

Università degli Studi di Bologna

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio

**Analisi di immagini satellitari
nello studio della regione del Fayyum - Egitto**

Candidato:

Emanuele Mandanici

Relatore:

Prof. Gabriele Bitelli

Correlatori:

Prof. Pietro Vittorio Curzi

Dr. Ivano Pino

Dr. Andrea Lugli

Indice

Premessa	5
I Telerilevamento e Archeologia	7
I.1 Immagini satellitari	7
I.1.1 Sensore Landsat	7
I.1.2 Sensore ASTER	9
I.2 Archeologia dei paesaggi	11
I.3 Casi di studio	13
I.3.1 Wadi El-Rayan, Egitto	13
I.3.2 Hohokam Canal System, Arizona	13
I.3.3 Wadi Tanezzuft, Libia	14
I.3.4 Radar Rivers	15
II L'oasi del Fayyum	19
II.1 Cenni Storici	19
II.2 Geologia dell'Egitto	22
II.2.1 La formazione	26
II.3 Geologia per il Fayyum	29
II.3.1 Il lago Moeris	33
II.4 Formazioni geologiche	36
III Dati e Materiali	41
III.1 Cartografia	41
III.2 Immagini Satellitari	42
III.3 Modello Digitale del Terreno	44
III.4 Progetto Africover	44
III.5 Il <i>software</i> Envi	47
IV Elaborazioni	51
IV.1 Operazioni Preliminari	51

IV.2	Classificazioni del suolo	52
IV.2.1	Classificazione non supervisionata	53
IV.2.2	Copertura dei terreni aridi	54
IV.2.3	Regioni di Interesse	54
IV.2.4	Classificazioni supervisionate	54
IV.3	Elementi Lineari	59
IV.4	Faglie	65
	Conclusioni	67
	Bibliografia	70
	Bibliografia per il Fayyum	73

Premessa

«Il territorio è un'opera d'arte: forse la più alta, la più corale che l'umanità abbia espresso. A differenza delle molte opere artistiche o tecniche che sono state prodotte dall'uomo plasmando la materia inanimata, il territorio è prodotto attraverso un dialogo, una relazione fra entità viventi, l'uomo stesso e la natura, nel tempo lungo della storia.»¹

Sono state proposte numerose definizioni di territorio, corrispondenti a diversi modi di concepirlo. Alla base di questa trattazione sta la convinzione che il *territorio* possa essere considerato come un insieme di relazioni e dinamiche che legano l'ambiente naturale, con le sue opportunità e i suoi fattori limitanti, e la comunità umana che insiste su di esso. Il territorio viene profondamente modificato dall'attività antropica nel corso del tempo e, d'altro canto, influenza le scelte della comunità. Costituisce inoltre la memoria e testimonia l'identità degli uomini che lo hanno abitato.

«I luoghi - infatti - sono soggetti culturali, “parlano”, dialogano del lungo processo di antropizzazione attraverso il paesaggio, restituiscono identità, memoria, lingua, culture materiali, messaggi simbolici e affettivi» (MAGNAGHI, 2000).

La comprensione del territorio e lo studio della sua evoluzione nel tempo consentono l'acquisizione di una conoscenza più profonda del passato, una migliore valorizzazione del presente ed una più affidabile pianificazione per il futuro. Tutto questo, evidentemente, richiede un approccio multidisciplinare tra geologia, archeologia ed ingegneria, che tende ad una integrazione, sia negli aspetti metodologici, sia nell'interpretazione delle risultanze.

Un contributo di notevole importanza può allora essere offerto dalle tecniche di *telerilevamento* o *remote sensing*. Queste metodologie, infatti, sebbene necessitino sempre di un controllo mediante dati a terra, consentono l'esplorazione, il monitoraggio e la mappatura a distanza di vaste aree in qualsiasi parte del mondo. Il continuo miglioramento in termini di qualità e quantità dei dati disponibili,

¹MAGNAGHI (2000)

unitamente alla relativa economicità, stanno favorendo una sempre più ampia diffusione di questi strumenti.

In particolare trova sempre maggiore impiego nella ricerca archeologica la classificazione di dati multispettrali, rilevati dai sensori posti su piattaforme satellitari. Essa, infatti, «*può costituire un valido aiuto per la ricostruzione del paesaggio antropico antico, almeno in macroscala, in quanto dall'elaborazione multispettrale si ricavano diverse informazioni paleoambientali, come la localizzazione e la forma dei paleovalvi, fenomeni pedogenetici, oppure le relazioni fra suoli, vegetazione e antropizzazione del territorio*» (FORTE, 2002).

Un luogo privilegiato per questo tipo di ricerca è senza dubbio l'*Egitto*, già definito dallo scrittore greco Erodoto “*dono del Nilo*”, a sottolineare la strettissima interdipendenza tra ambiente e civiltà. L'oggetto della presente trattazione sarà l'*oasi del Fayyum*, situata circa 60 chilometri a Sud della capitale, il Cairo, alla sinistra idrografica del Nilo. Il territorio di questa oasi presenta una notevole complessità, sia dal punto di vista geosedimentologico, sia dal punto di vista delle dinamiche insediative. Nonostante sia stato oggetto di numerose indagini da più di un secolo, molti aspetti restano ancora da chiarire o sono comunque meritevoli di ulteriore approfondimento.

Questa tesi vuole contribuire alla creazione di un *database* georeferenziato multiscala e multisorgente, che sia di supporto allo studio di questo territorio. Più specificamente essa si pone due obiettivi principali: da un lato si tenterà, attraverso l'impiego di immagini satellitari e con il supporto dei dati presenti in letteratura, una *classificazione* della litologia superficiale lungo la fascia desertica che circonda l'oasi del Fayyum; dall'altro lato si tenterà, sempre attraverso l'interpretazione di immagini satellitari e di un modello digitale del terreno, l'individuazione di elementi lineari riconducibili a *paleocanali*.

Nel primo capitolo verranno quindi descritte le principali caratteristiche dei sensori satellitari da cui sono state ricavate le immagini utilizzate e si riassumeranno brevemente alcuni casi di studio analoghi, nell'ambito dell'applicazione dei metodi di telerilevamento all'archeologia ed alla geologia.

Il secondo capitolo offrirà, invece, un inquadramento della regione del Fayyum, basato sui dati conosciuti e finalizzato all'individuazione di elementi utili alle procedure di classificazione delle immagini.

Nel terzo capitolo saranno descritti i dati a disposizione e gli strumenti *software*, mediante i quali sono state effettuate le analisi sulle immagini selezionate.

Il quarto capitolo, infine, illustrerà le elaborazioni effettuate e le procedure seguite per raggiungere gli obiettivi preposti.

Capitolo I

Telerilevamento e Archeologia

Con il termine *telerilevamento* si intende quell'insieme di tecniche che permettono di effettuare un rilievo sul territorio senza un contatto diretto. È altresì comunemente accettato limitare il termine alle sole tecnologie legate all'impiego di onde elettromagnetiche, siano esse nella banda del visibile o in qualunque altra regione dello spettro.

Grazie alla grande disponibilità di questi dati, alla relativa economicità rispetto ai costi dei metodi tradizionali e al miglioramento in termini di qualità e accessibilità, queste metodologie stanno trovando sempre nuovi campi di applicazione nelle più diverse discipline.

In questo capitolo si riassumono le caratteristiche tecniche di alcuni sensori satellitari a media risoluzione, i cui prodotti saranno utilizzati nella trattazione. Nella seconda parte si illustrano alcune possibili applicazioni nei campi dell'archeologia e della geologia.

I.1 Immagini satellitari

Nel corso degli anni sono state portate a termine numerose missioni spaziali, che hanno permesso di mettere in orbita satelliti sui quali sono stati installati diversi apparecchi di misura. Tra questi grande interesse rivestono i sensori elettronici, sensibili alle onde elettromagnetiche. Si esaminano ora le principali caratteristiche delle piattaforme Landsat ed ASTER.

I.1.1 Sensore Landsat

Il progetto Landsat nasce dalla collaborazione tra USGS (*United States Geological Survey*) e NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Il primo

satellite Landsat venne lanciato nel 1972 e restò in funzione per circa sei anni. Dopo il primo vennero effettuati altri sei lanci. Attualmente sono ancora in uso il satellite Landsat5, lanciato nel 1984, ed il Landsat7, lanciato nel 1999. In trentacinque anni di attività il programma ha raccolto un archivio di immagini che rende possibile lo studio delle dinamiche della superficie terrestre su un arco temporale che non ha eguali. Al fine di permettere il confronto tra scene riprese a distanza di anni, i sensori più recenti sono stati realizzati in modo da garantire continuità con quelli precedenti, pur essendo tecnologicamente più avanzati.

Il satellite Landsat5 è equipaggiato con due sensori: uno scanner multispettrale (MSS), che però ha cessato di funzionare nel 1995, ed il *Thematic Mapper*. Quest'ultimo è in grado di acquisire su sette bande:

- tre bande nel visibile (0.45 - 0.52; 0.52 - 0.60; 0.63 - 0.69 μm) con una risoluzione geometrica di 30 m;
- due bande nell'infrarosso vicino (0.76 - 0.90; 1.55 - 1.75 μm) con la stessa risoluzione;
- una banda nel termico (10.40 - 12.50 μm), risoluzione 120 metri;
- una banda nell'infrarosso medio (2.08 - 2.35 μm), risoluzione 30 m.

Il satellite Landsat7 è equipaggiato con il sensore ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) in grado di acquisire sulle stesse sette bande del precedente, migliorando però la risoluzione spaziale nel termico (60 m). Inoltre questo sensore acquisisce anche in pancromatico (0.52 - 0.90 μm) con una dimensione del *pixel* a terra di 15 metri.

Entrambi i satelliti cinque e sette ruotano su orbite eliosincrone a 705 km di altezza e si trovano a coprire lo stesso punto ogni 16 giorni.

Le immagini acquisite sono distribuite nelle seguenti opzioni:

- livello 0R: si tratta dell'immagine "grezza", cui non è stata applicata alcuna elaborazione, corredata però di una serie di metadati ausiliari contenenti le informazioni necessarie per l'esecuzione delle correzioni radiometriche e geometriche.
- livello 1R: sono immagini su cui è stata operata una correzione radiometrica e la rimozione degli effetti di *striping*.
- livello 1G: alle immagini radiometricamente corrette vengono anche applicate le correzioni geometriche. Tali correzioni non fanno uso di punti

di controllo a terra e l'errore residuo è stimabile in 250 metri per le zone pianeggianti. Facendo uso di punti di controllo e di modelli digitali del terreno è possibile ridurre l'errore a circa 30 metri.

Le immagini sono distribuite in tre diversi formati: HDF, Fast e GeoTiff (quest'ultimo solo per il livello 1G).

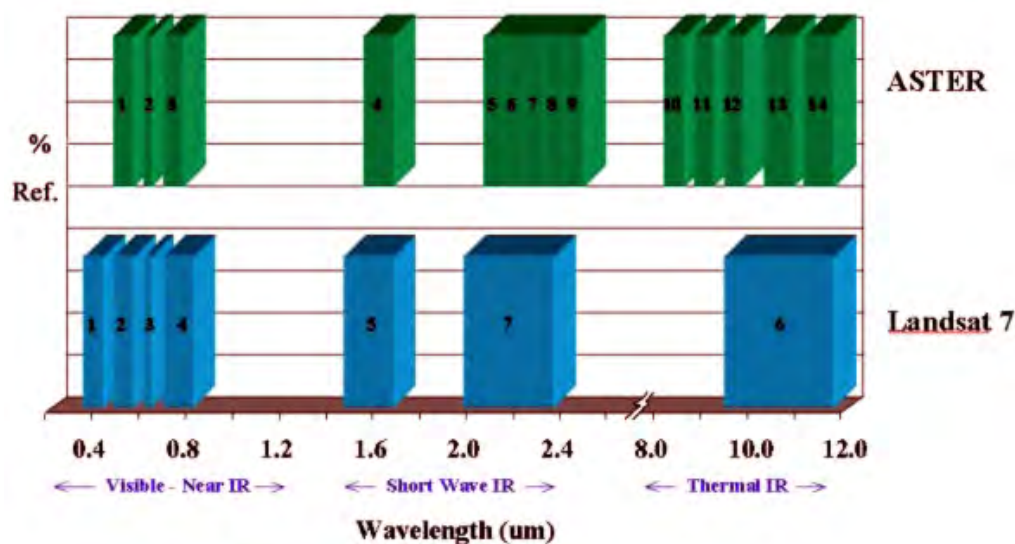


FIGURA I.1: Bande di acquisizione a confronto.

I.1.2 Sensore ASTER

L'acronimo ASTER significa *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*. Si tratta di un sensore multispettrale installato su Terra, un satellite lanciato dalla NASA nel dicembre 1999. Questo satellite segue un'orbita eliosincrona, cioè un'orbita il cui piano forma un angolo costante rispetto alla direzione del sole, garantendo il sincronismo tra illuminazione del sole e ripresa del satellite. La quota di volo è 705 km, con trenta minuti di ritardo rispetto al Landsat7.

Il sensore ASTER è in realtà composto da tre radiometri: il primo è sensibile a tre bande nel visibile ed infrarosso vicino (VNIR); il secondo è sensibile a sei bande nella zona dell'infrarosso ad onde corte (SWIR); infine il terzo copre cinque bande nell'infrarosso termico (TIR).

Ciascuno di questi sensori è caratterizzato da una diversa risoluzione spaziale. Si va dai quindici metri nel visibile ai novanta metri nel termico. Ognuno di essi opera attraverso un proprio telescopio posizionato in assetto nadirale; inoltre per la sola banda del vicino infrarosso, al fine di ottenere coppie stereoscopiche,

è stato installato un ulteriore telescopio rivolto all'indietro. Ogni scena ripresa dal sistema ASTER copre un'area di 60x60 km.

Per quanto riguarda la risoluzione temporale, il satellite passa nuovamente nello stesso punto ogni sedici giorni.

Il processo di acquisizione dei dati si articola nelle seguenti fasi:

- definizione di un piano di acquisizione giornaliero;
- trasmissione del piano al satellite;
- acquisizione dei dati da parte del satellite;
- trasmissione alla base

L'elaborazione effettiva avviene a Tokyo.

I prodotti disponibili sono di diversi tipi. Le immagini di "livello 1A" non hanno subito alcun processo di correzione né geometrica né radiometrica, tuttavia contengono come metadati i coefficienti necessari alle operazioni di correzione. Nelle immagini di "livello 1B", invece, tali coefficienti sono già stati applicati. Sono inoltre co-registrate le immagini omologhe ricavate dai tre sensori.

Per questioni legate alla capacità di immagazzinamento dei dati sul satellite, il numero di immagini ottenibili quotidianamente è limitato (circa 650 per il livello A e 310 per il livello B). La scelta relativa a quali scene acquisire viene effettuata mediante il piano di acquisizione. Questa pianificazione ha il compito di individuare le priorità sulla base delle diverse richieste, le quali sono espressione di tre finalità diverse:

- Osservazioni locali. Si tratta di richieste di materiale allo scopo di monitorare alcune caratteristiche del terreno (uso del suolo, geomorfologia, ecc.) in aree circoscritte.
- Monitoraggi regionali. Rispondono alle necessità di tenere sotto osservazione l'evoluzione nel tempo di porzioni di territorio di notevole estensione e sparse in diverse zone del pianeta (ad esempio lo studio dell'evoluzione dei ghiacciai nelle varie zone montuose della Terra).
- Mappatura globale. Risponde all'esigenza di avere una copertura complessiva di tutta la superficie terrestre.

Oltre ai prodotti di base sono ottenibili, su specifica richiesta, anche prodotti di livello più elevato, quale ad esempio un modello digitale del terreno, ricavabile dalle coppie stereoscopiche della banda sull'infrarosso vicino.

I.2 Archeologia dei paesaggi

L'archeologia dei paesaggi o, più in generale, la *storia dei paesaggi* è un approccio allo studio del passato che si è sviluppato in modo rigoroso a partire dalla metà del XX secolo. Essa consiste nel valutare l'interazione tra l'uomo ed il territorio, nel chiarire il contesto in cui i singoli siti sono inseriti, nel ricostruire, cioè, l'assetto e l'evoluzione che un territorio ha subito nel corso della storia. L'obiettivo è quindi la comprensione dell'influenza che il *territorio*, nella molteplicità dei suoi aspetti, ha avuto sull'*insediamento* e sullo sviluppo delle comunità umane e la comprensione delle modifiche che queste ultime hanno apportato. In breve, per usare la definizione di Barker, l'archeologia dei paesaggi (o *Landscape Archaeology*) può essere definita come lo «studio archeologico del rapporto tra le persone e l'ambiente nell'antichità, e dei rapporti tra la gente e la gente nel contesto dell'ambiente in cui abitava» (BARKER, 1986, p. 7).

La comprensione dei legami e delle relazioni intercorrenti tra comunità e ambiente naturale, inteso come paesaggio circostante *ereditato* dal passato, offre un punto di vista privilegiato su quelli che sono le necessità, i costumi e le peculiarità di una società. Questo approccio pone il territorio nel suo complesso, non più i singoli siti, al centro dell'indagine archeologica a scala regionale, nella consapevolezza che «La storia produce paesaggi [...]. Il paesaggio è al tempo stesso uno spazio di varia estensione per un tempo di varia durata, prodotto dalla storia. Le opere durature dell'uomo, ovvero le strutture e le infrastrutture necessarie alla sua vita, al suo agire economico, culturale e spirituale, si sovrappongono al substrato naturale e si inseriscono in una eredità storica in via di progressivo arricchimento, secondo un processo paragonabile alle trasformazioni inarrestabili del patrimonio genetico di un individuo, che continuano, anche dopo la sua morte, nelle generazioni successive.» (CAMBI e TERRENATO, 1998, p. 102).

In questa ottica il rilievo del territorio su scala regionale svolge un ruolo cruciale. Dal punto di vista metodologico, questa acquisizione di dati su vasta scala non sarebbe praticabile con le sole tecniche di ricognizione in superficie (*archaeological survey*). Ecco allora che le tecniche proprie del Telerilevamento possono fornire un contributo prezioso, permettendo l'individuazione o anche soltanto la mappatura di elementi utili allo studio del territorio.

L'impiego di fotografie aeree è consolidato ormai anche nelle discipline geologiche ed archeologiche da diverso tempo. L'utilizzo dei dati telerilevati da piattaforma satellitare, invece, ha avuto inizio soltanto nella seconda metà degli anni '70, grazie alle serie del sensore multispettrale Landsat MSS. Considerando la modesta risoluzione spaziale di quel prodotto (dell'ordine degli 80 m), l'im-

piego era limitato in gran parte allo studio di macro elementi. Tipica applicazione è infatti la ricostruzione dell'andamento nel passato dei più significativi corsi d'acqua (CAMPANA, 2004), essendo ad essi correlata l'ubicazione di siti archeologici. In Italia ricordiamo tra i primi esempi alcuni studi sugli schemi di centuriazione romana (MARCOLONGO e MASCELLARI, 1978).

