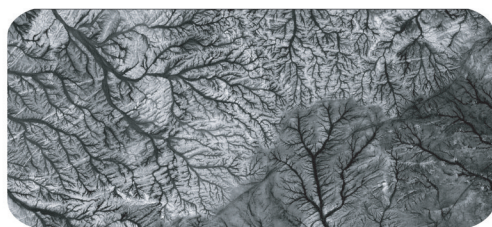
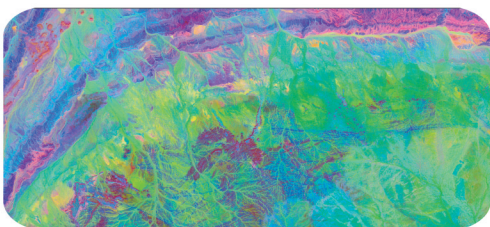
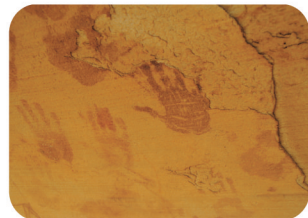




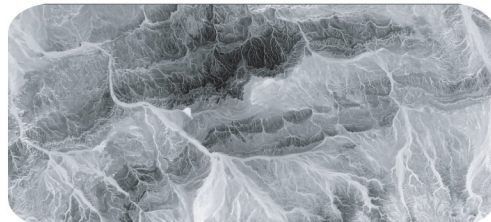
UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

DST  
DIPARTIMENTO DI  
SCIENZE DELLA TERRA



# IL PROGETTO SAHARAWI THE SAHARAWI PROJECT

(Telerilevamento per la ricerca di risorse naturali  
Remote Sensing Techniques for natural resources detection)



Sandro Moretti

Andrea Ciampalini

Nicola Casagli

Con Prefazione di Gilberto Mastromatteo



## Sommario

Prefazione .....	3
Riassunto .....	7
Introduzione .....	8
L'area di studio .....	15
Risorse naturali per la pianificazione strategica.....	21
Metodologia e risultati .....	23
La ricerca delle risorse naturali.....	24
La mappatura della geologia.....	34
Discussione.....	41
Conclusioni .....	48
Foreward .....	51
Abstract .....	54
Introduction .....	55
The study area .....	59
Mineral resources for strategic planning .....	64
Methods and results .....	66
Natural resources research .....	67
Geological mapping.....	72
Discussion.....	74
Conclusion .....	81
Bibliografia - References .....	83

## **Prefazione**

(Gilberto Mastromatteo)

Del ferro, dei Saharawi... e della resilienza

Tra le poche nozioni di fisica che conservo dal liceo c'è quella di resilienza. È un concetto che proviene dalla tecnologia dei materiali. Per dirla in due parole, indica la capacità di un materiale (un metallo, ad esempio) di assorbire un urto, tornando allo stato iniziale. È una questione di elasticità, insomma. Se me lo ricordo ancora è perché l'ho ritrovato poi, su qualche testo di sociologia all'università, sotto forma di connotato psichico e sociale. La resilienza di un individuo o di un popolo, la sua capacità di affrontare stress e avversità uscendone rafforzato, di tornare allo stato precedente un'aggressione esterna. Un concetto poetico, se vogliamo.

Forse è per questo motivo che, quando Andrea Ciampalini mi ha proposto di scrivere una prefazione per il suo libro, mi è tornato alla mente proprio il concetto di resilienza.

Questo libro parla di ferro e di deserto. In particolare parla del Sahara occidentale, che è uno scampolo d'Africa tra i più sconosciuti. E parla del suo popolo, il popolo saharawi, condannato a un'eterna nostalgia e a una perpetua attesa, ma capace di restare nazione, malgrado tutto.



Quella del Sahara Occidentale è la storia di una decolonizzazione rimasta sulla carta. Dal 1975, quando il regno di Marocco ha occupato parte del Paese, i saharawi vivono divisi in due. Alcuni di loro sono rimasti nei territori occupati, dove sono costretti a subire ogni giorno violenze e discriminazioni. La maggior parte vive in esilio in Algeria, nei campi profughi. Separati in casa da un muro, che corre nel deserto, da nord a sud, per 2700 chilometri. Una enorme cicatrice di guerra. Tutt'attorno si calcola siano disseminate quasi dieci milioni tra mine anti-uomo e anti-carro.

Ero assieme ad Andrea Ciampalini nel 2011, quando per la prima volta ho messo piede nei campi di rifugiati saharawi nel sud-ovest algerino e nei territori liberati della Rasd, la Repubblica araba saharawi democratica. Ci sarei tornato una decina di volte negli anni successivi. Di quel viaggio, compiuto assieme a Fiorella Bondoni dell'associazione "Ban Slout Larbi", a Benedetta Antonielli, Giovanni Bigalli e Luca Vescovini, conservo dei ricordi preziosi. Nelle lunghe ore di jeep, che ci portavano verso Tifariti o Bir Lehlu, abbiamo imparato a riconoscere i volti e i contorni di questa nazione in cerca di patria. I contrasti di un deserto inospitale, ma ricco di risorse energetiche, bellezze naturalistiche e siti archeologici. Per il popolo saharawi, al netto di ogni possibile retorica, è maturato in noi un profondo rispetto.

Tra quelle dune, i saharawi si sono inventati un Paese, totalmente autogestito, anche se totalmente dipendente dall'esterno per il suo sostentamento. Hanno tirato su scuole e dispensari, con mattoni di fango secco. Hanno poi proseguito gli studi all'estero, in Algeria, in Spagna o a Cuba. E sono tornati a casa. Nei campi vivono medici, ingegneri e giornalisti che lavorano come muratori e casalinghe o che semplicemente fanno il té. I livelli di scolarizzazione sono tra i più alti del continente. L'educazione è diventata il volano della loro pacifica resistenza. Hanno imparato ad aspettare, senza stancarsi di aspettare. Attendono da quaranta lunghi anni i saharawi. Attendono un referendum che possa sancirne l'autodeterminazione. Attendono l'emancipazione dall'assistenzialismo.

Lo studio messo a punto da Andrea Ciampalini, assieme ai suoi collaboratori, rappresenta una speranza concreta. Dice che nei territori liberati della Rasd il ferro c'è, è estraibile e può dare sostentamento economico a molte famiglie. C'è un solo rischio. Quello che rimanga un potenziale. E nient'altro. Almeno finché non ci sarà una volontà politica internazionale capace di spezzare l'eterna attesa nella quale versa il popolo saharawi. Allo stesso modo potremmo dire delle molte altre risorse, spesso incorporee, possedute da questa gente: la cultura, l'educazione, il senso di appartenenza, la fiducia nella

giustizia internazionale, a dispetto di tutto. Sono germogli che attendono pazientemente di diventare alberi, da quarant'anni, nell'arida serra di Tindouf. Il pericolo è che muoiano o che vengano infestati da erbe malsane.

Forse la vera ricchezza dei saharawi sta proprio nella resilienza. Come il ferro resiste alle sollecitazioni, così questo popolo sta resistendo alla feroce ingiustizia che gli ha riservato il mondo. Lo scrittore uruguayano Eduardo Galeano li definiva "figli delle nubi", perché sono alla perpetua ricerca della pioggia. "E della giustizia – diceva – che è più inafferrabile della pioggia nel deserto". Le loro sorti, in qualche modo, sono le sorti di ognuno di noi.

## Riassunto

Oggi, il Sahara Occidentale è una delle aree più sensibili dal punto di vista politico. La possibilità e il successo di poter tornare ad abitare i territori liberati non sono esclusivamente legati a fattori geo-politici ma, in primo luogo, allo sviluppo economico del Sahara Occidentale. Tale operazione può essere raggiunta attraverso lo sfruttamento delle risorse naturali presenti nei territori liberati e amministrati dalla Repubblica Araba Saharawi Democratica, area che oggi rimane quasi del tutto inesplorata.

In questa pubblicazione viene illustrata una metodologia a basso costo, basata sul telerilevamento, al fine di individuare la presenza, sulla superficie terrestre di depositi ricchi in minerali economicamente sfruttabili. La metodologia si basa sull'elaborazione di immagini Landsat ETM+, tecnica che permette di individuare e delimitare possibili giacimenti sfruttabili. Le immagini Landsat ETM+ rappresentano un grande vantaggio dal punto di vista economico in quanto sono scaricabili gratuitamente e la loro elaborazione non necessita di sistemi *hardware* o *software* particolarmente costosi. Questa tecnica può, quindi, essere facilmente trasferita ai tecnici saharawi permettendogli di estendere la ricerca di risorse naturali su tutti i territori liberati e di amministrare in

autonomia l'esplorazione e lo sfruttamento delle risorse presenti nel loro territorio.

**Parole chiave:** riconoscimento dei minerali, miniere di ferro, sfruttamento del ferro, Sahara Occidentale, Paesi in via di sviluppo.

## Introduzione

Il Sahara Occidentale è stato colonia spagnola fino al 1975 quando il controllo amministrativo dell'area passò in parte al Marocco e in parte alla Mauritania i quali reclamarono la loro sovranità sui territori sulla base di rivendicazioni storiche avanzate già dal 1957. Contemporaneamente l'Algeria si oppose alle rivendicazioni di Marocco e Mauritania sostenendo la richiesta di piena indipendenza avanzata dal Fronte Polisario (Fronte di Liberazione Popolare di Saguia el Hamra e Rio de Oro).

Nel 1975, a seguito di una missione nei territori contesi, le Nazioni Unite e la Corte Internazionale di Giustizia dichiararono che, nonostante le comuni radici storiche e culturali fra il Sahara Occidentale, il Marocco e la Mauritania, la popolazione saharawi possedesse i requisiti per l'auto determinazione.

Il 31 ottobre 1975 la parte nord occidentale del Sahara Occidentale fu invasa dall'esercito marocchino. Pochi giorni dopo avvenne la cosiddetta marcia verde, ovvero l'invasione di circa 350 000 coloni marocchini che occuparono stabilmente i territori già invasi dall'esercito marocchino pochi giorni prima. Contemporaneamente truppe della Mauritania occuparono il settore sudorientale dei territori saharawi.

Pochi mesi dopo (nel 1976) scoppiò la guerra fra il Fronte Polisario e gli eserciti marocchino e mauritano. Nonostante la fiera opposizione dei combattenti saharawi, il Marocco riuscì ad occupare in poco tempo circa due terzi del Sahara Occidentale: i settori settentrionale e occidentale, mentre la Mauritania prese il controllo della parte sudorientale del paese.

Il conflitto fra il Fronte Polisario e la Mauritania fu breve, concludendosi nel 1979 con il ritiro delle truppe mauritane, mentre con il Marocco venne raggiunto il cessate il fuoco solamente nel 1991 a seguito di una Risoluzione delle Nazioni Unite che prevedeva anche l'effettuazione di un referendum di autodeterminazione, non ancora avvenuto. Dal quel momento i territori del Sahara Occidentale sono divisi in due parti separate da un muro fortificato (Muro Marocchino) lungo circa 2700 km. Il muro è una struttura difensiva che separa la parte occupata dal Marocco dai territori liberati (Figura 1). La maggior parte delle nazioni non ha mai riconosciuto il diritto

del Marocco all'occupazione di parte del Sahara Occidentale, mentre numerose nazioni, alle quali non si sono mai aggiunte le Nazioni Unite, hanno riconosciuto ufficialmente il Sahara Occidentale. Questa situazione complica notevolmente lo status legale del Sahara occidentale che è tuttora irrisolto.

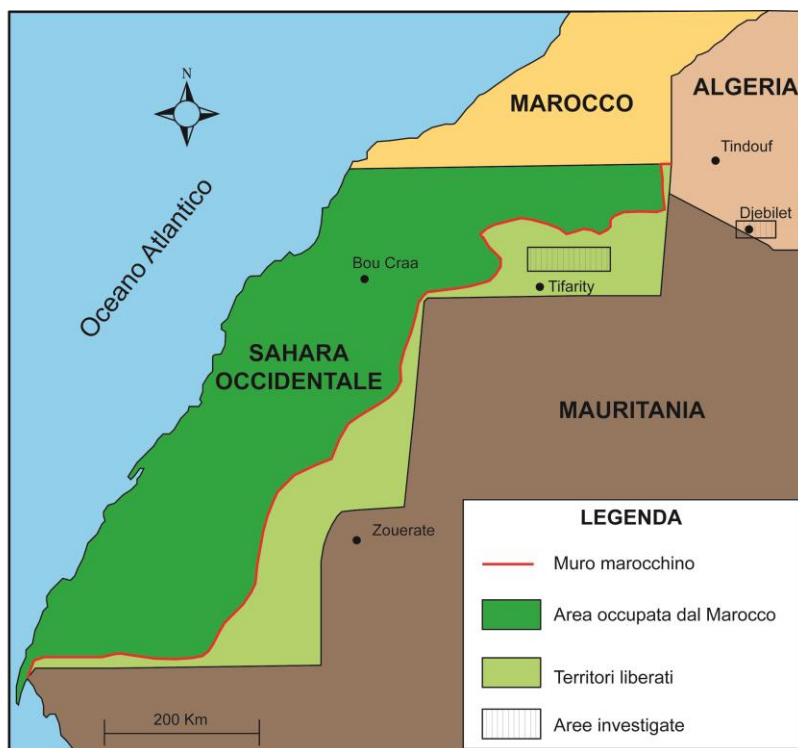


Figura 1 – Mappa politica del Sahara Occidentale e localizzazione delle aree investigate. *Political map of the Western Sahara and location of the study areas.*



Dall'inizio della guerra con il Marocco e la Mauritania, una parte considerevole della popolazione saharawi trovò rifugio nella regione di Tindouf (Algeria del Sud), dove furono creati numerosi campi di rifugiati. Oggi i campi ospitano ancora la maggior parte del popolo saharawi e sono amministrati dal Governo dell'autoproclamata Repubblica Araba Saharawi Democratica.

Il numero totale dei rifugiati ospitati nei campi di Tindouf è argomento di disputa. Secondo le fonti marocchine i rifugiati sarebbero circa fra i 45 000 e i 50 000, mentre secondo il Governo algerino sarebbero 165 000. Una stima recente effettuata dall'UNCHR riporta che i rifugiati nei campi di Tindouf siano circa 90 000.

Oggi i campi di rifugiati di Tindouf, dove la maggior parte del popolo saharawi vive in tende o in modeste casette di fango senza servizi e acqua corrente, sono completamente dipendenti dagli aiuti umanitari (Figura 2).



Figura 2 – Alcuni immagini del campo di rifugiati di Auserd. *Some pictures from the Auserd refugee camp.*

I territori liberati del Sahara Occidentale sono quasi del tutto inabitati e le poche persone che ci vivono traggono sostentamento dalla propria attività pastorizia nomade (Alvarez Gila *et al.*, 2011). Tifariti, dove vivono circa 70 persone, è l'insediamento più importante dei territori liberati. Il Governo della RASD sta pianificando lo sviluppo urbano dell'area di Tifariti al fine di favorirne il ripopolamento. Il successo dell'operazione di ripopolamento è fortemente influenzato dalle possibilità di crescita economica dell'area, dal successo del referendum e dalla durata del cessate il fuoco con il Marocco.

