

Studio integrato di aree minerarie della Sardegna tramite telerilevamento e analisi mineralogiche

Teresa Balvis (*), Francesco Muntoni (*), Alberto Marini (*), Pierfranco Lattanzi (**)

(*) Laboratorio TeleGIS, Dipartimento Scienze della Terra, Università degli Studi di Cagliari
Via Trentino 52, 09127 Cagliari, Tel. 0706757701, balvisteresa@tiscali.it

(**) Dipartimento Scienze della Terra, Università degli Studi di Cagliari, Via Trentino 52, 09127 Cagliari

Riassunto

L'attività estrattiva in Sardegna si è protratta per un lungo periodo, e soprattutto negli ultimi 150 anni con l'avvento delle tecniche di produzione industriali, ha indotto sostanziali cambiamenti nel paesaggio. L'esaurimento delle riserve minerarie ed il sostanziale abbandono di questo tipo di attività industriale negli ultimi vent'anni ha causato la chiusura di quasi tutti i siti, compromettendo in maniera significativa la qualità dell'ambiente per la presenza di scavi, discariche ed abbancamenti di materiali fini di risulta della lavorazioni dei minerali, responsabili di contaminazioni da metalli pesanti nel suolo e nelle acque, con potenziale rischio per l'ecosistema. L'avvento delle nuove tecniche di telerilevamento, in particolare lo studio delle immagini satellitari, offre un nuovo approccio allo studio dei problemi ambientali. I dati telerilevati registrano la riflettanza solare e l'emissione termica in parti specifiche dello spettro elettromagnetico. Poiché la "firma spettrale" che è (in linea di principio) caratteristica per i diversi materiali della superficie, consente varie applicazioni. In particolare è possibile riconoscere diversi gruppi di minerali, come idrossidi, solfati, carbonati e alcuni minerali di alterazione idrotermale. L'informazione può essere integrata con quella di sensori a terra, per meglio caratterizzare il target visualizzato con i sensori in volo, rendendo possibile una migliore comprensione delle informazioni nelle immagini che deve essere ulteriormente integrata dai dati mineralogici e geochimici che meglio caratterizzano le aree minerarie. Scopo del presente lavoro è di contribuire allo sviluppo di metodologie per l'indagine dei fenomeni di inquinamento nelle aree minerarie con un approccio che integra le conoscenze mineralogiche con dati telerilevati. Tale finalità è stata perseguita attraverso lo studio di alcune aree minerarie del distretto minerario piombo-zincifero di Montevecchio-Ingurtosu-Gennamari. L'integrazione tra tutti questi dati ha permesso di trarre delle conclusioni sulle possibili applicazioni dell'interpretazione delle immagini da satellite per il telerilevamento ambientale in aree minerarie.

Abstract

The extractive activity in Sardinia lasted for a long time and in the last past 150 years the industrial productive techniques have substantially changed the landscape. Additionally, in the last 20 years, the exhaustion of mining reserves and the abandonment of this kind of activity caused the closing of most of all the mines, seriously compromising the landscape due to the past excavation activity, dumps, and the build-up of thin materials derived from the mineral processing. This scenario presents risks of heavy metal pollution of soils and waters, therefore involving substantial risks for the environment. The development of Remote Sensing techniques, mainly the analysis of satellite images, offers a brand new approach to study environmental problems. The remote sensing data record the solar reflectance and the thermal emission in specific part of the electromagnetic spectrum. It is important to highlight that the "spectral signature" is, in principle, unique for each different surface's materials and allows many applications. In particular it is possible to use the spectral firm to recognize different groups of minerals, like hydroxides, sulphates, carbonates and

some minerals of hydrothermal change. These data can be integrated with those obtained through the terrestrial sensors, for a better characterization and a full comprehension of information in the images. All these data have to be completed with mineralogical and geochemical data, that are specific of mining areas. The aim of this project is to contribute in the development of methodologies to analyze pollution phenomena in the mining areas with an integrated approach between mineralogical and remote sensing data. This purpose can be achieved through analyzing some case studies in the lead – zinc mining district of Montevecchio, Ingurtosu and Gennamari. The integration of all these data allowed finding some applications of the satellite images interpretation for the environmental Remote Sensing in mining zones.

Introduzione

L'attività mineraria è una tra le attività industriali che maggiormente possono danneggiare, inquinare e modificare il territorio in quanto comporta la creazione di morfologie instabili soggette a frane e crolli (Di Gregorio et al., 1992), ma soprattutto l'esposizione all'ambiente esogeno di vaste aree di rocce mineralizzate e di sottoprodotti di trattamento, che producono importanti variazioni nella chimica dell'ambiente. L'impatto più rilevante è la dispersione nell'ambiente di elementi tossici, principalmente "metalli pesanti", intendendo con questo termine descrittivo elementi come Cu, Pb, Zn, Cd, As, Cr e Ni. La dispersione di questi elementi può essere veicolata per via meccanica (scivolamenti gravitativi, ruscellamento, trasporto eolico) o per via chimica (trasporto in soluzione). Quest'ultima può rappresentare il rischio meno evidente, ma nel lungo tempo si configura come quello più pericoloso e limitante per le attività umane nonché quello più difficilmente eliminabile (es., Plumlee & Logsdon, 1999 e Blowes et al., 2003). Le fonti d'inquinamento sono rappresentate oltre che dalle mineralizzazioni rimaste esposte in sotterraneo, dai materiali di scarto accumulati all'esterno o costituenti la ripiena stessa delle miniere. Un ruolo preponderante è svolto dai fanghi di flottazione, originariamente depositi in bacini: in essi si ritrovano alte concentrazioni di metalli pesanti e la loro lisciviazione da parte degli agenti atmosferici determina un notevole inquinamento nelle aree minerarie. In ogni caso, il circuito delle acque superficiali rappresenta la via preferenziale di dispersione di questi elementi tossici anche a distanze notevoli dalla sorgente.