Con il progredire della qualità dei prodotti disponibili si sono moltiplicate le possibilità di impiego. Le immagini della serie Landsat TM (si veda la sezione I.1.1) hanno ad esempio consentito l'individuazione di elementi archeologici, ancora di grandi dimensioni, quali arginature, parcellizzazioni agrarie, elementi viari ed insediamenti (CAMPANA, 2004). Tra i risultati più significativi vanno ricordati gli studi condotti nell'ambito del *Global Hydrology and Climate Center* nella penisola messicana dello Yucatán, che hanno permesso l'individuazione di insediamenti Maya (POPE e DAHLIN, 1989) attraverso lo studio di anomalie nello sviluppo della vegetazione. In Inghilterra, sempre mediante l'analisi di immagini Landsat TM, sono state riconosciute, catalogate, infine mappate numerose aree umide e depositi torbosi (si veda la figura I.2), utili alla comprensione delle dinamiche insediative protostoriche (COX, 1992).

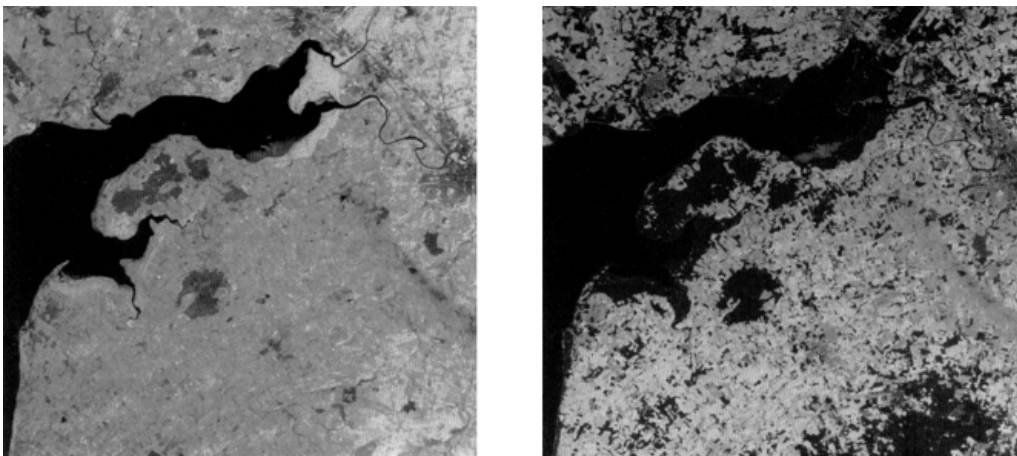


FIGURA I.2: A sinistra immagine Landsat del 1987 ottenuta dal rapporto tra la banda 4 e la quarta componente principale, la prima componente principale e la banda 5; a destra la stessa immagine classificata. Le aree umide sono quelle di colore più scuro.

In anni più recenti, la diffusione di immagini ad altissima risoluzione, quali i prodotti Ikonos (risoluzione massima 1 metro) e QuickBird (60 cm in presa nadirale), che consentono di apprezzare particolari di dimensioni inferiori al metro, ha consentito un'ulteriore moltiplicazione delle finalità perseguibili con i metodi del Telerilevamento. Numerosi studi sono tuttora in corso, al fine di valutare le effettive potenzialità di questi metodi di acquisizione di informazione territoriale.

I.3 Casi di studio

È ormai vastissima la letteratura riguardante l'applicazione di immagini telerilevate in ambito geologico ed archeologico. In questa sezione si intende presentare in estrema sintesi un ristretto numero di casi di studio. La scelta è quindi ricaduta su quei casi che presentano maggiore affinità tematica con questa tesi e che possono offrire un utile esempio metodologico.

I.3.1 Wadi El-Rayan, Egitto

Uno studio molto interessante è stato condotto da HAWELA e EL-KATTIB (1990) nell'area denominata "Wadi El-Rayan". Questa zona è ubicata immediatamente a sud-ovest della depressione del Fayyum, oggetto di questa tesi, ed è facilmente riconoscibile per la presenza di tre piccoli laghi artificiali, alimentati dalle acque di scarico di alcuni canali di irrigazione dell'oasi limitrofa.

La richiesta di sempre maggiori aree da adibire ad uso agricolo, per poter espandere la produzione, ha sollecitato lo studio della geomorfologia e delle tipologie di suolo in aree potenzialmente sfruttabili. In risposta a questa esigenza gli autori dello studio hanno utilizzato le tecniche di telerilevamento unitamente alla più tradizionale fotogrammetria aerea per produrre una mappa tematica dei tipi di suolo.

Sono state utilizzate immagini satellitari della serie Landsat 4 (sensore multispettrale MSS); l'interpretazione è stata condotta su una composizione a falsi colori (bande 4, 5 e 7) e ha consentito l'individuazione delle unità morfologiche di maggiori dimensioni, nonché il riconoscimento di corpi idrici naturali non distinguibili nelle riprese aeree.

La mappatura delle unità minori è stata eseguita sul mosaico delle aerofoto, sulla base di una serie di dati ottenuti da campioni di suolo prelevati in situ. La classificazione si è basata essenzialmente su criteri tassonomici, tenendo conto anche delle potenzialità di questi suoli.

I.3.2 Hohokam Canal System, Arizona

In questo studio, condotto dall'Università del Colorado (SHOWALTER, 1993), si è tentato di utilizzare le immagini satellitari della serie Landsat TM per mappare antichi canali presenti in una località vicina a Phoenix (Arizona). La zona di studio è caratterizzata da un clima semi-arido, con precipitazioni sporadiche, concentrate in due brevi periodi dell'anno. Questo territorio è stato abitato dal

300 a.C. fino al 1450 d.C. dalle popolazioni Hohokam, originarie del Messico, le quali hanno realizzato a più riprese una rete di canali di irrigazione al fine di rendere possibile la coltivazione.

Sulle immagini Landsat sono stati applicati una serie di filtri per porre in maggior risalto gli elementi lineari. La visualizzazione ottimale per un riconoscimento visivo è, secondo l'autrice, una composizione a falsi colori, ottenuta utilizzando la banda 2 per il blu, la banda 4 per il verde e la banda 7 per il rosso. I canali individuati sono stati vettorializzati manualmente.

I.3.3 Wadi Tanezzuft, Libia

Questo studio, condotto dal Dipartimento di Scienze della Terra "A. Desio" di Milano (PEREGO *et al.*, 2007), ha per oggetto un'area del Sahara Libico, situata attorno alla latitudine 25°N e longitudine 10°E, caratterizzata da un clima iper-arido, con temperature medie annue attorno a 30° C e precipitazioni inferiori a 10 mm. Evidenze di carattere geologico ed archeologico, indicano tuttavia che fino all'Olocene medio la zona era caratterizzata da una notevole disponibilità idrica, sufficiente quanto meno alla formazione di un sistema fluviale endoreico, con uno sviluppo longitudinale di oltre 150 chilometri, e di alcuni laghi.

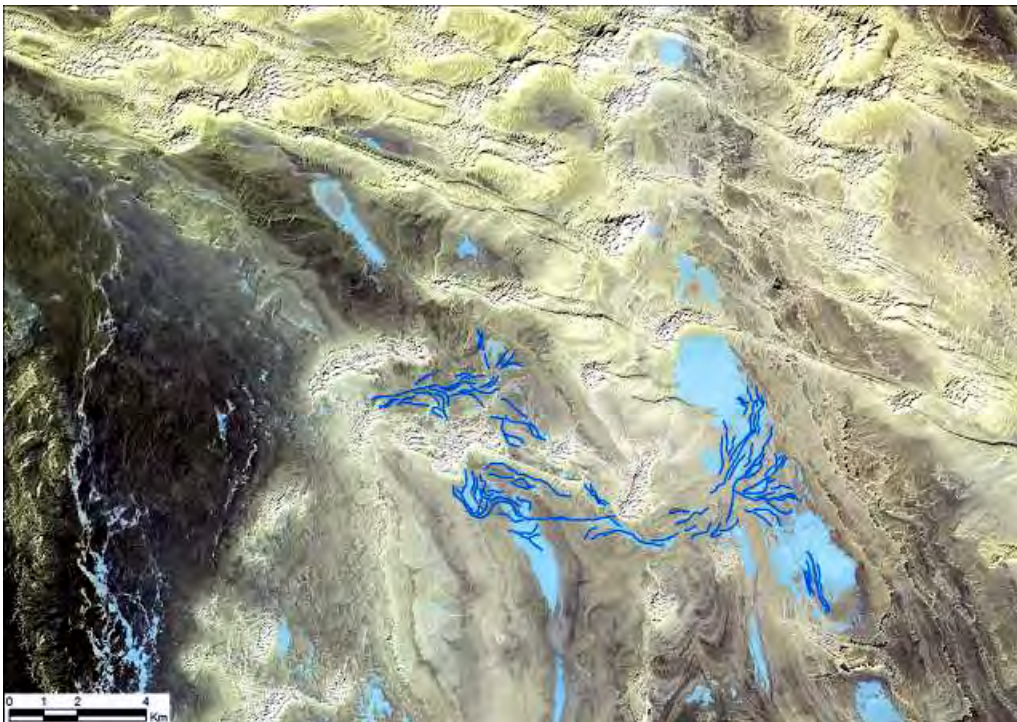


FIGURA I.3: Immagine ASTER (RGB=321) e DEM SRTM in vista prospettica con evidenziati i tracciati dei paleoalvei ed i bacini di sedimentazione lacustre. Da PEREGO *et al.* (2007).

Una prima fase dello studio ha previsto l'analisi di immagini ASTER per l'individuazione dei principali elementi morfologici. Sono stati evidenziati i tracciati dei corsi d'acqua e le aree dei possibili paleolaghi, come si può vedere in figura I.3. In particolare è stato possibile individuare il percorso dei paleoalvei grazie alla presenza di *barre ghiaiose*, le quali, per effetto della deflazione eolica, risultano attualmente in rilievo rispetto al suolo circostante, pertanto facilmente riconoscibili. Le aree occupate in passato da bacini lacustri sono caratterizzate invece da depositi limosi, evidenziabili mediante firme spettrali caratteristiche (si veda la figura I.4).

Per la mappatura in dettaglio di alcuni paleocanali si è reso necessario l'impiego di immagini a più alta risoluzione spaziale, come le Ikonos. Per queste è stata realizzata una fusione tra i dati multispettrali ed il pancromatico (procedura di *pansharpening*) al fine di ottenere immagini a colori con dimensione del pixel a terra pari ad un metro.

I.3.4 Radar Rivers

Con il termine *radar rivers* si intendono quei corsi d'acqua attivi nel passato, che sono stati individuati mediante l'impiego di immagini satellitari radar, in aree desertiche. In particolare rivestono fondamentale importanza per la ricostruzione della storia geologica dell'Egitto gli studi condotti da MCCAULEY *et al.* (1986). Attraverso l'analisi di immagini SIR A, B e C è stato possibile individuare una fitta rete di drenaggio, altrimenti invisibile in quanto completamente obliterata dai depositi sabbiosi che ricoprono il Deserto Occidentale. Il radar permette infatti di penetrare le sabbie desertiche per una profondità dipendente dalla lunghezza d'onda (maggiore lunghezza maggiore profondità), dalla assenza di umidità e dalle asperità della superficie. La figura I.5 mostra un esempio delle immagini ottenute.

Questi sistemi fluviali rappresentano la memoria della sedimentazione continentale avvenuta a seguito della regressione della Tetide (si veda il paragrafo II.2) prima dell'impostazione dell'attuale bacino del Nilo. Costituiscono inoltre una testimonianza dei periodi umidi che hanno preceduto il clima prevalentemente arido del tardo Quaternario.

Sempre mediante l'analisi di immagini radar di questo tipo è stata possibile l'individuazione di siti archeologici costituiti da insediamenti preistorici, disposti lungo il corso dei *radar rivers* (MCHUGH *et al.*, 1988). Le indicazioni ottenute dalle immagini sono state verificate mediante una serie di spedizioni sul

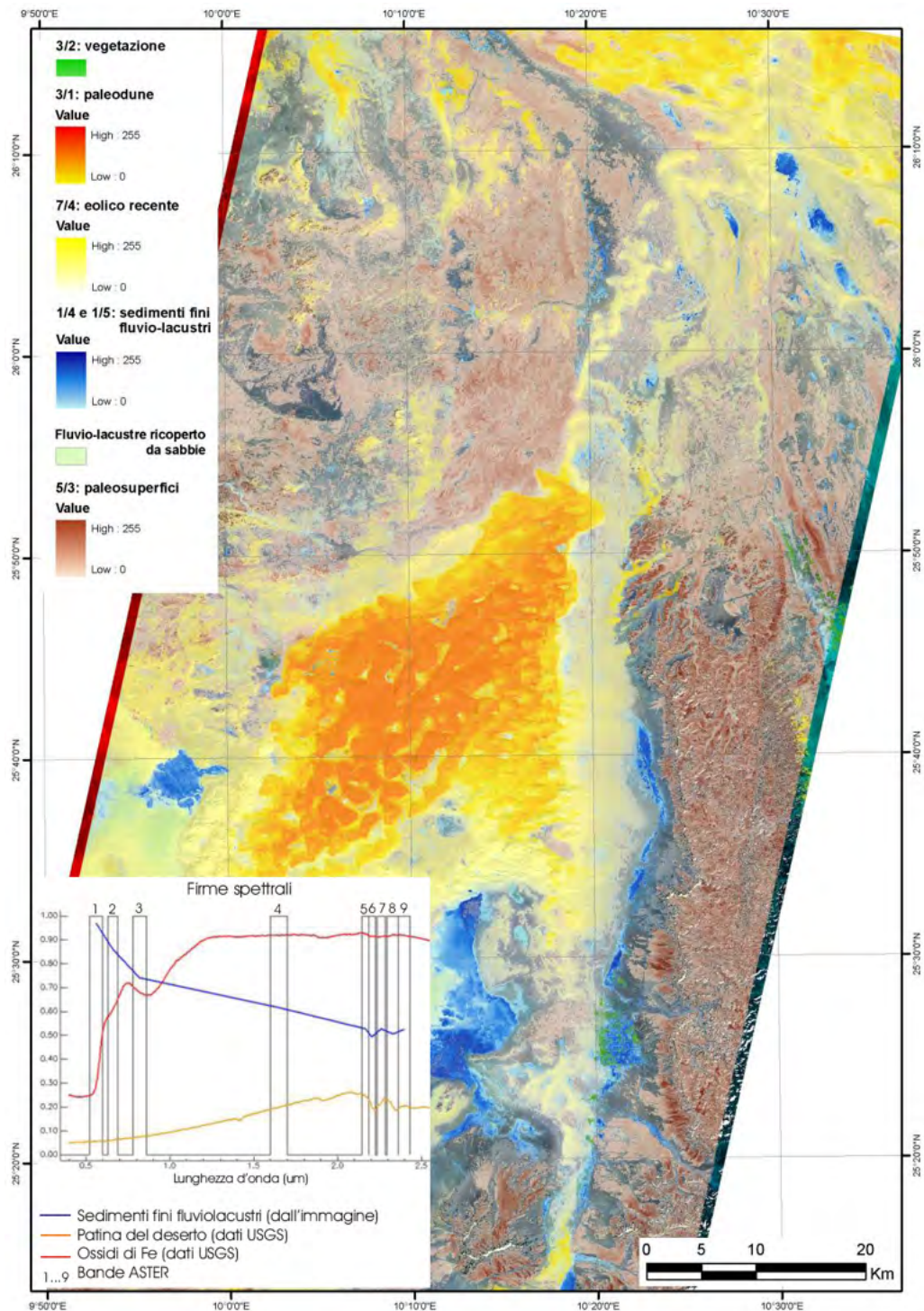


FIGURA I.4: Immagine ottenuta da dati ASTER: ad una base RGB=631 sono stati sovrapposti alcuni layers parzialmente trasparenti con saturazione di colore proporzionale a determinati rapporti tra bande. In basso a sinistra firme spettrali caratteristiche dei tipi di suolo presenti. Da PEREGO et al. (2007).

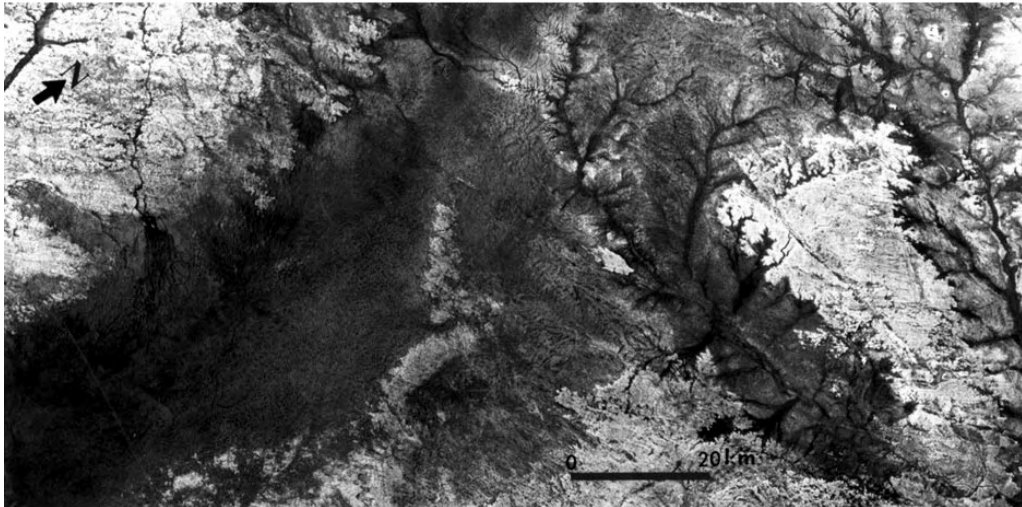


FIGURA I.5: Immagine radar SIR-C nel deserto occidentale. La zona costituisce un esempio di valle fluviale ed è situata approssimativamente attorno alla latitudine $20^{\circ} 30'$ Nord e longitudine $20^{\circ} 10'$ Est. Queste valli sono molto ampie (fino a 40 km di larghezza) e si estendono per centinaia di chilometri. Il fondo è molto piatto e le sponde presentano una topografia poco marcata (non più di qualche decina di metri). Da MCCAULEY et al. (1986).

campo, durante le quali sono stati rinvenuti numerosi manufatti databili alla fase Acheuliana (due fasi rispettivamente attorno a 212000 anni fa e 141000 anni fa).

Il caso dei fiumi radar costituisce un ottimo esempio di come l'*integrazione* tra diverse discipline, in questo caso Telerilevamento, Geologia e Archeologia, possa tentare un'interpretazione più completa ed organica del territorio e della sua evoluzione, giungendo ad una ricostruzione attendibile degli scenari passati e delle dinamiche morfogenetiche che hanno prodotto quelli attuali.