Il ripopolamento dei territori liberati dovrà essere fortemente sostenuto dagli aiuti umanitari, ma la piena emancipazione del popolo saharawi potrà essere facilitata dallo sfruttamento delle risorse naturali presenti nell'area poco esplorata e, amministrata dal Governo della RASD.

L'esplorazione delle risorse naturali è generalmente un'operazione costosa e difficilmente sostenibile per la RASD. Il telerilevamento è un metodo poco costoso e veloce che può essere facilmente sfruttato per il riconoscimento di aree ricche in risorse naturali, specialmente in ambiente desertico (Kaufmann, 1988; Ferrari, 1992; Kenea e Haenisch, 1996; Kenea, 1997; Sabins, 1999; Rajesh, 2008; Dogan, 2008; 2009, Honarmand *et al.*, 2012). Con questo lavoro vorremmo

presentare un esempio di come l'elaborazione di immagini satellitari Landsat ETM+ possa rappresentare un'opportunità per i paesi in via di sviluppo per incrementare la conoscenza del proprio territorio in termini di presenza e sfruttamento di risorse economiche. Nonostante la maggior parte delle risorse naturali siano localizzate nella parte occupata dal Marocco, come l'area di Bou Craa (uno dei più importanti giacimenti di fosfati al mondo), i territori liberati possono essere sede di importanti giacimenti minerari. Ad esempio le rocce presenti nei territori liberati possono contenere quantità sfruttabili di ferro. Il ferro è una delle meno remunerative risorse naturali ma è estensivamente impiegato in numerosi campi industriali. E' stato stimato che il fabbisogno di ferro per i prossimi 50 anni salirà almeno 5 volte rispetto alla produzione globale (Skinner, 2000). Per questo motivo la possibilità di scoprire nuovi giacimenti ricchi in ferro nei territori liberati può rappresentare un'occasione per pianificare il futuro sviluppo economico dell'area.

## L'area di studio

L'area di studio ricade nei territori liberati del Sahara Occidentale (Figura 1). Per quest'area non esistono informazioni geologiche dettagliate. Per ovviare a questo problema è stata selezionata l'area di Djebilet, dove sono presenti delle miniere di ferro e dove affiora una successione sedimentaria del tutto paragonabile a quella che caratterizza il Sahara Occidentale a Nord di Tifariti.

Nel sito algerino la stratigrafia e la localizzazione dei giacimenti di ferro (ematite, chamosite e siderite) sono ben conosciute (Guerrak, 1988a, b, 1991; Guerrak e Chauvel, 1985; Lubeseder *et al.*, 2009). Entrambe le aree sono situate lungo il fianco meridionale del bacino di Tindouf, il quale è lungo circa 800 km ed è orientato circa OSO-ENE. I sedimenti che caratterizzano il bacino di Tindouf si sono formati nel periodo che va dal Cambriano a Quaternario (Villeneuve, 2005) (Figura 3). Mentre il fianco settentrionale del bacino è stato approfonditamente studiato, non esistono studi di dettaglio sul fianco meridionale. La successione sedimentaria del bacino di Tindouf giace su un substrato rappresentato dallo scudo di Reguibat, che affiora estesamente a Sud del bacino (Guerrak, 1988b).

Lo Scudo di Reguibat è costituito da rocce formatesi durante l'Archeano (più di 3.5 miliardi di anni fa, Potrel *et al.*, 1996). Il cuneo sedimentario diventa più spesso andando verso il centro del bacino (Lubeseder *et al.*, 2009). Le rocce affioranti lungo il fianco meridionale sono state approfonditamente studiate in Algeria (Guerrak, 1998a; b).

La successione sedimentaria che affiora si è deposta fra il Cambro-Ordoviciano e il Devoniano inferiore. La litologia più antica affiorante è costituita da arenarie continentali del Cambro-Ordoviciano che hanno uno spessore variabile fra 1 e 70 m circa (Guerrak, 1988a; b). Questi depositi costituiscono una sequenza *coarsening upward* deposta in ambiente di piattaforma poco profonda. I depositi del Siluriano, spessi da 80 a 200 m, sono formati da una sequenza *fining upward* che rappresenta la trasgressione marina e sono composti da argilliti verdi e viola ricche in graptoliti (Legrand, 1969). Questi depositi sono ricoperti da una spessa sequenza (fino a 650 m) di sedimenti Devoniani (Guerrak, 1988b; Villeneuve, 2005). Questo spessore di sedimenti contiene almeno tre diverse sequenze *coarsening upward* e una *fining upward* (Guerrak, 1988a; b).

La prima sequenza si è formata durante il Lochkoviano (Devoniano inferiore) e registra la progradazione degli ambienti deposizionali dalla piattaforma di mare aperto

all'ambiente litorale e sono costituiti da calcilutiti con intercalazioni di arenarie gradate. Il loro spessore varia dai 6 ai 30 m e sono particolarmente ricchi in fossili (Brachiopodi, Tentaculiti, Bivalvi, Coralli e Crinoidi). Nell'area di Djebilet, la parte sommitale è rappresentata da arenarie calcaree lenticolari che sono ricche in ferro (LOIDs) ma non economicamente sfruttabili (Guerrak, 1991).

La seconda sequenza sedimentaria mostra una base trasgressiva e una progradazione dei sistemi deposizionali passando dai fanghi calcarei di mare profondo ad arenarie litorali (ambiente di barriera), arenarie di spiaggia ed, infine, a depositi prettamente continentali (dune eoliche con stratificazione tabulare incrociata) (Lemoigne, 1967). Nel Sahara Occidentale questa sequenza è costituita principalmente da i fanghi calcarei di mare profondo e dalle arenarie litorali.

L'ultima sequenza *coarsening upward* si è deposta durante il Pragian (Devoniano inferiore) ed è spessa dai 6 ai 30 m. La sequenza passa da arenarie siltose di ambiente intertidale a arenarie ricche in ooliti ferrosi depositate in ambiente lagunare che mostrano una diminuzione del contenuto di quarzo verso l'alto e un contemporaneo arricchimento in ferro.

Durante l'Emsiano (Devoniano inferiore) una nuova trasgressione marina ha interessato l'intero Sahara



permettendo la deposizione di una nuova sequenza *fining upward* (Legrand, 1967), formata principalmente da depositi di piattaforma di mare basso (Guerrak, 1988a). Questi depositi sono composti da conglomerati, arenarie e siltiti organizzate in una sequenza *fining upward* spessa circa 10 m.

L'ultima sequenza *coarsening upward* è la più interessante in quanto contiene i giacimenti algerini ricchi in ferro. Al loro interno sono stati riconosciuti due tipi diversi di arenarie oolitiche ricche in ferro (OISs, Guerrak, 1998b): gli "*extensive iron deposits*" (EXID-OIS), molto estesi arealmente ma poco spessi (pochi metri) e i "*local iron deposits*" (LOID-OIS) caratterizzati da notevoli spessori (fino a 30 m) ma scarsa estensione areale. Nel Sud dell'Algeria i depositi classificati come LOIDs rivestono un'importanza notevolmente maggiore degli EXID (Guerrak, 1988a; b).

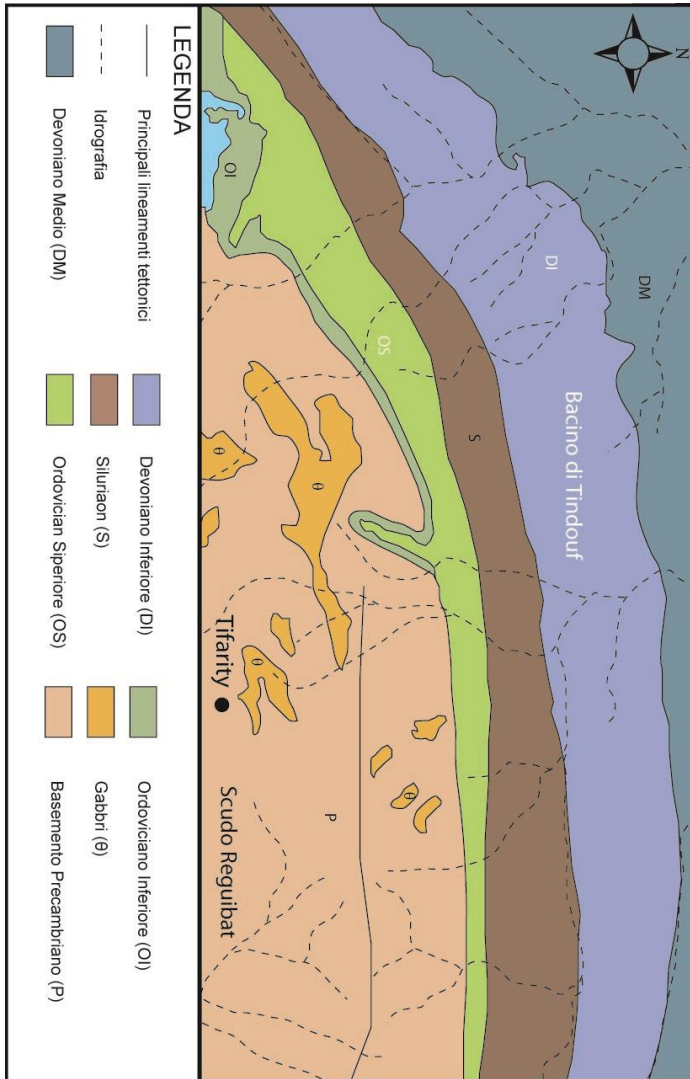


Figura 3 – Carta geologica del Sahara Occidentale (Saadi *et al.*, 1985). *Geological map of the Western Sahara* (Saadi *et al.*, 1985).

Da un punto di vista mineralogico i depositi ricchi in ferro sono costituiti da magnetite, ematite, goethite, maghemite, chamosite, siderite e pirite ma magnetite, chamosite e ematite rappresentano le specie più abbondanti (Guerrak, 1988b). La sorgente dei depositi ferrosi del Devoniano è probabilmente localizzata a Sud del bacino di Tindouf, nello Scudo Reguibat, soggetto all'erosione da parte di numerosi sistemi fluviali che fluivano in direzione del bacino di Tindouf. La mobilitazione del ferro può essere stata favorita dal cambiamento delle condizioni di ossido riduzione dopo la fase di sollevamento avvenuta nel Siluriano che interessò il settore settentrionale dello Scudo Reguibat (Guerrak, 1991). La dissoluzione del ferro (III) nei suoli, sotto forma di ferro (II) è favorita da ambienti riducenti (Rajesh, 2008). La rimozione del ferro (ii) in soluzione è favorita da un fenomeno che prende il nome di *bleaching* causato dall'azione dei fiumi che scorrevano nello Scudo Reguibat, permettendo la rideposizione del ferro negli ambienti deltizi del Bacino di Tindouf sotto forma di ooidi ricchi in chamosite. La presenza di abbondante chamosite (silicato di ferro) suggerisce che l'ambiente di deposizione fosse caratterizzato da un basso Eh (potenziale di riduzione) in acque calme e ricche di fango in sospensione (James e Van Houten, 1979). Questi ooidi (granuli rivestiti) hanno subito un progressivo rimaneggiamento con conseguente rottura nel

momento in cui l'ambiente subì un cambiamento, passando da acque calme ad agitate. La rottura dei granuli ne favorì l'ossidazione trasformando la chamosite in ematite e successivamente in goethite (Guerrak, 1988b; Ciampalini *et al.*, 2013a).

## **Risorse naturali per la pianificazione strategica**

Lo sfruttamento delle risorse naturali è necessario per l'esistenza umana e per contribuire alla crescita economica, specialmente nei paesi in via di sviluppo (Tilton, 2000; Lambert, 2001, Richard, 2005; Upadhyay *et al.*, 2010). In particolare, l'esplorazione mineraria può essere considerata come il primo passo da compiere per lo sviluppo economico sia per le più antiche società sia per quelle moderne. I fattori che influenzano il sistema di sfruttamento delle risorse minerarie sono: geologia, tecnologia, condizioni economiche, politiche e ambientali.

L'esplorazione mineraria a scala regionale costituisce la fase più importante dal punto di vista strategico in quanto consente anche di ottenere informazioni accurate sulla geologia del proprio paese, utilizzando i minerali come base

per l'identificazione di potenziali giacimenti (Snow e Mackenzie, 1981). Questa fase è, spesso, quella a più alto rischio in quanto l'investimento stanziato può non essere compensato dal possibile ritorno economico proveniente dalla scoperta di un nuovo giacimento. In questi casi una metodologia più economica possibile è necessaria per ridurre il rischio di perdita o il totale fallimento della fase di esplorazione, specialmente per paesi in via di sviluppo dalle risorse economiche limitate. Il Governo della RASD necessita, infatti, di una metodologia *low-cost*, che possa essere facilmente trasferibile ai tecnici saharawi, al fine di aumentare la conoscenza dei propri territori in termini di risorse naturali.

Un progetto minerario è generalmente costituito da 3 fasi:

- Riconoscimento e localizzazione di giacimenti (prospezione e esplorazione) con stima dei confini del possibile giacimento;
- Determinazione della qualità e quantità della risorsa riconosciuta (fase di valutazione);
- Definizione di un volume estraibile che consenta un certo profitto (valutazione economica)

Questo progetto è focalizzato sulla prima fase (prospezione e esplorazione) ed intende stabilire una procedura economica e facilmente esportabile basata su tecniche di telerilevamento per il riconoscimento di possibili giacimenti di ferro sulla

superficie terrestre. La fase di esplorazione richiede la disponibilità di dati geologici. L'area dei territori liberati è scarsamente conosciuta dal punto di vista geologico. Le informazioni più dettagliate derivano dalla carta geologica del Marocco (Saadi *et al.*, 1985, Figura 3) in scala 1:1.000.000. Ulteriori informazioni sono state ricavate dalla geologia del Sud dell'Algeria (Djebilet) dove affiora la stessa sequenza di rocce presente nei territori liberati. Djebilet comprende 3 miniere di ferro di notevole importanza (Guerrak, 1988). Le immagini Landsat ETM+ sono state utilizzate anche per realizzare una mappatura foto-litologica dei territori liberati e del sud dell'Algeria al fine di aumentare le informazioni disponibili.

## **Metodologia e risultati**

I sensori satellitari e aviotrasportati multispettrali e iperspettrali sono stati estensivamente utilizzati per riconoscere diverse caratteristiche della superficie della terra, del mare e dell'atmosfera (Marzano e Visconti, 2003; Barale e Gade, 2008; van der Meer *et al.*, 2012). Il telerilevamento risulta spesso essere una metodologia più economica rispetto a tecniche più tradizionali, specialmente per il riconoscimento

e la mappatura di risorse naturali come i depositi di ferro localizzati sulla superficie terrestre e che possono essere estesi su vaste aree. I vari sensori esistenti sono caratterizzati da differenti risoluzioni spaziali e spettrali, accessibilità del dato e costi. Fra questi, i sensori multispettrali come ad esempio il Landsat Thematic Mapper (TM) e l'Enhanced Thematic Mapper (ETM+) sono i più economici da utilizzare per la ricerca di risorse naturali e per la mappatura delle litologie sulla superficie terrestre, in quanto completamente gratuiti.