Il Telerilevamento comprende le tecniche che permettono di trarre informazioni su una realtà posta ad una nota distanza dal sensore, tale tecnica permette la conoscenza delle diverse caratteristiche degli oggetti investigati, mediante l'analisi delle informazioni derivanti dallo spettro delle onde elettromagnetiche. Il principio di base consiste nella capacità di ogni corpo di riflettere, assorbire e trasmettere una radiazione incidente in percentuali differenti, a seconda delle proprie qualità strutturali, chimiche, fisiche. Le informazioni elettromagnetiche vanno convertite, attraverso la creazione di opportuni modelli multidisciplinari, nella stima delle variabili chimiche, fisiche o biologiche investigate. Il successo o il fallimento dell'utilizzo dei dati telerilevati nel valutare le alterazioni ambientali, dipendono quindi da modelli e algoritmi sviluppati e utilizzati per estrarre i parametri ambientali dal *continuum* di dati ottico-spettrali raccolti dai sensori e dal confronto con elementi di verità a terra (Gommarasca, 2004). I sensori attuali consentono la misura a distanza, basata essenzialmente sul comportamento delle superfici dei corpi relativamente alle onde elettromagnetiche nel visibile, nell'infrarosso e nelle microonde; tali misure sono indirizzate al riconoscimento indiretto della struttura degli elementi territoriali o al rilevamento di alcune caratteristiche fisiche. Ciò ha consentito al telerilevamento, di accrescere il suo ruolo nella pianificazione territoriale e nella gestione delle risorse terrestri per lo studio e la comprensione di fenomeni non investigabili in altro modo e per il controllo delle dinamiche naturali.

Inquadramento geografico dell'area

Le aree oggetto di studio fanno parte del distretto minerario di Montevecchio – Ingurtosu – Gennamari (Sardegna sud-occidentale) e ricadono nei comuni di Guspini e Arbus individuabili nella tavoletta alla scala 1:25.000 della carta d'Italia dell'IGM, foglio 546 sezione I e IV, sezioni

“Montevecchio” e “Punta S’acqua durci”, nelle carte CTR scala 1:10.000 sezioni : 546-030, 546-040, 546-060 e 546-070. Nella carta Geologica d’Italia dell’IGM in scala 1:100.000, l’area di studio è compresa nei fogli 224-225 Capo Pecora-Guspini.

Oggetto specifico del presente studio è il cantiere di Levante di Montevecchio ed in particolare il bacino di sterili di flottazione facente capo alla Laveria Principe Tommaso, nota comunemente come “bacino di Piccalinna” che si trova a est rispetto al villaggio di Montevecchio. Quest’ultimo è una frazione del comune di Guspini, a cui è collegato da una strada asfaltata. L’altra area oggetto di studio è il bacino idrografico del Rio Naracauli a sud-ovest del villaggio di Montevecchio, caratterizzato da grandi quantità di materiali provenienti sia dagli scavi in sotterraneo e sia dagli impianti di pre-arricchimento e di flottazione.

Materiali e metodi

I dati utilizzati in questo studio sono essenzialmente di tre tipi: immagini satellitari Aster, dati di riflettanza a terra acquisiti mediante spettroradiometro da campo modello Macam e composizione mineralogica (ottenuta per diffrazione dei raggi X) del substrato su cui è stata effettuata la lettura spettrale.

1.1. Immagini satellitari

Le immagini utilizzate in questo studio sono quelle del sensore Aster collocato sul satellite TERRA, tali dati presentano una risoluzione spaziale e spettrale utili in questo tipo di studi. L’immagine utilizzata è quella acquisita il 29 luglio del 2000. Aster è il sensore con risoluzione geometrica maggiore tra quelli presenti sulla piattaforma TERRA: l’area ricoperta dai pixel varia da 15 a 90 m². Le bande utilizzate in questo lavoro sono quelle del visibile, del vicino e medio infrarosso cioè gli intervalli spettrali utilizzati negli studi geologico-mineralogici. L’intervallo spettrale del VNIR, 0,520-0,860 µm (bande 1-3), permette l’identificazione di minerali in cui sono presenti i metalli di transizione in particolare il ferro. L’intervallo spettrale di SWIR, 1,656-2,400 µm (bande 4-9), permette l’identificazione di minerali come carbonati, solfati, ossidi e idrossidi.

1.2. Acquisizione dei dati con lo spettroradiometro

L’acquisizione dei dati di riflettanza a terra è stata fatta con lo spettroradiometro da campo modello Macam SR-9050, in grado di acquisire sia valori di riflettanza e/o d’irradianza in un intervallo di 400-2500 nm.

La campagna di acquisizione dati con lo spettroradiometro nel distretto minerario di Montevecchio – Ingurtosu – Gennamari è stata condotta nei mesi di giugno, settembre, ottobre e novembre 2005. L’acquisizione dei dati è stata condizionata dalla scelta di aree facilmente accessibili e sicure, infatti tra i fattori che maggiormente hanno influenzato il lavoro di rilevamento vi sono senza dubbio la particolare topografia dell’area e, di non secondaria importanza, la sicurezza precaria o del tutto assente dei siti abbandonati. Molte delle discariche e degli abbancamenti non hanno infatti ancora subito, con rare eccezioni, interventi di ripristino ambientale e messa in sicurezza. Si è deciso così, di effettuare le misure solo sugli abbancamenti di fanghi di laveria all’interno del bacino idrografico del Rio Naracauli e sulla discarica di Piccalinna (Figura 1).

Si è determinato un passo di campionamento di circa 10 m in modo da creare una maglia abbastanza fitta che però non sempre è stato possibile seguire a causa dei problemi riguardanti le condizioni di sicurezza e gli affioramenti di fanghi talvolta troppo limitati. L’esigenza di avere una maglia di campionamento molto fitta è ovviamente utile per ottenere un dato che sia il più omogeneo possibile in quanto durante la fase di classificazione dell’immagine satellitare attraverso le firme acquisite in campagna, il maggior numero di dati ottenuti per unità di pixel (l’unità di superficie minima di qualsiasi immagine satellitare), darà maggiori possibilità di successo nell’identificazione di una firma sull’immagine stessa.