FIGURA I.6: *Due esempi di utensili tipo amigdala rinvenuti durante le campagne archeologiche. Si noti nell'immagine di destra la cementazione con sabbia grossolana e ghiaia fine, effetto di fenomeni di weathering chimico. Da MCHUGH et al. (1988).*

Capitolo II

L'oasi del Fayyum

Il Fayyum¹ è una regione geografica e un'unità amministrativa dell'Alto Egitto. La sua posizione è circa 60 km a Sud della capitale, il Cairo, alla sinistra idrografica del Nilo. Circondata dal deserto, si estende per circa 1827 km² e conta quasi due milioni di abitanti. Benché caratterizzata da una estrema scarsità di precipitazioni, il Fayyum è una delle regioni più fertili dell'Egitto, grazie alla presenza di opere idrauliche che, oggi come in passato, portano le acque del Nilo all'interno della valle. Attualmente l'oasi viene alimentata dalle acque del lago Nasser, addotte attraverso il *Bahr Yusef*². Si coltivano agrumi, ulivi, viti, cotone, lino e canna da zucchero. La parte più profonda della depressione è occupata dal lago Birket Qarun, la cui superficie si estende per 214 km², alla quota di 45 metri al di sotto del livello del mare. La profondità raggiunge gli otto metri. Nel lago, privo di emissari e attualmente salato, confluiscono tutte le acque provenienti dalla rete di irrigazione.

II.1 Cenni Storici

Le prime tracce di insediamento nell'area del Fayyum risalgono alla fine del Paleolitico (VIII-VII millennio a.C.). Si tratta di insediamenti stagionali disposti lungo le rive del lago, le cui fluttuazioni offrono un ambiente adatto a comunità basate su un'economia di sussistenza (MORINI, 2007).

Durante il Neolitico, già a partire dal VI millennio a.C., l'occupazione delle sponde del lago, pur essendo ancora stagionale, avviene per periodi sempre più lunghi. Si imposta un'economia di sussistenza basata sulla produzione agricola.

¹Il toponimo Fayyum deriva dal copto *phiom* che significa "palude".

²Sebbene il suo andamento sinuoso dimostri la sua origine naturale (probabilmente un braccio meandrizzato del Nilo), la leggenda attribuisce la realizzazione di questo canale al Giuseppe biblico, che, secondo il racconto della Genesi, divenne viceré dell'Egitto (Gn 41,41 ed. CEI).

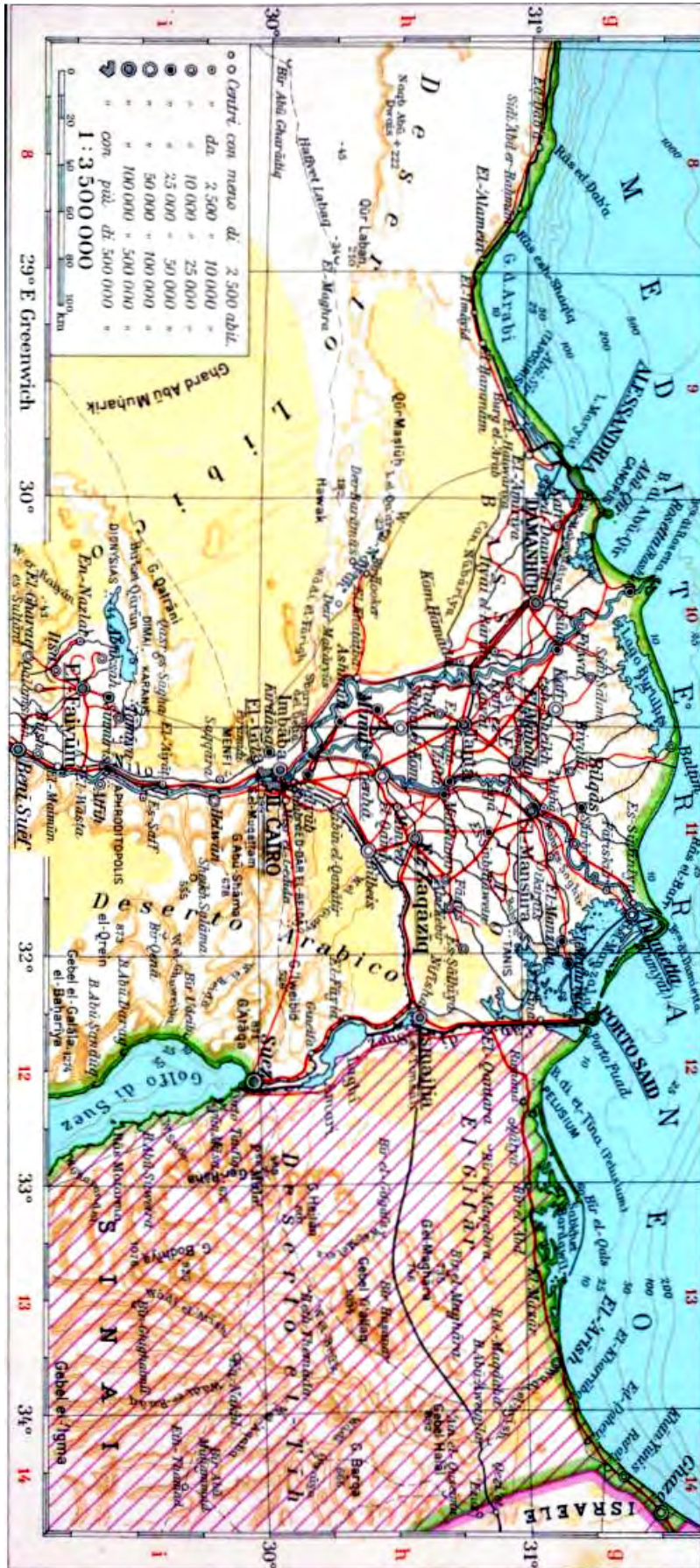


FIGURA II.1: Carta politica in scala 1:3500000 del delta del Nilo.

Sono attribuibili a questa fase i primi esempi di organizzazione agricola rinvenuti in Egitto.

Scarse sono le testimonianze del periodo Predinastico (IV millennio a.C.) e dell'Antico Regno (3100-2180 a.C.; I-VI dinastia), sebbene il nome della capitale Shedet sia ricorrente nei testi antichi (MORINI, 2007). In particolare è attestato fin da questo periodo lo sfruttamento delle cave di basalto nella parte settentrionale dell'oasi.

Se durante il Primo Periodo Intermedio (2180-2040 a.C.; VII-X dinastia), in un contesto di crisi per tutto l'Egitto, il Fayyum viene abbandonato, una fase di grande prosperità e sviluppo si ha durante il Medio Regno (2040-1786 a.C.; XI-XII dinastia). Il rafforzamento del potere centrale offre la possibilità di intraprendere un progetto politico di grande respiro. I sovrani della XII dinastia³ conducono una vasta opera di bonifica, senza precedenti nella storia antica, finalizzata alla creazione di un'oasi artificiale. Mediante la realizzazione di una fitta rete di canali di irrigazione, vaste porzioni di territorio vengono strappate al deserto e il Fayyum diventa una delle zone più fertili e produttive di tutto l'Egitto (CASSOLA e RUGGINI, 1982). A testimoniare lo stretto legame tra l'oasi e la dinastia regnante, il dio Sobek, già divinità protettrice della regione, diventa divinità dinastica.

L'oasi del Fayyum continua a rivestire un ruolo di grande importanza sia dal punto di vista politico che economico per tutto il Nuovo Regno (1567-1085 a.C.; XVIII-XX dinastia), senza che avvengano tuttavia grandi cambiamenti nell'organizzazione.

Dopo la fase di instabilità che caratterizza tutto l'Egitto a partire dalla fine del Nuovo Regno, per tutto il periodo delle dominazioni straniere (conquista assira durante il VII sec. a.C. e persiana meno di un secolo dopo), si ha un periodo di declino. Questa fase termina con l'insediamento dei Tolomei, avvenuto dopo la morte di Alessandro Magno (323 a.C.). È infatti di epoca tolemaica la seconda grande opera di bonifica nella regione del Fayyum, precisamente durante il regno di Tolomeo II (285-246 a.C.).

Da questo momento in poi, pur con qualche battuta d'arresto, il Fayyum resta una delle regioni più produttive di tutto l'Egitto fino alla fine dell'Epoca Romana (MORINI, 2007). In particolare è degna di nota una risistemazione della rete idrica per l'irrigazione durante il periodo augusteo.

Dopo una prima riduzione della superficie coltivata, avvenuta all'inizio del III sec. d.C., il declino definitivo della regione inizia nel IV-V sec. d.C. e prosegue

³Tradizionalmente è Sesostri II ad essere indicato come iniziatore dell'opera di bonifica.

per tutto il Medioevo. Il deserto tornerà ad occupare la regione a partire dalla parte settentrionale, anche se alcuni villaggi più meridionali presenteranno una continuità insediativa anche durante il periodo della dominazione araba.

II.2 Geologia dell'Egitto

Prima di entrare nel dettaglio delle peculiarità che caratterizzano l'oasi del Fayyum, si ritiene opportuno sottolineare i tratti salienti della formazione del territorio corrispondente all'attuale Egitto, in un'ottica regionale.

Dal punto di vista morfologico possiamo suddividere il territorio in tre unità principali (SAID, 1990):

- **Zona settentrionale:** la porzione di territorio a Nord del 28° parallelo è in gran parte occupata dalla depressione di Qattra (che si estende per 19500 km² e raggiunge nel suo punto più basso la quota di 134 m sotto il livello del mare) e comprende l'oasi del Fayyum (le cui quote oscillano tra -45 e +40 s.l.m.). A Nord della depressione, a partire dalla sommità della scarpata (quota massima circa 300 m), il terreno degrada gentilmente verso il Mediterraneo, seguendo un'ampia monoclinale.
- **Zona intermedia:** compresa tra il 28° ed il 24° parallelo, è coperta in gran parte da un deserto roccioso (*hamada*), composto essenzialmente da calcari. Il pavimento roccioso scolpito dall'erosione è coperto da un sottile strato di ghiaia e sabbia.
- **Zona meridionale:** in questa porzione di territorio è esposta la formazione della "Arenaria Nubiana" (Cretaceo), localmente interrotta da affioramenti del basamento, formatosi nel Carbonifero.

L'attuale assetto del territorio è il risultato dell'interazione di tre fattori fondamentali:

Tettonica. Sebbene il territorio dell'attuale Egitto occupi la parte nord-orientale del continente Africano, estremamente stabile e non interessato da attività endogena, la tettonica gioca un ruolo fondamentale nel modellamento del paesaggio. Gli eventi principali sono legati essenzialmente alle dinamiche del margine orientale della placca, un margine attivo, che provoca instabilità nella porzione di territorio che si affaccia sull'attuale Mar Rosso.



FIGURA II.2: Carta fisica dell'Egitto.

Gli eventi chiave per la formazione dell'Egitto sono essenzialmente la chiusura della Tetide ad Est e l'apertura del Mar Rosso, con conseguente orogenesi della catena omonima.

Cicli di trasgressione e regressione. Nel corso delle varie ere si sono susseguiti importanti cicli di trasgressione, durante i quali si sono formati i principali depositi marini, e regressione, caratterizzati da intense fasi di erosione. Questi avanzamenti e arretramenti della linea di costa sono legati a complesse concause di natura tettonica e climatica.

Le stratificazioni di depositi marini affiorano attualmente su gran parte del territorio egiziano.

Azione morfologica erosiva. I sistemi idrici che si sono sviluppati nel corso del tempo⁴ sono i principali responsabili delle forme di erosione che hanno modellato il paesaggio e che hanno prodotto i depositi continentali esposti prevalentemente nella parte settentrionale dell'odierno Egitto.

È quasi superfluo sottolineare la stretta correlazione con le vicende climatiche sia di portata globale che regionale: le prime infatti sono responsabili di importanti variazioni del livello di base, le seconde, specialmente la piovosità, influiscono sul regime e le portate dei fiumi. Anche se il clima è attualmente di tipo arido, in passato si sono succeduti diversi periodi umidi, caratterizzati da precipitazioni medie annue anche elevate. In questi periodi hanno agito anche i fenomeni di *weathering*.

Alcuni autori hanno posto una certa enfasi anche sul contributo dell'azione eolica nel modellamento delle aree desertiche (che coprono la quasi totalità del territorio egiziano). Sebbene tale contributo sia innegabile, soprattutto per quanto concerne la formazione degli accumuli sabbiosi che compongono le dune, l'importanza di questo agente è stata progressivamente ridimensionata dagli studi più recenti.

⁴Si è qui evitato di menzionare esplicitamente il Nilo, non perché si voglia sminuire l'importanza di questo agente, ma perché studi condotti negli anni '90 (ISSAWI e MCCAULEY, 1993), sulla scorta dell'osservazione dei cosiddetti "*radar rivers*", ovvero paleocanali visibili da immagini satellitari radar (cfr. paragrafo I.3.4), hanno suggerito che l'assetto attuale dell'idrografia egiziana si sia stabilito in tempi molto più recenti di quanto non si supponesse in passato. Come si dirà più avanti, secondo queste teorie, nel corso del Cenozoico si sono avvicendati almeno tre diversi sistemi idrografici, i quali si sono sviluppati su direttrici diverse, imposte di volta in volta da cause tettoniche che hanno variato la direzione a maggiore pendenza.

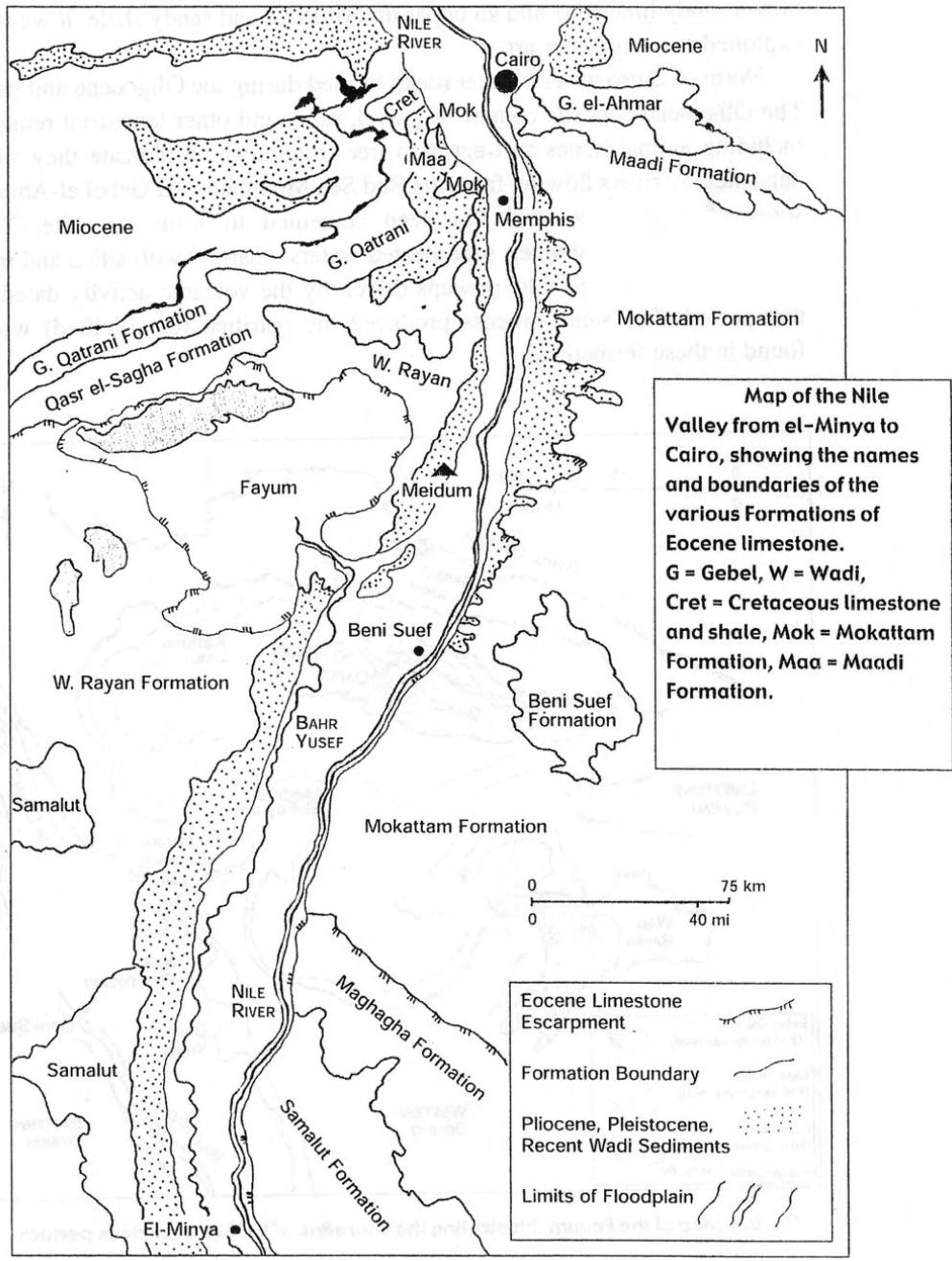


FIGURA II.3: Carta geologica semplificata in scala 1:2000000. Da SAMPSELL (2003).

II.2.1 La formazione

Si propone ora in estrema sintesi la successione degli eventi più significativi che hanno portato alla formazione del paesaggio attuale. La ricostruzione può iniziare dagli eventi del **Paleozoico** (590-248 Ma). Una serie di cicli trasgressivi e regressivi hanno lasciato sul territorio egiziano sedimenti marini, ora coperti da potenti successioni di epoche successive ed affioranti soltanto nel Gilf Kebir. Sono invece esposti sul 40% del territorio dell'attuale Egitto i sedimenti depositati durante le fasi trasgressive del **Cretaceo** (144-65 Ma).

Ulteriori episodi trasgressivi, di portata più limitata rispetto ai precedenti, si sono verificati durante l'**Eocene**, depositando le successioni di calcare che troviamo alla base dell'oasi del Fayyum⁵. In questo periodo ha avuto inizio anche l'orogenesi della catena del Mar Rosso, fenomeno connesso all'apertura del mare. Questi nuovi rilievi venivano drenati dal bacino idrico del fiume "Gilf", individuato da ISSAWI e MCCAULEY (1993), formatosi durante una fase di regressione, il quale scorreva in direzione Est-Ovest lungo il primo tratto, per poi volgere in direzione Nord e sfociare nella Tetide, raggiungendo la costa in una posizione più meridionale rispetto alla linea attuale (si veda figura II.4).