## **La ricerca delle risorse naturali**

L'archivio Landsat TM/ETM+ è stato comunemente utilizzato per la mappatura dei depositi ricchi in ferro nei Monti Zagros in Iran (Tangestani e Moore, 2000), in Sudan (Elsayed Zeinelabdein e Albiely, 2008), in Egitto (Ramadan e Kotny, 2004) in Australia (Rajesh, 2008) e in Canada (Daneshfar *et al.*, 2006). La distribuzione di specifici minerali distribuiti sulla superficie terrestre può essere evidenziata utilizzando differenti tecniche di elaborazione, combinando le 6 bande spettrali del sensore Landsat. La mappatura dei depositi di ferro può essere effettuata con successo utilizzando tecniche



come il rapporto fra bande, le immagini in falsi colori, l'analisi delle componenti principali e la *Intensity Hue Saturation* (IHS) (Al Rawashdeh *et al.*, 2006; Madani, 2009; Shalaby *et al.*, 2010; Dehnavi *et al.*, 2010). Al fine di elaborare le singole immagini, che comprendono aree molto vaste, è stato effettuato un *subset* dell'area di studio, sul quale applicare le tecniche sopradescritte, per mappare i minerali ferrosi in ambiente desertico. Per l'area di Djebilet (Algeria) è stato utilizzato un *subset* dell'immagine Landsat ETM+ 201/41 acquisita il 12/10/2010, mentre per i territori liberati è stato utilizzato il *subset* dell'immagine Landsat ETM+ 203/42 acquisita il 16/03/2006. La differenza nel periodo di acquisizione non rappresenta un problema in quanto l'ambiente desertico risulta omogeneo (Al Rawashdeh *et al.*, 2006). Entrambe le immagini sono state scaricate dal sito dell'*US Geological Survey* ([www.earthexplorer.usgs.gov](http://www.earthexplorer.usgs.gov)). Esistono altri numerosi tipi di prodotti acquisiti da satelliti che vengono comunemente utilizzati nel campo dell'esplorazione mineraria (Rowan e Mars, 2003; Hubbard e Crowley, 2005; Rajendran *et al.*, 2011); tali prodotti sono caratterizzati da una migliore risoluzione spaziale e/o spettrale rispetto a Landsat ma anche da un costo notevolmente più elevato. L'utilizzo dei dati tele rilevati è di cruciale importanza in aree come i territori liberati del Sahara Occidentale di non facile accesso a causa della

situazione politica e della mancanza di infrastrutture. Poiché quando si lavora con dati tele rilevati è necessario effettuare la validazione sul terreno per confermare i risultati delle elaborazioni, è stata effettuata una campagna sul terreno all'interno dell'area di studio. I campioni prelevati sul terreno, in corrispondenza delle zone mappate da satellite come "ricche in ferro" sono stati utilizzati per validare il dato satellitare. Un ulteriore metodo di validazione è stato quello di utilizzare le immagini satellitari del sito di Djebilet (Algeria), a circa 200 km a Est di Tifariti, dove si ha la certezza della presenza di giacimenti ricchi in ferro e confrontare le elaborazioni di queste immagini con quelle dei territori liberati. A Djebilet sono presenti tre siti di estrazione del ferro, due dei quali (Gara Center e Gara East) sono stati utilizzati per il confronto.

Il rapporto fra bande spettrali è uno dei metodi più semplici ed utilizzati per mappare la presenza di ossidi di ferro e solfati generalmente associati ad altri minerali di alterazione di origine idrotermale o contenuti in rocce alterate (Kauffman, 1988; Sabins, 1999; Ramadan e Kotny, 2004; Al Rawashdeh *et al.*, 2006; Dogan, 2008; 2009; Elsayed Zeinelabdein e Albiely, 2008; Madani, 2009; Denhavi *et al.*, 2010; Shalaby *et al.*, 2010). Il rapporto fra bande è basato essenzialmente sul rapporto del valore di riflettanza fra due bande aventi differenti

lunghezze d'onda. Fra i possibili rapporti, quello fra le bande 3 e 1 (3/1) è considerato il migliore per il riconoscimento degli ossidi e idrossidi di ferro (Ramadan e Kotny, 2004; Al Rawashdeh *et al.*, 2006; Dogan, 2008; 2009; Elsayed Zeinelabdein e Albiely, 2008; Madani, 2009; Shalaby *et al.*, 2010; Ciampalini *et al.*, 2013b) (Figura 4). Considerando i *subset* utilizzati, il rapporto fra le bande 4 e 1 (4/1) è risultato il migliore per la mappatura dell'estensione dei depositi ricchi in minerali ferrosi che appaiono come aree chiare nella relativa immagine (sia in Algeria sia nel Sahara Occidentale, Figura 4).

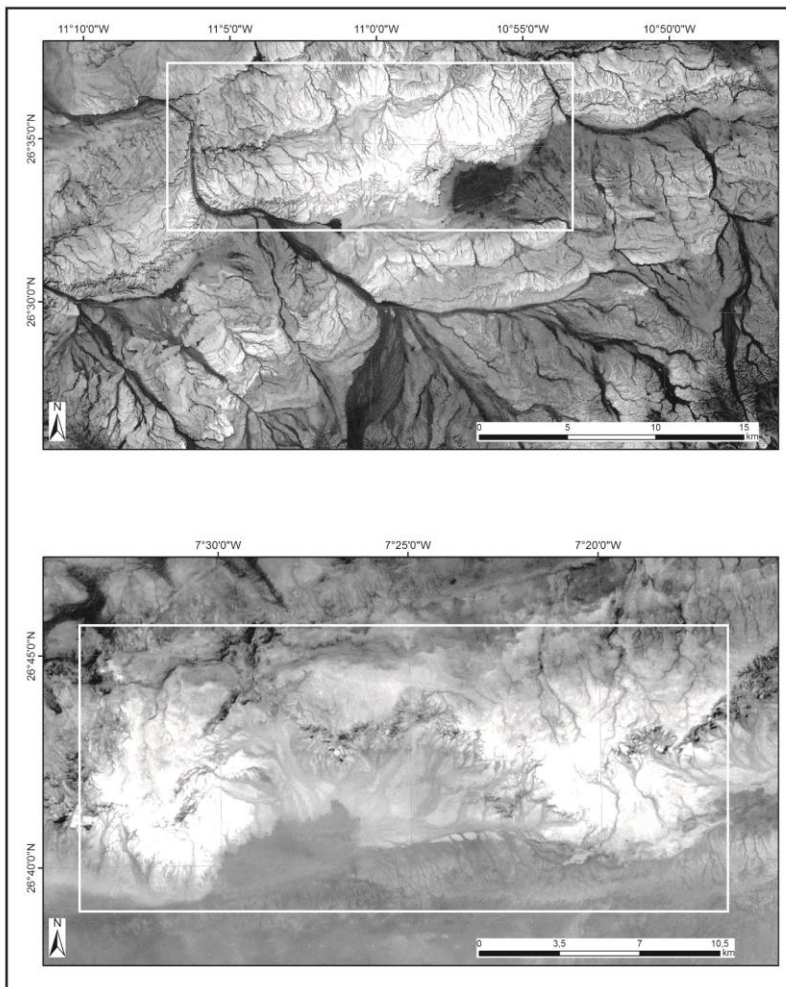


Figura 4 – Rapporto fra bande 3/1 nel Sahara Occidentale (in alto); rapporto fra bande 4/1 in Algeria (in basso). In entrambe le immagini le aree ricche in minerali ferrosi appaiono bianche. *Ratio image 3/1 for the Western Sahara site (up); Ratio image 4/1 for the Algeria site (down). The areas rich in iron appear in white.*

Il secondo tipo di elaborazione consiste nella realizzazione di immagini in falsi colori derivanti dalla combinazione delle 6 bande in Rosso, Verde e Blu (RGB).

Questo tipo di elaborazione è spesso utilizzato per mappare differenti litologie (Alessandro *et al.*, 1997; Shalaby *et al.*, 2010). Le differenti combinazioni vengono utilizzate per esaltare le differenze nella risposta spettrale delle diverse litologie presenti nell'area o per individuare zone di alterazione (Dehnavi *et al.*, 2010).

Le immagini in falsi colori possono anche essere create utilizzando le immagini prodotte con i rapporti fra bande in RGB (Sabins, 1999; Elsayed Zeinelabdein e Albiely, 2008). La scelta della migliore combinazione può essere fatta su base statistica (*optimum index factor*) o facendo riferimento all'abbondante letteratura riguardante l'argomento e tenendo conto delle litologie affioranti nell'area d'interesse. Fra le possibili combinazioni, l'immagine ottenuta dai rapporti fra bande 3/5, 4/1 e 5/7 in RGB è risultata la scelta migliore per evidenziare la presenza dei depositi ricchi in ferro sia in Algeria sia nel Sahara Occidentale (Figura 5).

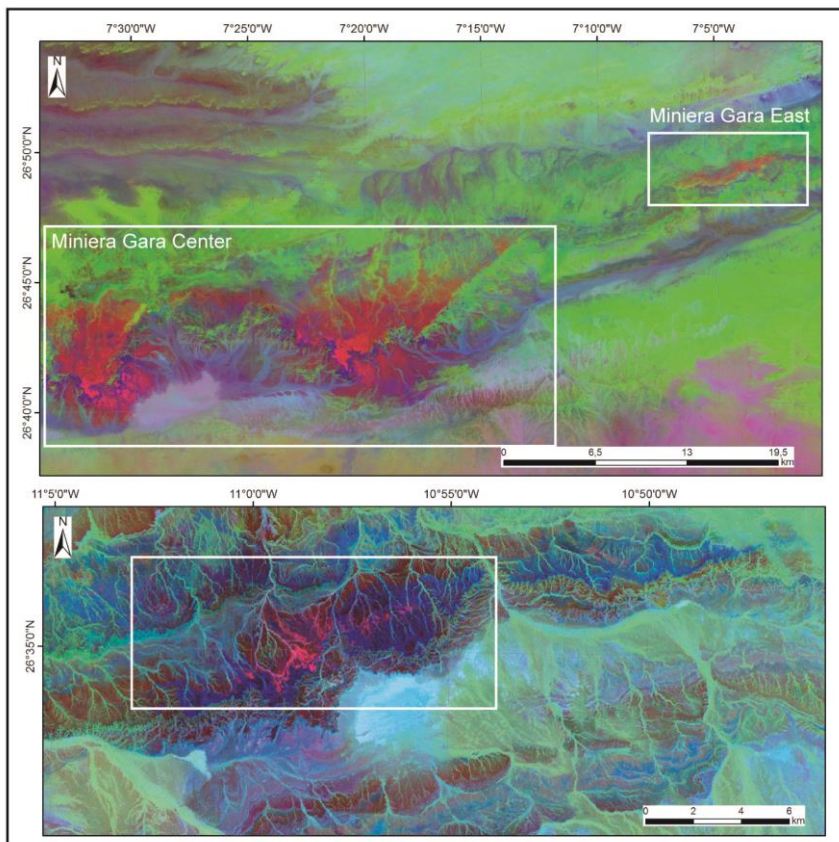


Figura 5 – Immagini in RGB prodotte utilizzando i rapporti fra bande 3/5, 4/1, 5/7 per l’Algeria (sopra) e per il Sahara Occidentale (sotto). Le aree ricche in ferro sono evidenziate in rosso. *Band Ratio images in RGB using ratios 3/5, 4/1, 5/7 for the Algeria (up) and the Western Sahara (down). The iron rich areas are highlighted in red.*

L’analisi delle componenti principali (PCA) rappresenta una tecnica più complessa rispetto alle precedenti ma costituisce

un ottimo strumento per la mappatura di determinati minerali presenti sulla superficie terrestre.

La PCA è un metodo di statistica multivariata che può essere utilizzato per trattare le bande spettrali Landsat ETM+ che sono fortemente correlate fra loro. Il risultato restituisce delle nuove bande, chiamate componenti principali, che non sono più correlate (Loughlin, 1991). Le componenti principali possono, a questo punto, essere utilizzate per creare immagini in falsi colori in RGB (Kauffman, 1988; Kenea e Haenisch, 1996; Alessandro *et al.*, 1997; Silijestrom *et al.*, 1997; Zumsprekel e Prinz, 2000; Al Rawasdesch *et al.*, 2006). La PCA può essere eseguita seguendo tre possibili diversi approcci: (1) *undstandardized* PCA, che usa la matrice di covarianza (Kaufmann, 1988; Loughlin, 1991; Kenea e Haenisch, 1996; Alessandro *et al.*, 1997; Zumsprekel e Prinz, 2000; Al Rawashdeh *et al.*, 2006; Aydal *et al.* 2007); (2) *standardized* PCA, usando la matrice di correlazione (Kenea e Haenisch, 1996) e *selective* PCA, utilizzando solamente 4 delle 6 bande Landsat (Loughlin, 1991).

Nel primo caso, l'immagine che corrisponde alla seconda componente principale evidenzia molto chiaramente l'estensione delle rocce ricche in ferro (Figura 6).



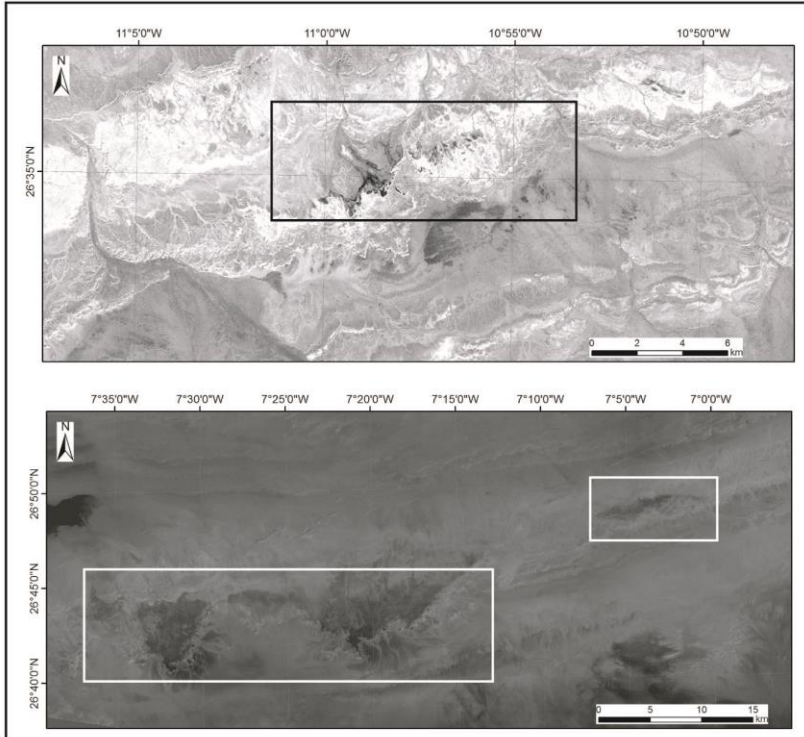


Figura 6 – Immagine della PC2 per il Sahara Occidentale (sopra) e per l'Algeria (sotto). Le aree ricche in ferro sono visualizzate in nero. *PC2 images for the Western Sahara (up) and Algeria (down). Iron rich areas are highlighted in black.*

Utilizzando le componenti principali PC1, PC2, PC3 in RGB è possibile mappare con accuratezza i depositi ferrosi algerini (Djebilet, Figura 7), mentre per i territori liberati i migliori risultati sono stati ottenuti con le PC 3, 2 e 4 in RGB (Figura 7) che sono generalmente indicate per mappare i gli ossidi di ferro (Loughlin, 1991).