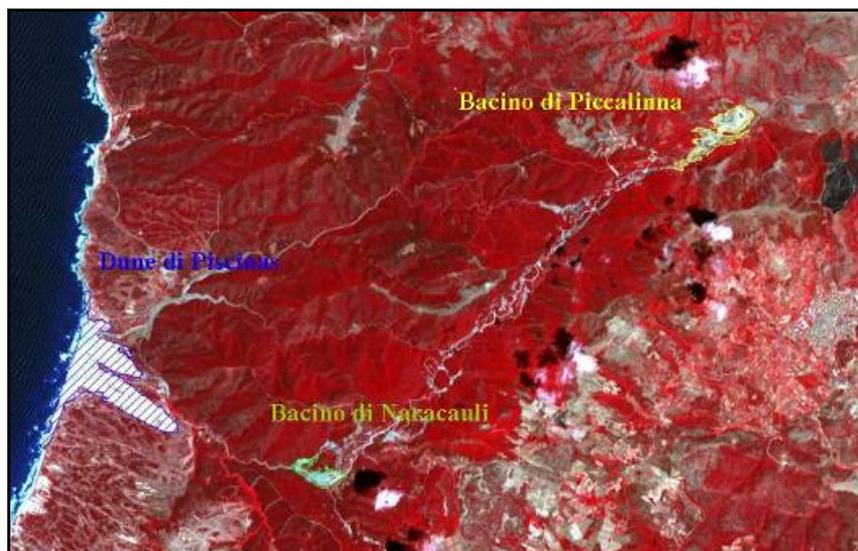


Figura 1 – Immagine Aster 321, sono indicate le aree in cui sono stati acquisiti i dati con lo spettroradiometro.

1.3. Acquisizione dei campioni di substrato e analisi mineralogiche

In ogni punto in cui sono state fatte le acquisizioni con lo spettroradiometro, sono stati prelevati dei campioni di suolo al fine di determinare i minerali presenti mediante analisi per diffrazione dei raggi X. In realtà non si tratta di suoli veri e propri (caratterizzati cioè dalla presenza di almeno un orizzonte ricco di materia organica), ma di materiali incoerenti essenzialmente da sterili di coltivazione e di trattamento, o da sedimenti fluviali, con scarsissimi o nulli processi di pedogenesi. Per ogni campione è stata prelevata la parte più superficiale del substrato, con una profondità massima di 1 cm dalla superficie. Sui campioni di substrato sono state eseguite le analisi diffrattometriche, con il diffrattometro di raggi X (XRD Panalytical Xpert Pro), presente nel Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Cagliari. L'individuazione dei picchi è stata eseguita in modo automatico con il software in dotazione allo strumento.

1.4. Elaborazione dei dati spettrali

Le firme spettrali acquisite in campagna sono state elaborate in modo da poter essere utilizzate all'interno del software Envi 4.2 che, oltre ad elaborare le immagini, consente l'elaborazione spettrale, pertanto i dati sono stati salvati in file formato Ascii. Per poter analizzare, e quindi riconoscere le firme spettrali dei minerali presenti, questi dati sono stati inseriti in "librerie spettrali".

Il riconoscimento della firma dei minerali nei dati raccolti in campagna avviene per confronto con una libreria spettrale nota ottenuta da letture su minerali in laboratorio. In questo lavoro è stata utilizzata la libreria spettrale USGS Mineral Spectral Library (splib04). Da questa libreria sono stati ulteriormente selezionati i minerali, che da bibliografia e dalle analisi diffrattometriche, si sa per certo essere presenti nel distretto minerario di Montevecchio – Ingurtosu – Gennamari; in questo modo è stata costruita la libreria di firme spettrali di minerali puri cioè ricavate in laboratorio dalla lettura diretta con spettroradiometro del singolo minerale in condizioni ambientali controllate. Una volta creata la libreria di riferimento, la "Libreria Montevecchio", è stato possibile procedere con l'analisi delle firme raccolte in campagna; per fare ciò è stato necessario utilizzare gli algoritmi che si trovano implementati nel software Envi. L'applicazione degli algoritmi, avviene mediante la tool *Spectral Analyst*, e la loro interpretazione richiede molta cautela in quanto devono essere introdotte

variabili scelte dall'operatore quali i valori massimi e minimi ammessi. L'applicazione di questi algoritmi non dà risultati sempre facilmente interpretabili, ma rappresenta il punto di partenza dell'analisi spettrale. Gli algoritmi di classificazione utilizzati in questo studio sono stati: Spectral Angle Mapper (SAM) e Spectral Feature Fitting.

1.5. Elaborazione delle immagini Aster

Le immagini Aster prima di essere classificate e confrontate con i dati di riflettanza a terra sono state corrette secondo le elaborazioni note come *pre-processing*. Questa fase di pre-elaborazione consente di minimizzare gli errori, il rumore di fondo e le distorsioni introdotte durante l'acquisizione e la trasmissione dei dati e comprende le procedure di correzione radiometrica, atmosferica e geometrica. In questo studio le prime tre bande dell'Aster, cioè l'intervallo del visibile vicino infrarosso (VNIR), sono state classificate con la tecnica *supervised* ed in particolare è stato utilizzato l'algoritmo SAM Spectral Angle Mapper. Le sei bande del Aster del infrarosso corto (SWIR) sono state invece classificate seguendo una procedura semi-automatica implementata in Envi che prevede diversi passaggi: Spectral Hourglass Wizard, che è stata ideata per l'analisi dei dati iperspettrali e multispettrali (Kruse et al., 2000) ed è stata applicata con successo anche ai dati Aster (Hubbard et al, 2003; Galvao et al., 2005).

Risultati e discussione

Nel considerare questi risultati, si devono tenere presenti le limitazioni intrinseche della determinazione della firma spettrale di una superficie in un sistema naturale, sulla quale influiscono vari fattori non quantificabili, tra cui il tipo di copertura del terreno (in questo caso i substrati delle discariche), le condizioni di acquisizioni del dato (in particolare l'umidità, che gioca un ruolo importante sulla risposta spettrale del suolo per effetto dell'assorbimento dell'acqua e del conseguente abbassamento della riflettanza nell'intero spettro), e la distribuzione delle dimensioni delle particelle delle superficie. Pertanto, la fase di confronto delle firme di campagna con le librerie spettrali, ottenute in laboratorio, ha richiesto un notevole studio: infatti, mentre le firme di laboratorio sono riferite ad un unico minerale sul quale la misura spettrale è stata fatta in condizioni ambientali standard, il dato di campagna presenta una curva di riflettanza risultato di una composizione mineralogica tipicamente polifasica e ottenuta in condizioni ambientali variabili. Per valutare l'attendibilità dell'interpretazione delle firme spettrali, si sono quindi confrontate la composizione mineralogica risultante dall'analisi diffrattometrica con quella indicata come probabile dall'analisi della firma spettrale raccolta sul terreno (ossia, le fasi per le quali i programmi di analisi spettrale restituiscono un alto "score", ossia probabilità che lo spettro del minerale sia presente nella firma spettrale raccolta sul terreno).