All'inizio del **Miocene**, il sollevamento della catena del Mar Rosso è avvenuto con maggiore intensità nella sua parte più settentrionale, producendo così una pendenza preferenziale in direzione Sud. Il drenaggio di questa regione inizia a confluire nel nascente fiume "Qena" (ISSAWI e MCCAULEY, 1993), il quale, fluendo in direzione Sud-Ovest, raggiunge l'Africa centrale (figura II.5).

Durante il **Messiniano** si è verificata una forte regressione del Mar Mediterraneo. I corsi d'acqua minori che fluivano in direzione Nord, tra cui l'Eonilo, hanno iniziato ad incidere profondamente i propri alvei e, in virtù del meccanismo di erosione regressiva, a catturare bacini idrici più meridionali. L'episodio decisivo per la formazione del moderno sistema idrografico è la cattura del Qena operata dall'Eonilo: questa cattura ha prodotto l'inversione del flusso da Sud a Nord e ha portato alla connessione tra la regione dei grandi laghi (che fino a quel momento presumibilmente riversava le proprie acque nel bacino del Congo) ed il Mar Mediterraneo⁶ (si veda figura II.6). L'episodio trasgressivo successivo alla

⁵I depositi eocenici sono composti da quattro formazioni principali. Dalla più antica alla più recente: formazione "Minia", formazione "Samalut", formazione "Mokattam" e formazione "Maadi" (SAMPSELL, 2003). Poiché gli strati immergono verso Nord, la formazione più antica è esposta al di sopra della latitudine di Assiut, la più recente poco più a Sud del Cairo. Cfr. figura II.3.

⁶Una datazione esatta di questi eventi non è ancora possibile. Lo studio condotto da MCHUGH *et al.* (1988) ha portato alla scoperta di numerosi insediamenti preistorici lungo il corso dei "radar rivers", al confine tra Egitto e Sudan (cfr. paragrafo I.3.4). Tali insediamenti sono stati dap-

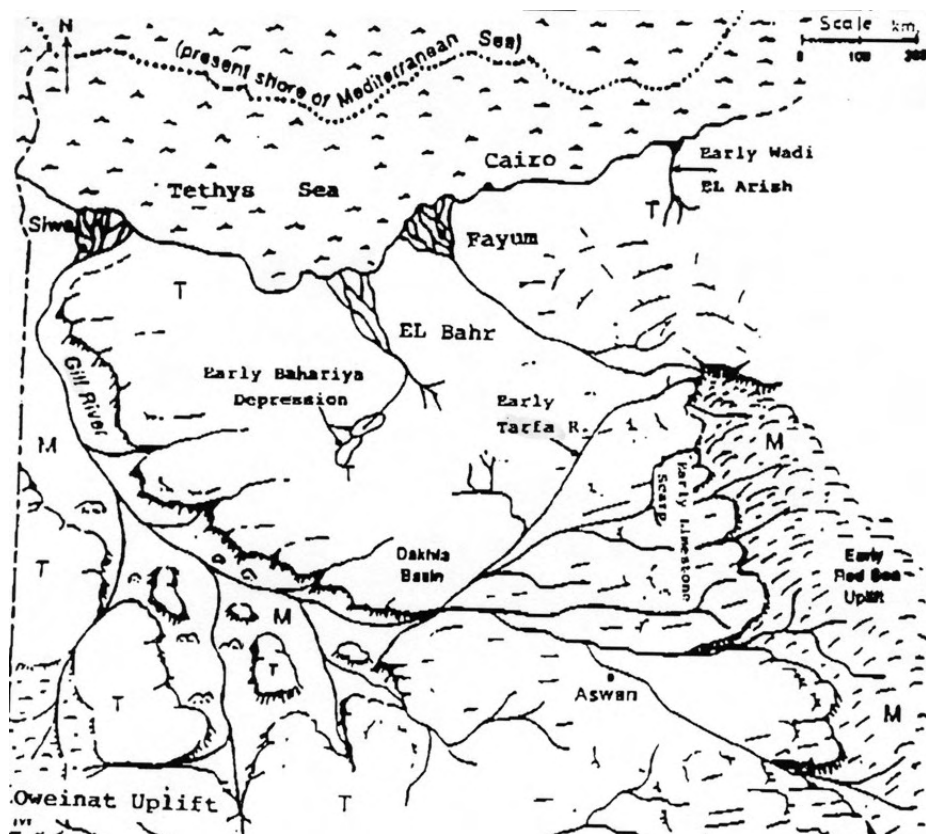


FIGURA II.4: Assetto dell'idrografia alla fine dell'Oligocene (24 Ma). Il sistema dominante è il Gilf, che drena la nascente catena del Mar Rosso. Si noti che l'area corrispondente all'oasi del Fayyum è occupata dall'apparato deltizio di un corso d'acqua minore. Da ISSAWI e MCCAULEY (1993).

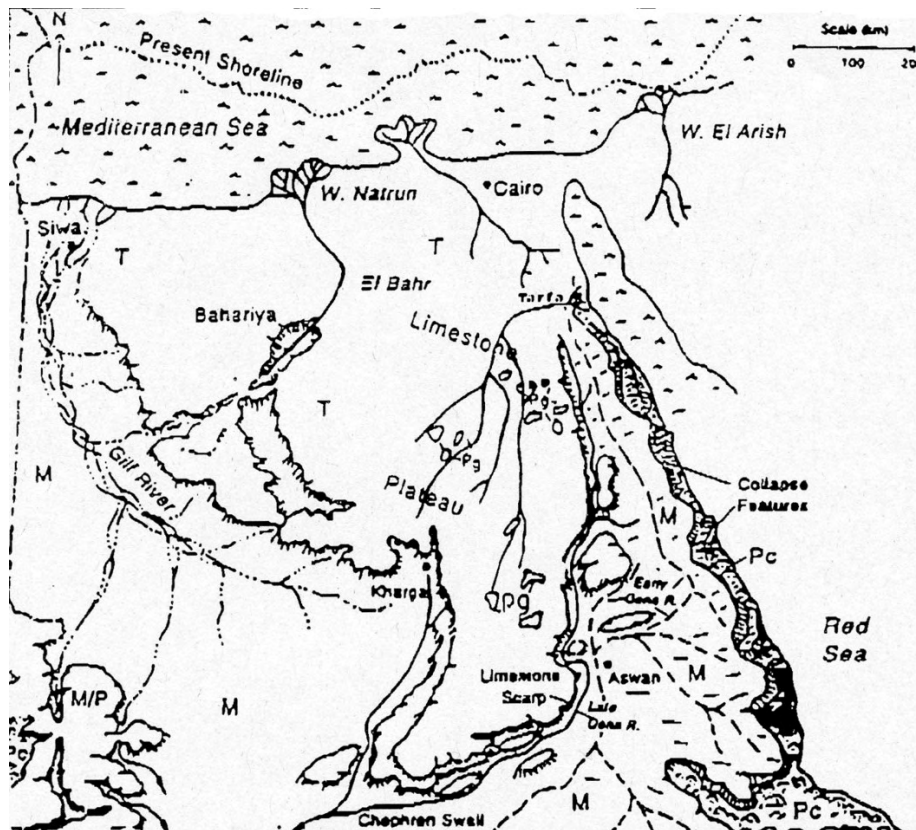


FIGURA II.5: Assetto dell'idrografia alla metà del Miocene (circa 16 Ma). Il sistema principale è il Qena, che drena la catena del Mar Rosso e scorre verso Sud-Ovest per effetto una orogenesi più intensa nella parte settentrionale della catena montuosa. Questo sollevamento differenziale provoca una pendenza in direzione Sud. Da ISSAWI e MCCAULEY (1993).

crisi del Messiniano si protrarrà fino alla metà del Pleistocene, producendo un arretramento della linea di costa e, di conseguenza, una fase di forte deposito di sedimenti marini nelle valli precedentemente incise.

Il tardo **Quaternario**, infine, non è altro che la storia delle alluvioni del Nilo.

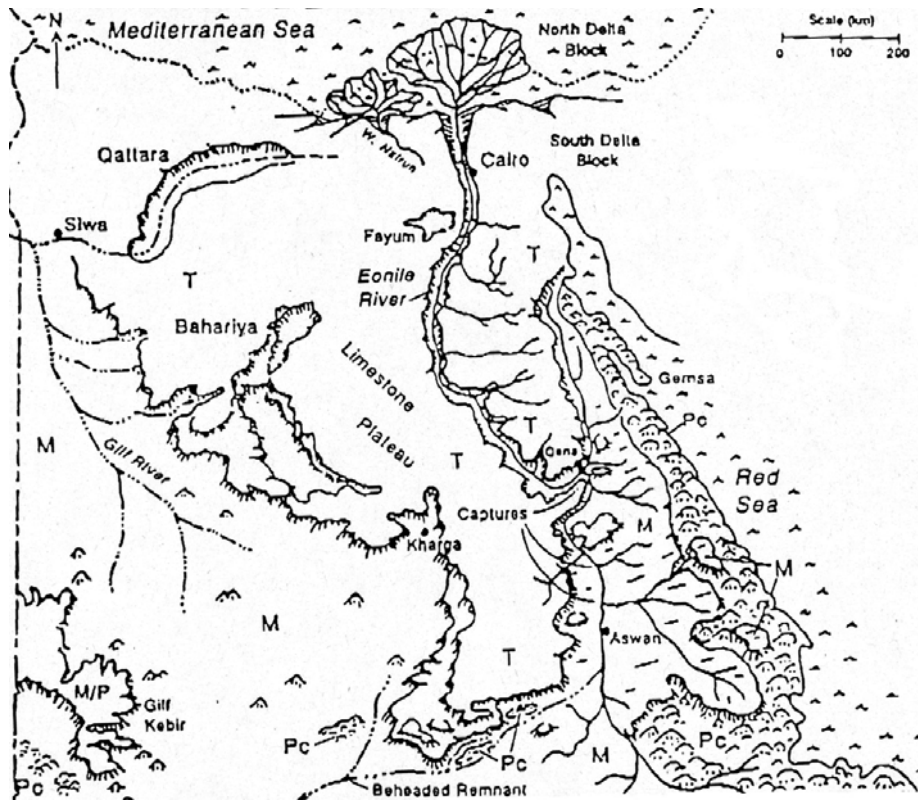


FIGURA II.6: Assetto dell'idrografia durante il Messiniano (6 Ma). Nella carta sono segnalati gli episodi di cattura più importanti per la formazione dell'attuale Nilo. Da ISSAWI e MCCAULEY (1993).

II.3 Geologia per il Fayyum

Nel corso degli anni sono stati portati a termine numerosi studi sull'oasi del Fayyum nell'ambito di diverse discipline. Il quadro è a tutt'oggi alquanto frammentario, benché non manchino importanti tentativi di offrire una visione organica dell'evoluzione di quest'area. In effetti questa depressione presenta maggiori difficoltà interpretative rispetto alle analoghe depressioni situate nel deserto li-

prima individuati mediante l'analisi delle immagini radar e successivamente verificati mediante indagini sul campo. Le datazioni, effettuate sulla base dei reperti archeologici rinvenuti, confermano che ancora durante il medio e tardo Pleistocene doveva essere presente una disponibilità idrica tale da supportare l'insediamento umano su una vasta area.

bico: ciò è essenzialmente dovuto alla presenza di una connessione con il Nilo, connessione che ha consentito la formazione di un lago.

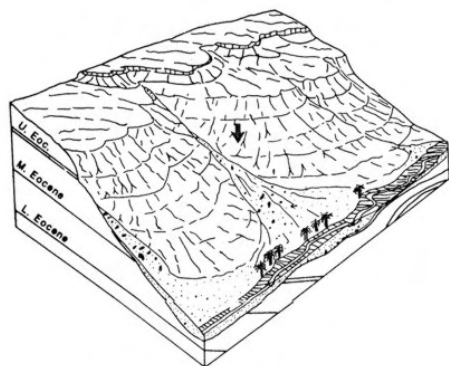
Secondo ISSAWI *et al.* (2001) la formazione della depressione ha inizio al termine dell'Eocene a seguito della regressione della Tetide, la quale ricopriva grosso modo l'attuale posizione del Mediterraneo. Mentre a Sud-Ovest è attivo il fiume Gilf, l'area corrispondente all'attuale Fayyum è occupata nell'Oligocene (37-24 Ma) dal delta di un corso d'acqua minore (indicato in letteratura con il nome "*Brown and Krauss river*"). I depositi di questo periodo costituiscono la formazione Qatrani, formazione con una potenza di 340 m, composta essenzialmente da arenarie, arenarie ghiaiose, calcari e argilliti. Questa formazione, si assottiglia notevolmente procedendo verso Sud-Est. Si segnala la presenza, all'interno di questa formazione, di una intrusione basaltica di 25 m di spessore, databile a circa 31 Ma. Tale intrusione è probabilmente dovuta alla formazione di fessure per effetto delle tensioni associate all'apertura del Mar Rosso (SAMPSELL, 2003).

In ogni modo dalla metà dell'Oligocene all'inizio del Miocene (24 Ma) la zona subisce un generale abbassamento dovuto ad una fase di degradazione. L'erosione è avvenuta in modo più accentuato nella parte meridionale dove manca la protezione dello strato basaltico.

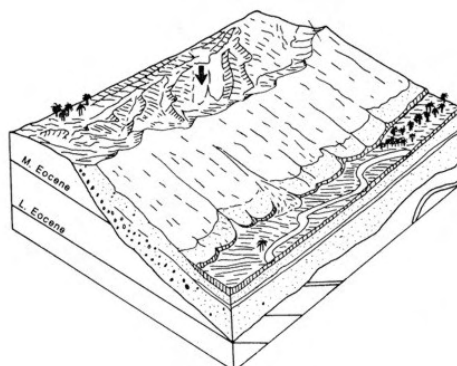
Della fase di deposizione avvenuta durante la trasgressione del Miocene medio restano poche tracce, in particolare uno strato di calcare ricco di fossili affiorante nella parte meridionale dell'altopiano che divide l'oasi dalla valle del Nilo. Anche questa trasgressione sembra dunque aver sommerso l'intera area del Fayyum.

Una nuova fase di intensa erosione sarebbe avvenuta nel Messiniano (6 Ma). Al termine di questa età la quota media dell'area si sarebbe attestata attorno al livello attuale del mare. A questa fase sarebbe seguita, durante il basso Pliocene, una nuova trasgressione, episodio al quale sarebbe ascrivibile la formazione Kom El-Shelul, uno strato di arenarie e argille sabbiose marine, visibile a quota 100 m nella parte Nord-occidentale della scarpata che circonda l'oasi. La mancanza di sedimenti del basso Pliocene nelle zone circostanti denuncia una nuova fase di degradazione nella seconda parte del Pliocene.

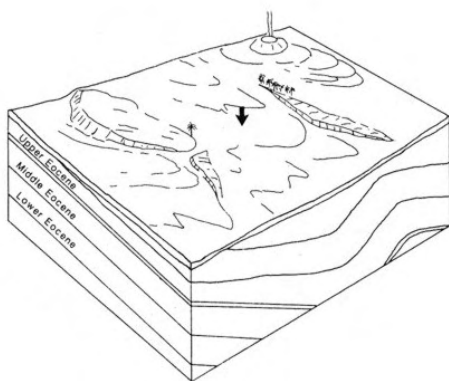
La formazione della depressione vera e propria, cioè l'abbassamento del terreno al di sotto del livello del mare attuale, sarebbe avvenuta soltanto durante il Quaternario e comunque in modo non lineare. Le sequenze quaternarie osservabili lungo la scarpata raggiungono una potenza di 64 m e sono costituite da sabbia, silt, argilla e sporadicamente tufo calcareo.



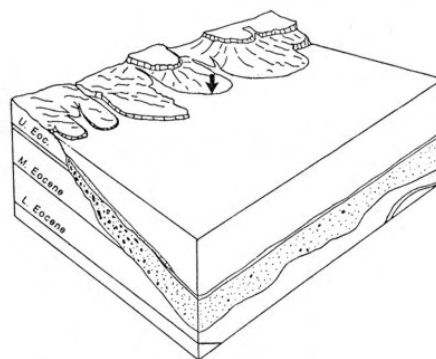
C. Late Miocene



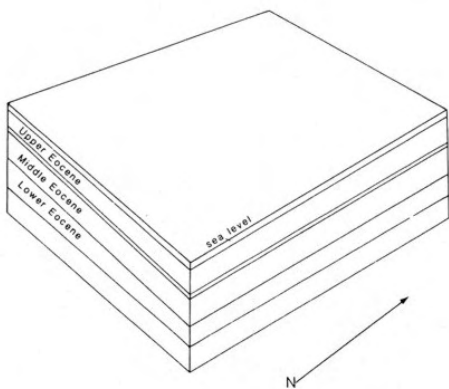
F. Late Pleistocene and Holocene



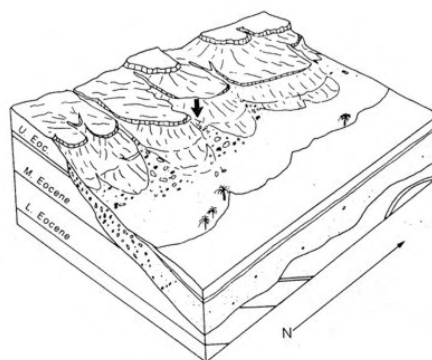
B. Late Oligocene and Early Miocene



E. Early and Middle Pliocene



A. Eocene



D. Early Pliocene

FIGURA II.7: *Evoluzione paleoambientale del territorio attualmente occupato dall'oasi del Fayyum. Da HAMBLIN (1987).*

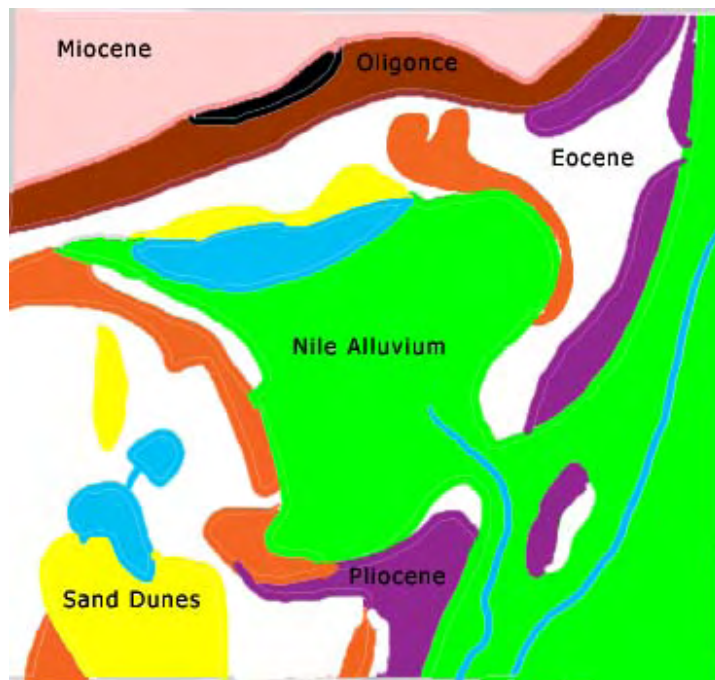


FIGURA II.8: Carta geologica semplificata dell'oasi del Fayyum. *Legenda.* Eocene: strati di calcare e argilliti da ambiente marino profondo o poco profondo; Oligocene: arenaria, ghiaia e shale dovuti a trasporto fluviale in direzione Est-Ovest; Miocene: strati di calcari e arenarie grossolane legati alla trasgressione miocenica; Pliocene: arenaria e argilla sabbiosa dovuti al riempimento delle valli fluviali per innalzamento del livello di base. Da BYRNES (2007).

