Merucci L., Pugnaghi S., Salvi S., Sterni A., e Teggi S. (1999) - *MVRRS Campaign: MIVIS mission on Sicilian volcanoes and ground measurements*. Pub. Ist. Naz. Di Geofisica, Rome, Italy (in press).

Caltabiano T., Romano R. e Budetta G. (1994) - *SO<sub>2</sub> flux meseasurements at Mount Etna (Sicily)*. Journal of Geophysical Research, 99(D6): 12809-12818.

Casadevall T. J., Johnston D. A., Harris D. M., Rose W. I., Malinconico L. L., Stoiber R. E., Bornhorst T. J., Williams S. N., Woodruff L., e Thompson J. M. (1981) - *SO<sub>2</sub> emission rates at Mount St. Helens from March 29 through December 1980*. U. S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1250, 193-200.

Casadevall T. J., Rose W. I., Gerlach T., Greenland L. P., Ewert J., Wunderman R., e Symonds R. (1983) - *Gas emission and eruptions of Mount St. Helens through 1982*. Science, 221: 1383-1385.

Casadevall T. J., Stokes J. B., Greenwood L. P., Malinconico L. L., Casadevall J. R., e Furukawa B. T. (1987) - *SO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> emission rate at Kilauea volcano, 1979-1984*. U. S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1350, 771-780.

Eisinger M., e Burrows J. P. (1998) - *Observations of SO<sub>2</sub> from volcanic plumes*. ESA Earth Observation Q., 58: 16-18.

European Space Agency (ESA) (1993) - *Global Ozone Monitoring Experiment. interim science report*. Eur. Space Agency Spec. Publ., ESA SP-1182.

Gillespie A., Rokugava S., Matsunaga T., Cothorn J. S., Hook S., e Kale A. (1998) - *A temperature and emissivity separation algorithm for Advance Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER) images*. IEEE Trans. Geosc. Remote Sens., 36: (4) 1113-1126.

Krueger A.J. (1983) - *Sighting of El Chichòn sulfur dioxide clouds with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer*. Science, 220: 1377-1379.

Krueger A.J., Walter L. S., Schnetzler C. C., e Doiron D. S. (1990) - *TOMS measurements of the sulfur dioxide emitted during the 1985 Nevada del Ruiz eruption*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 41: 7-15.

Krueger A. J., Walter L. S., Bhartia P. K., Schnetzler C.C., Krotkov N. A., Sprod I., e Bluth G. J. S. (1995) - *Volcanic sulfur dioxide measurements from the Total Ozone Mapping Spectrometer instruments*. Journal of Geophysical Research, Vol. 100: NO. D7, 14057-14076.

Malinconico L. L. (1979) - *Fluctuations in SO<sub>2</sub> emission during recent eruption of Etna*. Nature, 278: 4345.

Mc. Gee K. A., e Sutton A. J. (1994) - *Eruptive activity at Mount St. Helens, Washington, USA, 1984-1988, A gas chemistry prospective*. Bull. Volcanol., 56: 433-446.

McMillin L.M. e Crosby D.S (1975) - *Theory and validation of the multiple window sea surface temperature technique*. Journal of Geophysical Research, Vol.89: 3661-3665.

Ottle C., Outalha S., Francois C., e LeMaguer S. (1997). - *Estimation of total atmospheric water vapour from split-window radiance absorption*. Geophys. Res., 80, 5113-5117.

Prabhakara C., Dalu G. e Kunde V. G. (1974) - *Estimation of sea surface temperature from remote sensing in the 11 to 13 mm window region*. Journal of Geophysical Research, Vol.79: 5039-5044.

Pugnaghi S., Teggi S., Corradini S., Buongiorno M. F., Bogliolo M. P., e Merucci L. (submitted to GRL) - *Estimation of sulfur dioxide plume from high resolution radiance measurements in thermal infrared using two MIVIS channels with different absorption: A case study from Mt. Etna volcano, Sicily 1997 campaign*. Geophys. Res. Lett., pp.4.

Realmutto V. J. (1990) - *Separating the effects of temperature and emissivity: Emissivity spectrum normalization*. In Proceedings, 2nd Thermal Infrared Multispectral Scanner (TIMS) Workshop, edited by E. A. Abbots, JPL Publ., 90-55, 310-316.

Realmutto V. J., Abrams M. J., Buongiorno M. F., e Pieri D. C. (1994) - *Multispectral Infrared Mapping of sulfur dioxide plumes: a case study from Mount Etna, Sicily, July 29, 1986*. Journal of Geophysical Research, 99: 481-488.

Realmutto V. J., Sutton A. J., e Elias T. (1997) - *Multispectral infrared mapping of sulfur dioxide plumes: A case study from the East Rift Zone of Kilauea Volcano, Hawaii*. J. Geophys. Res., 102: 15057-15072.

Saunders P.M. (1967) - *Aerial measurements of sea surface temperature in the infrared*. Journal of Geophysical Research, 72: 4109-4117.

Schmugge T. J., Becker F. e Li Z. L. (1991) - *Spectral emissivity variations observed in the airborne surface temperature measurements*. Remote Sens. Environ., 35:95-104.

Stoiber R. E., Malinconico L. L., e Williams S. N. (1983) - *Use of the correlation spectrometer at volcanoes*. In Forecasting Volcanic Events, edited by H. Tazieff and J. C. Sabroux, Elsevier, New York, pp. 425-444.

Stoiber R. E., Williams S. N., e Huebert B. (1987) - *Annual contributions of the sulfur dioxide to the atmosphere by volcanoes*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 33: 1-8.

Teggi S., Bogliolo M. P., Buongiorno M. F., Pugnaghi S. e Sterni A. (1999) - *Evaluation of SO<sub>2</sub> emission from Mt. Etna using diurnal and nocturnal MIVIS TIR remote sensing images and Radiative transfer models*. Journal of Geophysical Research, 104(B9): 20069-20079.

Ulivieri C., Castronuovo M. M., Francioni R. e Cardillo A. (1994) - *A Split-Window algorithm for estimating land surface temperature from satellites*. Advanced Space Research, 14(3): 59-65.

# Uso dei dati MIVIS per il rilevamento dell'alterazione idrotermale in aree vulcaniche attive: l'esempio dell'isola di Vulcano

Francesco Mazzarini <sup>(1)</sup> e Maria Teresa Pareschi<sup>(1)</sup>

I dati iperspettrali MIVIS sono stati usati per riconoscere aree con alterazione idrotermale attiva, dovuta a camere magmatiche superficiali, nell'isola di Vulcano. Dati geologici e spettrali di terreno hanno permesso di scegliere le bande MIVIS più idonee per il riconoscimento dell'alterazione. Queste bande effettivamente consentono di riconoscere le rocce alterate da quelle fresche, specialmente nella zona del cono de La Fossa dove l'assenza di edifici e vegetazione rende il riconoscimento più semplice. I dati MIVIS termici, relativi ad un sorvolo notturno, assieme a misure di temperatura al suolo sono stati inoltre usati per evidenziare la stretta correlazione spaziale, nel cono de La Fossa, tra aree idrotermali attive, fumarole ed anomalie termiche.

## Introduzione

Vulcano fa parte dell'arco vulcanico delle Isole Eolie, ed è stato un vulcano attivo in tempi storici. Il vulcano de La Fossa (Fig. 1) rappresenta il cratere attivo dell'isola; esso consiste di un cono cineritico con fianchi ripidi che si eleva di 391 m sul livello del mare [Frazzetta e La Volpe, 1991]. L'ultima eruzione della La Fossa è avvenuta nel 1888-1890 [Mercalli e Silvestri, 1891]. Da quel momento il vulcano è in stato quiescente con variabile attività fumarolica con associate anomalie termiche ed attività sismica [Montalto, 1996; Harris e Stevenson, 1997]. Vi sono altre importanti strutture vulcaniche nell'isola, in particolare: Vulcanello, Faraglione, Vulcano Primordiale, Punta Luccia e Monte Saraceno (Fig. 1). La nostra attenzione sarà focalizzata sul cratere attivo di La Fossa.

Il complesso eruttivo di Vulcano è interessato da un'estesa alterazione idrotermale sia attiva sia fossile [Fulignati et al., 1996; 1998; Harris e Stevenson, 1997]. Il maggior sviluppo dell'alterazione idrotermale è nel cratere de La Fossa, associato con i più importanti campi fumarolici. Le fumarole di alta temperatura sono essenzialmente concentrate nel bordo nord del cratere, mentre fumarole a più bassa temperatura ( $\leq 100^\circ\text{C}$ ) sono presenti nel lato nord del cratere a Le Forgie e nel lato sud (Fig. 1). In quest'ultimo secolo, l'attività fumarolica del cratere La Fossa ha avuto due principali fasi parossistiche, la prima negli anni '20-'30 e l'ultima dal 1978 ad ora [Barberi et al., 1991].