In generale, i risultati delle analisi diffrattometriche (XRD) evidenziano nei campioni esaminati la presenza di quarzo e di muscovite e/o illite come minerali principali; sono poi presenti minerali delle rocce dell'area (feldspati, clorite), nonché sfalerite, gesso, siderite, calcite, dolomite, e occasionalmente fluorite e barite. Questi dati sono in accordo con i precedenti studi sull'area (Da Pelo, 1998; Caboi et al. 1999). Per quanto riguarda le analisi spettrali, sono stati considerati i primi sei minerali che hanno riportato il punteggio (*score*) più elevato, e che quindi, in linea di principio, hanno la massima probabilità di essere presenti nel campione.

In tutti i campioni è evidente che vengono riscontrati quasi sempre gli stessi minerali, inoltre il minerale che mostra il punteggio più elevato è quasi sempre la galena, seguita dalla pirite e dall'ortoclasio. Anche se la presenza di questi minerali è tutt'altro che improbabile nell'area tuttavia i primi due non sono stati rilevati con le analisi diffrattometriche, né con un'osservazione del materiale al microscopio binoculare. Si tratta quindi verosimilmente di "falsi positivi". L'analisi spettrale presenta "falsi positivi" quasi sistematici, come galena, pirite e probabilmente ortoclasio, mentre presenta buona corrispondenza con la diffrattometria, e quindi sembra affidabile, per minerali come quarzo e "muscovite" (genericamente, mica potassica). Eliminando i minerali con

scores molto alti, ma individuati come probabili “falsi positivi”, si ottiene una migliore corrispondenza.

Un caso del tutto particolare, e che merita una discussione approfondita, è quello dell'epsomite, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$. Questo minerale, che ha una firma spettrale molto caratteristica (Figura 2), compare spesso con score molto alti nell'analisi spettrale, mentre non è mai stato individuato per diffrazione. Tuttavia la sua presenza nelle discariche di Montevocchio, e in particolare a Piccalinna, è ben documentata e caratteristica (Da Pelo, 1998 e riferimenti). Essa, così come la fase simile esaidrite ($MgSO_4 \cdot 6H_2O$), forma efflorescenze superficiali biancastre dovute a risalita per capillarità ed evaporazione dell'acqua dai pori nei periodi secchi, mentre, essendo facilmente solubile, è del tutto assente nei periodi umidi.

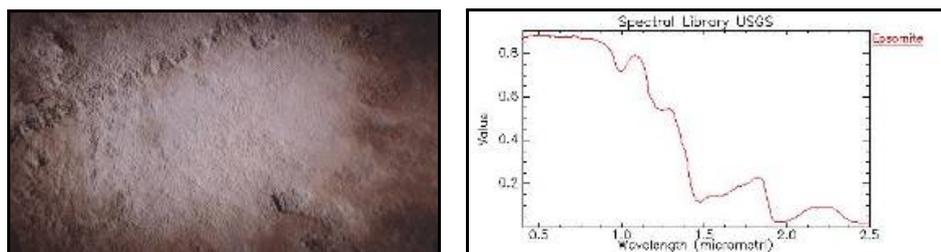


Figura 2 – Foto della superficie di campione PN1 e spettro di riflettanza dell'epsomite.

La foto (Figura 2) del campione PN1, prelevato in un periodo molto secco, mostra appunto la presenza di una patina biancastra alla superficie, molto verosimilmente si tratta proprio di epsomite. Il mancato riconoscimento per diffrazione è dovuto alla combinazione di due circostanze sfavorevoli: trattandosi di un'esile patina molto superficiale, per quanta cura si ponga nel prelevamento del campione di superficie, inevitabilmente si raccoglie anche parte del materiale sottostante, che finisce per essere quantitativamente prevalente nella porzione analizzata per diffrazione; in tale materiale è costante la presenza di quarzo, il cui secondo (per intensità) picco di diffrazione ($d = 4.26 \text{ \AA}$) si sovrappone, mascherandolo, al picco più intenso dell'epsomite ($d = 4.21 \text{ \AA}$). In questo caso quindi possiamo ragionevolmente affermare che l'analisi spettrale, grazie alla firma molto caratteristica del minerale ed alla sua concentrazione alla superficie, riesce a mettere in evidenza una fase che può invece sfuggire all'analisi diffrattometrica.

Si sottolinea che l'epsomite è potenzialmente una fase di rilevanza ambientale. L'epsomite di Montevocchio contiene molto spesso Zn come vicariante del Mg, e presumibilmente contiene anche Cd, che a Montevocchio è sistematicamente associato allo Zn (Cabo et al., 1999), quindi è una fase che influisce in una certa misura sulla mobilità dei “metalli pesanti”. Come si è già accennato, essa presenta dei cicli di formazione/dissoluzione in risposta alla variazione delle condizioni ambientali, e quindi può rappresentare in una certa misura un indicatore di avvenute variazioni nelle condizioni delle discariche.

Acquisita dunque quest'informazione preliminare sull'attendibilità della risposta spettrale, si è passati all'analisi e classificazione delle immagini Aster. In questo caso, oltre alle incertezze proprie dell'interpretazione spettrale in termini di composizione mineralogica, bisogna tenere conto anche di altre limitazioni legate alla risoluzione spaziale delle immagini (un pixel è uguale a 30 m), alla presenza della vegetazione, e all'interferenza dell'atmosfera.

Per ottenere risultati significativi sono state anzitutto applicate delle “maschere” che avevano come obiettivo quello di restringere l'analisi solo alle aree in cui erano state fatte le acquisizioni spettrali a terra. Tali aree sono scarsamente coperte da vegetazione. L'immagine Aster utilizzata per l'analisi è stata acquisita nel mese di luglio, in condizioni quasi ottimali di assenza di nubi e bassa umidità.

La classificazione delle prime tre bande dell'Aster (0,52 – 0,86 μm) non ha prodotto dei risultati che possano essere considerati attendibili e significativi. Essi sostanzialmente ripetono i “falsi positivi”

già segnalati in precedenza, indicando un'ipotetica distribuzione di galena e pirite del tutto non realistica.