Numerosi meccanismi sono stati proposti dagli studiosi per spiegare l'approfondimento della depressione. Si ritiene poco significativo in tal senso il contributo dell'azione eolica, sebbene sia stato enfatizzato in passato da alcuni autori. Appare decisamente più plausibile attribuire maggiore importanza al contributo dato dall'azione dell'acqua, sia come erosione meccanica operata da acque correnti superficiali, sia come dissoluzione chimica operata da acque infiltratesi in fessure e faglie.

II.3.1 Il lago Moeris

La presenza del lago è ciò che maggiormente distingue questa depressione dalle altre presenti nella parte orientale del deserto libico. La sua esistenza è certamente legata alla prossimità con la valle del Nilo, fatto che ha consentito (e consente tuttora!) l'ingresso di acqua. Il parziale episodio regressivo avvenuto nel Pliocene medio (durante il più ampio ciclo trasgressivo verificatosi tra la fine del Messiniano ed il Pleistocene medio), avrebbe dunque lasciato in corrispondenza dell'attuale oasi un lago salmastro, le cui acque sarebbero state gradualmente sostituite da quelle dolci di origine meteorica e alluvionale (ISSAWI *et al.*, 2001).

Le origini di questo lago sono comunque divenute oggetto del dibattito tra studiosi⁷ anche a seguito dei problemi sollevati dalla lettura delle fonti antiche, in particolare il passo di Erodoto⁸:

«Ma una meraviglia ancora maggiore di questo Labirinto la offre il lago detto Meride⁹, presso il quale è costruito il labirinto. Il suo perimetro è di 3600 stadi, che corrispondono a 60 scheni¹⁰ [756 km], pari alla parte costiera dell'Egitto stesso. Il lago si estende nella sua lunghezza verso nord e verso sud, e ha una profondità massima di 50 orge¹¹ [102 m]. Che è artificiale e scavato lo dimostra esso stesso. Infatti in mezzo al lago sorgono due piramidi¹² [...] e su entrambe

⁷Si vedano ad esempio GARBRECHT (1987) e EVANS (1991).

⁸Erodoto, *Storie*, Traduzione di A. I. D'Accini, vol. I, libri I-II, [149], BUR, 1984.

⁹Il lago Moeris.

¹⁰Nel sistema attico lo *stadio* è un'unità di misura della lunghezza pari a circa 210 metri; lo *scheno*, invece, è un'unità egizia che corrisponde a 12,6 km circa.

¹¹Nel sistema egizio l'*orgia* è un'unità di misura della lunghezza che vale circa 6 piedi, ossia poco più di 2 metri.

¹²In realtà non si tratta di piramidi ma dei basamenti delle statue del faraone Amenemhat III, ancor'oggi visibili. Molto probabilmente le statue erano state erette sulla sponda del lago. Considerando che Erodoto visse nel V sec. a.C., il fatto che le statue vengano descritte come emergenti in mezzo al lago può essere interpretato in due modi: è possibile che Erodoto abbia semplicemente visitato la regione durante un episodio di piena del Nilo (EVANS, 1991), oppure è possibile che il livello del lago sia incrementato rispetto all'epoca della costruzione delle statue

c'è un colosso di pietra seduto sul trono. [...] L'acqua che è nel lago non è sorgiva - ché in questo punto la regione è terribilmente priva d'acqua - ma vi è stato immesso il Nilo attraverso un canale, e per 6 mesi l'acqua scorre verso il lago, per 6 mesi al contrario, ritornando al Nilo.»

Evidenze geologiche ed archeologiche consentono di ritenere assai improbabile che il lago possa avere un'origine artificiale. Già le campagne di scavo condotte negli anni '20 avevano infatti dimostrato la presenza di un lago durante il Paleolitico (GARDNER, 1929). Gli studi che da allora si sono susseguiti hanno mostrato che il livello dell'acqua nel corso della storia ha subito continue fluttuazioni, non sempre ricostruibili con precisione. Ciò che ad ogni modo appare chiaro è che il volume d'acqua è stato di gran lunga superiore a quello attuale, almeno per tutto il periodo dinastico (si veda figura II.9). Sembra che il restringimento del lago sia iniziato a partire dall'Epoca Tolemaica, allo scopo di aumentare la superficie coltivabile.

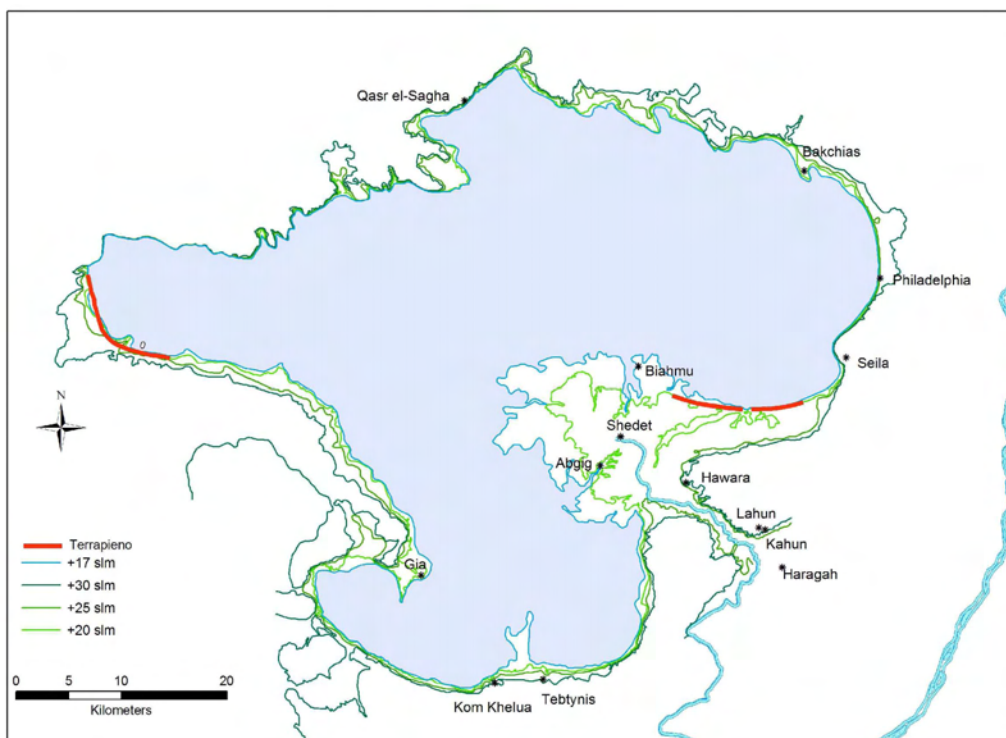


FIGURA II.9: *Ipotesi di ricostruzione dell'estensione del lago durante il Medio Regno. Da MORINI (2007).*

La tabella seguente riassume le fluttuazioni avvenute durante il Quaternario, in accordo con lo studio di ISSAWI *et al.* (2001). Nella prima colonna è indicata (oltre mille anni prima).

la variazione del livello dell'acqua che sarebbe avvenuta entro la data indicata nella seconda colonna. Sempre in accordo con ISSAWI *et al.* (2001), la quota all'inizio del Quaternario era attorno a 20 metri sopra il livello attuale del mare. Oggi la superficie del lago si trova a 45 metri sotto il livello del mare. Se le cause delle fluttuazioni più antiche sono da ricercarsi negli eventi climatici globali o comunque in fattori naturali più locali, al contrario a partire dal 2000 a.C. il livello del lago è controllato dagli interventi antropici.

- 15 m	35000 anni fa
+ 15 m	20000 anni fa
- 40 m	10000 anni fa
+ 40 m	5000 a.C.
- 22 m	4900 a.C.
+ 14 m	3000 a.C.
- 17 m	2040 a.C.
+ 20 m	1640 a.C.
- 20 m	1550 a.C.
+ 19 m	1070 a.C.
- 19 m	712 a.C.
+ 23 m	395 a.C.
- 43 m	642 d.C.
- 20 m	presente

È stato comunque osservato (HASSAN, 1998) che, dal momento in cui l'intervento antropico è diventato rilevante, le fasi di abbassamento del livello sono correlabili a periodi di difficoltà politiche ed economiche, durante le quali è presumibilmente venuta meno una adeguata manutenzione delle opere idrauliche, mentre quelle di avanzamento sono correlabili a periodi di prosperità.

Alterne vicende sembra aver subito anche la salinità del lago. In particolare sono attribuibili alla fase di abbassamento culminata nel 2040 a.C. alcuni depositi sedimentari caratteristici di acque salate. D'altro canto se le acque del lago venivano utilizzate a scopo irriguo è evidente che, almeno nelle fasi di prosperità del Fayyum, le acque dovevano essere dolci o almeno dolciastre. È altresì probabile che le acque del lago si siano mantenute dolci fin tanto che il livello del lago si è mantenuto alto e l'alimentazione è stata garantita dalle piene del Nilo. Le fasi salate sono probabilmente legate a fasi di scarsa alimentazione.

In anni recenti sono state effettuate diverse misurazioni della salinità. PHILLIPS (1988) riporta una concentrazione salina pari all'1,3%. Tuttavia questo indi-

ce è in costante aumento, contestualmente al generale fenomeno della salinizzazione dei suoli dell'oasi. Si tratta di un effetto tipico dei climi aridi e semi-aridi e che comporta una perdita in termini di produttività agricola anche del 30% (GHABOUR e DAELS, 1993). Tenendo presente che il lago riceve esclusivamente le acque residue della rete di irrigazione, l'aumento di salinità nel suolo comporta anche un aumento della salinità dell'acqua, già favorito dalla fortissima evaporazione.

II.4 Formazioni geologiche

Nel corso degli anni sono stati condotti numerosi studi stratigrafici sulle formazioni che circondano l'oasi del Fayyum. Purtroppo la maggior parte di questi contributi ha come oggetto porzioni molto limitate di territorio, pertanto risulta difficile definire un quadro organico ed esaustivo.

Nelle pagine che seguono si riportano alcune stratigrafie presenti in letteratura. Le informazioni riguardanti gli strati più superficiali sono risultate assai utili per le operazioni di classificazione della litologia superficiale che sono state eseguite sulle immagini satellitari (si veda il capitolo IV). Una discussione puntuale sulle sezioni stratigrafiche esula gli scopi della presente trattazione; per maggiori informazioni si rimanda pertanto agli articoli citati nella didascalia di figura II.10.

Si vogliono sottolineare soltanto alcuni tratti essenziali. Alla base dell'oasi del Fayyum si trovano i calcari depositi nel corso dell'Eocene. Essi emergono nel settore sud-occidentale (punto 6 di figura II.10, calcari bianchi dell'Eocene medio) e in una ristretta fascia sulla sponda settentrionale del lago Qarun (punto 2, calcareniti dell'Eocene superiore). Più a Nord i calcari sono coperti da formazioni più recenti, in particolare in cima alla scarpata che delimita il bordo nord-occidentale dell'oasi (punto 1) sono esposte le arenarie mioceniche (subito al di sotto delle quali si trova lo strato di basalto). Sui rilievi che ad Est separano l'oasi dalla valle del Nilo affiorano unità più recenti. Nella parte sud-orientale si tratta di ghiaie plioceniche di *facies* deltizia (punto 5), mentre nella parte nord-orientale (punti 3 e 4), probabilmente per la minor distanza dal corso del Nilo, affiorano sedimenti alluvionali quaternari.

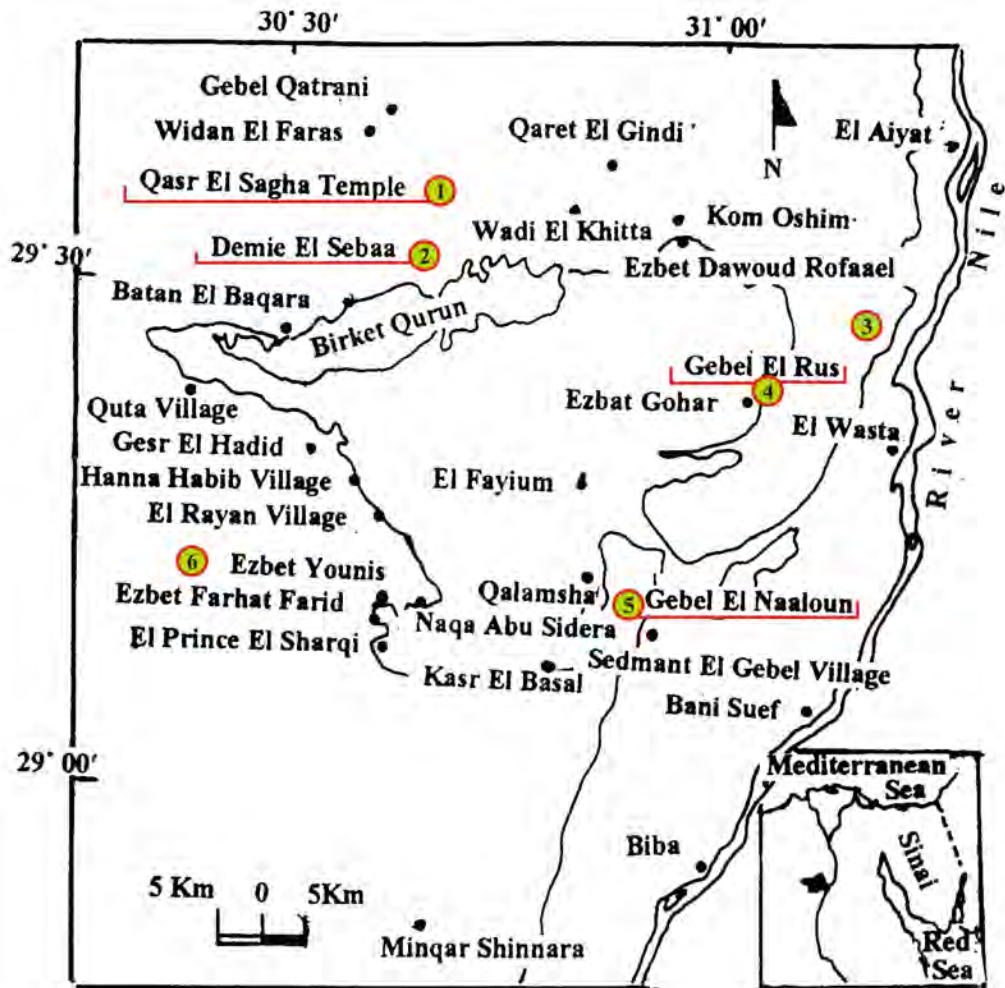
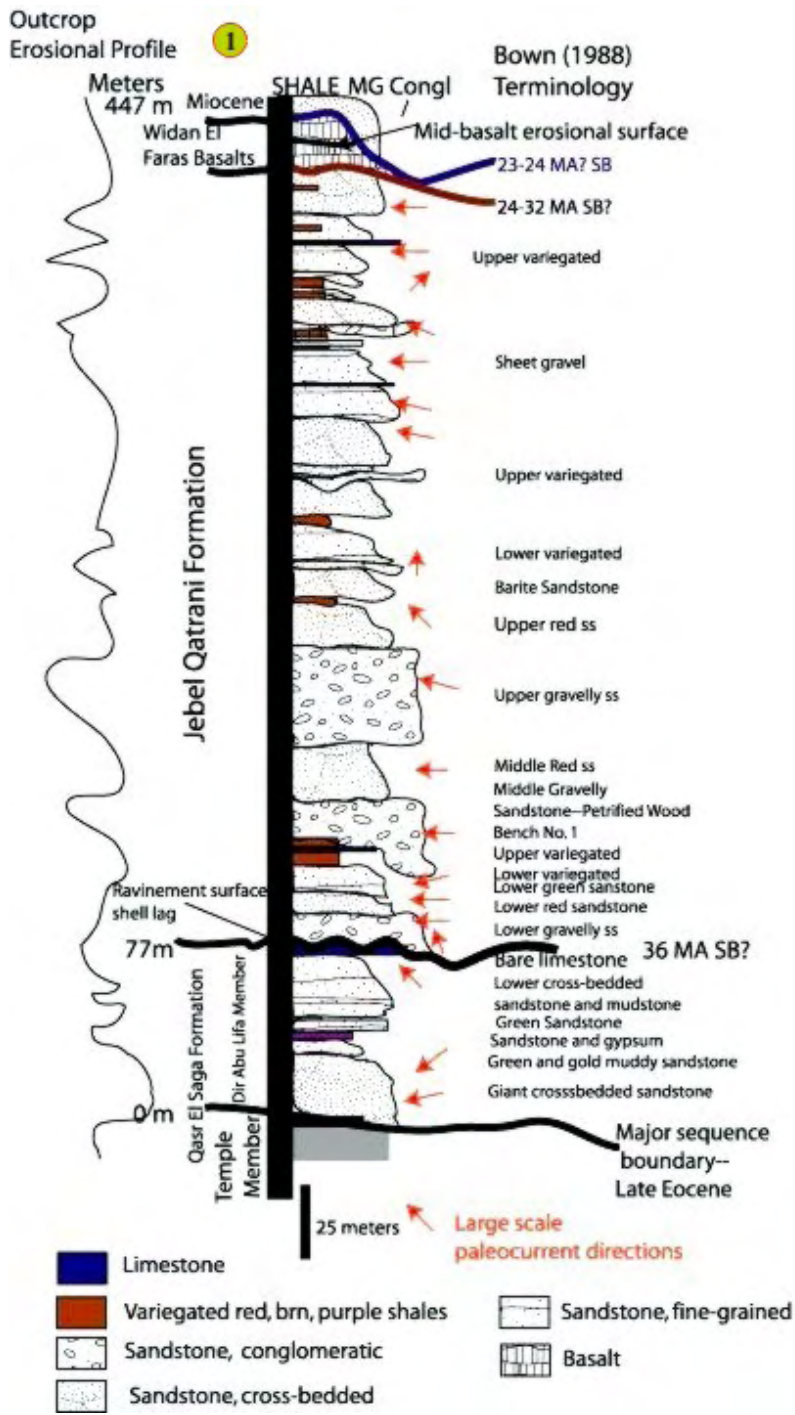
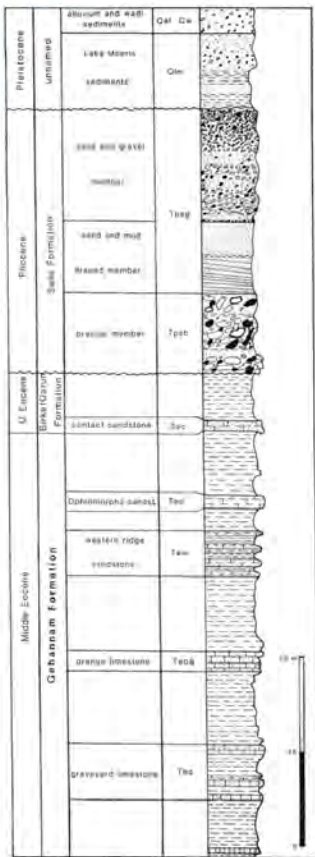


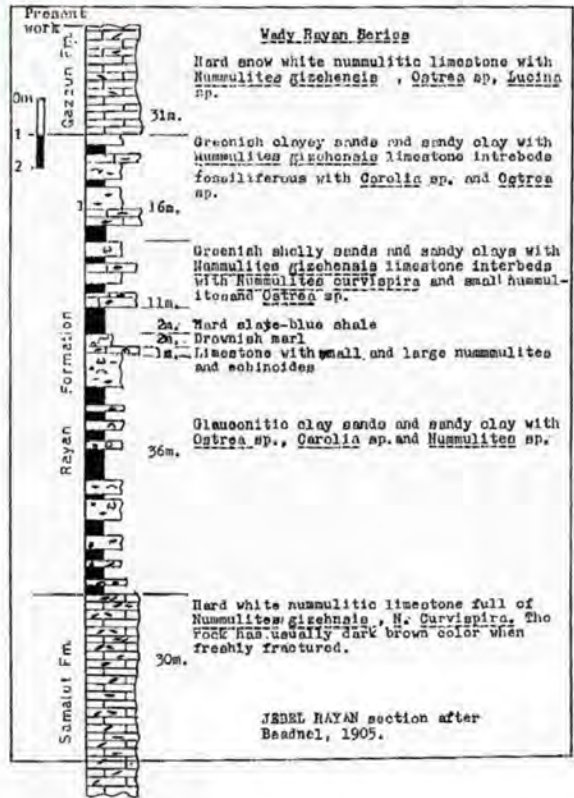
FIGURA II.10: Ubicazione delle colonne stratigrafiche di riferimento. Le colonne 2 e 6 sono state ricavate dallo studio di SWEDAN (1992); la colonna 1 è tratta dallo studio di DOLSON et al. (2002); la sezione 3 è desunta da HASSAN et al. (1984); la 4 dal lavoro di HAMBLIN (1987); la sezione 5 infine deriva dallo studio di TAMER et al. (1975b). Nelle pagine successive sono riportate alcune di queste colonne stratigrafiche.