<sup>(1)</sup> CSGSDA-CNR, via S.Maria 53, I-56100 Pisa

Ricevuto il 08/06/00 - Accettato il 31/08/00

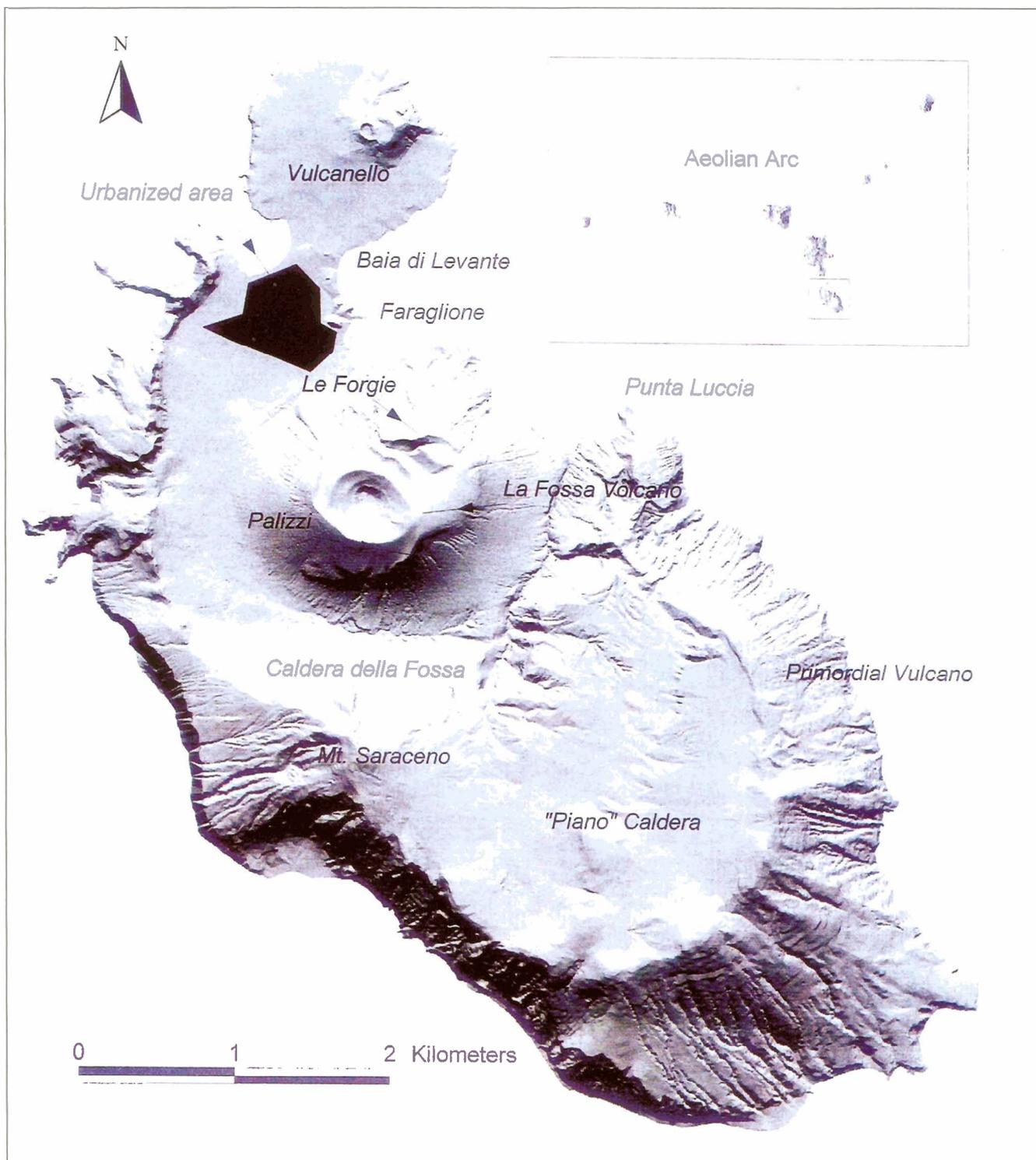
*Remotely sensed data (Airborne hyperspectral MIVIS data) were used to map active hydrothermal areas, related to a shallow magmatic chamber, at Vulcano island (Sicily). Field spectra of selected altered surfaces and field survey were used to select the most suitable bands from the whole MIVIS data set. The band selection used was able to clearly discriminate between fresh and hydrothermally altered rocks, especially at La Fossa crater. The thermal infrared MIVIS channel, relatively to a night flight, as well as the field temperature measurements have been used to outline the thermal anomalies over the La Fossa cone and their spatial correlation with hydrothermal alteration.*

L'area della caldera de La Fossa è, quindi, sede di importanti emissioni fumaroliche che sono l'espressione superficiale di un sistema magmatico-idrotermale attivo il cui motore principale è un sistema magmatico superficiale di alimentazione. I fluidi sono, quindi, arricchiti in gas acidi ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  e  $\text{HF}$ ) e risalendo in superficie condensano con acque superficiali formando forti soluzioni acide o sono scaricati dalle fumarole [Chiodini et al., 1995; Fulignati et al., 1998, 1999].

Dati telerilevati da aereo attraverso il *Multispectral Infrared Visible Imaging Spectroradiometer* (MIVIS) sono stati usati per il riconoscimento delle superfici alterate dall'attività idrotermale, con particolare interesse per l'area del cratere de La Fossa. I dati iperspettrali MIVIS sono stati scelti per la loro alta risoluzione spaziale, radiometrica e spettrale.

Sulla base di dati di terreno, geologici e spettrali, e delle paragenesi mineralogiche delle rocce alterate [Fulignati et al., 1998] otto canali sono stati selezionati (circa 40 Mb di dati) dall'intero set di bande del MIVIS (centodieci canali, circa 500 Mb di dati). Un approccio multispettrale è stato quindi usato per l'analisi dei canali selezionati. Il lavoro di terreno ha permesso anche di selezionare alcuni siti caratterizzanti le varie facies d'alterazione idrotermale, usati poi come aree campione durante il processo di classificazione.

I canali MIVIS selezionati hanno permesso di discriminare, in aree vulcaniche attive, le rocce interessate da alterazione idrotermale e di localizzare le emissioni fumaroli-



**Figura 1** - *Digital Elevation Model* dell'Isola di Vulcano, illuminazione da nord; sono ben visibili le principali strutture vulcaniche dell'isola.

che, e potrebbero essere usati durante fasi d'esplorazione d'aree vulcaniche per le quali le conoscenze dirette siano scarse se non del tutto assenti.

L'uso, inoltre, delle immagini MIVIS notturne, nei canali relativi all'infrarosso termico, permette di evidenziare la localizzazione dell'anomalia termica collegata ai campi fumarolici.

### Alterazione idrotermale

L'alterazione idrotermale superficiale dell'isola è di tipo *high sulfidation* in accordo con le analisi mineralogiche e geochimiche, e consiste di tre principali facies [Fulignati et al., 1998; 1999]. Esse sono, in ordine decrescente d'acidità e termalità:

- 1) Facies *Silicic Alteration* (SA): la roccia originale è lisciviata da fluidi molto acidi (pH<2) che lasciano una roccia residuale formata principalmente da SiO<sub>2</sub> (circa il 95% in peso). Le fasi mineralogiche che si formano sono dominate dalla presenza di silice amorfa, zolfo nativo e, in minore quantità, barite e realgar (Tab. 1). Vicino alle fratture sede di fumarole ad alta temperatura si ritrovano sublimati;
- 2) Facies *Advanced Argillic* alunitica (AA): la roccia è ampiamente sostituita da minerali del gruppo delle alunite (natroalunite, alunite e jarosite) con netta prevalenza di alunite (Tab. 1), a volte è presente gesso;
- 3) Facies *Intermediate Argillic* (IA): la halloysite è il minerale tipico di questa facies, a volte associato con ematite e smectite (Tab. 1). Questa facies è limitata a poche decine di metri quadrati, essenzialmente esposti lungo le ripide pareti interne del lato ovest del cratere La Fossa.

L'attenzione è stata focalizzata sull'alterazione idrotermale presente nel vulcano attivo de La Fossa, dove l'assenza d'edifici e di vegetazione, almeno nelle sue porzioni più elevate, rende più agevole il riconoscimento delle rocce alterate.

Dati di letteratura e il lavoro di terreno mostrano come l'alterazione idrotermale del bordo settentrionale del cono

de La Fossa interessi rocce riolitiche e latitiche, con la facies SA vicino alle fumarole d'alta temperatura circondata dalla facies AA [Fulignati et al., 1998]. Le fumarole e la circolazione di fluidi sembrano essere controllate da sistemi di frattura diretti circa N-S. Zone d'alterazione idrotermale fossili sono state identificate nell'isola, nella struttura del Vulcano Primordiale e nell'area attorno la caldera de La Fossa.