Risultati più incoraggianti si sono ottenuti dalla classificazione delle sei bande dell'infrarosso medio (1,600 – 2,430 μm). Applicando la procedura Spectral Hourglass Wizard, è stato possibile ridurre il numero di classi, consentendo una più agevole classificazione. Nelle figure seguenti (Figura 3), vengono rappresentate delle elaborazioni delle bande relative ai bacini di Piccalinna e Naracauli-Pireddu, in cui ad ogni pixel viene attribuito un colore convenzionale corrispondente al minerale che ha il massimo *score* nella firma spettrale relativa a quel pixel. Per i motivi sopra esposti, pirite e galena sono stati esclusi dai minerali presi in considerazione. Tra i minerali individuati, l'epsomite è quello che ricopre in parte il bacino di Piccalinna, risultato che appare attendibile alla luce delle considerazioni precedentemente svolte. Anche la dolomite, per altro ben evidenziata anche nelle analisi diffrattometriche, sembra essere ben rappresentata in entrambe le aree. La muscovite (intendendo con questo termine una generica "mica potassica") sembra la fase predominante nel bacino di Naracauli-Pireddu, e ancora una volta ciò concorda con i risultati della diffrazione X.

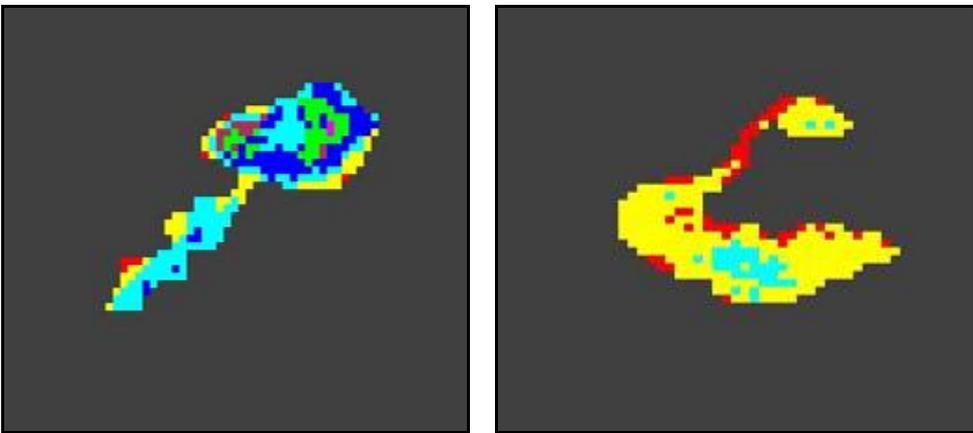


Figura 3 – Risultati della classificazione dell'immagine Aster SWIR, relativa al bacino di Piccalinna e di Naracauli.

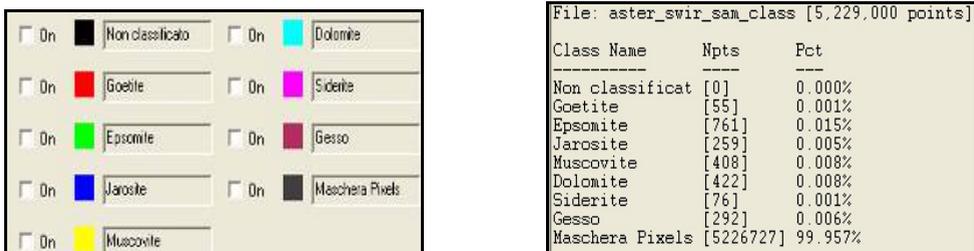


Figura 4 – Legenda della classificazione dell'immagine Aster SWIR - Numero dei pixel e percentuale di ogni minerale ottenuti nella classificazione dell'immagine Aster SWIR.

Conclusioni

L'attività mineraria provoca sull'ambiente notevoli modifiche di carattere sia morfologico che chimico, ciò rappresenta un problema importante in una regione come la Sardegna, dove esiste una grande tradizione mineraria, caratterizzata purtroppo in passato da una gestione scarsamente interessata ai problemi ambientali.

L'avvento delle nuove tecniche di telerilevamento, in particolare lo studio delle immagini satellitari, offre un nuovo approccio allo studio dei problemi ambientali. Infatti studi recenti evidenziano come dall'analisi dei dati telerilevati sia possibile ottenere informazioni utili ad integrare dati mineralogici e geochimici per la caratterizzazione delle aree minerarie, mediante la realizzazione di mappe di distribuzione dei vari minerali presenti. In particolare l'informazione può essere integrata con quella di sensori a terra, che possono essere usati per meglio caratterizzare il target visualizzato con i sensori in volo, rendendo possibile una migliore comprensione delle informazioni delle immagini. Scopo del presente lavoro era appunto di contribuire allo sviluppo di metodologie per l'indagine dei fenomeni di inquinamento nelle aree minerarie con un approccio che integrasse le conoscenze mineralogiche con dati telerilevati.

Per conseguire tale finalità sono state prese in esame alcune aree minerarie del distretto minerario piombo-zincifero di Montevecchio - Ingurtosu - Gennamari, in cui i fenomeni di inquinamento sono ben noti e studiati da tempo. Le immagini del sensore Aster sono state scelte in quanto ben si prestano agli studi di carattere ambientale e per il monitoraggio dell'ambiente. Inoltre per tarare e validare opportunamente gli spettri delle immagini Aster, sono stati acquisiti con lo spettrometro da campo dati di riflettanza a terra. In ogni punto in cui sono state fatte le acquisizioni con lo spettrometro, sono stati prelevati dei campioni di suolo al fine di determinare i minerali presenti mediante analisi per diffrazione dei raggi X.

I risultati hanno mostrato corrispondenze ed incongruenze, in particolare i minerali che mostrano il punteggio più elevato sono quasi sempre la galena, seguita dalla pirite e dall'ortoclasio, che non sono stati rilevati con le analisi diffrattometriche, si tratta quindi verosimilmente di "falsi positivi". C'è invece perfetta congruenza nel riconoscimento del quarzo e di un minerale appartenente alla famiglia delle miche potassiche (biotite secondo l'analisi spettrale, muscovite-illite secondo la diffrazione X). Si conclude quindi che l'interpretazione dei dati spettrali di riflettanza deve essere adeguatamente supportata da una conoscenza della mineralogia della zona e da un'opportuna taratura.