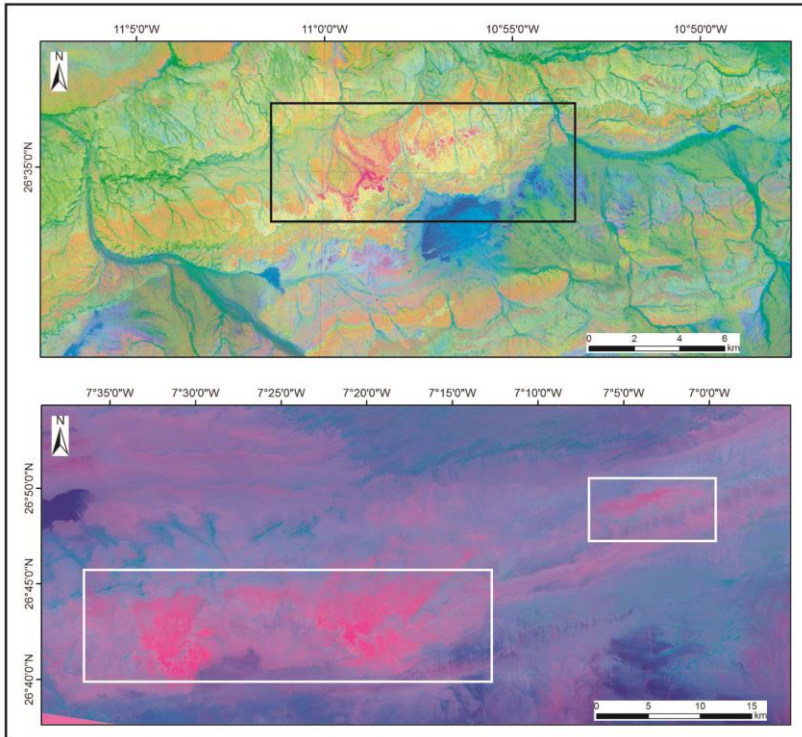


Figura 7 – Immagini in RGB prodotte utilizzando le componenti principali PC3, 2 e 4 per il Sahara Occidentale (sopra) e PC 1, 2 e 3 per il l'Algeria (sotto). Le aree ricche in ferro sono evidenziate in rosso. *PC images in RGB using PC 3, 2 e 4 for the Western Sahara (up) and PC 1, 2 e 3 for the Algeria (down). The iron rich areas are highlighted in red.*

I risultati ottenuti con la *standardized PCA* hanno permesso di mappare le stesse aree utilizzando la combinazione PC4, PC2 e PC3 in RGB sia per l'Algeria sia per i territori liberati.

La bande spettrali 1, 3, 4 e 5 sono state utilizzate per la *selective* PCA in quanto considerate le più utili per evidenziare i minerali di ferro. I minerali ferrosi generalmente presentano un forte assorbimento nella banda 1 e alta riflettanza nelle bande 3 e 4 (Loughlin, 1991).

I campioni prelevati durante il rilevamento sul terreno al fine di validare i risultati ottenuti da satellite sono stati analizzati preliminarmente con un microscopio a scansione elettronica del MEMA (Università di Firenze). Il microscopio permette una stima del contenuto in ferro che è risultato variare fra il 44% e il 66% del peso dei campioni prelevati nelle zone mappate da satellite come ricche in ferro.

## **La mappatura della geologia**

Le metodologie descritte nella precedente sezione, utilizzate per la mappatura dei depositi ricchi in ferro, possono fornire interessanti risultati anche nel campo della cartografia geologica, soprattutto in aree desertiche. Al fine di migliorare il dettaglio della cartografia geologica del Sahara Occidentale, l'elaborazione delle immagini satellitari Landsat ETM+ è stata utilizzata cercando di discriminare le differenti litologie presenti.

Ad esempio la produzione di immagini in falsi colori può essere agevolmente utilizzata per evidenziare le differenze fra le varie litologie. In letteratura sono numerosi gli esempi di combinazioni di bande spettrali per mappare la geologia in ambiente desertico.

Per esempio vengono comunemente utilizzate le seguenti combinazioni in RGB: 457, 541, 751 e 753 (Daneshfar *et al.*, 2006; Dehnavi *et al.*, 2010; Deller, 2006; Ramadan e Kotny, 2004; Qaid e Basavarajappa, 2008; Zumsprekel e Prinz, 2000). Le combinazioni che evidenziano meglio le differenze sono state ulteriormente elaborate applicando il *decorrelation stretching* per enfatizzare ulteriormente tali differenze.

Questa operazione consente di aumentare la decorrelazione fra le bande conservando il dato originale delle bande (Rothery e Hunt, 1990). I rapporti fra bande sono, generalmente, più utili rispetto alle singole bande per evidenziare differenze nella topografia e nell'illuminazione che possono essere sintomatiche di cambiamenti nella litologia.

In particolare, i rapporti fra bande risultano essere molto utili se combinati per formare nuove immagini in falsi colori. I rapporti fra bande più comunemente utilizzati nella mappatura delle litologie sono i seguenti: 3/5, 3/1, 5/7 – 3/1, 5/7, 5/4 – 5/7, 3/1, 4/3 e 5/7, 4/5, 3/1. (Aydal *et al.*, 2007; Elsayed

Zeinelabdein e Albiely, 2008; Kaufmann, 1988; Rajesh, 2008; Ramadan e Kotny, 2004).

Infine, anche in questo caso, è stata utilizzata l'analisi delle componenti principali (PCA) utilizzando la matrice di covarianza e tutte le bande multispettrali disponibili al fine di creare immagini in falsi colori (Aydal *et al.*, 2007; Ramadan e Kotny, 2004; Siljestrom *et al.*, 1997; Ciampalini *et al.*, 2012).

Le elaborazioni così ottenute (Figure 8 e 9) sono state integrate con la mappa geologica 1:1.000.000 (Saadi *et al.*, 1985), con le informazioni sulla stratigrafia dell'area (Guerrak, 1988a) e con le osservazioni effettuate durante il sopralluogo nei territori liberati.

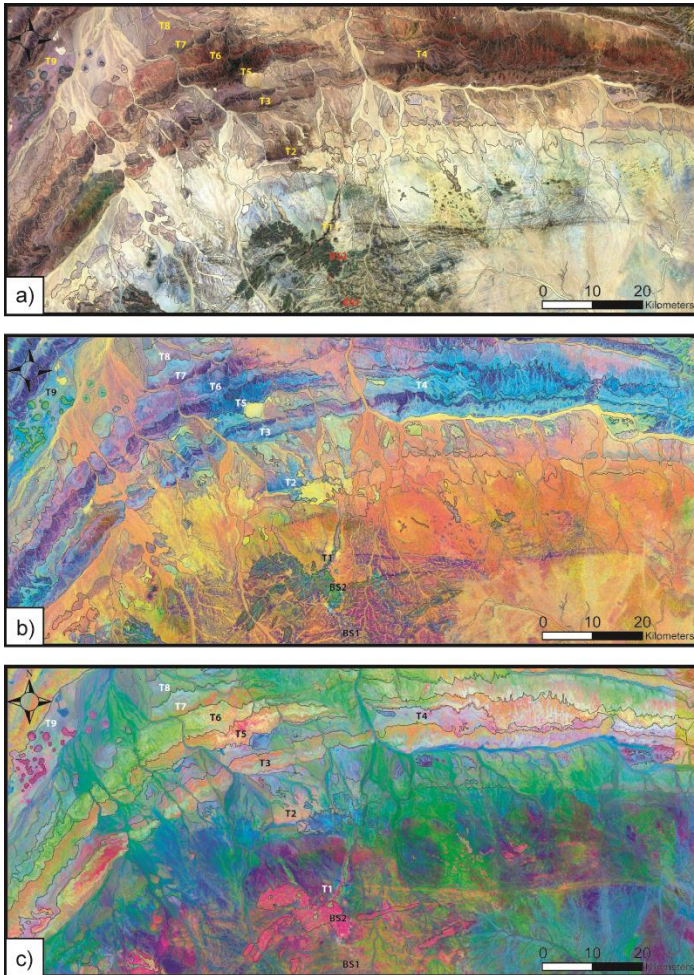


Figura 8 – Alcuni esempi delle elaborazioni effettuate al fine di mappare le differenti litologie: a) immagine in falsi colori 541; b) immagine in falsi colori 3/1 – 5/7 – 5/4; immagine in falsi colori PC 123. *Examples of the enhancements performed on Landsat images. (a) composite 541; (b) composite 3/1 – 5/7 – 5/4 with decorrelation stretching; (c) composite PC123.*



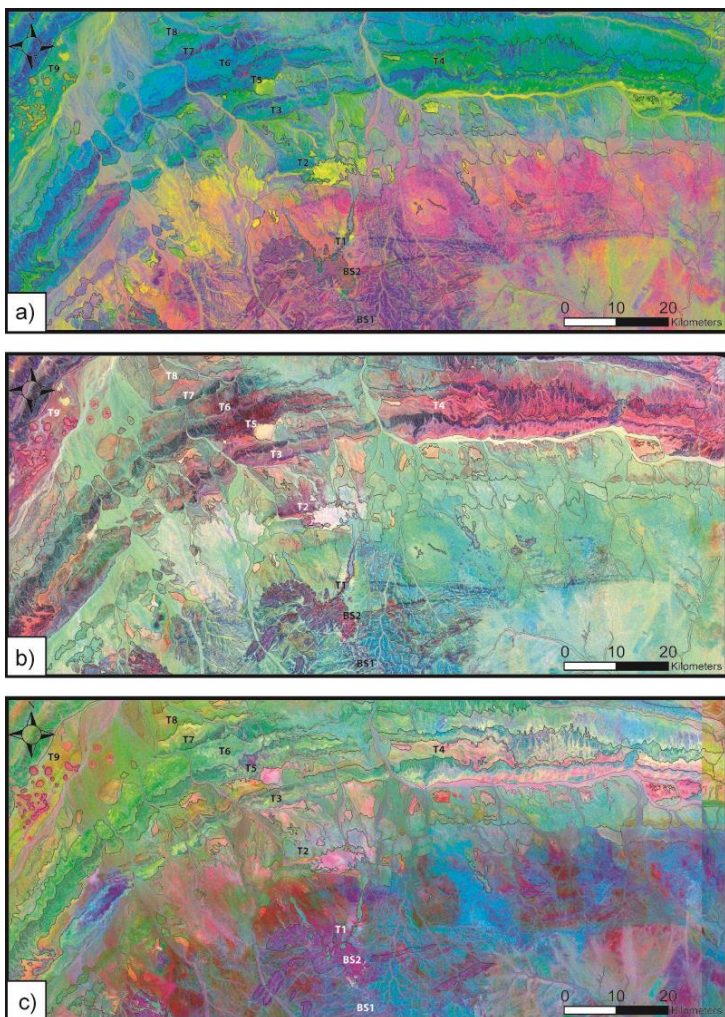


Figura 9 - Altri esempi delle elaborazioni effettuate al fine di mappare le differenti litologie: a) immagine in falsi colori 457 con decorrelation stretching; b) immagine in falsi colori 5/7 - 3/1 - 4/3; immagine in falsi colori PC 324. *Other examples: (a) composite 457 with decorrelation stretching; (b) composite 5/7 - 3/1 - 4/3; (c) composite PC 324.*

Le elaborazioni effettuate hanno portato al riconoscimento di 12 differenti unità foto-litologiche (Figura 10), 2 appartenenti al basamento Precambriano e 10 al Bacino sedimentario di Tindouf, che sono state confrontate con le informazioni disponibili e validate con il rilievo sul terreno. Questa operazione ha consentito di produrre una nuova mappa geologica (Figura 11), basata sulle unità foto-litologiche riconosciute.

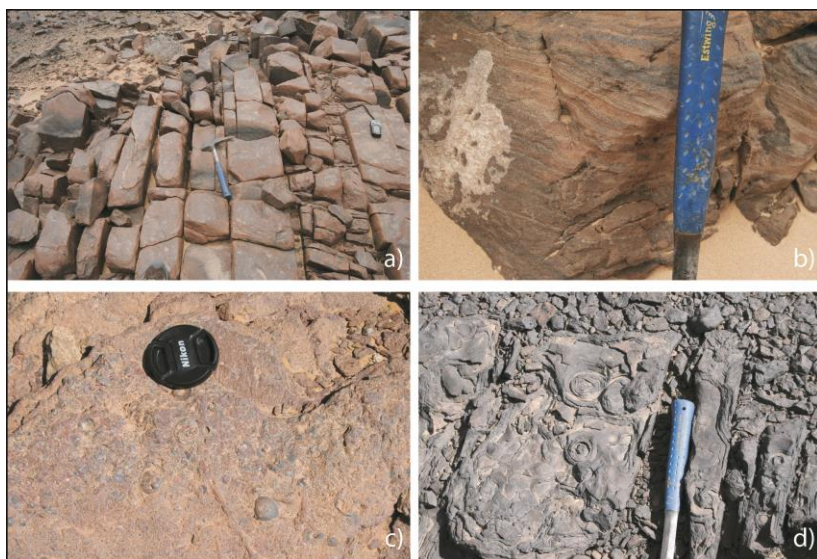


Figura 10 – Alcuni esempi delle litologie riconosciute: a) graniti dello Scudo Precambriano; b) Arenarie Ordoviciane; c) Argilliti del Siluriano; d) Calcari dell'Eifeliano. *Some examples of the recognized lithologies: a) Precambrian granite; Ordovician sandstone; c) Silurian claystone; d) Eifelian Limestone.*



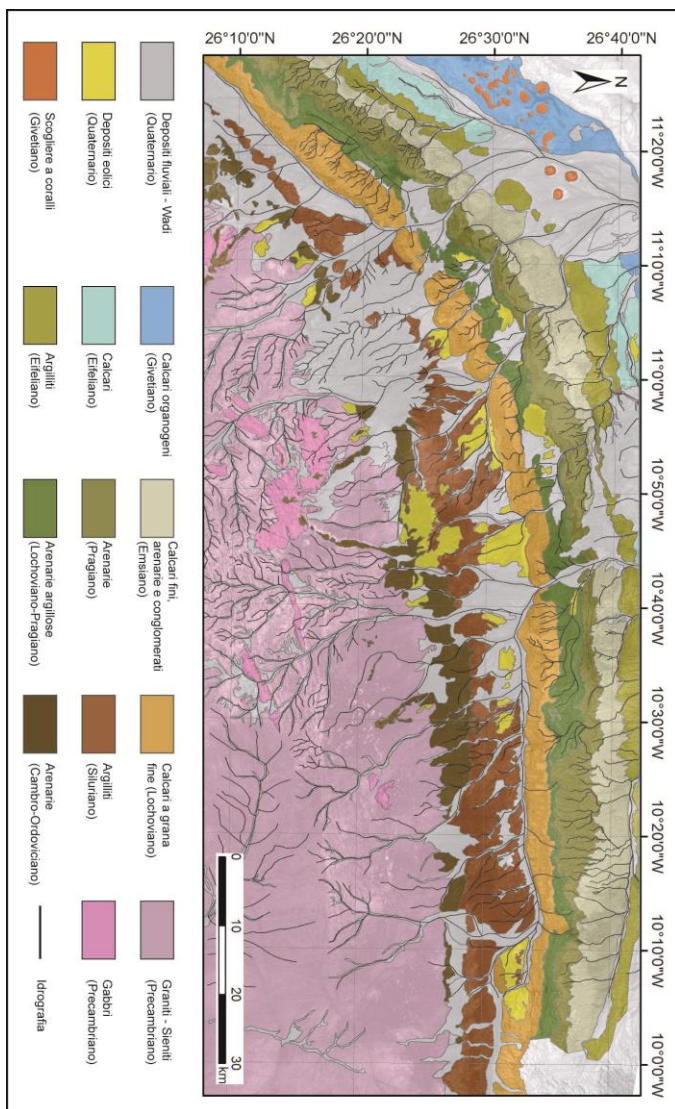


Figura 11 – Nuova carta foto-litologica del fianco meridionale del Bacino di Tindouf. *New photo-lithological map of the southern flank of the Tindouf Basin.*

## Discussione

Le metodologie descritte e i risultati ottenuti provano chiaramente l'utilità delle immagini multispettrali Landsat ETM+ nel riconoscimento dei minerali ferrosi, il cui sfruttamento può servire da incentivo per la crescita economica dei paesi in via di sviluppo. Le riserve di ferro delle miniere di Djebilet sono state stimate in 1,7 miliardi di tonnellate, con un contenuto del 57% di ferro.