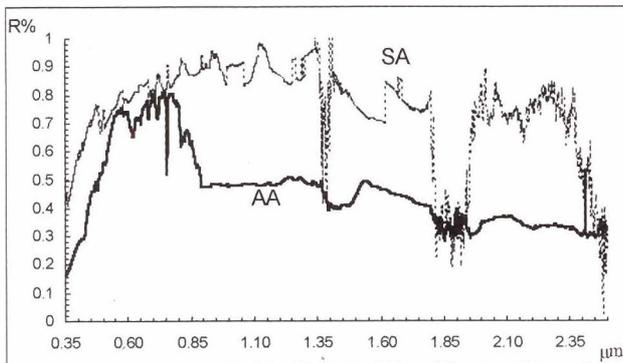
### Dati di terreno

Il lavoro di terreno è stato condotto alla scala di 1:10000. Oltre al rilievo geologico, sono stati misurati gli spettri delle superfici alterate, delle rocce fresche e della vegetazione. È stato usato lo spettrometro FieldSpec FR, che opera nell'intervallo ottico dello spettro elettromagnetico (0.35-2.5 μm). Questo strumento usa cavi a fibre ottiche collegati a tre spettrometri: il primo misura la radiazione relativa alla regione con lunghezze d'onda da 0.35 a 1.0 μm con intervallo di campionamento di 0.0014 μm (Visibile/Infrarosso Vicino, VNIR). Gli altri due spettrometri operano nell'Infrarosso a lunghezze d'onda corte (SWIR1 e SWIR2), hanno intervalli di campionamento di 0.002 μm e coprono le regioni spettrali di 0.9-1.85 μm e di 1.7-2.5 μm, rispettivamente. Il FieldSpec FR rileva dati di riflettanza mediati su 30 misure ed integrati su finestre spettrali di 0.001 μm, le misure sono relative ad una superficie di riferimento, fatta di materiale con caratteristiche fisiche ed ottiche note (spectralon). Le misure spettrali sono state effettuate con un'ottica di 8° con il sensore a circa 50 cm sopra la superficie da misurare. Questo procedimento è stato adottato per investigare aree le più possibili omogenee e per ridurre il rumore di *backscattering* derivante dalle superfici circostanti. L'area misurata è, quindi, ampia circa 4.0 x 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>. La riflettanza della superficie di riferimento è stata misurata prima della misurazione di ciascun target.

Sono state campionate tutte le facies d'alterazione idrotermale (SA, AA ed IA); poiché l'estensione della facies *Intermediate Argillic* (IA) è molto limitata, essa è stata

**Tabella 1** - Facies mineralogiche riscontrate nelle differenti facies d'alterazione idrotermale.

Facies d'alterazione idrotermale	Fasi mineralogiche
Intermediate Argillic (IA)	halloysite, smectite, hematite, goethite
Advanced Argillic (AA)	alunite, natroalunite, jarosite, gesso, silice amorfa, mizzonite, zolfo nativo, wilcoxite, goethite, halite, barite, realgar
Silicic Alteration (SA)	Silice amorfa, zolfo nativo, salammoniac, cristobalite, realgar, goethite, barite, oro, tellurium, solfati di Pb-Bi



**Figura 2** - Spettri misurati sul terreno (riflettanza vs. lunghezza d'onda) relativi alle rocce alterate in facies AA e a quelle in facies SA.

incorporata nella facies *Advanced Argillic* (AA) e non più considerata nel seguito. Sono state campionate anche aree con rocce non alterate, vegetazione e suolo. Il lavoro di terreno ha inoltre rilevato la stretta relazione spaziale, nel bordo nord del cratere de La Fossa, tra la facies *Silic Alteration* e le fumarole d'alta temperatura. Lungo le principali fratture d'emissione ci sono abbondanti sublimati di zolfo di colore giallo; in queste aree è stato difficile ottenere buoni dati spettrali per l'effetto della condensazione e dei gas sul segnale. Di seguito sono brevemente descritti gli spettri relativi alle facies d'alterazione idrotermale (Fig. 2).

### **Advanced Argillic (AA)**

Gli spettri di AA sono stati campionati a Palizzi (Fig. 1) e la loro media è riportata in Figura 2; le caratteristiche d'assorbimento dello ione  $Fe_3^+$  (0.43, 0.6 e 0.9  $\mu m$ ) sono ben espresse. Gli assorbimenti dell'acqua (bande d'assorbimento multiple) sono a circa 1.0-1.2  $\mu m$  e a 1.4  $\mu m$ . A 1.5  $\mu m$  un caratteristico assorbimento marca l'inizio della pendenza della curva verso alte lunghezze d'onda fino a 1.85  $\mu m$ . Altre importanti zone con caratteristiche spettrali tipiche dell'acqua sono attorno a 1.9, 2.2  $\mu m$ ; gli assorbimenti attorno a 2.4-2.5  $\mu m$  sono parzialmente mascherati dal rumore.

### **Silic Alteration (SA)**

Lo spettro, riportato in Figura 2, è la media di campionamenti effettuati in diversi siti localizzati essenzialmente nel bordo nord del cratere de La Fossa, dove è attivo un intenso campo fumarolico. A causa dell'effetto dei gas e della loro condensazione lo spettro, relativo a rocce alterate in facies SA, ha un basso rapporto segnale/rumore. Comunque, un tenue assorbimento attorno a 0.56  $\mu m$ , dovuto alla presenza di ioni  $Fe_3^+$ , è sempre riconoscibile. Gli assorbimenti dovuti alla presenza di acqua sono sempre riconoscibili (1.4, 1.9 e, parzialmente oscurato dal rumore, 2.2  $\mu m$ ). La finestra spettrale, posizionata attorno

a 2.3-2.5  $\mu m$ , è fortemente affetta dal rumore (Fig. 2).

I dati spettrali di letteratura relativi a rocce con alterazione idrotermale [Buckingham e Sommer, 1983] ed alle fasi mineralogiche presenti (alunite, gesso, jarosite, barite, zolfo) [Hunt e Ashley, 1979] mostrano numerosi assorbimenti caratteristici della presenza di acqua a 1.0-1.2  $\mu m$  (specialmente nel gesso), 1.4  $\mu m$ , 2.2  $\mu m$  e vicino a 1.9  $\mu m$ . Attorno a 1.5  $\mu m$ , le rocce alterate in facies AA mostrano una pendenza verso le basse frequenze tra 1.5 e 1.85  $\mu m$ , tipica dello spettro dell'alunite [Hunt et al., 1971]. Le caratteristiche spettrali attorno a 0.43  $\mu m$  sono proporzionali alla quantità di jarosite presente, laddove lo ione ferrioso sono responsabili degli assorbimenti a 0.6 e 0.9  $\mu m$ . Tutti i minerali idrati, in ogni facies d'alterazione, sono caratterizzati dagli assorbimenti per lo ione  $OH^-$  a 2.4-2.5  $\mu m$ . La presenza dell'assorbimento attorno a 1.75  $\mu m$  dipende dalla quantità di gesso presente e dalla sua temperatura di formazione [Hunt et al., 1971; Hunt e Ashley, 1979].

Le differenze nel comportamento spettrale delle due facies d'alterazione idrotermale dipendono dal differente contenuto di minerali (Tab. 1). La facies AA è essenzialmente caratterizzata da alunite, gesso (circa il 75% della roccia) e in minor parte jarosite. La facies SA è, invece, caratterizzata da presenza di silice amorfa (opale e cristobalite, circa l'80-95% della roccia). Zolfo nativo, barite e goethite sono meno abbondanti, ma presenti in entrambe le facies d'alterazione. In generale la facies SA ha valori di riflettanza più alti di AA (Fig. 2). Nella regione del visibile, la facies AA mostra assorbimenti marcati dovuti alla presenza di minerali ricchi in ione  $Fe_3^+$  (0.43, 0.6 e 0.9  $\mu m$ ). D'altro canto, gli assorbimenti dovuti alla presenza di acqua (1.4, 1.9 e 2.4-2.5  $\mu m$ ) sono molto più marcati per la facies SA che per la AA. La generale alta risposta spettrale della facies SA può essere dovuta sia alla presenza dei minerali di silice amorfa (opale e cristobalite; assorbimento a 1.9  $\mu m$ ) sia alle coperture di sublimati di zolfo in prossimità delle fumarole di alta temperatura.

Infine, il fianco est del cratere de La Fossa presenta estese superfici alterate, problemi logistici non hanno permesso le misurazioni radiometriche, ma un'ispezione ha rivelato che le rocce su questo lato sono essenzialmente alterate solo superficialmente e non completamente trasformate come per le altre zone; questo tipo d'alterazione è nominato quindi 'alterazione superficiale'.

### **Dati telerilevati**

I dati iperspettrali relativi all'isola di Vulcano sono stati ottenuti attraverso il sensore Daedalus AA500 MIVIS, nell'ambito del Progetto CNR LARA Campagna "Sicilia 94" [Bianchi et al., 1994; Caruso et al., 1996; Bogliolo et al., 1996]. Il MIVIS è un sensore passivo montato su piattaforma aerea che registra, in 102 canali, energia dal visibile all'infrarosso termico (Tab. 2).