Molto interessante il caso dell'epsomite, minerale di un certo interesse ambientale per la sua possibilità di ospitare ioni di "metalli pesanti" (Zn, Cd) e per i suoi cicli di precipitazione-dissoluzione legati, rispettivamente, alla stagione arida e alla stagione umida. La sua presenza, rilevata dall'analisi dei dati spettrali acquisiti a terra, non è confermata dalle analisi diffrattometriche, mentre è del tutto coerente con le osservazioni di campagna e gli studi pregressi sull'area. Una spiegazione verosimile appare essere che nel campione sottoposto a diffrazione è presente un inquinamento di quarzo, i cui riflessi si sovrappongono a quelli dell'epsomite.

Sulla base di questa calibrazione a terra, si è infine passati alla classificazione delle immagini Aster nelle bande VNIR (visibile - vicino infrarosso) e SWIR (infrarosso a corta lunghezza d'onda). La classificazione delle prime tre bande dell'Aster (0,52 - 0,86 μm) non ha prodotto dei risultati che possano essere considerati attendibili e significativi. Al contrario la classificazione delle immagini Aster SWIR ha consentito di visualizzare la distribuzione areale di alcuni minerali in modo sufficientemente attendibile, coerente con le osservazioni di campagna, le firme spettrali raccolte a terra e l'associazione mineralogica determinata per diffrazione X. In particolare, la distribuzione dell'epsomite sembra mappabile in modo verosimile.

In conclusione, nonostante, l'approccio proposto soffre ancora di alcune incertezze e limitazioni, in circostanze favorevoli sembra possibile individuare con sufficiente certezza particolari minerali che presentano una firma spettrale molto caratteristica, e che sono sufficientemente rari da potersi ritenere esclusivi di determinati contesti ambientali.

I risultati ottenuti, pertanto, incoraggiano nel proseguire in questo genere di studi per il monitoraggio di queste aree. Migliori risultati potrebbero essere conseguiti con un incremento dei dati di riflettanza spettrale a terra, con immagini satellitari o da aereo a maggiore risoluzione sia spettrale che spaziale, e da un affinamento degli algoritmi di analisi, il tutto adeguatamente supportato da analisi mineralogiche e geochimiche. In questo modo sarebbe possibile creare un modello sulla distribuzione di certi inquinanti, specifico per queste aree.

Bibliografia

- Abrams M. e Hook S., 2002 – *Aster User Handbook – Version 2* - Jet Propulsion Laboratory 4800 Oak Grove Dr. Pasadena, CA 9110.
- Agar B., 1996 – *Multi-Spectral data and their applications for gold exploration in Latin America*. – Presentato al 2° International Gold Symposium, Lima, Peru.
- Altinbas U., Kurucu, Y. e Bolca M., 2005 – *Using Advanced Spectral Analyses Techniques as possible Means of Identifying Clay Minerals* – Turk Journal Agric. For. Vol. 29.
- Amisani M., 2002 – *Monitoraggio dei corpi idrici di Rio Piscinas, Rio Irvi, Rio Naracauli (Sardegna sud-occidentale)*. – In: Schenk H. e Ulzega A. – *Monitoraggio scientifico nell'area del progetto Life Natura - Dune di Piscinas-Monte Arcuentu in Sardegna*. – *Unione Europea: Progetto Life Natura 1997*- Amministrazione Provinciale di Cagliari- Assessorato alla Programmazione territoriale e Sviluppo Economico.
- Bailey Bryan G. 2007 – *ASTER data and products: generation, characteristics and access* - Rivista Italiana di TELERILEVAMENTO, n°39.
- Beddel R., 2004 – *Remote Sensing in Mineral Exploration*. – SEG Newsletter – Society of Economic Geologists.
- Ben-Dor E., Goldshleger N., Beniamini Y., Agassi M. e Blumerg D.G., 2003 – *The spectral reflectance properties of soil structural crust in the 1.2- to 2.5 µm spectral region* – Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 67.
- Biddau R., De Pelo S. & Dadea C., 2001 - *The abandoned mining area of Montevecchio-Ingurtosu*. – WRI - 10 Mid - Session Field trip, 13.
- Bioshop L. J. e Murad E., 2005 – *The visible and infrared spectral properties of jarosite and alunite* – *American Mineralogist*, Vol. 90.
- Brivio P. A., Lechi G. e Zilioli E., 2006 – *Principi e metodi di Telerilevamento* – CittàStudio Edizioni.
- Blowes D. W., Ptacek C. J. e Jurjovec J., 2003 – *Mill tailings: hydrogeology and geochemistry. Chapter 5* – In *Environmental Aspects of Mine Wastes*. Canada Schort Course Series Vol. 31., 95-116, Jambor J. L., Blowes D. W. e A.I.M. Ritchie Editors.
- Caboi R., Cidu R., Fanfani L., Lattanzi P. e Zuddas P., 1999 – *Environmental mineralogy and geochemistry of the abandoned Pb-Zn Montevecchio-Ingurtosu mining district, Sardinia, Italy*. – *Chronique de la Recherche miniere*, N° 534.
- Carmignani L., Barca S., Carosi R., Di Pisa A., Gattiglio M., Musimuci G., Oggiano G. & Pertusati P.C., 1992 - *Struttura della Catena Ercinica: guida alla escursione sul basamento paleozoico della Sardegna*. – MURST Gr. Inf. Geol. Strutt..
- Chen X., Warner T. A. e Campagna D., 2007 – *Integrating visible, near-infrared and short-wave infrared hyperspectral and multispectral thermal imagery for geological mapping at Cuprite, Nevada* – *Remote Sensing of Environment*, Vol. 110.
- Chessa A., Dettori B., Fanni S. e Piras G. L., 1999 – *Caratterizzazione delle acque del bacino del Rio Montevecchio (Sardegna SW)* - IV SEMINARIO EUROPEO DI GEOGRAFIA DELL'ACQUA Cagliari.
- Chevrel S., Belocky R. e Crosel K., 2002– *Monitoring and assessing the environmental impact of mining in Europe using advanced Earth Observation Techniques*. – *Mineo – First Results of the Alpine Test Site*. - Environmental Communication in the Information Society, EnviroInfo Vinee, W. Phillmann and K. Tochtermann Eds, Part1.
- Chikhaoui M., Bonn F., Bokoye A. I. e Merzouk A., 2005 - *A spectral index for land degradation mapping using ASTER data: application to a semi-arid Mediterranean catchment* - *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 7.
- Clark R. N., Swayze G. A., Wise R., Livio K. E., Hoefen T. M., Kokaly R. F. e Sutley S. J., 2007 - *USGS Digital Spectral Library splib06a* - U. S. Geological Survey Data Series 231; 20 Settembre (<http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06>).