Le rocce che ospitano i giacimenti di ferro algerini sono le stesse che affiorano nei territori liberati a nord di Tifariti. Questa similitudine è stata riscontrata sia da satellite sia sul terreno proprio per il contenuto in ferro del tutto paragonabile.

Il sito mappato nei territori liberati è da considerare come un'area che può essere economicamente sfruttabile per l'estrazione dei minerali ferrosi. L'utilizzo dei dati satellitari Landsat ETM+ ha permesso di individuare un'area di circa 72 km<sup>2</sup>, localizzata nei territori liberati, che potrà diventare una nuova area mineraria, con una spesa veramente contenuta.

L'elaborazione delle immagini Landsat ETM+ risulta, quindi, una procedura molto semplice, che potrà essere replicata da tecnici saharawi con computer poco costosi, per la ricerca di risorse naturali in tutta l'estensione dei territori liberati. In definitiva, questa metodologia può rappresentare una strada

molto economica, veloce e semplice per valutare le potenzialità, in termini di risorse naturali, del Sahara Occidentale. In caso di risultati positivi, come in questo caso, potranno essere pianificate nuove analisi più accurate per determinare l'effettiva presenza di risorse economicamente sfruttabili.

Per esempio potranno essere utilizzate immagini multispettrali con risoluzione spaziale e spettrale (Worldview 2 o Quickbird), generalmente più costose, su aree specifiche utilizzando le stesse procedure adattate alle specifiche spettrali dei sensori utilizzati.

Il Sahara Occidentale è un paese ricco in termini di risorse naturali, le più importanti sono rappresentate dai giacimenti di fosfati estratti nel sito di Bou Craa. I fosfati presenti a Bou Craa hanno, probabilmente, giocato un ruolo fondamentale fra le motivazioni dell'invasione del Marocco.

Un Sahara Occidentale indipendente, che abbia a disposizione l'intero suo territorio, potrebbe diventare uno dei paesi leader nell'esportazione di fosfati. Inoltre il Sahara Occidentale è caratterizzato dalla presenza di altre risorse naturali, per esempio le sue acque costiere sono particolarmente ricche di pesce. Negli ultimi anni il governo marocchino ha investito circa 90 milioni di dollari in un

ambizioso piano di sviluppo della filiera ittica lungo le coste dei territori occupati (Shelley, 2004).

Infine la compagnia petrolifera statale marocchina ha iniziato una campagna di prospezioni per determinare la presenza di petrolio e gas naturale al largo delle coste dei territori occupati a seguito della recente scoperta di questo tipo di risorse a largo delle coste mauritane (Brownfield e Charpentier, 2006; Davison, 2005; Sasche *et al.*, 2011).

Dal 1976 il Marocco ha investito più di 1 miliardo di dollari nei territori occupati al fine di sviluppare una rete di infrastrutture utile allo sfruttamento delle risorse naturali dell'area (Shelley, 2004), realizzando anche 3 aeroporti e numerosi porti nautici per l'esportazione delle risorse estratte. Lo sviluppo dell'industria mineraria nei territori liberati porterebbe a dei benefici simili, grazie alla realizzazione di una rete di infrastrutture, oggi totalmente inesistente, dedicata allo sfruttamento delle risorse naturali.

Le reti infrastrutturali sono necessarie alla crescita dei paesi in via di sviluppo, specialmente il Sahara Occidentale, per la mobilità delle persone e dei beni. Infatti, lo sfruttamento dei giacimenti di ferro è da considerare economicamente conveniente se il materiale estratto può essere esportato grazie alla presenza di strade, porti e aeroporti.

Esistono numerose problematiche che possono essere ricondotte all'estrazione mineraria: ad esempio il notevole costo iniziale, l'impatto ambientale (Lahiri-Dutt, 2004) e gli aspetti sociali, ma se organizzati correttamente l'estrazione e la lavorazione delle risorse minerarie può portare ad un generale miglioramento delle condizioni sociali del paese ed alla progressiva riduzione dell'impatto ambientale.

Attualmente, nei paesi nord africani il maggiore problema è rappresentato dalla stabilità politica, considerata come fattore fondamentale per attrarre finanziatori esteri. La complessa situazione politica del Sahara Occidentale rappresenta l'ostacolo maggiore per gli investitori. Secondo la legge internazionale l'estrazione delle risorse naturali può essere concessa esclusivamente da governi sovrani legittimamente riconosciuti.

Un altro importante fattore limitante per gli investitori è rappresentato dalla crescente pressione, nei confronti delle aziende operatrici, al fine di minimizzare l'impatto ambientale e di aumentare il benessere delle popolazioni locali (Holden e Jacobson, 2006). La crescita delle regolamentazioni ambientali e dei costi sociali rappresenta un deciso aumento dei costi che gli investitori dovrebbero sostenere.

Le questioni di carattere ambientale non solo rappresentano un fattore economicamente negativo per le

aziende siderurgiche ma può portare anche ad una pubblicità negativa per le stesse aziende in caso di problemi.

Quindi, sebbene i territori liberati siano caratterizzati dalla presenza di risorse naturali, come dimostrato in questa pubblicazione, la totale mancanza di una rete infrastrutturale e la difficile situazione politica rappresentano dei forti deterrenti per i possibili investitori.

L'iniziale sviluppo economico e sociale del Sahara Occidentale liberato dovrebbe essere garantito da finanziamenti internazionali dedicati allo sviluppo del sistema di comunicazione che possa favorire il collegamento con altri siti estrattivi come, ad esempio, quelli algerini o della Mauritania (Zouerate) dove l'attività estrattiva è in corso.

Lo sviluppo di una tale rete potrebbe essere anche di interesse per il governo algerino, infatti, il sito di Djebilet è situato a 300 km dall'Oceano Atlantico e a ben 1600 km dal Mar Mediterraneo. Lo sfruttamento di queste miniere diventerebbe più conveniente se i minerali estratti potessero essere esportati via Atlantico.

La rete di infrastrutture che dovrebbe essere sviluppata all'interno dei territori liberati avrebbe porterebbe anche ad indubbi benefici per il settore turistico.

Il Sahara Occidentale è ricco sia di paesaggi naturali di ineguagliabile bellezza ma anche di molti siti di interesse

archeologico risalenti al Paleolitico e Neolitico testimoniati da numerose pitture rupestri e ritrovamenti di artefatti e sepolture (Figura 12).

Gli abbondanti ritrovamenti di manufatti preistorici, come asce, frecce, pietre da macinazione, ceramiche ed altro risalenti a diversi millenni fa, testimoniano che il clima del Sahara, oggi caratterizzato da clima arido, fosse decisamente più umido (Brooks *et al.*, 2003).

Queste condizioni climatiche sono testimoniate anche dalla presenza di numerose pitture rupestri. Il patrimonio geo-archeologico è rappresentato da manufatti di pietra e ceramiche risalenti ai periodi Acheuleano (400 000 – 150 000 anni fa), Musteriano – Ateriano (90 000 – 50 000 anni fa) e Neolitico (circa 10 000 anni fa), oggi conservati nel museo di Tifariti. La parte più interessante del patrimonio archeologico del Sahara Occidentale è costituita dalle pitture rupestri e dalle sepolture. Queste importanti testimonianze sono largamente diffuse in tutti i territori liberati, soprattutto nelle vicinanze di Tifariti.

Fra le sepolture, sono abbastanza comuni quelle a struttura a tumulo, lineare, o ad antenna. L'ultimo tipo è particolarmente diffuso in Libia, fatto che suggerisce una certa continuità geografica e culturale fra la Libia e il Sahara centrale durante il Neolitico (Cremaschi, 1988).

Nelle vicinanze di Tifariti, il ritrovamento di monumenti pre-islamici e islamici evidenzia come l'area sia stata occupata da insediamenti in maniera continua, fino ad oggi (Brooks *et al.*, 2003).

Ad oggi, la parte più ricca di ritrovamenti archeologici dei territori liberati è quella settentrionale, in particolare sono abbondanti i ritrovamenti di pitture rupestri.

Alcuni di questi siti sono praticamente abbandonati e il progressivo deterioramento delle pitture rupestri sta portando alla perdita di un patrimonio culturale di inestimabile valore.

I danni alle pitture rupestri sono, probabilmente, in parte provocati dal turismo incontrollato. Infatti, alcuni di questi siti sono molto conosciuti ma non sufficientemente protetti dalle autorità. Altre pitture rupestri risultano danneggiate dagli eventi atmosferici e dall'usura del tempo. In particolare, il sito di Bou Dheheir è uno dei più importanti esempi di arte preistorica di tutto il Sahara Occidentale a causa dei soggetti dipinti (rinoceronti, bufali, giraffe) che testimoniano condizioni climatiche passate ben differenti dalle attuali. Lo sviluppo della rete di infrastrutture porterebbe non solo benefici in termini di afflussi turistici ma anche alla necessità di proteggere il patrimonio culturale.



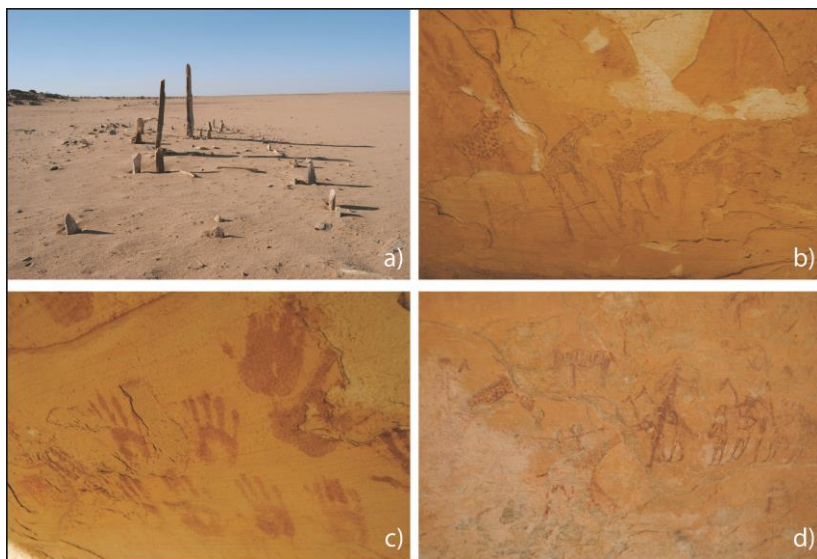


Figura 12 – Alcuni esempi del patrimonio archeologico dei territori liberati del Sahara Occidentale a Nord di Tifariti: a) sepolture; b), c) e d) esempi di pitture rupestri. *Some examples of the free territories of the Western Sahara, north of Tifariti: a) burial; b), c) and d) rock paintings.*

## Conclusioni

La valorizzazione dei territori liberati del Sahara Occidentale in termini di sfruttamento di risorse naturali può rappresentare una vera e propria opportunità per lo sviluppo economico e sociale del paese. Il possibile sfruttamento delle risorse individuate necessita di una futura e accurata valutazione della quantità di ferro estraibile e dal suo ritorno in termini economici.

L'estensione del giacimento riconosciuto da satellite è simile a quello algerino ma la estesa copertura di depositi eolici ai bordi del possibile giacimento potrebbe suggerire che, in realtà, esso possa essere più esteso di quanto mappato. Il riconoscimento di aree sfruttabili per la presenza di risorse naturali potrebbe portare ad un miglioramento dell'innovazione tecnologica, economica e sociale per i paesi in via di sviluppo.

Inoltre un impegno nell'uso di tecnologie produttive moderne e pulite e una legislazione che tenga conto della difficile situazione del Sahara Occidentale potrebbero favorire l'interesse di fondi internazionali dedicati e di investitori stranieri.

Fino ad oggi numerosi paesi hanno modificato la propria legislazione riguardante le tematiche estrattive per incoraggiare gli investimenti nel settore come, per esempio, l'Ecuador, l'Argentina e il Cile (Warhurst e Bridge, 1997), che sono diventati, nel tempo, importanti paesi per l'esplorazione mineraria.

Se i risultati ottenuti grazie alle precedentemente descritte tecniche di telerilevamento venissero confermati da analisi più accurate, lo sfruttamento dei giacimenti ferrosi individuati potrebbe rappresentare il motore per lo sviluppo economico dei territori liberati.

Nella valutazione della convenienza economica è, anche, necessario considerare che il giacimento si troverebbe sulla superficie terrestre e non in profondità. La profondità di un giacimento rappresenta un importante fattore economico: maggiore è la profondità del giacimento maggiori saranno i costi per individuare ed estrarre le risorse naturali (Scott e Dimitrakopoulos, 2001).

In quest'ottica i territori liberati del Sahara Occidentale potrebbero essere uno dei paesi più competitivi a livello di esportazione di materia prima a basso costo.

# Foreward

(Gilberto Mastromatteo)

About iron, Saharawis and... resilience

Among the few notions of physics I remember from high school, there is the one of resilience. It is a concept that comes from the material's technology. To make a long story short, it indicates the ability of a material (a metal, for example) to absorb a shock, returning to the initial state. Hence, it is a matter of flexibility. I remember this notion because I found it again, in some sociology books at university, in the form of psychological and social connotation. The resilience of an individual or of a people is its ability to deal with stress and adversity and to get stronger, to come back to the state it had before an external aggression. A poetic concept, if you will.

Perhaps, it is for this reason that, when Andrea Ciampalini asked me to write a foreword to his book, I remembered precisely the concept of resilience.

This book is about iron and about desert. Specifically, it speaks about Western Sahara, which is among the most unknown scraps of Africa. It speaks about its people, the Sahrawi people, condemned to an eternal homesickness and to a perpetual waiting, but able to be a nation, despite all odds.

The story of Western Sahara is the story of a decolonization still unfinished. Since 1975, when the kingdom of Morocco had occupied part of the country, the Saharawis were living divided in two. Some of them remained in the occupied territories, where they were forced to suffer daily violences and discriminations. The majority of them lived in exile in Algeria, in the refugee camps. Separated by a wall, which ran in the desert, from north to south, for 2,700 km. A huge battle scar. It is estimated that almost ten millions anti-personnel and anti-tank mines are scattered all around it.