La scena studiata è una singola strisciata ampia 2800 m

**Tabella 2 - Range e risoluzione spettrale dei canali del MIVIS.**

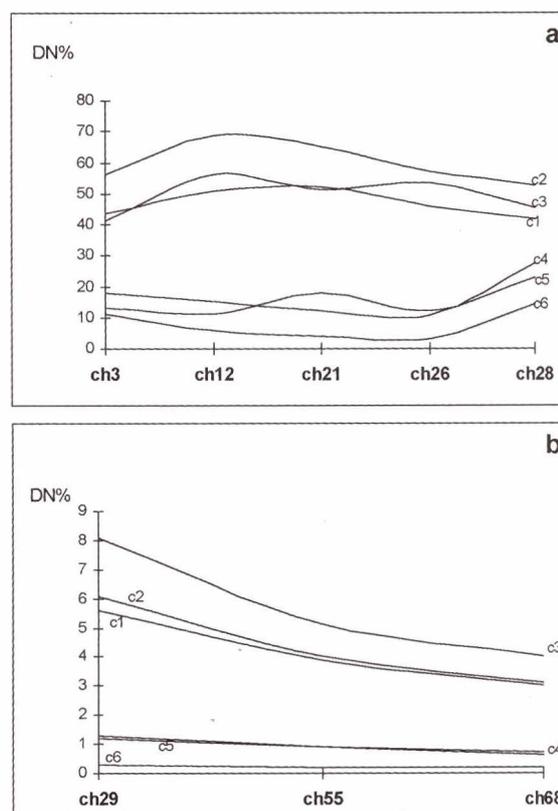
Optical port	Range spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Numero di canali	Risoluzione spettrale ( $\mu\text{m}$ )
1 (VIS)	0.431-0.833	20	0.02
2 (NIR)	1.150-1.155	8	0.05
3 (SWIR)	1.983-2.479	64	0.008
4 (TIR)	8.210-12.700	10	0.4

che ricopre il settore est dell'isola, includendo l'intera caldera de La Fossa (data di acquisizione: 21 Luglio 1994, 8:11-8:19 ora locale). I dati MIVIS hanno una risoluzione radiometrica di 12 bit, ed una spaziale di circa 4 m (dipendendo questa dall'altezza del volo e dal rilievo dell'area ripresa). Il rilevamento di terreno, i dati spettrali raccolti e le analisi mineralogiche permettono di scegliere dall'intero set dei dati MIVIS i canali più idonei per il riconoscimento dell'alterazione idrotermale; come prima approssimazione l'effetto dell'atmosfera è stato ignorato assumendolo omogeneo sull'area investigata. Nel campo ottico dello spettro elettromagnetico (0.35-2.5  $\mu\text{m}$ ) sono stati scelti otto canali MIVIS:

- i canali ch3 e ch12 sono prossimi agli assorbimenti relativi agli ioni ferro (0.6 and 0.9  $\mu\text{m}$ );
- i canali ch29, ch55 e ch68 sono localizzati sui principali assorbimenti dell'acqua presenti in tutti i minerali del gruppo delle aluniti (1.9, 2.2 e 2.3  $\mu\text{m}$ );
- il canale ch26 è posizionato attorno l'assorbimento a 1.4  $\mu\text{m}$  tipico delle rocce idrotermalizzate; il canale ch28 vicino a 1.5  $\mu\text{m}$  che è diagnostico dello spettro di rocce alterate in facies AA ed, infine, il canale ch21 risponde dell'assorbimento attorno 1.1  $\mu\text{m}$ , tipico degli spettri dell'alunite e del gesso.

Riassumendo, le bande selezionate possono essere riunite in tre principali gruppi: il primo (ch3 e ch12) rappresenta la risposta spettrale degli ioni ferro nello spettro visibile, il secondo (ch21, ch26 e ch28) è diagnostico della risposta spettrale dell' $\text{SO}_4$  relativamente al gesso ed alunite; il terzo, infine, (ch29, ch55 e ch68) è relativo all'assorbimento dello ione  $\text{OH}^-$  presente in tutti i minerali dovuti alle alterazioni idrotermali ed al forte assorbimento a circa 1.9  $\mu\text{m}$  dovuto alla presenza di silice amorfa.

Sulla base del rilievo di terreno, sono state identificate sei aree omogenee, ampie circa 400  $\text{m}^2$ , considerate rappresentative di alcuni differenti tipi di superfici. Queste differenti tipologie di superfici rappresentano sei classi: classe c1, SA; classe c2, AA; classe c3, alterazione superficiale; classe c4, rocce fresche; classe c5, vegetazione e suolo; classe c6, aree in ombra, mare e suoli. Queste aree sono state riconosciute nell'immagine MIVIS e sono stati



**Figura 3 - Spettri delle classi scelte (DN vs. canali. c1, SA; c2, AA; c3, alterazione superficiale; c4, rocce fresche; c5, vegetazione e suolo; c6, mare, ombre e suoli) relativamente ai dati MIVIS. a) spettro di ch3, ch12, ch21, ch26 e ch28, b) spettro di ch29, ch55 e ch68. I valori DN sono riportati come % rispetto al massimo valore in ciascun canale del data set originale. Da notare come le rocce alterate (classi c1, c2, e c3) si differenzino nettamente dalle altre superfici ed abbiano i valori più alti delle altre classi (c4, c5 e c6).**

calcolati gli spettri delle varie classi (Fig. 3), spettri che chiaramente mostrano valori (DN) nettamente più elevati delle rocce alterate (classi c1, c2 e c3) rispetto ai valori delle altre superfici (classi c4, c5 e c6).

Per aumentare al massimo i contrasti tra le differenti superfici presenti nella scena, la Trasformazione delle Componenti Principali (PCT; Gupta, 1992) è stata applicata, riducendo così la ridondanza spettrale dei dati. La Prima Componente corrisponde del contributo di tutti i canali e, di fatto, è un'immagine delle intensità, dove le varie condizioni d'illuminazione sono più rappresentate che quelle spettrali. La maggior parte dell'informazione spettrale è contenuta nelle componenti più basse. Differenti immagini a colori sono state generate, in particolare la distribuzione delle rocce con alterazione idrotermale è ben evidenziata dalle immagini Pc1 - Pc2 - Pc3 (RGB) principale (Fig. 4a) Pc3 - Pc4 - Pc5 (RGB) (Fig. 4b). Nell'immagine RGB costituita dalle tre prime componenti (Fig. 4a) le aree caratterizzate da forte alterazione idrotermale sono chiaramente visibili nei toni del verde e del giallo intenso specialmente nell'area nord del bordo craterico, dove gli spot nei colori magenta-violetto sono relativi alle posizioni delle fumarole ad alta temperatura. L'alterazione superficiale mostra colori nei toni del rosa. Le rocce fresche, nella parte sommitale del cratere de La Fossa, sono invece di colore blu e ciano.

Il metodo della trasformazione della componente principale selettiva (*Selective Principal Component Transform*; Chavez e Kwarteng, 1989) è stato applicato ai canali MIVIS selezionati. La componente principale è stata applicata ai differenti gruppi di canali precedentemente descritti: gruppo a, ch3 e ch12 per l'effetto del ferro; gruppo b, ch21, ch26 e ch28 per gli effetti dovuti alla presenza dell'SO<sub>4</sub>; ed infine gruppo c, ch29, ch55 e ch68 per l'effetto dell'assorbimento dovuto all'acqua. La composizione RGB delle prime componenti rispettivamente dei gruppi a, b e c (Fig. 4c) non distingue le differenti facies d'alterazione idrotermale, ma esalta le rocce alterate (giallo e bianco) rispetto alle rocce fresche, alla vegetazione e suolo.

Allo scopo di definire come le differenti superfici di alterazione contribuiscono alla risposta spettrale è stata effettuata una classificazione di tipo *supervised* nell'area del cono de La Fossa. Il classificatore *Spectral Angle Mapper* (SAM; Kruse et al., 1993) è stato applicato usando come spettri di riferimento quelli relativi alle aree campione riconosciute nell'immagine e definite durante il lavoro di terreno. Il metodo SAM consiste nel comparare gli angoli tra il vettore dello spettro di riferimento e quello di ogni pixel in uno spazio n-dimensionale, dove n è il numero di bande. Il pixel è attribuito alla classe, rappresentata da uno spettro di riferimento, per la quale l'angolo tra gli spettri è minore e, comunque, sotto a una soglia (0.10 radianti). Pixel per i quali qualsiasi spettro di riferimento

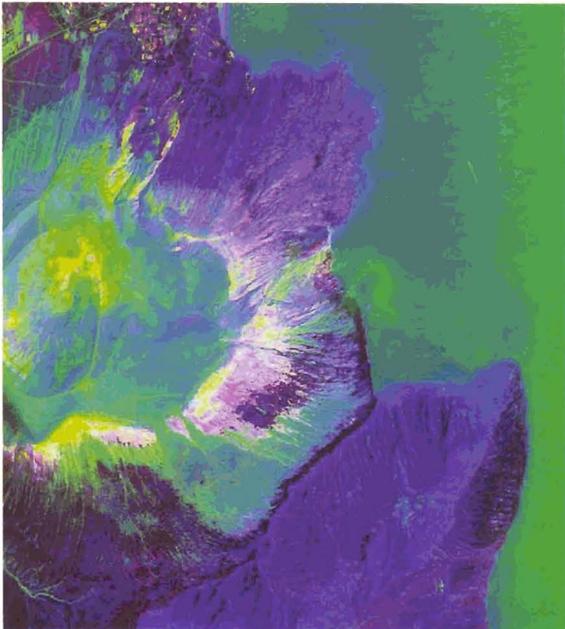
forma angoli superiori di tale soglia non sono classificati. Questo metodo è molto sensibile alla forma dello spettro dei pixel e poco alle variazioni tonali indotte da condizioni d'illuminazione differenti. La matrice degli errori è mostrata in tabella 3. L'accuratezza del classificatore adottato (*overall accuracy*) è del 92.3%. Generalmente le rocce alterate sono nettamente distinte dalle altre superfici (aree grigie in Tab. 3), con appena qualche percentuale d'errore tra superfici SA e rocce fresche e vegetazione. E' altrettanto chiaro come il classificatore usato non è capace di distinguere tra le differenti facies, esclusa l'alterazione superficiale. Riteniamo che tale inefficacia nella discriminazione spettrale delle facies d'alterazione idrotermale, sia essenzialmente causata dalla presenza di fumarole che tendono a mascherare fortemente il segnale. Dati telerilevati e misure di terreno hanno evidenziato la presenza di fumarole d'alta temperatura nel bordo nord e all'interno del cratere de La Fossa [Gaonac'h et al., 1994; Harris e Stevenson, 1997]. Per meglio localizzare zone con anomalia termica e, quindi, la posizione delle fumarole, abbiamo usato i dati dell'infrarosso termico del MIVIS (*Optical Port 4*, Tab. 2). E' stato usato il canale MIVIS 96 relativo al sorvolo notturno del 25 Luglio 1994. I dati sono stati georeferenziati con risoluzione al suolo di 30 m. La distribuzione dei valori dei pixel (DN) nell'immagine notturna è raggruppabile in tre ampie classi spettrali: mare (DN compresi nel range 1080-1150); isola (DN nel range 1045-1060) e cratere de La Fossa (DN variabili tra 1200-3110). Durante il sorvolo notturno sono state misurate temperature al suolo [Bogliolo et al., 1996] tramite termocoppia e termometro EVEREST all'infrarosso (Tab. 4). E' stata eseguita un'analisi semi qualitativa della radianza termica, calcolando una curva di regressione tra i valori dei pixel (DN) corrispondenti ai siti di Tabella 4 e le relative temperature. Quest'approssimazione non tiene in considerazione l'effetto dell'atmosfera, considerato omogeneo sull'intera area, e l'effetto del rilievo sulla distribuzione della temperatura. La regressione lineare, con errore quadratico medio di  $\pm 6^\circ\text{C}$ , è espressa dalla relazione:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 0.1819 \times \text{DN} - 172.94 \\ r^2 = 0.788$$