- Clark R.N., Boardman J., Mustard J., Kruse F., Ong C., Pieters C. e Swayze G. A., 2006 - *Mineral Mapping and Applications of Imaging Spectroscopy* - IGARSS 2006, 31 Luglio – 4 Agosto, Denver, Colorado (Abstract, submitted, 01/2006).
- Clark R.N., Swayze G. A., Wise R., Livo K. E., Hoefen T. M., Kokaly R. F. e Sutley S. J., 2003 - *USGS Digital Spectral Library splib05a* - U.S. Geological Survey, Open File Report 03-395.
- Clark, R. N., 1999 - *Chapter 1: Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy* - In: *Manual of Remote Sensing*, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences, (A.N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons, New York.
- Clark R. N., Swayze G. A., Gallagher A. J., King T. V. V. e Calvin W. M., 1999 - *The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1 (0.2 to 3.0 µm)* - U.S. Geological Survey, Open File Report 93-592.
- Clark R.N., 1995 – *Reflectance Spectra* – American Geophysical Union.
- Clark R. N., Swayze G. A., Gallagher A. J., King T. V. V. e Calvin W. M., 1993 - *The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1 (0.2 to 3.0µm)* - U. S. Geological Survey, Open File Report 93-592.
- Da Pelo S., 1998 - *Mineralogia e geochimica ambientale di aree minerarie attive e dismesse*. - Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra Consorzio Cagliari-Genova-Torino.
- Dessena M. A. e Melis M. T. 2006 – *Telerilevamento applicato* - edizioni Mako.
- Di Gregorio F. e Massoli-Novelli R., 1992 – *Geological Impact of Some Tailings Dams in Sardinia, Italy* – Environ Geol. Water Sci. Vol. 19, No. 3.
- Elachi C., 1987 - *Introduction to physics and techniques of remote sensing*. - John Wiley & Sons, New York.
- Escadafal R., Gouinaud C., Mathieu R. e Pouget M., 1993 - *Le spectroradiomètre de terrain: un outil de la télédétection et de la pédologie*. - Cah. Orstom, sér. Pédol., Vol. XXVIII, n° 1, 15-29.
- Fanfani L., Caboi R., Cidu R., Cristini A., Frau F., Lattanzi P. & Zuddas P. 2001 - *Impatto ambientale dell'attività mineraria in Sardegna: studi mineralogici e geochimici*. - Rend. Semin. Fac. Sci. Univ. Cagliari 70 (suppl.), 249-264.
- Fanfani L., 1996 – *Mobilizzazione di metalli pesanti nelle aree minerarie abbandonate*. – Quaderni di Geologia Applicata 4 suppl..
- Farifteh J., 2007 - *Spectral characteristics of salt-affected soils: a laboratory experiment* – In: *Imaging Spectroscopy of salt-affected soils: model-based integrated method* – Chapter 3, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC) and Utrecht University, Igitur, Utrecht Publishing & Archiving Services.
- Gaffey S. J., 1986 - *Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35 – 2.55 microns): calcite, aragonite, and dolomite*. - American Mineralogist, Vol. 71.
- Galvao S. L., Almeida-Filho R. e Vitorello I., 2005 - *Spectral discrimination of hydrothermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: evaluation in a tropical savannah environment* - International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 7.
- Garcia-Melendez E., Ferrer-Julia M., Bermejo A. e Suarez M., 2004 – *Relacion entre la respuesta espectral (visible – infrarrojo cercano) y la composicion mineralogica de materiales sedimentarios del borde occidental de la Cuenca del Duero* – Rev. Soc. Geol. Espana Vol. 17 (1-2).
- Gomasasca M. A., 2004 - *Elementi di geomatica* - AIT ,Associazione Italiana di Telerilevamento.
- Grove C. I., Hook S.J. e Paylor E. D., 1992 - *Laboratory reflectance spectra for 160 minerals 0.4-2.5 micrometers: JPL Publication 92-2* - Jet propulsion Laboratory, Pasadena, California.
- Hubbard B. E., Crowley J. K. e Zimbelman D. R., 2003 - *Comparative Alteration Mineral Mapping Using Visible to Shortwave Infrared (0.4 – 2.4 µm) Hyperion, Ali and Aster Imagery* - IEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, n° 6.
- Kalinowski A. e Oliver S., 2004 - *Aster mineral Index Processing Manual* - Remote Sensing Applications Geoscience Australia.