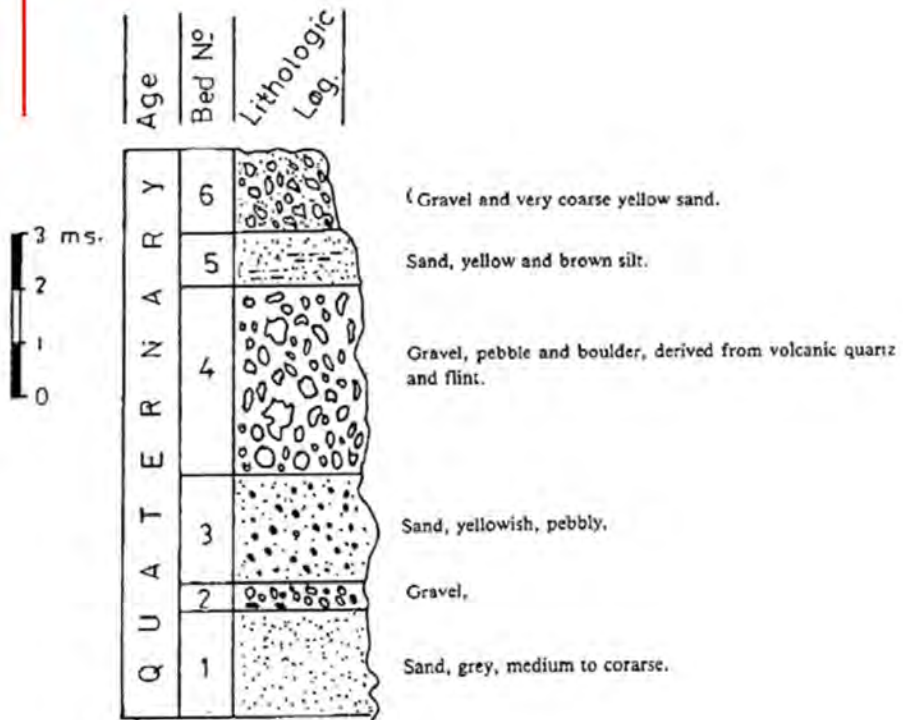
4



6



3



Capitolo III

Dati e Materiali

In questo capitolo verranno presentati dati, materiali e strumenti disponibili, utilizzati per le elaborazioni di cui al capitolo IV.

III.1 Cartografia

La carta topografica costituisce un utile punto di riferimento per ricavare e verificare le informazioni geometriche di base sul territorio in esame. In questo caso sono stati utilizzati alcuni fogli della serie in scala 1:50000 realizzata dall'*Egyptian General Survey Authority*. Questa cartografia è stata realizzata mediante restituzione di riprese aeree realizzate nel biennio 1990-91 e successive verifiche a terra.

I dati sono riferiti al *datum* “Old Egyptian”, materializzato dalla rete geodetica “Venus” del 1874, che assume come ellissoide di riferimento quello di Helmert¹ (1907) e riferisce le quote alla determinazione (1906) del livello medio marino ad Alessandria. Per la rappresentazione cartografica è stata utilizzata la proiezione di Gauss, ma il reticolato chilometrico utilizzato è il “Red Bell²”.

I fogli della carta relativi al lago Qarun ed al territorio circostante (si veda figura III.1) sono stati scanditi e memorizzati in formato TIF. Sono quindi stati georeferenziati nel sistema UTM-WGS84 utilizzando una trasformazione conforme, i cui parametri per ciascun foglio sono stati stimati su dodici punti (angoli della carta e punti del grigliato chilometrico).

¹Parametri caratteristici dell'ellissoide di Helmert 1907: semiasse maggiore 6378200, semiasse minore 6356818.1689999998; *shift* rispetto al GRS80 $\Delta X = -130$; $\Delta Y = 110$; $\Delta Z = -13$.

²Falsa origine del sistema Red Bell: 30°N = 810000 , 31°E = 615000.

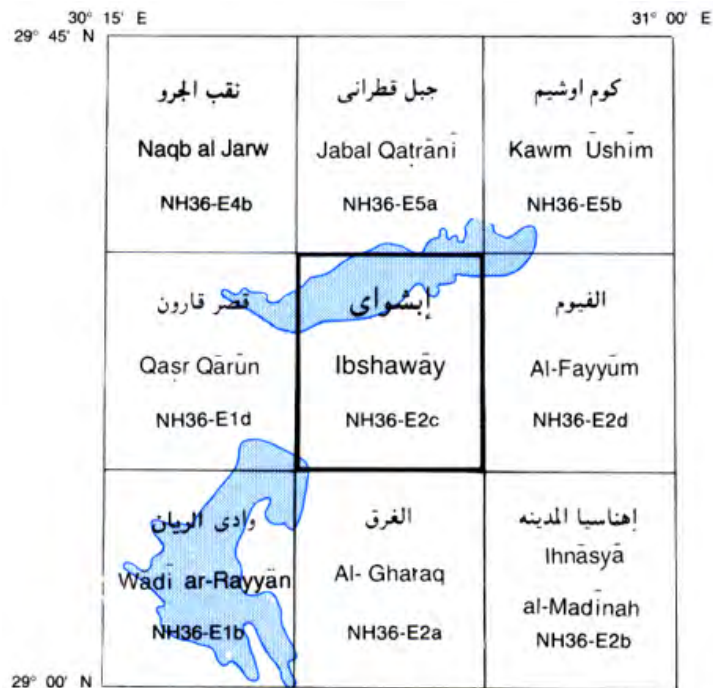


FIGURA III.1: Quadro di unione dei fogli della carta topografica dell’Egitto in scala 1:50000 relativi all’area del lago Qarun.

III.2 Immagini Satellitari

Nella presente trattazione sono state utilizzate diverse immagini ASTER (per le caratteristiche tecniche del sensore si veda la sezione I.1.2). La copertura dell’oasi è garantita dalla composizione di quattro immagini: sono state quindi selezionate quelle che presentavano caratteristiche di radianza affini. Si è cercato di evitare, cioè, che alcune immagini fossero molto più “scure” di altre. Naturalmente sono state scartate quelle immagini che presentavano una maggiore copertura nuvolosa. La presenza di nubi, infatti, non solo nasconde alcune porzioni di terreno, ma altera le caratteristiche di radianza delle aree su cui proiettano la propria ombra.

Per poter essere utilizzate ai fini di una mappatura, le immagini devono essere corrette geometricamente. Le immagini di livello 1B della serie ASTER contengono già (nel *file* MET) i metadati relativi alla georeferenziazione (precisione attorno a 50 m). Tuttavia occorre ancora procedere ad una ortorettifica, operazione questa che richiede l’impiego di un modello digitale del terreno.

Ci si è inoltre serviti delle immagini ad alta risoluzione fornite dal *tool Google Earth* per effettuare ulteriori verifiche geometriche ed interpretative.

III.3 Modello Digitale del Terreno

Ai fini delle elaborazione è necessario disporre di un modello digitale del terreno. Sebbene le immagini ASTER consentano l'estrazione del DEM mediante l'utilizzo della coppia stereoscopica nella banda 3 (*nadir* e *backward*), si è preferito utilizzare il già validato modello SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), nella versione 3, che è caratterizzata da una risoluzione al suolo di 90 m. Questo modello è ottenuto da una collezione di dati di interferometria radar ed offre una copertura globale del pianeta tra le latitudini 60N e 60S. I file in formato HGT sono disponibili gratuitamente in rete e sono tagliati in settori delle dimensioni di un grado di latitudine per un grado di longitudine. Per il 90% dei dati l'errore assoluto verticale è inferiore a 16 m, mentre l'errore assoluto sulla posizione planimetrica è inferiore a 20 m. Maggiori informazioni sono disponibili sul sito internet della NASA (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/srtmBibliography.html>); per dettagli sull'accuratezza del modello si rimanda all'articolo di RODRIGUEZ *et al.* (2005).

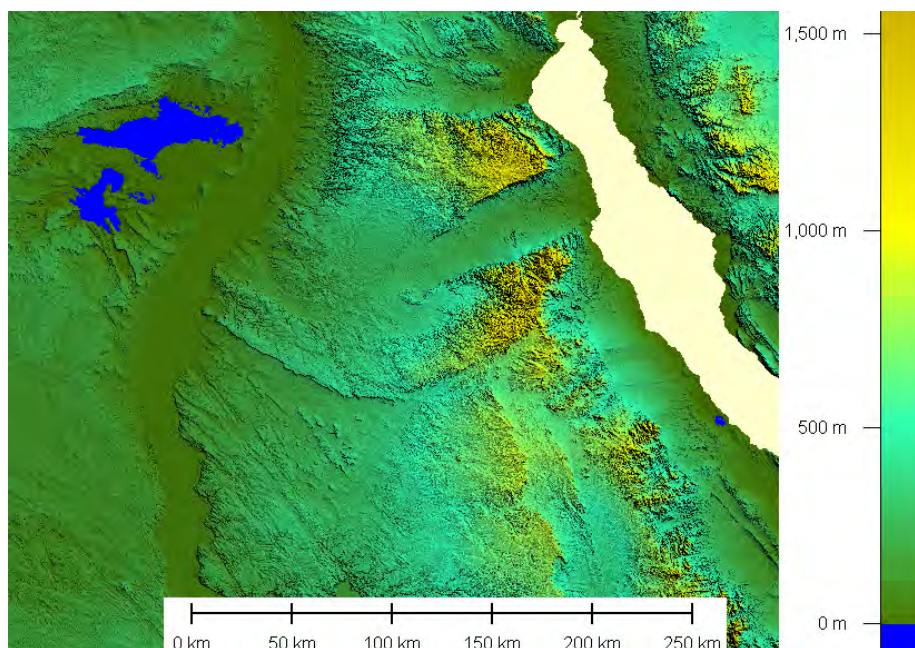


FIGURA III.3: *Modello SRTM dell'elevazione del terreno.*

III.4 Progetto Africover

Per poter effettuare una classificazione supervisionata delle immagini disponibili occorrono dei dati di riferimento, detti “verità” a terra, mediante i quali si

possano definire i siti di addestramento per l'algoritmo e le aree di controllo per verificare la qualità. A tal fine sono stati impiegati i dati del progetto *Africover* realizzato dalla FAO (*Food and Agriculture Organization*). Si tratta di un progetto di classificazione dei tipi di copertura ed uso del suolo sul territorio africano, nato per rispondere alle esigenze di informazione territoriale legate all'agricoltura, alla prevenzione delle calamità, alla pianificazione territoriale, alla gestione delle risorse idriche e alimentari, nonché allo studio dei cambiamenti climatici e della biodiversità.

Il prodotto è costituito da una collezione di *file* vettoriali in formato *shapefile* (uno *standard* per il dato vettoriale spaziale sviluppato e regolato da ESRI, *Environmental Systems Research Institute*), georeferenziati nel sistema UTM-WGS84. Ogni *shapefile* contiene le informazioni relative ad una macro-categoria, sotto forma di aree definite da poligoni. Ad ogni poligono è associata una codifica, la quale porta l'informazione relativa alle caratteristiche del suolo compreso nell'area del poligono stesso. Altri *shapefile* contengono polilinee che descrivono il tracciato di strade e corsi d'acqua principali. Infine un *file* contiene punti che definiscono il centro degli agglomerati urbani.

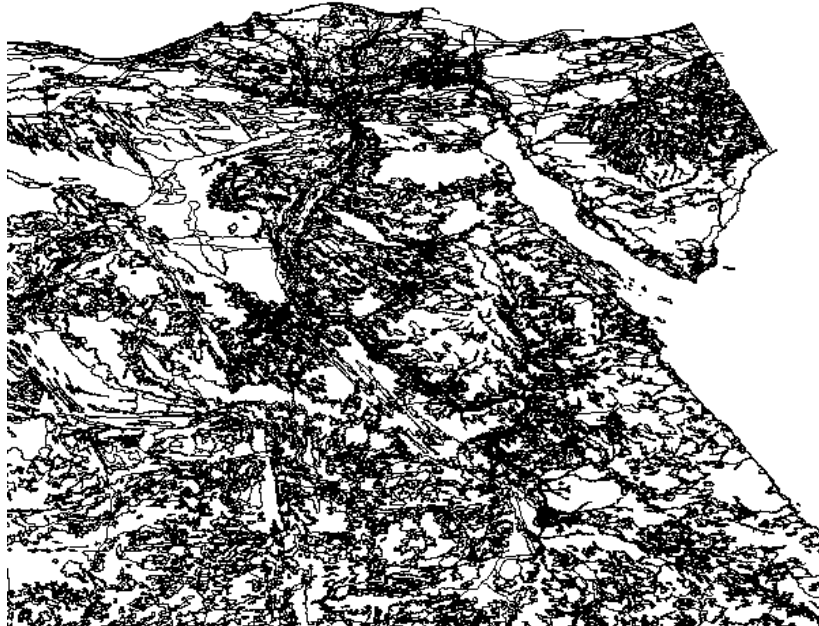


FIGURA III.4: *Poligoni di classificazione del progetto Africover.*

Dal punto di vista metrico gli obiettivi dichiarati del progetto sono un'accuratezza planimetrica non inferiore a 100 metri per i poligoni di copertura e non inferiore a 50 metri per gli elementi topografici fondamentali. In conformi-

tà con questi requisiti, i poligono sono stati generati mediante classificazioni di immagini Landsat TM.

La classificazione del suolo è di tipo gerarchico ed è stata definita completamente a priori, ovvero il suo impianto non è finalizzato direttamente ad una particolare zona geografica o ad uno specifico ambito applicativo, ma è stato progettato per essere applicabile a qualsiasi parte del mondo e per svariate finalità (DIGREGORIO e JANSEN, 1998).

Il sistema è standardizzato ed è indipendente dalla scala della mappa; l'accuratezza, infatti, è garantita dall'organizzazione gerarchica: una mappa a grande scala riporterà soltanto le classi di ordine più elevato, mentre una carta di maggiore dettaglio utilizzerà anche le sottoclassi di livello più basso.

La classificazione è aperta, nel senso che possono essere aggiunte nuove sottoclassi senza alterare l'impianto generale, purché le classi rimangano mutualmente esclusive.

Sono stati distinti otto gruppi fondamentali (DIGREGORIO e JANSEN, 1998):

- terreni coltivati
- vegetazione naturale e semi-naturale
- coltivazioni acquatiche ed aree periodicamente allagate
- vegetazione acquatica naturale e aree vegetate periodicamente allagate
- superfici artificiali ed aree pertinenti
- aree spoglie
- corpi idrici superficiali
- corpi idrici artificiali

Questi macro-gruppi sono stati internamente suddivisi in classi e sotto-classi organizzate in modo gerarchico. L'attribuzione di una porzione di suolo ad una classe avviene sulla base di un albero di discriminazioni operate sulla base di classificatori predefiniti. Ad esempio la prima scelta consiste nel distinguere tra presenza o assenza di vegetazione (di qualsiasi tipo).

Per informazioni più dettagliate è possibile consultare il sito internet del progetto (www.africover.org) o consultare il manuale di DIGREGORIO e JANSEN (1998).

III.5 Il software Envi

Per le elaborazioni è stato utilizzato principalmente il software commerciale ENVI (*ENVironment for Visualizing Images*), realizzato dalla *Research Systems Inc.*, nella versione 4.3.