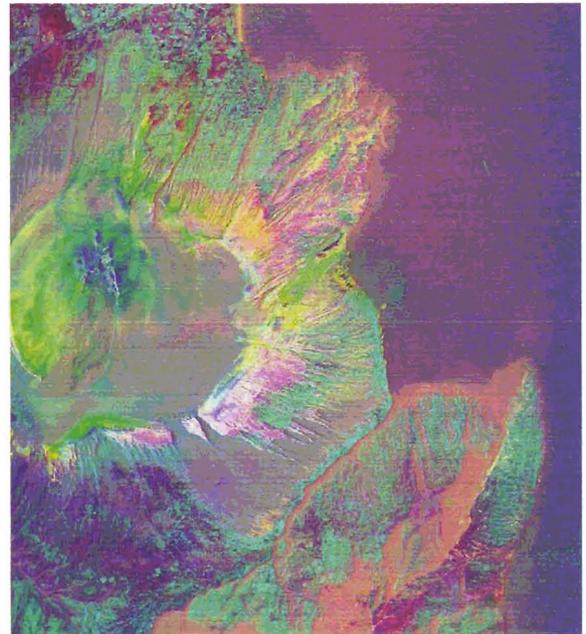
dove:

T= temperatura superficiale calcolata in  $^{\circ}\text{C}$   
DN= valore del pixel  
 $r^2$ = coefficiente di correlazione.

Secondo tale equazione il mare ha una temperatura calcolata compresa tra 23 e 36 $^{\circ}\text{C}$ , l'isola tra 17 e 20 $^{\circ}\text{C}$ , e il cratere de La Fossa temperature comprese tra 45 e 180 $^{\circ}\text{C}$ , con un punto a circa 300 $^{\circ}\text{C}$ . Le principali curve di livello,



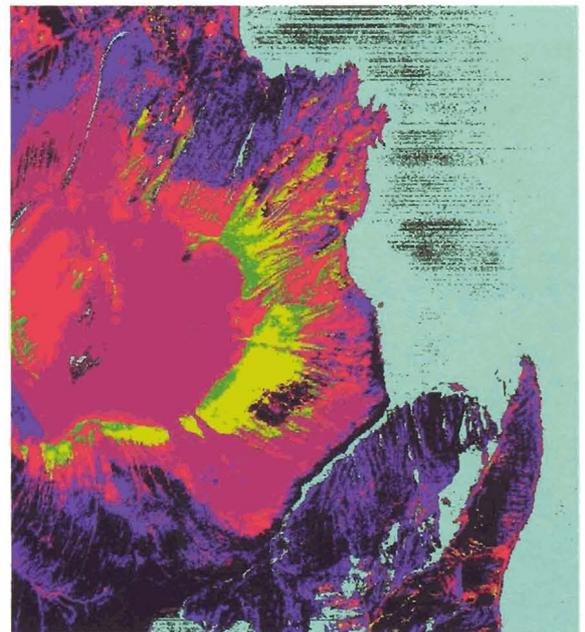
(a)



(b)



(c)



(d)

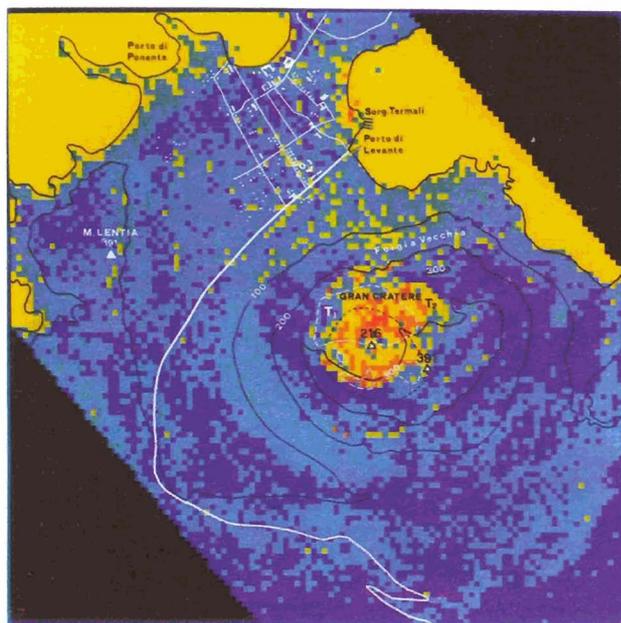
**Figura 4** - Immagini del cratere de La Fossa. a) composizione a colori RGB della PCA, 1°,2°,3° componente (PC). b) composizione a colori RGB della PCA, 3°,4°,5° componente. c) immagine RGB ottenuta dalla *Selective PCT*; rosso, ch3 e ch12 prima componente; verde, ch21, ch26 e ch28 prima componente; blu, ch29, ch55 e ch68 prima componente (SPC). d) immagine classificata tramite SAM: c1, rosso; c2, verde; c3, giallo, c4, marrone carminio; c5 blu; c6, verde mare; n.c., nero. Tutte le immagini sono linearmente contrastate (Concessione SMA 591 del 22.12.95).

	c1	c2	c3	c4	c5	c6
n.c.	0.00	0.00	0.00	0.00	7.34	6.40
c1	<b>69.44</b>	31.93	0.03	5.73	1.75	0.00
c2	20.14	<b>49.82</b>	3.33	0.00	0.00	0.00
c3	10.42	18.25	<b>96.67</b>	0.00	0.00	0.00
c4	0.00	0.00	0.00	<b>94.27</b>	20.98	1.60
c5	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>69.93</b>	0.00
c6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>92.00</b>

**Tabella 3** - Matrice degli errori relativi alla classificazione SAM. Le classi relative a superfici non alterate sono con lo sfondo grigio.

UTM X (m)	UTM Y (m)	Tipo di sup.	temp.	DN	sito
2496555	4252260	mud	32.0 C°	1106	Sorgenti termali
2496915	4249975	rock	15.8 C°	1030	Palizzi (IIV)
2495635	4250200	veget.	16.9 C°	1036	Stazione di Polizia
2495725	4251650	sand	17.0 C°	1060	Campo di calcio
2495912	4252467	sea	21.5 C°	1088	Porto di Ponente

**Tabella 4** - Dati descrittivi dei siti di misurazione delle temperature.



**Figura 5** - Immagine di temperatura: blu azzurro,  $10^{\circ}\text{C} < T < 20^{\circ}\text{C}$ ; giallo,  $20^{\circ}\text{C} < T < 45^{\circ}\text{C}$ ; arancione,  $45^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ ; rosso,  $T > 150^{\circ}\text{C}$ . All'immagine sono state sovrapposte le principali strade ed edifici, bianco, e le curve di livello 0, 100 e 200 m, nero. Nord, alto dell'immagine.

gli abitati e le strade sono stati sovrapposti sull'immagine termica notturna georeferenziata (Fig. 5).

Nonostante le approssimazioni insite in un simile approccio, le anomalie termiche evidenziate al cratere de La Fossa sono nette ed in corrispondenza con un'estesa alterazione idrotermale.

### Conclusioni

Le bande MIVIS scelte, sulla base dei dati geologici e spettrali di terreno, discriminano effettivamente le rocce interessate da alterazione idrotermale da quelle non alterate. Inoltre, sono parzialmente distinte le rocce interessate da alterazione idrotermale, che comporta una completa lisciviazione dell'intero volume di roccia, da quelle con alterazione superficiale, lato est del cono de La Fossa. La presenza dell'alterazione superficiale nel lato est del cono attivo può essere spiegata dalla circolazione locale dei venti, variabile durante il giorno, che porta i gas fumarolici, ricchi di  $\text{SO}_2$ , a concentrarsi lungo i versanti orientali [Graziani et al., 1997]. Riteniamo che l'approccio analitico di tipo multispettrale non consenta un'efficace determinazione dei livelli di alterazione idrotermale essenzialmente per la presenza dei gas delle fumarole. Probabilmente un approccio analitico di tipo iperspettrale potrebbe superare queste difficoltà. Infine, la correlazione spaziale tra alterazione idrotermale, anomalia termica e campi fumarolici è un'ulteriore conferma dell'origine magmatica dei fluidi circolanti.