I was with Andrea Ciampalini in 2011, when I set foot, for the first time, in the Sahrawi refugee camps in southwestern Algeria and in the liberated territories of Sadr, the Saharawi Arab Democratic Republic. I would have gone back a dozen times, in the following years. I keep treasured memories about that trip I made together with Fiorella Bondoni, from “Ban Slout Larbi” association, Benedetta Antonielli, Giovanni Bigalli and Luca Vescovini. During the long hours spent travelling by jeep, which was taking us to Tifariti or Bir Lehlou, we learned to recognize faces and contours of this nation in search of home. The contrasts of an inhospitable desert, but rich in energy resources, natural beauties and archaeological sites. We experimented a deep respect for the Saharawi people, without any possible rhetoric.

Among those dunes, the Saharawis have invented a country, fully self-ruled, even if totally dependent on the outside for its livelihood. They built schools and dispensaries, with bricks of dried mud. Then, they continued their studies abroad, in Algeria, in Spain or in Cuba. And they returned home. In the camps are living doctors, engineers and journalists, who are working now as masons and housewives, or just as tea makers. The levels of education are among the highest in the continent. Education has become the driving force for their peaceful resistance. They learned to wait, without getting tired of waiting. The Saharawis have been waiting for forty long years. They're waiting for a referendum, that would sanction their self-determination. They're waiting for the emancipation from dependency.

The study developed by Andrea Ciampalini, along with his collaborators, is a concrete hope. It says that there is iron in the liberated territories of Sadr, that it is mineable and that it can give economic support to many families. There is only one risk. That it could remain a potential. And nothing else. At least, until there is an international political will able to break the eternal waiting in which the Saharawi people pours. Similarly, we could speak about many other resources, often incorporeal, owned by these people: culture, education, sense of belonging, confidence in international justice, despite

everything. These are seeds that have been patiently waiting to become trees for forty years, in the arid greenhouse of Tindouf. The danger is that they could die or they could be infested by unhealthy herbs.

Perhaps, the real wealth lies in the resilience of the Saharawis. As the iron is able to withstand, so these people are resisting the fierce injustice that the world is giving them. The Uruguayan writer Eduardo Galeano described them as “children of the clouds” because they are in a perpetual search of the rain. “They also pursue justice – he said – which is harder to find than water in the desert.”. Their fate, somehow, is the fate of each one of us.

## **Abstract**

At the present time, Western Sahara is politically one of the most sensitive areas of the World. Possibilities of gaining independence and succeeding in inhabiting the presently occupied land are not only linked to international politics but also to the economic development of Western Sahara, which could be achieved through the exploitation of natural resources that can be found in the almost unexplored area administrated by the Saharawi Arab Democratic Republic.

In this book, we present a cost effective remote sensing technique to detect mineral deposits, based on the enhancement of Landsat ETM+ imagery, which also allows defining the actual extent of the ore district. Landsat images can be downloaded free of charge and their elaboration does not need any expensive hardware or software tool, thus this knowledge could be transferred to the Saharawi technicians enabling them to manage the resources of their own country in an independent way.

**Keywords:** mineral detection; iron mines; iron exploitation; Western Sahara; developing country.

## **Introduction**

Western Sahara was a Spanish colony until 1975, when the administrative control was handed by Morocco and Mauritania, which claimed the sovereignty over the territory, based on competing traditional claims, since 1957. At the same time, Algeria opposed both Moroccan and Mauritanian claims, supporting the demand of full independence laid by the Saharawi national liberation movement Polisario Front (Popular Front for the Liberation of Saguia el-Hamra and Río



de Oro). In 1975, after a visiting mission, both United Nations (UN) and International Court of Justice (ICJ) declared that, despite the clear historical links between Western Sahara, Morocco and Mauritania, the Saharawi population possessed the right of self-determination.

On October 31st 1975, the northwestern part of the Western Sahara territories was invaded by 350,000 Moroccan settlers and troops (Green March). At the same time, Mauritanian troops occupied the southeastern sector.

After few months (in 1976), a war broke out between the Polisario Front and Morocco and Mauritania. Despite the proud opposition of the Saharawi fighters, Morocco ended up taking control of the northern two-thirds of Western Sahara as its Southern Provinces and Mauritania took control of the southeastern part left. The conflict between the Polisario front and the Mauritanian troops was short, whereas the war against Morocco ended in 1991, when UN favored a ceasefire.

Western Saharawi presently divided into two by a wall (Moroccan wall), more than 2700 Km long. This wall is a defense line, which divides the area occupied by Morocco from the liberated territories (Figure 1).

Other countries do not recognize the sovereignty of Morocco over the occupied territory yet, whereas Western Sahara has been recognized by several countries, but not by

the UN (United Nations). This situation complicates the setting of the legal status of Western Sahara, which has not been solved yet. Since the beginning of the war against Morocco, a consistent part of the Saharawi took refuge in the Tindouf province (South Algeria), creating several refugee camps, which are currently governed by the authorities of the self-proclaimed Sahrawi Arab Democratic Republic (SADR).

The total number of refugees in Algeria is disputed. According to Moroccan sources, refugees are about 45,000 to 50,000, whereas the Algerian government argued that 165,000 Saharawi live in the Tindouf camps.

A recent estimation performed both by UNCHR and CIA suggests that the right amount can count about 90,000 people. The exact number will be fundamental for the future referendum, promoted by the UN, for the determination of the political status of Western Sahara.

The Tindouf camps, where most of Saharawi still live in tents or in modest mud huts without running water, are completely dependent on international humanitarian aid. The liberated territories of Western Sahara (Figure 1) are almost uninhabited and the people living there depend on pastoral nomadism (Alvarez Gila *et al.*, 2011). Tifariti, where about 70 persons live, is the most important settlement in these territories. The

SADR government is planning an urban development of Tifariti to repopulate the liberated territories, but the return of the Saharawi people in their land is strongly linked to the economic growth of the area and also to the success of the referendum and to the maintenance of the ceasefire.

The repopulation of the liberated territories should be supported by a strong humanitarian aid, but the emancipation of the Saharawi will be facilitated by the exploitation of the natural resources present in the almost unexplored area administrated by the SADR government.

The retrieval of natural resources is usually expensive and it is hard to support by the Saharawi government. Remote sensing is an inexpensive and rapid method, which can be exploited for the detection of mineral resources, especially in arid environments (Kaufmann, 1988; Ferrari, 1992; Kenea and Haenisch, 1996; Kenea, 1997; Sabins, 1999; Rajesh, 2008; Dogan, 2008; 2009, Honarmand et al., 2012).

In this book we show an example of how the enhancement of Landsat ETM+ imagery could represent a very cheap opportunity for developing countries to increase knowledge about their territories in terms of available and exploitable natural resources. Even if most of the natural resources are located in the occupied side of Western Sahara like Bou Craa,

one of the most important phosphate mines of the world was detected in the liberated territories.

This area is characterized by the presence of iron ore deposits. Iron is one of the least expensive and most widely used metals, but the requirements of metals over the next 50 years is forecasted to be five times their global production (Skinner, 2000). For this reason, the iron ore deposits detected in the Western Sahara could represent an interesting resource of iron and constitute an element of economic development.

## **The study area**

The study area is located within the RASD territory (Figure 1). This area is characterized by a general lack of bibliographic data due both to the region's remote location and to its difficult political situation. The information about the geology of another part of the Tindouf basin (Djebilet, Algeria), characterized by the same sedimentary sequence, rocks and iron mines, combined to the remote sensing techniques were used to extend the geological interpretation to the study area.

In Algeria, the stratigraphy and the location of the major iron ore deposits (hematite–chamosite–siderite-bearing formations) are well-known (Guerrak 1988a, b, 1991; Guerrak and

Chauvel, 1985; Lubeseder *et al.*, 2009). Both areas are located along the southern flank of the WSW–ENE oriented Tindouf Basin, which is 800 km long.

The sediments of the Tindouf Basin were formed between the Cambrian and Quaternary (Villeneuve, 2005). While the northern flank has been extensively studied, detailed geological studies about the southern flank have yet to be published. The sedimentary succession of the Tindouf Basin overlaps the Reguibat Shield southwards along the southern flank (Guerrak, 1988b). The Precambrian Reguibat Shield is made of Archaean terrains older than 3.5 Ga (Potrel *et al.*, 1996). The sedimentary wedge deepens gently toward the basin center where reaches the higher thickness (Lubeseder *et al.*, 2009). The rocks outcropping in the southern flank have been studied in detail in Algeria near the village of Djebilet (Guerrak, 1988a, b).

This sedimentary succession was formed between the Cambro-Ordovician and the lower Devonian. The oldest rocks occurring consist of Cambro-Ordovician continental sandstones, with a thickness ranging between 1 and 70 m (Guerrak, 1988a, b).

These deposits are represented by a coarsening upwards sequence deposited within shallow shelf environments (Guerrak, 1991). The thickness of the Silurian rocks (green

and purple shales rich in graptolites) varies between 80 and 200 m. They correspond to a fining upward sequence deposited during a marine transgression (Legrand, 1969). The Silurian deposits are overlain by a thick sequence (as much as 650 m) of Devonian sediments (Guerrak, 1988b; Villeneuve, 2005).

Three coarsening upward sequences and one fining upward sequence were recognized within the Lower Devonian deposits (Guerrak, 1988a, b). The first one (Lochkovian in age) corresponds to the progradation of the environments from offshore to a shoreface and consists of mudstones with fine-grained sandstone layers. Their thickness varies between 6 to 30 m and they are particularly rich in fossils (e.g. Brachiopods, Tentaculites, Bivalves, Corals and Crinoids).

In the Djebilet area, the uppermost sediments are characterized by the lenticular calcareous sandstones, which are considered to be local ironstones deposits (LOIDs) but they are lacking in economic interest (Guerrak, 1991).

The second sequence shows a transgressive base and the progradation of the depositional environments, passing from the offshore mudstones and siltstones to the shoreface sandstones (barrier island environment), foreshore sandstones characterized by tabular cross-bedding (beach sediments) and finally to aeolian dunes with tabular–planar cross-bedding and

fossil vegetation (Lemoigne, 1967). In the Western Sahara test site, this coarsening upwards sequence is primarily composed of offshore mudstones and siltstones and shoreface sandstones.

The last sequence (Pragian in age), is 6 to 30 m in thickness. This coarsening upward sequence shows a transition from the foreshore, parallel laminated argillaceous sandstones to the sandstones containing iron ore oolites, deposited within a lagoon or embayment environment and characterized by an upward decrease in quartz content to form rich iron ore.

A new marine transgression occurred during the Emsian (Lower Devonian) when the whole Sahara platform was submerged, allowing the deposition of a fining upward sequence (Legrand, 1967), formed by shallow shelf deposits (Guerrak, 1988a) made of conglomerates, sandstones and siltstones. These deposits are organized in a 10-m-thick fining upward sequence.

The last coarsening upward sequence is the most interesting because it hosts the Algerian iron ores. Here, two types of oolitic ironstone sandstone deposits (OISs) were recognized: the extensive iron deposits (EXID-OIS, Guerrak, 1988b) extend over ten to several hundred kilometers but few meters thick and the local iron deposits (LOID-OIS, Guerrak,

1988b) characterized by a restricted extension but 30 m thick. The OISs classified as LOIDs (Guerrak, 1988a, b) in southern Algeria are economically more important than the EXID.

The iron ore deposits consist of magnetite, hematite, goethite, maghemite, chamosite, siderite and pyrite, but magnetite, chamosite and hematite are the most representative (Guerrak, 1988b).

The source of the iron hosted in the Devonian deposits was probably located southward of the study areas within the Reguibat Shield, affected by erosive processes by rivers flowing contemporaneously.

The iron mobilization can be related to a change in the oxidation–reduction conditions during the uplift phase, which involved the northern sector of the Reguibat Shield during the Silurian (Guerrak, 1991).

The dissolution of iron (III) in soils as iron (II) was favored by reducing environments (Rajesh, 2008). The removal of iron (II) in solution by river action resulted in the bleaching of the Precambrian rocks and the precipitation of iron in the deltaic depositional systems of the Tindouf Basin to form iron-rich, originally chamosite ooids.

The presence of abundant chamosite (iron silicate) suggests a low Eh environment, indicating that the intra-sedimentary process of accretion developed around scattered



grains dipped within iron-rich (chamosite) mud in calm waters (James and Van Houten, 1979). These coated grains were reworked and broken in agitated waters and were partially oxidized, enabling the transformation of chamosite into hematite and of the latter into goethite (Guerrak 1988b; Ciampalini *et al.*, 2013a).

## **Mineral resources for strategic planning**

The exploitation of natural resources is needed for human existence and to contribute to the economic growth, especially in developing countries (Tilton, 2000; Lambert, 2001, Richard, 2005; Upadhyay, *et al.*, 2010). In particular, mineral exploration can be considered as the first step in economic development from the early steps of civilization to the modern society. Several factors influence the mineral supply system: geological, technical, economic and political issues and constraints.

Regional mineral exploration represents the most important phase from a strategic point of view, because it allows a better knowledge of the geological properties of a country, using minerals as the base for the identification of potential ore reserves (Snow and Mackenzie, 1981).

Exploration is often the most risky phase, as the investment could not be compensated by the economic return of a discovery. Thus, a very inexpensive methodology is needed to reduce the risk related to the failure of the exploration phase, especially for developing countries. The government of Western Sahara needs a very low-cost methodology, which can be easily taught to the Saharawi technicians, in order to improve the potentiality of their country in terms of natural resources.

A mining project is usually composed by three fundamental steps:

- detection and location of the ore deposit (prospection and exploration), with definition of its boundary;
- determination of the quality and quantity of the selected mineral (evaluation phase);
- definition of the extractable volume at a certain profit (economic evaluation).

This work is focused on the first phase (prospection and exploration); in the attempt to present a low-cost methodology - based on remote sensing techniques - to developing countries to detect the iron ore deposits of the Earth surface. This stage of the mining project requires geological data, but

the considered area is poorly known from a geological point of view.

The most accurate information about Western Sahara is represented by the geological map of Morocco (Saadi *et al.*, 1985, Figure 3) at scale 1:1.000.000. Further geological information was inferred through a correlation with the same sedimentary sequence cropping out in the south of Algeria (Djebilet), where three iron ore districts are present (Guerrak, 1988).

Then, a photo-lithological mapping of Western Sahara, based on the enhancement of Landsat ETM + imagery was used to define the extent of the sedimentary unit, cropping out both in Algeria and Western Sahara, hosting the Algerian iron ore districts.

## **Methods and results**

Satellite and airborne multispectral or hyperspectral sensors have been extensively used to evaluate several characteristics of land, sea and atmosphere (Marzano and Visconti, 2003; Barale and Gade, 2008; van der Meer *et al.*, 2012).

Remote sensing techniques are cheaper than more traditional methods for the detection of exploitable resources, such as iron ore deposits located on the Earth surface and they can rapidly cover large areas.

The available sensors are characterized by different resolution, accessibility and costs. Among them, multispectral sensors such as the Thematic Mapper (TM) and the Enhanced Thematic Mapper plus (ETM +) installed on the Landsat satellites are the cheapest used in mineral exploration and geological mapping, because they are free.