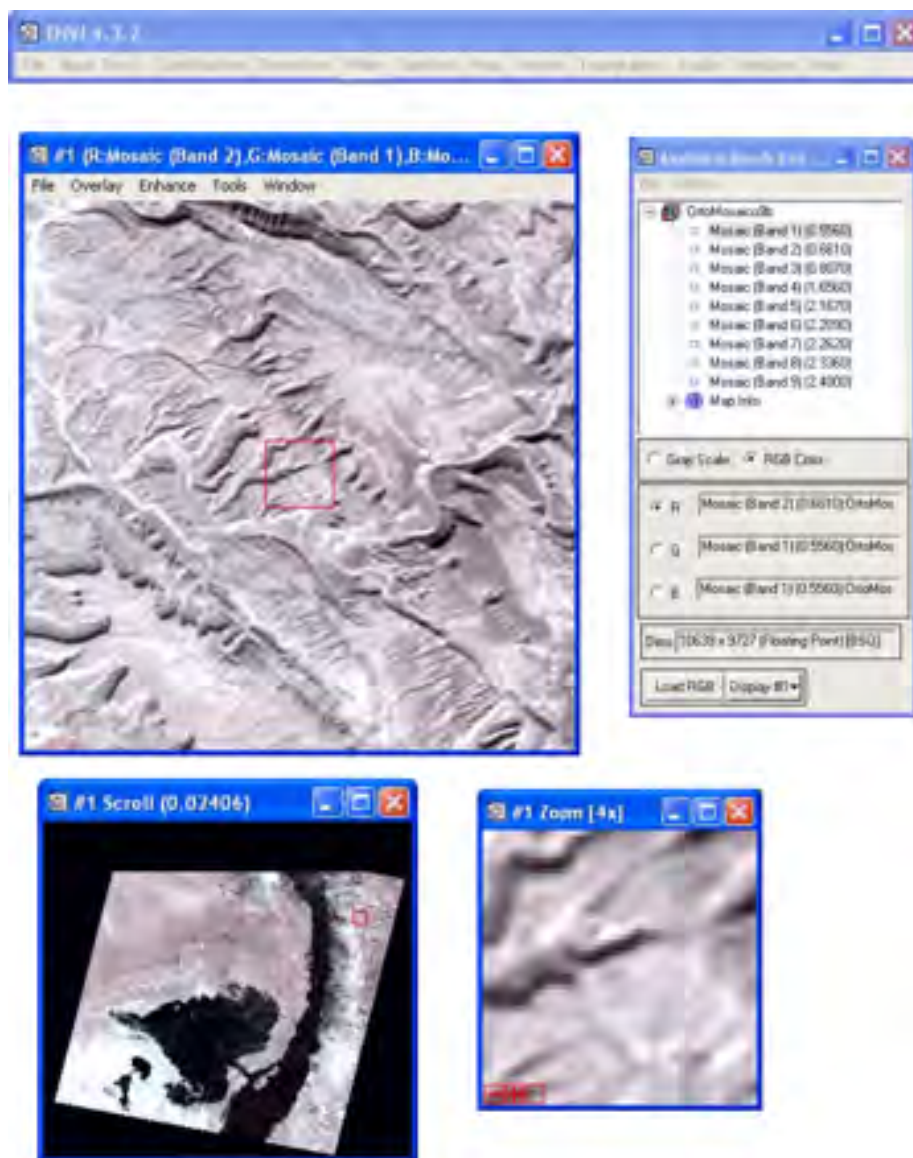


FIGURA III.5: *Interfaccia principale del programma ENVI.*

ENVI offre un'interfaccia attraverso la quale è possibile eseguire molte delle operazioni necessarie alla gestione ed all'interpretazione delle immagini. Sono inoltre implementate funzioni di registrazione e ortorettifica delle immagini, gestione di DEM e dati vettoriale.

Per quanto riguarda la classificazione delle immagini, sono disponibili numerosi metodi. Per una classificazione non supervisionata ENVI implementa

due algoritmi: *IsoData* e *K-Means*. Si tratta di due metodi di tipo iterativo che, partendo da classi uniformemente distribuite nello spazio, ne calcolano media e deviazione *standard* e assegnano i *pixel* restanti con il criterio della minima distanza. Ad ogni iterazione, media e deviazione *standard* vengono ricalcolate e si procede alla rassegna dei *pixel*. Mentre l'algoritmo K-Means prevede che il numero di classi sia fissato a priori, nell'*IsoData* tale numero può variare in base ai parametri inizialmente assegnati (numero di *pixel* minimo, massima deviazione *standard*, ecc.).

Normalmente, però, risulta conveniente optare per una classificazione supervisionata, basata su dati di "verità" a terra. Il *software* permette di definire direttamente sull'immagine una o più aree di interesse delimitate da polilinee o altre figure. Queste regioni vengono definite dall'operatore e sono impiegate dal programma come modello. Per questo motivo è opportuno scegliere zone dell'immagine molto omogenee e, ovviamente, di indubbia interpretazione. Inoltre le regioni di esempio non dovrebbero essere raggruppate in una sola zona, ma distribuite uniformemente nell'immagine. L'algoritmo confronterà quindi tutti i *pixel* dell'immagine con quelli appartenenti alle regioni modello ed assegnerà quelli simili alla medesima classe.

Il concetto di "*simile*" può essere tradotto operativamente in diversi algoritmi. ENVI ne supporta diversi. Alcuni sono basati su metodologie di tipo statistico, altri sono fisicamente basati. Gli algoritmi implementati sono i seguenti:

Parrallelepiped: Definizione di un parrallelepipedo ad n dimensioni, il lato è determinato in base alla deviazione *standard* dalla media di ogni classe. Se il *pixel* appartiene al parrallelepipedo di una classe viene classificato in quella. Se appartiene a più classi viene attribuito all'ultima esaminata. Se non appartiene a nessuna, resta non classificato.

Minimum Distance: Calcola la distanza euclidea di ogni *pixel* dal vettore media di ogni classe (intesa come sito di addestramento o libreria definita). Tutti i *pixel* sono assegnati alla classe più vicina. Se si specifica una distanza massima o una deviazione *standard* massima, alcuni *pixel* possono restare non classificati.

Maximum Likelihood: Assume una distribuzione normale per ogni classe ed ogni banda. Viene calcolata la probabilità che un *pixel* appartenga ad una determinata classe. Ogni *pixel* viene assegnato alla classe con la massima probabilità. Anche qui si può specificare una soglia al di sotto della quale lasciare il *pixel* non classificato.

Mahalanobis Distance: Metodo simile alla massima verosimiglianza, ma assume che le covarianza delle classi siano tutte uguali.

Spectral Angle Mapper: È un metodo fisicamente basato. In uno spazio n dimensionale (n bande) viene valutato l'angolo tra il vettore spettrale del *pixel* ed il vettore rappresentativo della classe. Il *pixel* viene assegnato alla classe con cui forma l'angolo minimo. Anche qui si può precisare la soglia.

Binary Encoding: Dati e classi vengono codificati in sequenze binarie (0 ed 1) a seconda che in ciascuna banda il valore sia al di sotto o al di sopra della media dello spettro. Si confronta il dato e le classi così codificate. Si assegna il *pixel* alla classe con il maggior numero di corrispondenze.

Nelle elaborazioni effettuate per questa tesi sono state impiegate prevalentemente la classificazione *K-means* tra le non supervisionate, la SAM e la *Maximum Likelihood* tra le supervisionate.

Il programma ENVI consente inoltre di effettuare una stima di tipo statistico sull'accuratezza raggiunta dalla classificazione, attraverso il calcolo della cosiddetta *matrice di confusione*. Al fine di questo calcolo è necessario definire manualmente altri poligoni, distinti da quelli utilizzati per la classificazione, da confrontare con i risultati della classificazione. Attraverso la matrice di confusione è possibile valutare quanti *pixel* appartenenti alle regioni di controllo (note) sono stati effettivamente assegnati alla classe giusta e quanti ad altre classi, nonché quanti *pixel* non appartenenti ad una specifica classe sono stati ad essa assegnati erroneamente.

In alternativa ai metodi supervisionati e non, finora esaminati, è possibile implementare un algoritmo di classificazione basato su una serie di discriminazioni definite dall'utente. Sulla base di una espressione booleana, che può cioè avere come risultato "vero" oppure "falso", ogni singolo *pixel* viene attribuito ad una classe oppure ad un'altra. Ciascuna delle due, poi, può essere sottoposta ad un ulteriore discriminazione. Si realizza cioè un *albero di decisioni* mediante il quale ogni *pixel* viene "smistato" alla classe di appartenenza. Le espressioni utilizzate possono contenere operatori aritmetici, funzioni matematiche (ad es. di tipo trigonometrico) ed utilizzano come variabili i valori assegnati al *pixel* per ciascuna banda di acquisizione dello spettro. Un esempio di discriminazione può essere valutare se il valore di ogni *pixel* in una determinata banda è maggiore o minore di una soglia assegnata.

Fino a questo momento si è considerata soltanto una classificazione basata

sulla definizione di aree note sulle quali “addestrare” l’algoritmo. È però possibile effettuare la classificazione anche sulla base delle firme spettrali. Confrontando il valore di un *pixel* ad ogni banda di frequenza disponibile con i valori tipici delle firme spettrali è possibile risalire al materiale presente sulla superficie. Il *software* ENVI consente di caricare questi dati mediante un apposito formato di file.

Una volta ottenuta l’immagine classificata è possibile applicare algoritmi di raffinamento, i quali consentono ad esempio di rimuovere eventuali *pixel* isolati o di definire meglio i contorni delle aree classificate.

Capitolo IV

Elaborazioni

In questo capitolo verranno presentati i risultati delle diverse elaborazioni eseguite sulle immagini satellitari con l'ausilio dei dati disponibili descritti nei capitoli II e III.

IV.1 Operazioni Preliminari

Come prima cosa è stata affrontata la correzione geometrica delle immagini. Sebbene le immagini ASTER del segmento L1B siano già georeferenziate (coordinate dei vertici assegnate) occorre ancora eseguire l'ortorettifica. A seguito di questa operazione, l'immagine ha le stesse proprietà geometriche di una cartografia.

Il software ENVI consente sia la generazione di un DEM attraverso l'analisi della coppia stereoscopica sulla banda 3 dell'ASTER e l'individuazione semi-automatica dei punti omologhi, sia l'importazione di un DEM esterno. In questo caso sono state utilizzate le funzioni specifiche di importazione dei *file* HGT del modello SRTM. I *file* relativi alla porzione di superficie compresa tra il 28° ed il 29° parallelo Nord ed il 30° e 32° meridiano Est (complessivamente sei *file*) sono stati uniti in un mosaico al fine di ottenere un DEM unico per tutta l'area. Le coordinate sono state convertite dalle originarie geografiche alle cartografiche UTM, mantenendo come *datum* il WGS84.

Per coprire l'area di studio sono state selezionate quattro immagini ASTER che presentavano le migliori caratteristiche, nel senso di copertura nuvolosa praticamente assente e condizioni di illuminazione e radianza simili. Per ciascuna delle quattro immagini è stata eseguita l'ortorettifica mediante il mosaico SRTM sulle tre bande VNIR (*Visible and Near InfraRed*) e sulle sei bande dello SWIR (*Short Wave InfraRed*). La precisione ottenibile sulle coordinate del *pixel* è del-

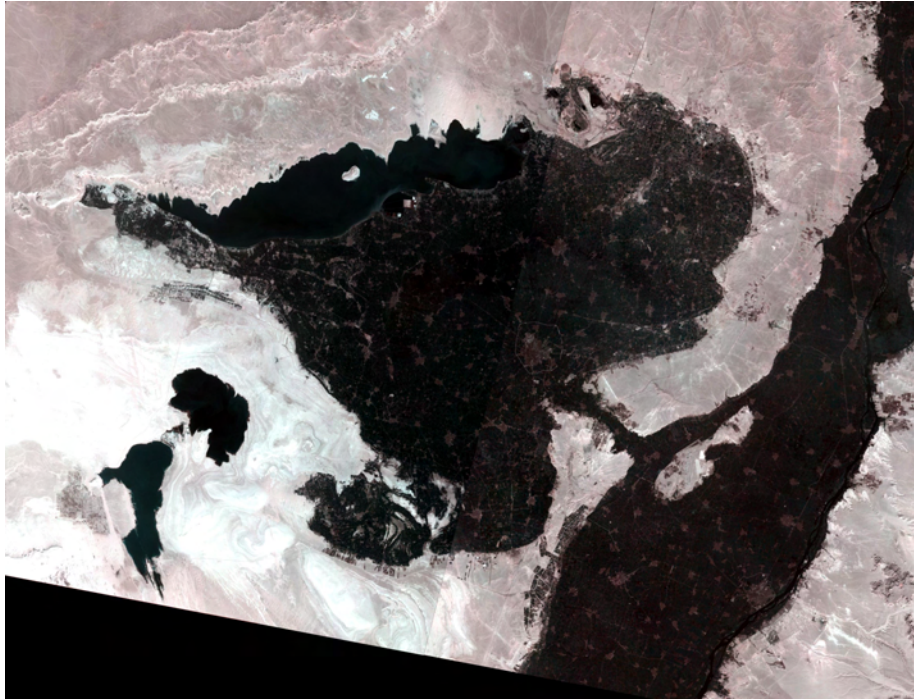


FIGURA IV.1: Mosaico di quattro immagini ASTER. Le due immagini che coprono il settore Ovest appartengono ad una strisciata del 13 Febbraio 2003, mentre le due che coprono la parte orientale sono datate 27 Luglio 2007.

l'ordine dei 50 m. A questo punto è stata eseguita l'operazione di *layer stacking* per unire in un'unica immagine le bande del visibile e dell'infrarosso (queste ultime sono state ricampionate a 15 metri dai 30 originali con algoritmo bilineare). Infine le quattro immagini con nove bande sono state composte in un mosaico (figura IV.1).

Poiché il tool *Google Earth* offre immagini satellitari ad alta definizione¹, si è eseguita un'ulteriore registrazione dell'immagine utilizzando le coordinate di cinque punti, definiti su incroci di strade ben riconoscibili su entrambe le immagini. Lo scarto quadratico medio calcolato dal software è pari a 0,67 pixel, corrispondenti a poco più di 10 metri.

IV.2 Classificazioni del suolo

Sono stati eseguiti numerosi e diversi tentativi di classificazione delle immagini allo scopo di evidenziare varie caratteristiche del territorio. Sono stati testati an-

¹L'accuratezza metrica dei prodotti *Google Earth* varia fortemente da zona a zona. Dal confronto tra le coordinate di alcuni punti ricavate da *Google* e dalla carta topografica in scala 1:50000 emerge una discrepanza dell'ordine di 30 m.

che diversi algoritmi di classificazione. Il software utilizzato è stato ENVI nella versione 4.3 (si veda il paragrafo III.5).

IV.2.1 Classificazione non supervisionata

La classificazione non supervisionata è stata utilizzata in primo luogo per evidenziare la distinzione netta tra l'area umida, comprendente i corpi idrici e le superfici irrigate e coltivate, e la zona desertica, caratterizzata da totale assenza di umidità e comprendente suoli di natura rocciosa e aree coperte da sabbia. Il risultato è riportato in figura IV.2.

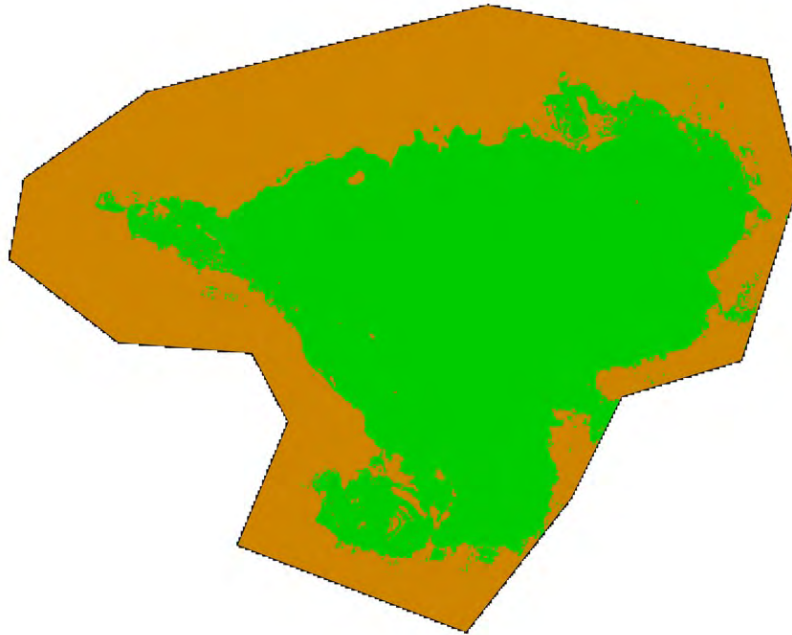


FIGURA IV.2: *Classificazione K-means a due sole classi. Con l'ovvio significato dei colori, risulta ben definita l'area dell'oasi. Sul risultato della classificazione sono stati applicati algoritmi di raffinamento tipo clump e Sieve, per eliminare pixel isolati.*

Per ottenere questo risultato è stata operata la classificazione con il metodo K-Means sulla banda 9 (SWIR), impostando come numero di classi 2 e come numero di iterazioni massime 10. Poiché l'area dell'oasi risulta ben definita è possibile ottenerne il valore numerico, dal momento che l'immagine di partenza è stata ortorettificata. Tale valore, ricavabile dalle statistiche di base sulle classi, risulta 1934 km² ed include la superficie del lago.

IV.2.2 Copertura dei terreni aridi

Il passo successivo è stato tentare di distinguere le diverse tipologie di copertura del suolo nella parte desertica dell'area di studio. In base alla legenda della classificazione del progetto Aficover della FAO (si veda il paragrafo III.4), si sono distinte tre classi: roccia nuda, suolo roccioso, copertura sabbiosa.

IV.2.3 Regioni di Interesse

Lo strumento ROI di ENVI permette di definire le “regioni di interesse”, ovvero dei *subset* spaziali a cui attribuire un significato specifico. Nel caso si voglia eseguire delle classificazioni con algoritmi supervisionati, occorre definire le classi ed attribuire manualmente alcuni *pixel* dell'immagine alle classi definite. Questa attribuzione può appunto essere eseguita mediante lo strumento ROI, che permette il tracciamento di poligoni e polilinee.

Utilizzando il *file shape* del progetto *Aficover* relativo al gruppo *bare soils* sovrapposto all'immagine da classificare, sono stati tracciati manualmente alcuni poligoni appartenenti alle tre categorie definite al paragrafo IV.2.2, in modo da fornire i dati di partenza per gli algoritmi supervisionati.

IV.2.4 Classificazioni supervisionate

Sulla base delle regioni di interesse definite appositamente sono stati testati diversi algoritmi. Particolare attenzione è stata dedicata agli algoritmi a massima verosimiglianza e al SAM (*Spectral Angle Mapper*).

Come termine di confronto è stata utilizzata una classificazione non supervisionata di tipo K-means con quattro classi (si è aggiunta una classe per le superfici d'acqua). Ci si aspetta che la classificazione supervisionata possa fornire risultati più attendibili.

Inizialmente le classificazioni sono state eseguite sull'intero mosaico composto da quattro immagini. Questo approccio però ha rivelato da subito un grosso limite: a causa delle differenze di radianza tra un'immagine e l'altra, la classificazione ha interpretato il bordo delle immagini come un confine tra diverse classi. Tali differenze sono dovute alle variate condizioni atmosferiche ed ambientali tra un'acquisizione e l'altra, riscontrate in particolar modo tra immagini appartenenti a strisciate satellitari differenti.