## Bibliografia

- Barberi F., Neri G., Valenza M. e Villari L.** (1991) - *1987-1990 unrest at Vulcano*. Acta Vulcanologica, 1: 95-106.
- Bianchi R., Marino C.M. e Pignatti S.** (1994) - *Airborne hyperspectral remote sensing in Italy*. Proceedings EUROPTO Series 'Recent Advances in Remote Sensing and Hyperspectral remote sensing' SPIE, Roma (Italy), September 27-29 1994, 2318: 29-37.
- Bogliolo M.P., Buongiorno M.F., Salvi S., Teggi S., Pugnaghi S., Abrams M.J., Pieri D.C., Realmuto V.J. e Catalbiano T.** (1996) - *Ground measurements of physical parameters at Vulcano island and Mount Etna in support of the MIVIS remote sensing campaign "Sicilia-94"*. ING publication n. 577, pp. 67.
- Buckingham W.F. e Sommer S.E.** (1983) - *Mineralogical Characterization of Rock Surfaces Formed by Hydrothermal Alteration and Weathering - Application to Remote sensing*. Economic Geology, 78: 664-674.
- Caruso, P. Graziani G., Mosca S., Martilli A., Pareschi M.T. e Valenza M.** (1996) - *The Vulcano 1994 Summer campaign*. Nuovo Cimento, 19: 195-214.
- Chavez P.S. e Kwarteng A.Y.** (1989) - *Extracting Spectral Contrast in Landsat TM Image Data Using Selective Principal Component Analysis*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 55: 339-348.
- Chiodini G., Cioni R., Marini I. e Panichi C.** (1995) - *Origin of the fumarolic fluids of Vulcano Island, Italy and implications for volcanic surveillance*. Bulletin of Volcanology, 57: 99-110.
- Frazzetta G. e La Volpe L.** (1991) - *Volcanic history and maximum expected eruption at "La Fossa di Vulcano" (Aeolian Islands, Italy)*. Acta Vulcanologica, 1: 107-114.
- Fulignati P., Gioncada A. e Sbrana A.** (1996) - *Hydrothermal alteration in the subsoil of porto di Levante, Vulcano (Aeolian Islands, Italy)*. Acta Vulcanologica, 8: 129-138.
- Fulignati P., Gioncada A. e Sbrana A.** (1998) - *Geologic model of the Magmatic-hydrothermal system of Vulcano (Aeolian Islands, Italy)*. Mineral. Petrol., 62: 195-222.
- Fulignati P., Gioncada A. e Sbrana A.** (1999) - *Rare-earth element (REE) behaviour in the alteration facies of the active magmatic-hydrothermal system of Vulcano (Aeolian Islands, Italy)*. Journal of Volcanological and Geothermal Research, 88: 325-342.
- Gaonac'h H., Vandemeulebrouck J.S. e Halbwachs M.** (1994) - *Thermal infrared satellite measurements of volcanic activity at Stromboli and Vulcano*. Journal of Geophysical Research, 99: 9477-9485.
- Graziani G., Martilli A., Pareschi M.T. e Valenza M.** (1997) - *Atmospheric dispersion of natural gases at Vulcano island*. Journal of Volcanological and Geothermal Research, 75: 283-308.
- Gupta R.P.** (1992) - *Remote Sensing Geology, 2nd edition*. Springer-Verlag Ed., Berlino, pp. 356.
- Harris A.J.L e Stevenson D.S.** (1997) - *Thermal observations of degassing open conduits and fumaroles at Stromboli and Vulcano using remotely sensed data*. Journal of Volcanological and Geothermal Research, 76: 175-198.
- Hunt G.R., Salisbury J.W. e Lenhoff C.J.** (1971) - *Visible and Near-Infrared Spectra of Minerals and Rocks: IV. Sulphides and Sulphates*. Modern Geology, 3: 1-14.
- Hunt G.R. e Ashley R.P.** (1979) - *Spectra of Altered Rocks in the Visible and Near Infrared*. Economic Geology, 74: 1613-1629.
- Kruse F.A., Lefkoff A.B., Boardman J.B., Heidebrecht K.B., Shapiro A.T., Barloon P.J. e Goetz A.F.H.** (1993) - *The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data*. Remote Sensing of Environment, 44: 145-163.
- Mercalli G. e Silvestri O.** (1891) - *Le eruzioni dell'isola di Vulcano incominciate il 3 Agosto 1888 e terminate il 22 Marzo 1890*. Amm. Uff. centr. Meteor. Geodin., Roma, 10, pp. 213.
- Montalto A.** (1996) - *Signs of potential renewal of eruptive activity at la Fossa (Vulcano, Aeolian Islands)*. Bulletin of Volcanology, 57: 483-492.

# MIVIS

## dalla sperimentazione alle applicazioni

a cura di Petronio Malagoli e Riccardo De Paulis

Le tecniche di telerilevamento hanno uno sviluppo atipico rispetto a quelle che caratterizzano altre discipline. La messa in orbita di un nuovo satellite o la realizzazione di un nuovo sensore, generano un balzo che determina una potenziale capacità di acquisizione di dati territoriali ed ambientali, spesso quantitativamente e qualitativamente, tali da rivoluzionare le procedure impiegate fino a quel momento. Così è stato anche per il MIVIS.

La possibilità di registrare tutti i fenomeni elettromagnetici che si manifestano sulla superficie terrestre in un ampio intervallo di lunghezza d'onda (dai 0,4 ai 12 micron), suddiviso in 102 bande di ampiezza variabile, (64 canali con intervalli di soli 0,008 micron) ha permesso di ampliare notevolmente i metodi d'indagine, di solito più limitati sia in risoluzione spaziale sia spettrale.

Il periodo di studio delle caratteristiche tecniche dello strumento, di individuazione dei possibili campi applicativi e di sperimentazione vera e propria è stato necessariamente lungo soprattutto per il fatto che non esisteva al mondo una letteratura specifica, essendo il MIVIS tuttora un prototipo, costruito in unico esemplare dalla DAEDALUS. Una particolare attenzione merita anche il vettore messo a disposizione dalla Compagnia Generale Ripreseeree per il trasporto del sensore particolarmente voluminoso e pesante: il CASA 212 CC, un vero e proprio laboratorio volante.



Particolari dell'ampia cabina del laboratorio aereo in cui sono visibili il MIVIS, la camera fotogrammetrica digitale ADS40 della LH Systems e il sistema D-GPS.



Il Laboratorio aereo CASA 212 CC.

### SCHEDA TECNICA dell'aeromobile CASA 212 CC

<i>Tipo</i>	<i>CASA 212 CC</i>
<i>Casa costruttrice</i>	<i>C.A.S.A. Siviglia</i>
<i>Lunghezza</i>	<i>15,0 metri</i>
<i>Altezza</i>	<i>6,5 metri</i>
<i>Apertura alare</i>	<i>19,0 metri</i>
<i>Volume interno</i>	<i>19,0 metri cubi</i>
<i>Propulsori</i>	<i>2 motori Garret TPE da 900 HP</i>
<i>Capacità di carico</i>	<i>2 700 Kg</i>
<i>Velocità di crociera</i>	<i>350, Km/h</i>
<i>Tangenza</i>	<i>7.600 m</i>
<i>Autonomia</i>	<i>5h,30'</i>
<i>Botole per riprese verticali</i>	<i>2</i>
<i>Strumentazione</i>	<i>Equipaggiamento per volo strumentale e GPS</i>

I vari componenti del MIVIS: a sinistra l'elettronica di controllo e a destra la testa di scansione.



## II MIVIS Applicazione sul rilevamento del Cemento Amianto

<i>Data volo</i>	<i>Agosto 2000</i>
<i>Orario della ripresa</i>	<i>12.00</i>
<i>Quota di volo</i>	<i>1.200 metri</i>
<i>Risoluzione al suolo</i>	<i>2,5 metri</i>
<i>Scopo</i>	<i>localizzazione e valutazione delle coperture in cemento amianto</i>
<i>Risultati</i>	<i>classificazione, controllo e georeferenziazione su tutto il territorio di un comune italiano</i>

Porzione di un insediamento industriale ripreso con il sensore MIVIS nell'Agosto 2000 per la determinazione di eventuali presenze di coperture in cemento amianto. L'immagine è una rappresentazione in sintesi RGB a colori reali. (Aut. SMA n°386 del 17/11/00).



La disponibilità di molte informazioni spettrali per ogni singolo pixel, consente di discriminare i differenti materiali costituenti gli oggetti ripresi sul terreno; ciò consente, tra l'altro, di identificare le coperture costituite da cemento amianto, che nell'immagine, sono evidenziate in colore rosso dopo la classificazione. Da verifiche in sito si è potuto constatare un'alta correlazione con la classificazione iperspettrale.