## **Natural resources research**

Landsat TM/ETM + archive data have been widely used to map iron-rich deposits such as in the Zagros Belt (Tangestani and Moore, 2000), in Sudan (Elsayed Zeinelabdein and Albiely, 2008), in Egypt (Ramadan and Kotny, 2004) in Australia (Rajesh, 2008) and in Canada (Daneshfar *et al.*, 2006). The mineral distribution on the Earth surface can be highlighted using different image-processing techniques and combining 6 spectral bands of the Landsat.

Band ratios, color composites, principal component transformation, Intensity Hue Saturation (IHS) and decorrelation processing can be appropriately used together in

mapping iron ore deposits (Al Rawashdeh *et al.*, 2006; Madani, 2009; Shalaby *et al.*, 2010; Dehnavi *et al.*, 2010).

Subsets of many ETM + scenes have been used to evaluate the best approaches of enhancement of multispectral images to detect iron ore districts in arid environment. A subset of the Landsat ETM+ 201/41 image (16/03/2006) and Landsat ETM + 203/42 image (12/10/2000) was used for the Algerian test site and for the Western Sahara test site respectively.

The difference in the date of acquisition is not considered crucial in arid desert environments (Al Rawashdeh *et al.*, 2006). Both images were downloaded free of charge from the Global Land Cover Facilities website (<http://glcf.umiacs.umd.edu/>). In mineral exploration from satellite, other remote sensing products are available (Rowan and Mars, 2003; Hubbard and Crowley, 2005; Rajendran *et al.*, 2011); they are usually characterized by a higher spectral and/or spatial resolution with respect to the Landsat product, but they are more expensive.

The use of remote sensing techniques is crucial in areas such as the liberated territories of the Western Sahara, which are not easily accessible, due to the current political condition and the absence of infrastructures, but a ground truth validation is needed to confirm the obtained results. Therefore

a field campaign was carried out in a selected area, where the enhanced images highlighted the possible presence of iron ore deposits.

The samples collected as ground truth in the Western Sahara test site were used to validate the processed remotely sensed images. A further validation was obtained by considering another test site, located in southern Algeria (Djebilet), 200 km to the east of the study area, where the same lithologies crop out and three well-known iron ore deposits are exploited.

Two of them (Gara Center and Gara East) were selected and compared with the study area. Band rationing is one of the most used and simple enhancement techniques to map the iron oxide and sulfate minerals distribution, associated with hydrothermally altered or weathered rocks (Kauffman, 1988; Sabins, 1999; Ramadan and Kotny, 2004; Al Rawashdeh *et al.*, 2006; Dogan, 2008; 2009; Elsayed Zeinelabdein and Albiely, 2008; Madani, 2009; Denhavi *et al.*, 2010; Shalaby *et al.*, 2010). Among the possible ratios, the 3/1 ratio image is considered the most useful to detect iron oxy-hydroxides (Ramadan and Kotny, 2004; Al Rawashdeh *et al.*, 2006; Dogan, 2008; 2009; Elsayed Zeinelabdein and Albiely, 2008; Madani, 2009; Shalaby *et al.*, 2010; Ciampalini *et al.*, 2013b) (Figure 4).

Considering the selected subsets (Algeria and Western Sahara), the band ratios 4/1 resulted the more suitable band ratios to delineate the widening of the iron ore deposits, which appear as dark pixels (Figure 4). Another basic enhancement is represented by the false color composites (FCC) of ETM + bands, which are often used to discriminate lithologies (Alessandro *et al.*, 1997; Shalaby *et al.*, 2010).

Three selected bands as primary colors red, green and blue (RGB) are used to exalt the differences among areas characterized by different lithologies, or to detect the possible altered zones (Dehnavi *et al.*, 2010). FCCs can be created by combining three ratio images in RGB (Sabins, 1999; Elsayed Zeinelabdein and Albiely, 2008). The choice of the most suitable set of bands can be done statistically (optimum index factor) or referring to the extensive literature and taking into account the lithologies characterizing the study area. Among the possible combinations, the FCC formed by ratios 3/5, 4/1 and 5/7 in red, green and blue (RGB) resulted the most suitable to highlight the occurrence of iron ore deposits, both in Djebilet and Western Sahara (Figure 5).

The Principal Component Analysis (PCA) represents a more sophisticated technique that can be used to evaluate the presence of some selected minerals in the Earth surface. PCA is a very useful multivariate statistical method, which can be

applied to the strongly correlated Landsat ETM + bands, in order to obtain new uncorrelated latent variables (Loughlin, 1991), called principal components, which can be used to create FCCs in RGB (Kauffman, 1988; Kenea and Haenisch, 1996; Alessandro *et al.*, 1997; Silijestrom *et al.*, 1997; Zumsprekel and Prinz, 2000; Al Rawasdesch *et al.*, 2006). These FCCs are considered the most effective technique to detect areas characterized by iron ore deposits.

Three different approaches can be used to perform the PC analysis: 1) unstandardized PCA, using the covariance matrix (Kaufmann, 1988; Loughlin, 1991; Kenea and Haenisch, 1996; Alessandro *et al.*, 1997; Zumsprekel and Prinz, 2000; Al Rawashdeh *et al.*, 2006; Aydal *et al.* 2007); 2) standardized PCA, using the correlation matrix (Kenea and Haenisch, 1996) and 3) selective PCA, using four of the six available bands (Loughlin, 1991).

In the first case, the second principal components image highlights the widening of the iron ore deposits (Figure 6) and the most useful FCC is represented by the PC1 PC2 PC3 in RGB, which allows highlighting the iron ore deposits in the Djebilet test site (Figure 7), whereas the most appropriate FCC for the Western Sahara sub-scene is represented by the PC3 PC2 PC4 in RGB (Figure 7), which generally fits for iron oxides (Loughlin, 1991). Using the standardized PC analysis,



the FCC formed by PC4, PC2 and PC3 in RGB respectively, resulted very effective to delimit the iron ore deposits in both the study areas. Bands 1, 3, 4 and 5 were chosen to the map iron ore deposits using the selective PCA, because they are the most suitable to detect iron oxides, which exhibit strong absorptions in ETM+ Landsat band 1 and high reflectance in bands 3 and 4 (Loughlin, 1991).

A dedicated field campaign was carried out, in order to collect ground truth samples. They have been preliminarily analyzed using the scanning electron microscope of the MEMA (Interdisciplinary Center for Electron Microscopy and Microanalysis, University of Firenze), in order to perform a first evaluation of iron content. Results suggest that the iron content of the detected ores ranges between 45 and 66% in weight.

## **Geological mapping**

The techniques used in order to detect the presence of natural resources, described before, can be profitably used for the improvement of the geological mapping, especially in arid environment. The enhancement of the Landsat ETM+ imagery has been used in order to improve the accuracy of the

available geological map of the Western Sahara discriminating the lithologies which characterize the Tindouf Basin.

For example false color composites are commonly used to detect different lithologies which crop out in a selected area.

Four principal suitable band combinations (displayed in RGB mode) are mentioned in the literature: 742, 457, 541, 751 and 753 (Daneshfar *et al.*, 2006; Dehnavi *et al.*, 2010; Deller, 2006; Ramadan and Kotny, 2004; Qaid & Basavarajappa, 2008; Zumsprekel & Prinz, 2000).

Decorrelation stretching was applied to the most informative color composites, because it allows emphasizing subtle color variations while preserving original data color relationships (Rothery and Hunt, 1990).

Band ratios are generally more useful than single bands to discriminate changes caused by topographic features and illumination conditions of the scene because they are more affected by the physic response of a specific lithology to the sun illumination.

The most commonly used composites formed by band ratios in RGB have been evaluated: 3/5-3/1-5/7, 3/1-5/7-5/4, 5/7-3/1-4/3 and 5/7-4/5-3/1 (Aydal *et al.*, 2007; Elsayed Zeinelabdein and Albiely, 2008; Kaufmann, 1988; Rajesh, 2008; Ramadan and Kotny, 2004). Finally, also in this case, Principal Component Analysis (PCA) using the covariance

matrix has proved useful for lithologic discrimination among rocks (Aydal *et al.*, 2007; Ramadan and Kotny, 2004; Siljestrom *et al.*, 1997; Ciampalini *et al.*, 2012).

The obtained results were (Figures 8 and 9) integrated with the 1:1.000.000 geological map (Saadi *et al.*, 1985) and with the stratigraphic data available in the literature (Guerrak, 1988a). The results were validated through a field campaign performed during April 2011.

Photo-interpretation of Landsat ETM+ images led to distinguishing 12 photo-lithological units (Figure 10): two units belong to the Precambrian Basement and 10 photo-lithological units to the Paleozoic stratigraphic sequence of the Tindouf Basin. These results allowed the production of a new and more informative geological map of the southern flank of the Tindouf Basin (Figure 11) based on the recognized photo-lithological units.

## **Discussion**

The described enhancement techniques prove the usefulness of multispectral imagery (Landsat ETM+) in the detection of iron ore deposits, whose exploitation can be evaluated as incentive to the growth of developing countries.

The reserves of Djebilet mining field has been estimated in 1.7 billions of tons, grading 57% of iron.

The sedimentary rocks hosting the iron oxides-bearing sandstones of the Djebilet mining field are the same outcropping in the selected test site located in Western Sahara and their spectral features are very similar, probably as a consequence of their comparable iron content between the two ores. The occurrence of an analogous geological framework between the two areas was confirmed through a dedicated field campaign, which assured the actual existence of iron oxides rich sandstones in Western Sahara, representing a new exploitable mining field.

The application of a very inexpensive remote sensing tool, represented by Landsat ETM+ imagery, allowed the identification of an area of about 72 km<sup>2</sup>, located in the liberated territories of the Western Sahara, which may represent a possible location for a new mining district.

The enhancement Landsat ETM + images is a very simple procedure, which could easily be performed by trained Saharawi technicians, using a not really expensive workstation. Thus, this methodology could represent a very fast, cheap and simple preliminary way to investigate the potentialities of their own country, in terms of natural resources.

In case of positive results, as in this case, more sophisticated and accurate deposit studies can be planned. For instance, a high resolution multispectral image (Worldview 2 or Quick Bird) of the 72 Km<sup>2</sup> can be purchased in order to obtain more reliable results, using the same remote sensing techniques described in this paper and adapted to the specifications/spectral bands of these sensors. Western Sahara is a rich country in terms of natural resources, the most important and abundant of which is represented by phosphate, which is extracted in the Bou Craa mines.

The Bou Craa phosphate deposits played a large economic role in the Moroccan invasion of Western Sahara. An independent Western Sahara could be among one of the biggest (the second after Morocco) exporters of phosphate of the world. Moreover, Western Sahara is characterized by the presence of others natural resources of interest for the Moroccan government. For instance, the Western Sahara coasts are particularly rich in fish.

Over the last few years, the Moroccan government has invested about US\$90 million in an ambitious plan to develop the fishing industry (Shelley, 2004). Furthermore, the Moroccan state oil industry started investigating the presence of oil and gas offshore Western Sahara, after the recent discovery of these kind of resources offshore Mauritania

(Brownfield and Charpentier, 2006; Davison, 2005; Sasche *et al.*, 2011).

The Moroccan government invested at least US\$ 1 billion in infrastructures since 1976 to favor the exploitation of the natural resources located in the controlled part of Western Sahara, so that the percentage of households having electricity and drinking water are higher than in Morocco (Shelley, 2004). Additionally, three airports and several harbors were built to export the exploited resources.

The development of the mining industry in the liberated territories of Western Sahara can lead to the construction or expansion of an infrastructure net, today totally inexistent. Infrastructures are indispensable for a developing country, especially for Western Sahara, for the mobility of both people and goods.

In particular, the exploitation of the iron ore deposits can be considered of economic value if the extracted materials can be exported thanks to the presence of roads, ports and/or airports. Several problems can be ascribed to the mining activity: it is financially expensive (substantial amount of funds), environmentally invasive (Lahiri-Dutt, 2004) and socially intrusive, but if it is successfully managed, the conversion of mineral endowment can lead to a general

improvement of the national wealth, social aspirations and to the reduction of environmental problems.

In Northern Africa, the most important problem is represented by political stability, which is considered fundamental by foreign investors. Today Western Sahara represents the most complicated political scenario, because the disputed status of its territory is an obstacle to the attraction of investors. Following the international law, the disposal of natural resources can be only obtained by a legitimate sovereign state.

Others fundamental factors that foreign investors usually consider are represented by the increasing pressures on companies to minimize their environmental impacts and pay greater heed to local social issues (Holden and Jacobson, 2006). The increased environmental regulations and social expectations represent elements of increasing costs for the companies.

The environmental issues are not only crucial for the increasing of the costs, but also for the negative publicity a company or financial institution can derive from the heedless of the rules concerning the environmental policy.

As a consequence, although the liberated territories of Western Sahara are considered rich in mineral resources, as showed in this paper, their political situation and the complete

lack of infrastructures are deterrents for private investments. The socio-economic development of the liberated territories of the Western Sahara might initially start thanks to international funds dedicated to infrastructures, in order to facilitate the link with others extractive areas located in Algeria (Djebilet) and Mauritania (Zouerate), where mining activities are already running.

The implementation of this net represents an interest for the Algerian government because Djebilet, one of the largest iron deposits of the world, is located 300 Km from the Atlantic Ocean and 1600 Km from the Mediterranean Sea. The exploitation of these mines would be considerably more profitable if the extracted minerals could be transported via Atlantic Ocean. A useful transportation net could provide a spin-off for tourism, especially a naturalistic and historical one.

As a matter of fact, Sahara is characterized by a rich Paleolithic to historical period of archaeological heritage (Figure 4). The abundant occurrence of prehistoric artifacts, such as hand axes, arrowheads, grinding stones, pottery and others artifacts dated back to hundreds of thousands of years to past few millennia testifies that the Sahara, which is today characterized by a very arid climatic conditions, was much wetter in the past (Brooks *et al.*, 2003).



These climatic conditions are confirmed by remains and abundant rock art as well. The geo-archeological heritage is represented by Acheulean (400 000 - 150 000 years ago), Mousterian and Aterian (90000 - 50 000 years ago) and Neolithic (at last 10 000 years ago) stone tools and pottery, which are collected and showed in the Tifariti museum. Moreover, the most important and interesting part of the cultural heritage of Western Sahara is represented by burials and rock art. These evidences are scattered in the neighborhood of Tifariti.

Among the burials, circular mounds, linear, crescent type and antenna tombs were recorded within the liberated territories. The latter are particularly interesting, because similar burials are also present in Libya and Algeria, ensuring a geographical and cultural continuity between this area and the Central Sahara during the Neolithic (Cremaschi, 1988). Close to Tifariti, pre-Islamic spiral and Islamic monuments were recorded attesting the continuous occupation of this region until the present day (Brooks *et al.*, 2003). The northern sector is characterized by the presence of several sites where rock art is recorded. Some of the paintings are, unfortunately, subjected to degradation or completely destroyed (Figure 12).

These damages are probably partially related to uncontrolled tourism, since these sites are known, but not

protected by the authorities. Others painting are damaged by natural weathering. In particular, the site of Bou Dheheir is one of the most significant rock art sites of the whole Sahara, because the depicted fauna (rhinoceros, buffalo, and giraffe) testify different climatic conditions. A proper infrastructure net could lead to the development of a touristic exploitation, associated to a protection plan for this cultural heritage that may represent another crucial factor for the economic growth of these territories.