- Kariuki P.C., 2004 - *SPECTROSCOPY AND SWELLING SOILS An Integrated Approach* - This research was funded by the Netherlands Government through the International Institute for Geoinformation and Earth Observation (ITC) Department of Applied Earth Sciences, Delft University of Technology.
- Kruse F.A., 2004 - *Comparison of ATREM, ARCON, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude Aviris data of Boulder, Co* - In proceedings 13th JPL Airborne Geoscience Workshop, Jet Propulsion Laboratory, 31 Marzo – 2 Aprile, Pasadena, CA (in press).
- Kruse F. A., 2003 - *Mineral Mapping with AVIRIS and EO-1Hyperion*. - Presentato alla 12° JPL Airborne geoscience Workshop, 24-28 Febbraio, Pasadena, California.
- Kruse F. A., 2002 - *Comparison of AVIRIS and Hyperion for Hyperspectral Mineral Mapping*. - Presentato alla 11° JPL Airborne geoscience Workshop, 4-8 Marzo, Pasadena, California.
- Kruse F. A., Boardman J. W. e Lefkoff A. B., 2000 - *Extraction of Compositional Information for Trafficability Mapping from Hyperspectral Data* - SPIE International Symposium on AeroSense, 24-28 Aprile, Orlando, FL., Vol. 4049.
- Kruse F. A. e Lefkoff A. B., 1999 - *Analysis of Spectral Data of Manmade Materials, Military Targets, and Background Using an Expert System Based Approach* - In Proceedings, ISSR'99, 31 Ottobre – 4 Novembre, Las Vegas, Nevada, published on CD-ROM by ISPRS.
- Kruse F. A., 1998 - *Advances in hyperspectral remote sensing for geologic mapping and exploration* - Presentato al 9° Australian Remote Sensing Conference, Sydney, Australia.
- Kruse F. A., 1997 - *Characterization of active hot - springs environments using multispectral and hyperspectral remote sensing*. - Presentato al Twelfth International Conference and Workshops on applied Geologic Remote Sensing, Denver, Colorado.
- Kruse F. A., 1994 - *Imaging spectrometer data analysis – A tutorial* - International Symposium on Spectral Sensing Research (ISSSR), 10-15 Giugno, San Diego, CA., Vol. I.
- Kruse F. A., Lefkoff A. B., Boardman J. W., 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 Environment, Vol. 44.
- Kruse F. A., Perry S. L. e Caballero A. 2006 – *District-level mineral survey using airborne hyperspectral data, Los Menucos, Argentina* – Annali of Geophysics, Vol. 49, n.1.
- Lattanzi P., Zuddas P. & Frau F. 1998 – *Otavite from Montevecchio, Sardinia, Italy*. - Mineralogical Magazine. Vol. 62 (3).
- Leone A. P., Menenti M., Letizia A. e Colombo C. M., 2002 – *Uso della spettrometria ottica e di immagini iperspettrali per lo studio dei suoli in sistemi agricoli e forestali del Mediterraneo*. - AIT informa -Rivista Italiana di TELERILEVAMENTO, n° 24.
- Leone A. P., 2000 - *Spettrometria e valutazione della riflettanza spettrale dei suoli nel dominio ottico 400 – 2500 nm*. - AIT informa-Rivista Italiana di TELERILEVAMENTO, n° 19.
- Manuale dello Spettrometro Macam Sr-9050.
- Martinez-Alonso S., Rustad J.R. e Goetz A.F.H., 2002 - *Ab initio quantum mechanical modelling of infrared vibrational frequencies of the OH group in dioctahedral phyllosilicates. Part II: Main physical factors governing the OH vibrations* - American Mineralogist, Vol. 87.
- Mauger A. J., 2003 - *Comparison of various remote sensing and spectral radiometer instruments* - Mesa Journal.
- Mezned N., Abdeljaoued S. e Boussema M. R., 2007 - *Aster Multispectral Imagery for Spectral Unmixing based Mine Tailing cartography in the North of Tunisia* - Presentato all'Annual Conference 2007 Remote Sensing and Photogrammetry Society, Newcastle University.
- Montero I. C., Brimhall G. H., Alpers C. N. e Swayze G. A., 2005 - *Characterization of waste rock associated with acid drainage at the Penn Mine, California, by ground-based visible to short-wave infrared reflectance spectroscopy assisted by digital mapping*. - Chemical Geology Vol. 215.
- Montero I. C. e Brimhall G. H., 2001 - *Semi-automated Mineral Identification Algorithm for Ultraviolet, Visible and Near Infrared Reflectance Spectroscopy* - Presentato al Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology. IAMG, Kansas.

- Plumlee G. S., 1999 – *The environmental geology of mineral deposits – Charter 3* – In Reviews in Economic Geology-Vol.6A: The environmental geochemistry of mineral deposits. Part A: Processes, Techniques and Health Issues.
- Quental L. Abreu M. M., Oliveira V., Sausa P., Batista M. J. Brito G., Vairinho M., Sausa J. e Martins I., 2001 - *Imagines Hiperspectrais para avaliacao e monitorizacao ambiental em areas mineiras: resultados preliminares do projecto Mineo na mina de Sao Domingos, Alentejo*. – Atti del Congresso Internazionale sobre Patrimonio Geologico e Mineiro (in press).
- RSI – Research Systems Inc., 2003 – *Envi User's Guide*.
- Salvadori I. & Zuffardi P., 1965 - *Contributo alla conoscenza della paragenesi del giacimento piombo-zincifero di Montevecchio (Sardegna). Nota introduttiva*. - Società Mineraria Italiana, Vol. XXI.
- Secchi F. A. G. Brotzu P. & Callegari E., 1991 – *The Arburese igneous complex (SW Sardinia). An example of dominant igneous fractionation leading to peraluminous cordierite-bearing leucogranites as residual melts*. – Chemical Geology, Vol. 92.
- Shrestha D. P., Margate D. E., Van der Meer F. e Anh H. V., 2005 – *Analysis and classification of hyperspectral data for mapping land degradation: an application in southern Spain* - International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 7.
- Stara P., Rizzo R. & Tanca G. A., 1996 – *Inglesiente e Arburese. Miniere e minerali*. Vol. II. EMSA – Ente Minerario Sardo.
- Swalf P. S., Crosta A. P. e De Souza Filho C. R., 2003 - *Remote sensing signature of the Morro do Ouro gold deposit, Minas Gerais, Brazil, using reflectance spectrometry: application to mineral exploration using spaceborne multispectral sensors* - Revista Brasileira de Geociencias, Vol. 33.
- Swayze G. A., Smith K. S., Clark R. N., Sutley S. J., Pearson R. M., Vance J. S., Hageman P. L., Briggs P. L., Meier A. L., Singleton M. J. e Roth S., 2000 – *Using Imaging Spectroscopy to Map Acidic Mine Waste* – Environmental Science and Technology, Vol. 34.
- Thompson A. J. B., Hauff P. L. e Robitaille A. J., 1999 – *Alteration mapping in exploration: application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy* – SEG-Newsletter, Society of Economic Geologists, N° 39.
- Vane G. e Goetz A.F.H. 1988 - *Terrestrial imaging spectroscopy*. - Rem. Sensing. Environ., 24, 1-29.
- Van de Meer F., 2006 – *Indicator kriging applied to absorption band analysis in hyperspectral imagery: A case study from the Rodalquilar epithermal gold mining area, SE Spain* – International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 8.
- Van der Meer F., 2004 – *Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery* – International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol.5.