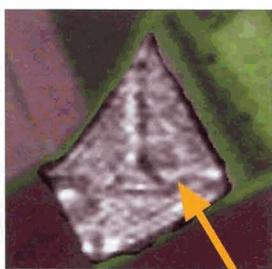


## Il MIVIS Applicazione in archeologia

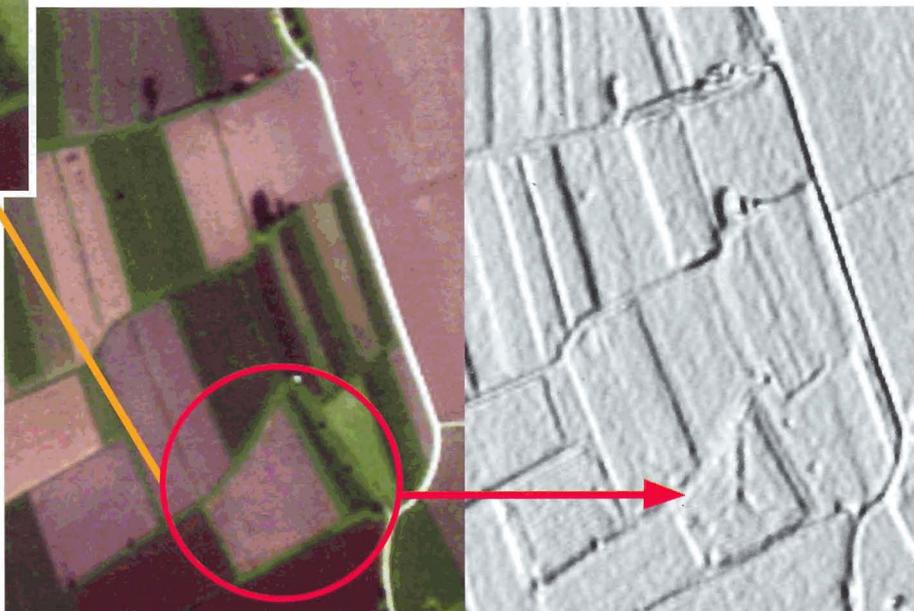
<i>Data volo</i>	<i>13 Ottobre 1998</i>
<i>Orario della ripresa</i>	<i>11.40</i>
<i>Quota di volo</i>	<i>1.500 metri</i>
<i>Risoluzione al suolo</i>	<i>3 metri</i>
<i>Scopo</i>	<i>analisi della fisiografia del territorio e ricerca dettagliata di strutture sepolte</i>
<i>Risultati</i>	<i>localizzazione di aree d'interesse caratterizzate da evidenti discontinuità fisiche</i>

Sintesi del lavoro di foto-interpretazione condotto su una ripresa MIVIS nell'area di Aquileia; le tracce evidenziate segnalano la presenza di elementi di discontinuità fisica nel territorio, riconducibili a possibili presenze nel sottosuolo di manufatti.

I vari colori rappresentano differenti gradi di evidenza di queste tracce, e quindi di probabilità di presenze sub-superficiali. Le tracce blu rappresentano dei paleoalvei. (Aut. SMA n°417 del 24/11/98).



Presenza di tracce geometricamente molto irregolari in una zona agricola della pianura friulana; la geometria di queste discontinuità fisiche è uno degli elementi che depone a favore della presenza di manufatti nel terreno piuttosto che di fenomeni derivanti da cause naturali. Si noti come nella sintesi RGB a colori reali tali geometrie siano assenti, mentre sono ben evidenti se osservate, con un particolare tipo d'elaborazione, nell'intervallo di lunghezza d'onda corrispondente all'infrarosso termico.



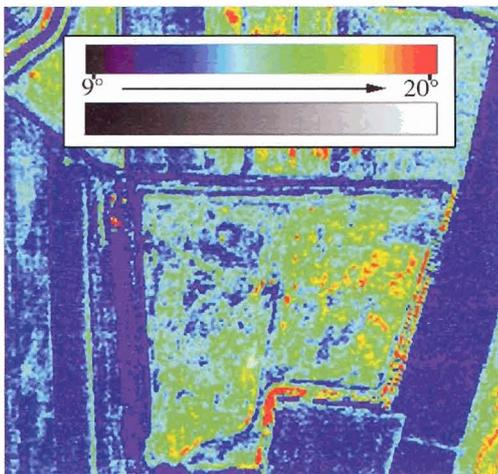
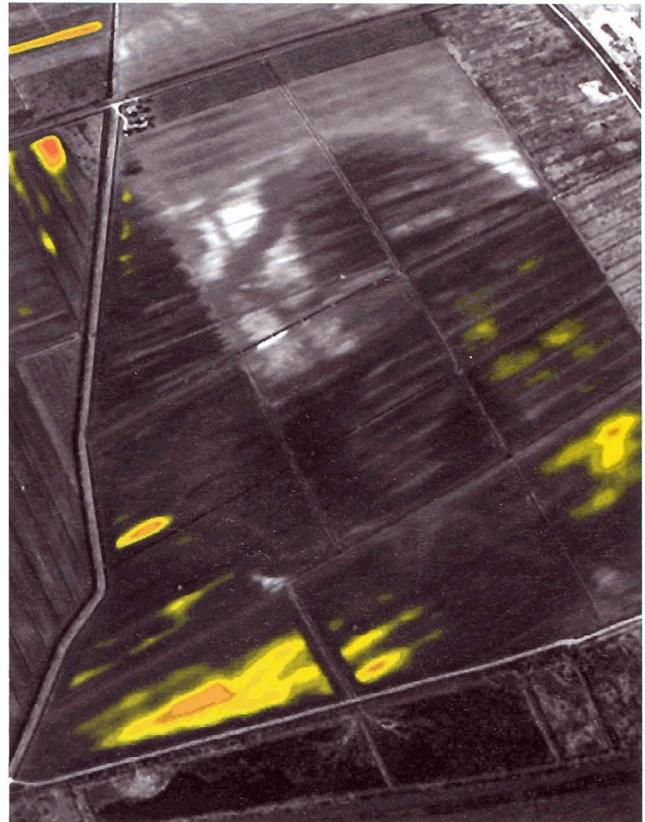
## IL MIVIS

### Applicazione nel monitoraggio ambientale

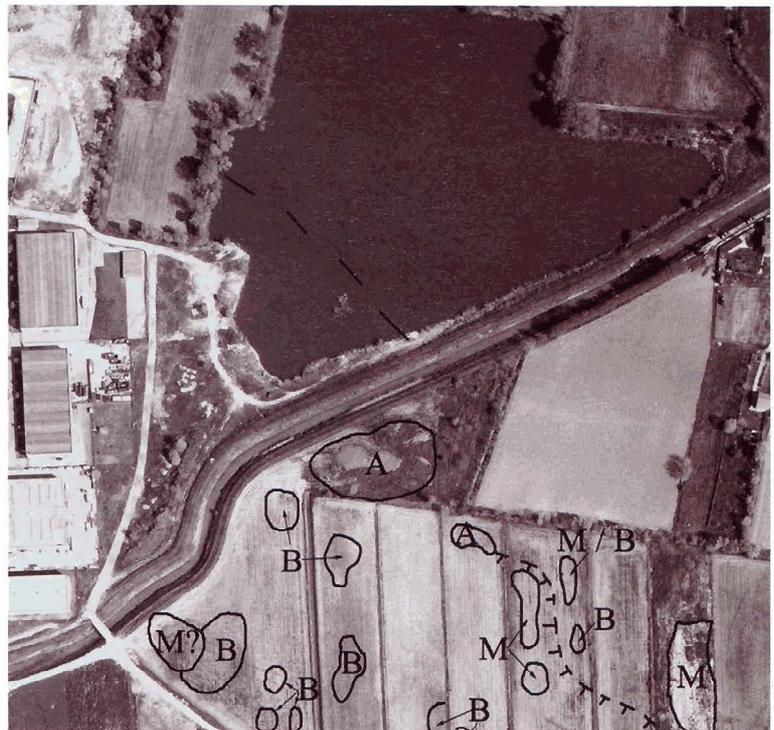
Nella progettazione, nella gestione e nella dismissione delle discariche di RSU, svolge una funzione fondamentale la predisposizione di un adeguato sistema di monitoraggio, cioè il rilevamento sistematico di una serie di parametri, nonché i metodi di indagine per guidare interventi di risanamento e recupero. Le tecnologie utilizzabili sono evidentemente molto diverse a seconda dell'oggetto di controllo, in ogni caso il monitoraggio multi ed iperspettrale sia da postazione fissa che aviotrasportato appare, attualmente, tra le tecniche d'indagine più indicate.

L'alta potenzialità all'indagine multispettrale (102 bande investigative), con discriminazione radiometrica fine (spinta fino a 0.02 micron) propria del MIVIS, unitamente alle caratteristiche proprie dei dati di telerilevamento ne fanno uno strumento innovativo nelle applicazioni dirette alle tematiche ambientali e territoriali, tra le quali il monitoraggio delle discariche di rifiuti solidi urbani riveste particolare importanza. Nelle figure sono mostrati alcuni esempi di lavori effettuati sia su discariche controllate (density slice nel termico e interpretazione spettrale), che su aree con possibile presenza di discariche abusive o di infiltrazioni di particolari agenti inquinanti. (Aut. SMA n°419 del 24/11/98).