## **Conclusion**

The valorization of the study area might signify an important opportunity for the development of the Western Sahara and for the repopulation of the liberated territories. The future exploitation of mineral deposits is related to the results coming from an accurate evaluation of the amount of extractable iron and depends on establishing if it can be considered profitable.

The extent of the recognized ore area is similar to their analogous in Algeria, but the presence of a widespread cover of aeolian deposits suggests that the Western Sahara ore deposit might be wider. The detection of exploitable areas in terms of natural resources might lead to an improvement of

the innovation in processing technology and in knowledge for developing countries.

Furthermore, a commitment for the use of cleaner production technologies and a liberalized mining legislation can be attractive for dedicated international funds and for foreign investments. Up to now, several countries modified their legislation on mining issues, thus encouraging the foreign interest in mineral resources, such as Ecuador, Argentina (Warhurst and Bridge, 1997) and Chile, which became important targets for mineral exploration. If the results obtained through remote sensing methods will be confirmed by further, more accurate ore deposit studies, the exploitation of the iron bearing sandstones could be considered as low-cost, since they are located on the Earth surface.

The depth is considered an important economic factor: the higher is the depth the higher are the costs for both detection and exploitation of the resources (Scott and Dimitrakopoulos, 2001). In this framework, Western Sahara might be one of the most competitive countries.

## Bibliografia - References

- Al Rawashdeh, S., Saleh, B., Hamzah, M. (2006) The use of remote sensing technology in geological investigation and mineral detection in El Azraq-Jordan. *Cybergeog: European Journal of Geography, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques*, 358, 16pp.
- Alvarez Gila, O. (2011) Western Sahara: Migration, exile and environment. *International migration*, 49, 146-163.
- Alessandro, V., Pieruccini, U., Pranzini, E., Righini, G., Salvestrini, L. (1997) Elaborazione ed interpretazione di immagini Landsat TM per la discriminazione litologica in un area marginale dello "Zaire Craton" in Angola. *Rivista Italiana di Telerilevamento*, 9, 43-52.
- Aydal, D., Arda, E., Dumanliar, Ö. (2007) Application of the Crosta technique for alteration mapping of granitoidic rocks using ETM+ data: case study from eastern Tauride belt (SE Turkey). *International Journal of Remote Sensing*, 28, 3895-3913.
- Barale, V., and Gade, M. (2008) Remote sensing of the European Seas. Barale V. and Gade M. (Eds.). Springer, 514 pp.
- Brooks, N., Di Lernia, S., Drake, N., Raffin, M., Savage, T. (2003) The geoarcheology of Western Sahara: Preliminary results of the first Anglo-Italian expedition in the "free zone". *Sahara*, 14, 63-80.
- Brownfield, M.E., and Charpentier, R.R. (2006) Geology and total petroleum systems of the Gulf of Guinea Province of West Africa. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 2207- C, 32 pp.

- Ciampalini, A., Garfagnoli, F., Antonielli, B., Del Ventisette, C., Moretti, S. (2012) Photo-lithological map of the southern flank of the Tindouf Basin. *Journal of Maps*, 8, 453-464.
- Ciampalini, A., Garfagnoli, F., Antonielli, B., Moretti, S., Righini, G. (2013a) Remote sensing techniques using Landsat ETM+ applied to the detection of iron ore deposits in Western Africa. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 4529-4546.
- Ciampalini, A., Garfagnoli, F., Del Ventisette, C., Moretti, S. (2013) Potential use of remote sensing techniques for exploration of iron deposits in Western Sahara and Southwest of Algeria. *Natural Resources Research*, 22, 179-190.
- Cremaschi, M. (1988) Late Quaternary geological evidences for environmental changes in south-western Fezzan (Libyan Sahara). In *Palaeoenvironmental and Prehistory in south-western Fezzan (Libyan Sahara)*, Cremaschi M. and Di Lernia S. (Eds.) Wadi Teshuinat: Centro Interuniversitario di Ricerca per le Civiltà e l'Ambiente del Sahara Antico, 13-47.
- Daneshfar, B., Desrochers, A., and Budkewitsch, P. (2006) Mineral-Potential Mapping for MVT Deposits with Limited Data Sets Using Landsat Data and Geological Evidence in the Borden Basin, Northern Baffin Island, Nunavut, Canada. *Natural Resources Research*, 15(3), 129–149.
- Davison, I. (2005) Central Atlantic margin basins of North West Africa; Geology and hydrocarbon potential (Morocco to Guinea). *Journal of African Earth Sciences* 43, 254- 274.
- Dehnavi, A.G., Sarikhani, R., Nagaraju, D. (2010) Image processing and analysis of mapping alteration zones in environmental

- research, East of Kurdistan, Iran. *World App Sciences Journal*, 11, 278-283.
- Deller, M.E. (2006). Facies discrimination in laterites using Landsat Thematic Mapper, ASTER and ALI data - examples from Eritrea and Arabia. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 2389–2409.
- Dogan, H.M. (2008) Applications of remote sensing and Geographic Information Systems to assess ferrous minerals and iron oxide of Tokat province in Turkey. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 221-233.
- Dogan, H.M. (2009) Mineral composite assessment of Kelkit River Basin in Turkey by means of remote sensing. *Journal of Earth System Science*, 118, 701-710.
- Elsayed Zeinelabdein, K.A., Albiely, A.I. (2008) Ratio image processing techniques: a prospecting tool for mineral deposits, Red Sea Hills, NE Sudan. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 1295-1298.
- Ferrari, M.C. (1992) Improved decorrelation stretching of TM data for geological applications: first results in Northern Somalia. *Int. J. Remote Sens.*, 13, 841–851.
- Guerrak, S. (1988a) Ordovician ironstone sedimentation in Ougarta Ranges: North Western Sahara (Algeria). *J. Afr. Earth Sci.*, 7, 657–678.

- Guerrak, S. (1988b) Geology of the Early Devonian oolitic iron ore of the Gara Djebilet field, Saharan Platform, Algeria. *Ore Geol. Rev.* 3, 333–358.
- Guerrak, S. (1991) Paleozoic patterns of oolitic ironstone sedimentation in the Sahara. *J. Afr. Earth Sci.* 12, 31–39.
- Guerrak, S., Chauvel, J.J. (1985) Les minéralisations ferrifères du Sahara Algérien. Le gisement de fer oolithique de Mecheri Abdelaziz (basin de Tindouf). *Miner. Deposita*, 20, 249–259
- Holden, W.N., and Jacobson, R.D. (2006) Mining amid decentralization. Local governments and mining in the Philippines. *Natural Resources Forum*, 30, 188-198.
- Honarmand, M., Ranjbar, H. and Shahabpour C. (2012) Application of principal component analysis and spectral angle mapper in the mapping of hydrothermal alteration in the Jebal-Barez area, southeastern Iran. *Resource Geology*, 62(2), 119-139.
- Hubbard, B., Crowley, J.K. (2005) Mineral mapping on the Chilean–Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery: Data dimensionality issues and solutions. *Remote Sensing of Environment*, 99, 173-186.
- James, H.L., Van Houten, F.B. (1979) Miocene goethitic and chamositic oolite: northeastern Colombia. *Sedimentology* 26, 125–133.
- Kaufmann, H. (1988) Mineral exploration along the Aqaba-Levant Structure by use of TM-data. Concepts, processing and results. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 1639-1658.
- Kenea, N.H. (1997) Improved geological mapping using Landsat TM data, Southern Red Sea Hills, Sudan: PC and IHS decorrelation

- stretching. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 1233-1244.
- Kenea, N.H., and Haenisch, H. (1996) Principal component analyses for lithologic and alteration mappings: examples from the Red Sea Hills, Sudan. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 31, 271-275.
- Lahiri-Dutt, K. (2004) Informality in mineral resources management in Asia: raising questions relating to community economies and sustainable development. *Natural Resources Forum*, 28, 123-132.
- Lambert, I.B. (2001) Mining and sustainable development: considerations for minerals supply. *Natural Resources Forum*, 25, 275-284.
- Legrand, P. (1967) Le Dévonien du Sahara algérien. In: Oswald DH (ed) *International Symposium of the Devonian System*. Alta, Calgary, pp 245–284.
- Legrand, P. (1969) Découvert de graptolites entre Gara Djebilet et Aouinet el Egra (Synéclise de Tindouf, Sahara Algérien). *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord Algerie*, 59, 99–114.
- Lemoigne, Y. (1967) Reconnaissance paléobotanique dans le Sahara Occidental (Région de Tindouf et Gara Djebilet). *Ann. Soc. Geol. Nord Fr.*, 87, 31–38.
- Loughlin, W.P. (1991) Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57, 1163-1169.



- Lubeseder, S., Redfern, J., Boutib, L. (2009) Mixed siliciclastic–carbonate shelf sedimentation—Lower Devonian sequences of the SW Anti-Atlas, Morocco. *Sed. Geol.*, 215, 13–32
- Madani, A.A. (2009) Utilization of Landsat ETM+ data for mapping gossans and iron rich zones exposed at Bahrah area, Western Arabian Shield, Saudi Arabia. *Journal of King Abdulaziz University: Earth Sciences*, 20, 25-49.
- Marzano, F.S., and Visconti, G. (2003) Remote sensing of atmosphere and ocean from space: Models, instruments and techniques. Marzano and Visconti (Eds.). Springer. 256 pp.
- Potrel, A., Pecaut, J., Fanning, C.M., Auvray, B., Burg, J.P., Caruba, C. (1996) Old terranes (3.5 Ga) in the West African Craton, Mauritania. *J. Geol. Soc. London*, 153, 507–510.
- Qaid, A.M., & Basavarajappa, H.T. (2008). Application of optimum index factor technique to Landsat-7 data for geological mapping of North East of Hajjah, Yemen. *American-Eurasian Journal of Scientific Research*, 3, 84–91.
- Rajendran, S., Thirunavukkarasu, A., Balamurugan, G., Shankar, K. (2011) Discrimination of iron ore deposits of granulite terrain of Southern Peninsular India using ASTER data. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41, 99–106.
- Rajesh, H.M. (2008) Mapping Proterozoic unconformity-related uranium deposits in the Rockhole area, Northern Territory, Australia using landsat ETM+. *Ore Geology Review*, 33, 382-396.
- Ramadan, T.M., and Kotny, A. (2004) Mineralogical and structural characterization of alteration zones detected by orbital remote

- sensing at Shalatein District, SE Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 40, 89-99.
- Richard, J.P. (2005) Challenges for sustainable mineral resources development in the 21st Century. *Resources Geology*, 55(2), 131-137.
- Rothery, D.A., & Hunt, G.A. (1990). A simple way to perform decorrelation stretching and related techniques on menu-driven image processing systems. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 133–137.
- Rowan, L.C., and Mars, J.C. (2003) Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, 84, 350-366.
- Saadi, M., Hilali, E.A., Bensaïd, M., Boudda, A., and Dahmani, M. (1985) *Carte Géologique du Maroc, echelle 1/1000000*, Edition du Service Géologique du Maroc, Notes et Mémoires n° 260.
- Sabins, F.F. (1999) Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Review*, 14, 157-183.
- Sachse, V.F., Littke, R., Heim, S., Kluth, O., Schober, J., Boutib, L., Jabour, H., Perssen, F., Sindern, S. (2011) Petroleum source rocks of the Tafaya Basin and adjacent areas, Morocco. *Organic Geochemistry*, 42, 209-227.
- Scott, M., and Dimitrakopulos, R. (2001) Quantitative analysis of mineral resources for strategic planning: implications for Australian Geological Surveys. *Natural Resources Research*, 10, 159-177.

- Shalaby, M.H., Bishta, A.Z., Roz, M.E., Zalaky, M.A. (2010) Integration of geologic and remote sensing studies for the discovery of uranium mineralization in some granite plutons, Eastern Desert, Egypt. *Journal of King Abdulaziz University: Earth Sciences*, 21, 1-25.
- Shelley, T. (2004) *What future for Africa's last colony?* London: Zed Books, 2004.
- Siljestrom, P.A., Moreno, A., Vikgren, K., Caceres, L.M. (1997) Technical note The application of selective principal component analysis (SPCA) to Thematic Mapper (TM) image for the recognition of geomorphologic features configuration. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3843-3852.
- Skinner, B.J. (2000) Keynote presentation on 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro. August.
- Snow, G. Mackenzie, B.W. (1981) The environment of exploration: economic, organizational and social constraints. *Economic Geology 75th anniv. vol.* 871-896.
- Tangestani, M.H., and Moore, F. (2000) Iron oxides and hydroxyl enhancement using the Crosta method: a case study from the Zagros Belt, Fars Province, Iran. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2, 140-146.
- Tilton, J.E. (2000) Mining and public policy: an alternative view. *Natural Resources Forum*, 24, 49-52.
- Upadhyay R.K., Venkatesh A.S. and Roy S. (2010) Mineralogical characteristics of iron ores in Joda and Khondbond areas in Eastern India with implications on beneficiation. *Resources Geology*, 60, 203-211.

- van der Meer, F.D., van der Werf, H.M.A, van Ruitenbeek, F.J.A., Hecker, C.A., Bakker, W.H., Noomen, M.F., van der Meijde, M., Carranza, E.J.M., Boudewijn de Smeth, J., Woldai, T. (2012) Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14, 112-128.
- Warhurst, A., and Bridge, G. (1997) Economic liberalisation, innovation, and technology transfer: opportunities for cleaner production in the minerals industry. *Natural Resources Forum* 21, 1-12.
- Villeneuve, M. (2005) Paleozoic basins in West Africa and Mauritanide thrust belt. *J. Afr. Earth Sci.* 43, 166–195.
- Zumsprekel, H., and Prinz, T. (2000) Computer-enhanced multispectral remote sensing data: a useful tool for the geological mapping of Archean terrains in (semi)arid environments. *Computer & Geosciences*, 26, 87-100.

## **RINGRAZIAMENTI**

Il progetto che ha reso possibile questa pubblicazione è stato finanziato da Autostrade per l'Italia S.p.a.. Si ringrazia la Regione Toscana per aver supportato economicamente la stampa del volume.

Si ringraziano, inoltre, la Dott.ssa Gaia Righini per aver ideato il progetto di ricerca. La Dott.ssa Benedetta Antonielli, Luca Vescovini e Giovanni Bigalli per il supporto nelle attività svolte sul terreno. Fiorella Bendoni e Sandro Volpe dell'associazione Ban Slout Larbi per il supporto.

Un ringraziamento particolare va a Gilberto Mastromatteo per aver reso migliore il viaggio nel Sahara Occidentale ma, soprattutto, per la prefazione.

Si ringrazia sentitamente anche tutta la comunità saharawi del campo rifugiati di Auserd per l'ospitalità durante la permanenza a Tindouf, in particolare Abdalahi Bucheiba, la sua famiglia e Taualo.

## **ACKNOWLEDGMENTS**

This research was funded by Autostrade per l'Italia S.p.a.. We are grateful to the Regione Toscana which funded the publication of this volume.

Dr. Gaia Righini is acknowledged for the designing of the project. We are grateful to Dr. Benedetta Antonielli, Luca Vescovini and Giovanni Bigalli for their support in the field campaign, the Ban Slout Larbi team: Fiorella Bondoni and Sandro Volpi for their invaluable help.

A special thanks to Gilberto Mastromatteo for his friendship and for the preface.

We are grateful to the saharawi community of the Auserd refugee camp for the hospitality and in particular to Abdalahi Bucheiba, its family and Taualo.