Data volo	13 Ottobre 1998
Orario della ripresa	12.20
Quota di volo	1.500 metri
Risoluzione al suolo	3 metri
Scopo	monitoraggio ambientale
Risultati	localizzazione di aree con evidenti stati di alterazione termica e spettrale



Data volo	17 Aprile 2001
Orario della ripresa	10.25
Quota di volo	1.200 metri
Risoluzione al suolo	2 metri
Scopo	monitoraggio discarica RSU
Risultati	localizzazione di aree con evidenti stati di alterazione termica e spettrale



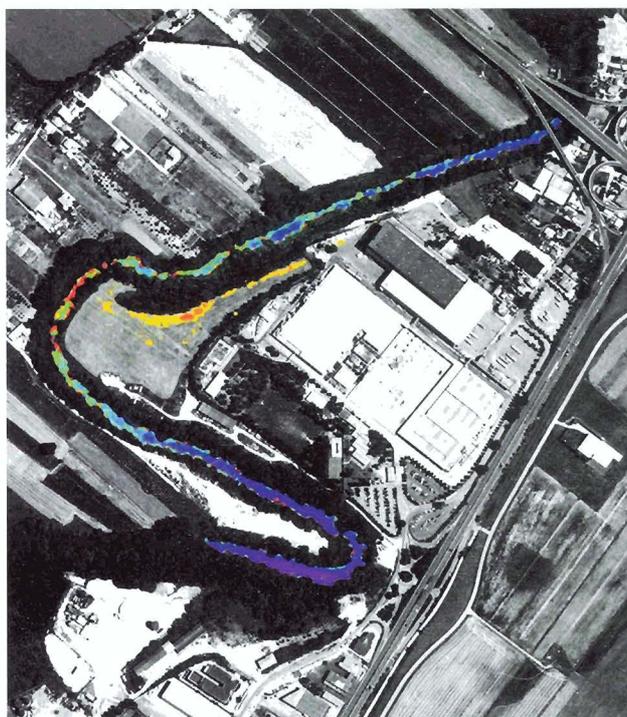
## IL MIVIS

### Applicazione come supporto ad un Sistema Informativo Territoriale

Esempio di differenti elaborazioni di dati iperspettrali MIVIS opportunamente georeferenziati ed inseriti all'interno di un sistema informativo geografico (SIT/GIS). La possibilità d'integrare dati iperspettrali e vettoriali in un unico sistema presuppone una precedente correzione geometrica delle immagini telerilevate.

Nell'immagine a fianco è possibile osservare una particolare elaborazione, indirizzata al controllo dei rischi naturali in aree industriali, opportunamente georeferenziata e sovrapposta ad un'ortofoto digitale. (Aut. SMA n°410 del 7/12/99).

<i>Data volo</i>	<i>30 Settembre 1999</i>
<i>Orario della ripresa</i>	<i>11.30 - 14.30</i>
<i>Quota di volo</i>	<i>1.500 metri - 3.000 metri</i>
<i>Risoluzione al suolo</i>	<i>3 metri</i>
<i>Scopo</i>	<i>controllo e prevenzione dei rischi naturali in aree caratterizzate dalla presenza di insediamenti industriali</i>
<i>Risultati</i>	<i>Georeferenziazione ed integrazione di dati iperspettrali Mivis all'interno di sistemi informativi geografici.</i>



## IL MIVIS

### Applicazione nell'esplorazione petrolifera

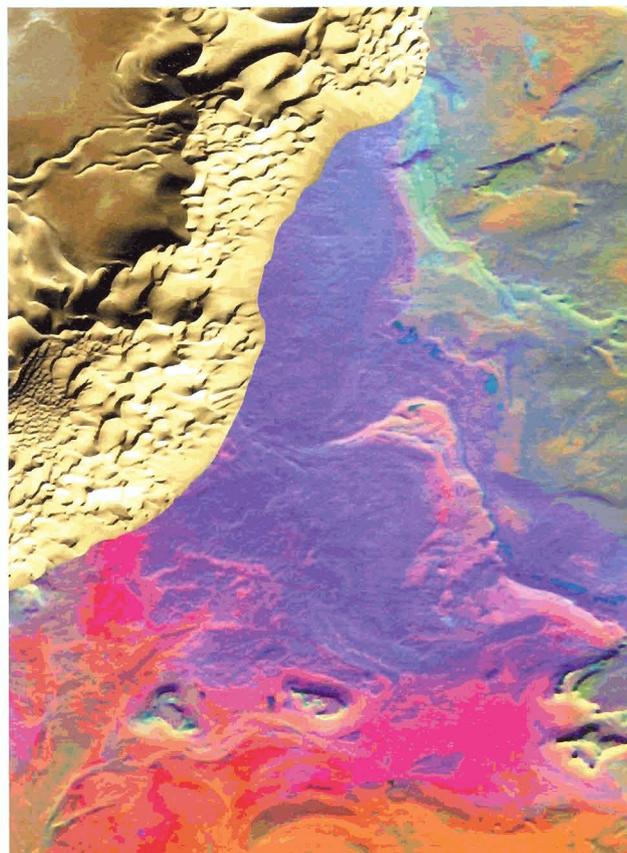
Il lavoro svolto in questi ultimi anni dal reparto di telerilevamento dell'ENI - Divisione AGIP -, è un esempio concreto delle reali potenzialità del telerilevamento iperspettrale nelle applicazioni industriali legate all'esplorazione e all'ambiente.

Dal 1997 sono stati analizzati enormi quantitativi di dati relativi alle riprese MIVIS effettuate nelle principali zone del nostro paese caratterizzate da notevole interesse petrolifero. Tramite le informazioni territoriali già in possesso su tali aree è stato possibile realizzare una proficua correlazione con le rispettive elaborazioni iperspettrali.

In questo modo dopo tre anni di ricerca è stato messo a punto dall'ENI un algoritmo di classificazione in grado di realizzare in modo semiautomatico delle mappe probabilistiche ad uso esplorativo. Dalla ricerca si è passati alle prime vere applicazioni in aree ancora "vergini" da un punto di vista esplorativo. In quest'ottica la campagna in Algeria, effettuata dalla Compagnia Generale Ripreseeree nel dicembre 2000, può considerarsi come l'effettivo esordio delle tecniche iperspettrali nel mondo della ricerca petrolifera, su vasta scala.

*Per gentile concessione dell'AGIP.*

<i>Data volo</i>	<i>Dicembre 2000</i>
<i>Orario della ripresa</i>	<i>12.00</i>
<i>Quota di volo</i>	<i>2.300 metri</i>
<i>Risoluzione al suolo</i>	<i>4 metri</i>
<i>Scopo</i>	<i>individuazione di anomalie spettrali riconducibili a fenomeni di "Microseepage"</i>
<i>Risultati</i>	<i>realizzazione di mappe probabilistiche ad uso esplorativo</i>





## La tua Città in un Click! Immagini digitali di tutte le città italiane

Il sito web della Compagnia Generale Ripreseeree (CGR) [www.terraitaly.com](http://www.terraitaly.com) consente agli operatori di ordinare direttamente immagini del territorio italiano tra una vasta gamma di prodotti esclusivi della CGR: dal Volo Italia eseguito nel biennio 1988/89 e successivamente ripetuto nel 1994 con pellicola bianco e nero da alta quota (scala media dei fotogrammi 1:75.000 e risoluzione sul terreno pari a circa un metro), alla ripresa realizzata con pellicola a colori alla scala 1:40.000 nel 1998/99, dalle ortofoto digitali a colori del **Programma "it2000"**<sup>TM</sup> (realizzate con taglio analogo a quello delle Carte Tecniche Regionali alla scala nominale 1:10.000) alle più recenti riprese aeree delle aree metropolitane in scala 1:9.000, denominate TerraItaly<sup>TM</sup> - City. Per gli operatori stranieri ciò è possibile collegandosi col sito Kodak "Earth Imaging Products".

In [www.terraitaly.com](http://www.terraitaly.com) è disponibile anche un considerevole numero di riprese da bassa quota relative a luoghi famosi (siti archeologici, aeree paesaggistiche, parchi naturali, insediamenti turistici, zone di particolare interesse storico, architettonico, urbanistico e ambientale, piazze e strutture monumentali, eccetera). **Con le City di TerraItaly<sup>TM</sup> è stata completata la copertura aerea a grande scala di tutte le aree metropolitane e urbane relative ai 110 capoluoghi di provincia e delle principali città della penisola ed sono in fase di realizzazione le ortofoto digitali a grande scala, con precisione geometrica analoga a rilievi al 2000, che è possibile consultare a scala 1:500 e superiore considerato che la dimensione dei singoli pixel è ricampionata a 15 centimetri sul terreno.**

Tutte le riprese sono state realizzate nel periodo autunno 2000 - estate 2001 utilizzando una nuova pellicola molto sensibile con un più elevato potere risolvete e una maggiore leggibilità in zone d'ombra; la grana particolarmente fine consente fattori di ingrandimento anche superiori a 18x. In tutte le riprese è stata inoltre applicata una tecnologia innovativa; le camere fotogrammetriche da presa impiegate erano infatti interfacciate al Sistema inerziale Applanix POS/AV abbinato con un'antenna GPS. Questo Sistema consente di georeferenziare direttamente i singoli fotogrammi conoscendone, con elevata precisione, sia le coordinate spaziali del centro di presa sia l'assetto angolare della camera (ovvero i parametri  $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$ ) al momento dello scatto.



Sopra: dettaglio della piazza dei Miracoli ricavato dalla ripresa TerraItaly<sup>TM</sup> - City dell'area urbana di Pisa.



Due particolari ingranditi tratti dalla ripresa dell'area metropolitana di Firenze eseguiti nell'ambito del prodotto Terraitaly™ - City.



Due particolari ingranditi tratti dalla ripresa dell'area metropolitana di Venezia eseguiti nell'ambito del prodotto Terraitaly™ - City.