Si è allora pensato di limitare la classificazione ad ogni singola immagine, definendo apposite regioni d'interesse per ciascuna. In figura IV.3 è riportato il

risultato della classificazione SAM, condotta con una soglia di 0,05 radianti come massimo angolo spettrale accettabile tra il vettore spettrale del *pixel* ed il vettore rappresentativo della classe, su una porzione di territorio a Nord-Est dell'oasi. Sono state considerate ancora le tre classi di suolo arido più la superficie d'acqua. Se da un lato il fiume Nilo è stato correttamente classificato e anche alcuni tratti di un importante canale che corre in sinistra idrografica, dall'altro la distinzione tra le tre categorie di suolo non trova alcuna corrispondenza con i poligoni della FAO. Si nota inoltre che mentre il suolo coltivato è rimasto correttamente non classificato (non essendo stata prevista un'apposita classe), i centri abitati sono stati quasi interamente attribuiti alla classe suolo sabbioso. Questo errore può essere dovuto, almeno in parte, al fatto che gli edifici sono costruiti con i più svariati materiali, le cui firme spettrali non sono necessariamente distinguibili. Ancora una volta, comunque, il risultato non è stato all'altezza delle aspettative, non riuscendo a superare la pur modesta qualità della classificazione non supervisionata di riferimento.

Si è tentato quindi un diverso approccio. Anziché tentare di classificare le tre tipologie della FAO, si è tentato di utilizzare le diverse informazioni sulla litologia superficiale presenti in letteratura, per verificare se gli algoritmi possano riuscire a discriminare le diverse formazioni geologiche affioranti. Sulla base delle informazioni puntuali indicate nella figura II.10 (pag. 37) e delle indicazioni delle carte geologiche semplificate (figura II.8 a pag. 32 e figura II.3 a pag. 25), sono stati definiti alcuni *training sites* in corrispondenza delle aree apparentemente più omogenee.

La classificazione condotta sull'intero mosaico di immagini ha nuovamente riproposto le difficoltà legate alla differenza di radianza tra le diverse strisciate, come si evince dalla figura IV.4. La parte orientale risulta completamente inattendibile, mentre risultati più conformi alla realtà sono stati ottenuti nella parte occidentale. Pertanto tutte le considerazioni che seguono si riferiscono esclusivamente a quest'ultima porzione di territorio. Anzitutto si osserva una discreta corrispondenza con la mappa semplificata di figura II.8 per quanto riguarda l'ubicazione dei calcari eocenici. Questi affiorano infatti in una ristretta fascia a Nord del lago Qarun e nella zona denominata *Wadi Rayan* situata a Sud dell'oasi (si veda il paragrafo I.3.1). Il colore verde scuro indica calcari dell'Eocene medio, mentre la tonalità più chiara i depositi dell'Eocene superiore, caratterizzati da una maggiore componente sabbiosa. Purtroppo si osserva anche una certa confusione tra gli accumuli di sabbia sciolta e gli affioramenti eocenici, dovuta probabilmente al fatto che anche le sabbie sciolte saranno in prevalenza

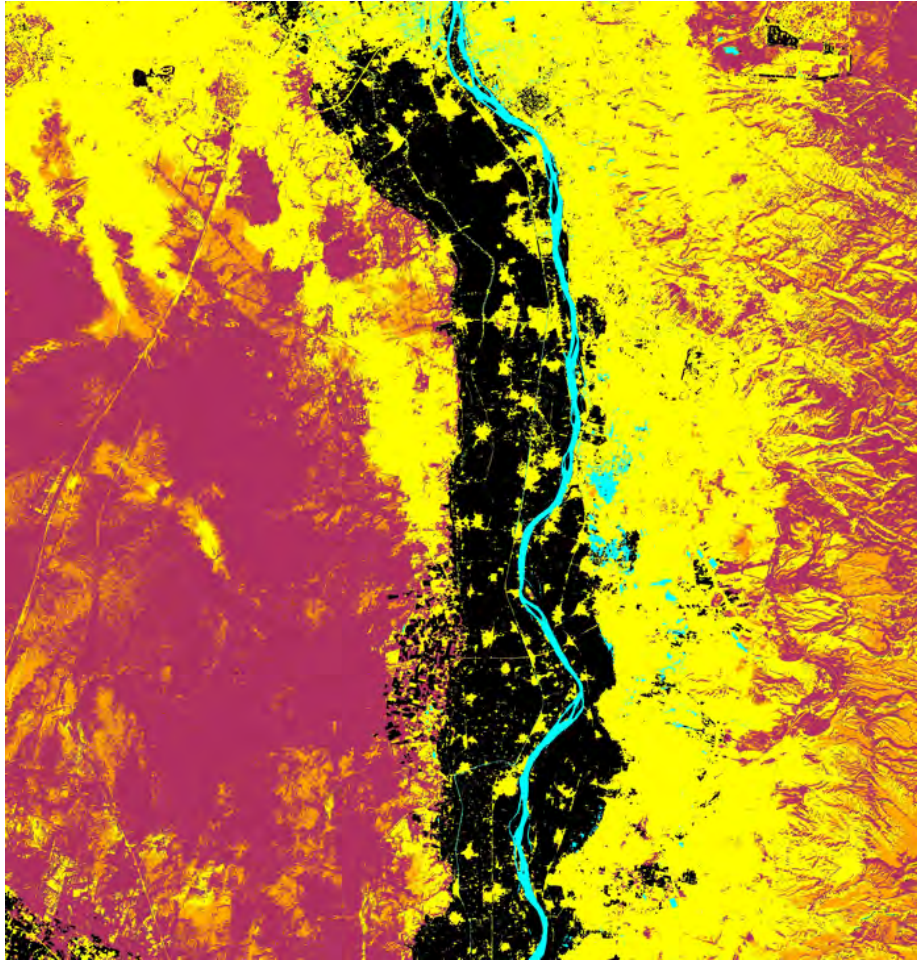


FIGURA IV.3: *Classificazione con il metodo SAM della porzione di territorio a Nord-Est dell'oasi. Il colore marrone indica la roccia compatta nuda, il giallo la sabbia, l'arancio il suolo e il ciano l'acqua.*

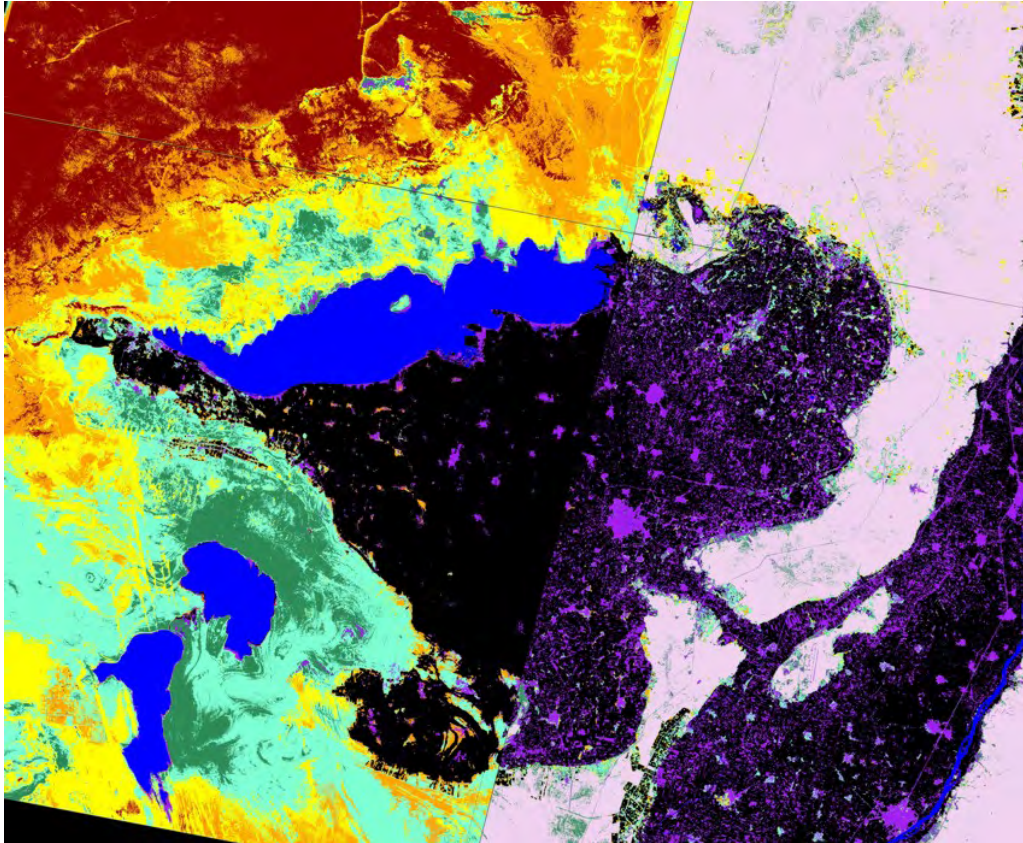


FIGURA IV.4: *Classificazione SAM condotta con training sites desunti dalle informazioni sulla litologia superficiale presenti in letteratura (si veda la sezione II.4). Le due sfumature di verde indicano i calcari eocenici, il colore marrone i depositi miocenici di arenaria e ghiaia, l'arancio indica le formazioni oligoceniche tra le quali affiorano anche le intrusioni basaltiche (colore viola), in rosa sono evidenziati i sedimenti alluvionali pleistocenici, infine in giallo le dune sabbiose.*

composte dai medesimi calcari.

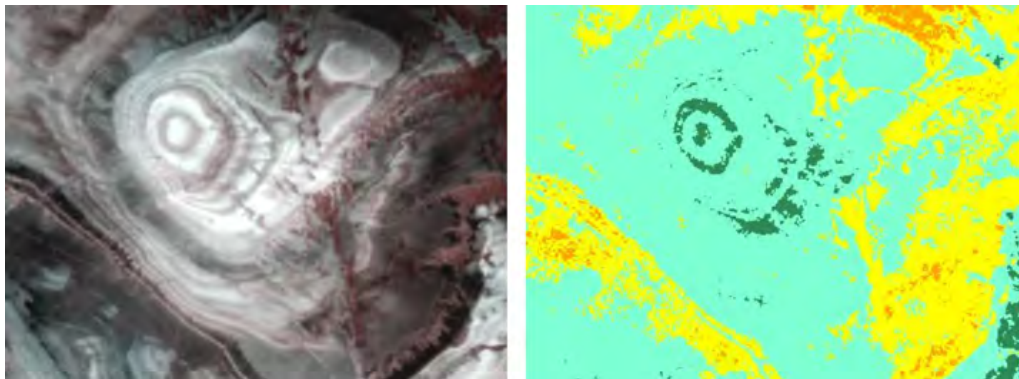


FIGURA IV.5: Il rilievo, situato nella zona denominata Wadi Rayan, è alto non più di 50 metri. L'immagine di destra è il particolare della classificazione SAM riportata in figura IV.4. Si noti come vengono colte le differenze nella stratificazione.

Un risultato degno di nota è la classificazione di un rilievo situato nella zona Wadi Rayan, riportata in figura IV.5. Sulle pendici del rilievo affiorano strati a diversa composizione. La classificazione sembra cogliere l'alternanza delle due tipologie di depositi eocenici. Come detto in precedenza, il colore verde più chiaro indica depositi con maggior componente sabbiosa: è dunque possibile che la classificazione rifletta l'alternanza di calcari bianchi e calcareniti grigie. Tuttavia, in assenza di precisi dati di controllo, non è possibile affermarlo con certezza.

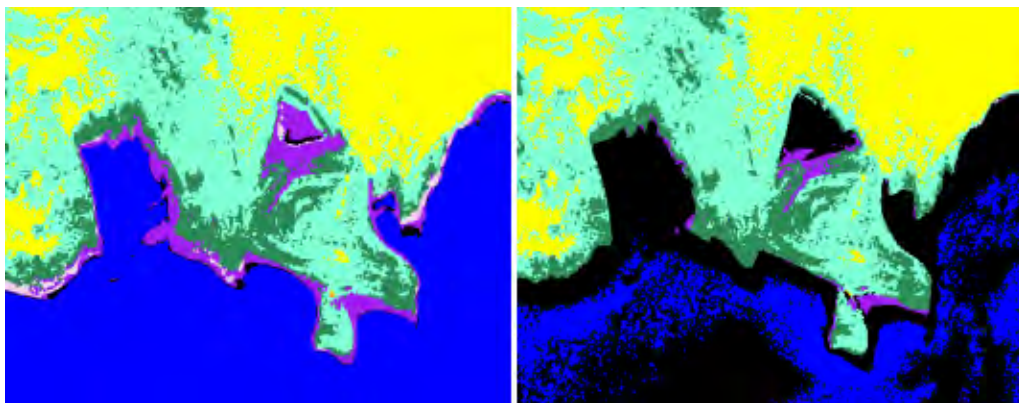


FIGURA IV.6: Classificazioni SAM sulla sponda settentrionale del lago Qarun. Nell'immagine a sinistra si nota la presenza della classe basalto (in viola) lungo la sponda. Nell'immagine di destra il problema è stato quasi eliminato mediante l'utilizzo di un algoritmo a soglie multiple.

Un'altro problema riscontrato nei primi tentativi di classificazione è stato la confusione tra il basalto e l'acqua del lago in prossimità della sponda (si veda la figura IV.6). Questo problema, che nasce evidentemente da una somiglianza spettrale tra gli affioramenti di basalto e l'acqua poco profonda (sulla cui radianza

influisce anche il fondale), è stato drasticamente ridotto attraverso l'impostazione di soglie multiple per l'algoritmo di classificazione. In pratica si è impostata una soglia ridotta per la classe basalti: nel caso del metodo SAM la soglia consiste nel massimo angolo spettrale ammissibile tra il *pixel* ed il vettore rappresentativo della classe; nel caso del metodo a massima verosimiglianza, invece, si tratta di una soglia di probabilità.

La figura IV.7 mostra il confronto tra una classificazione SAM con nove classi (sono state aggiunte la vegetazione e il suolo urbanizzato) ed una classificazione non supervisionata *K-means*, cui è stato imposto il medesimo numero di classi.

Come si può notare, l'algoritmo non supervisionato fornisce un risultato globalmente peggiore, tuttavia alcuni elementi appaiono più chiaramente. In particolare si noti come viene evidenziata la scarpata nord-occidentale, in cui affiorano gli strati della formazione oligocenica *Gabel Qatrani*. Sempre con riferimento alla carta semplificata di figura II.8 (pag. 32), sembra che la classificazione supervisionata fornisca una descrizione migliore degli affioramenti dei calcari eocenici. Nel complesso si osserva comunque una corrispondenza spaziale di massima tra le classi definite con i due metodi.

Ove possibile e significativo, è stata eseguita una prima verifica visiva dei risultati con l'ausilio delle immagini ad alta risoluzione del *tool Google Earth*, il quale offre anche la possibilità di visualizzare alcune fotografie a terra in un punto specificato. A titolo di esempio si riporta in figura IV.8 il caso delle dune lineari che raggiungono un lago artificiale dell'area Wadi Rayan, le quali, come si può vedere, sono state correttamente identificate dall'algoritmo SAM.

Evidentemente per una validazione vera e propria dei risultati occorrerebbe disporre di un maggior numero di dati di verità a terra, per essere in grado di definire aree di controllo sulle quali costruire una matrice di confusione.

IV.3 Elementi Lineari

Il secondo tipo di analisi riguarda la ricerca di elementi lineari che possano individuare antichi canali di irrigazione abbandonati. Questi studi di natura archeologica mirano a ricostruire l'aspetto e le condizioni ambientali di questa regione nel corso del tempo.

Sono state osservate le zone aride immediatamente a ridosso dell'oasi, considerando che le coltivazioni attuali hanno probabilmente obliterato eventuali tracce di antichi sistemi. Su indicazione degli archeologi sono stati esaminati con

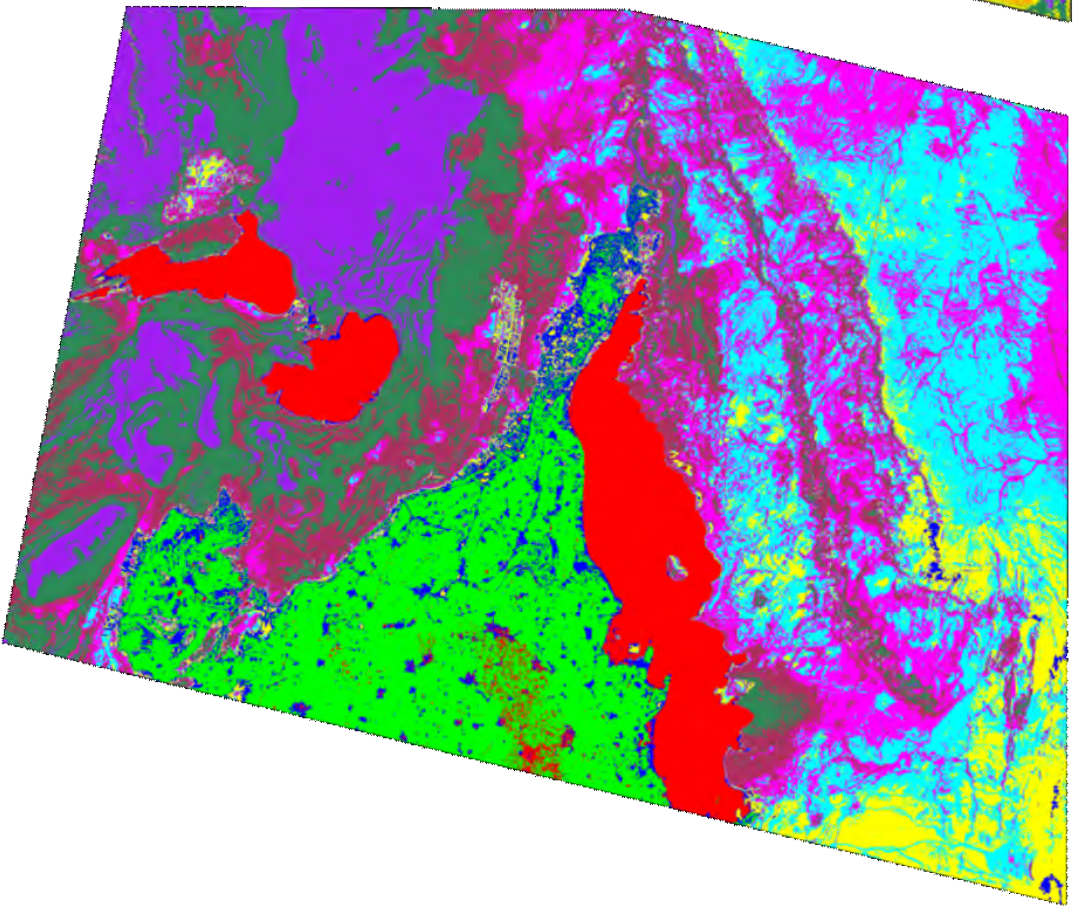
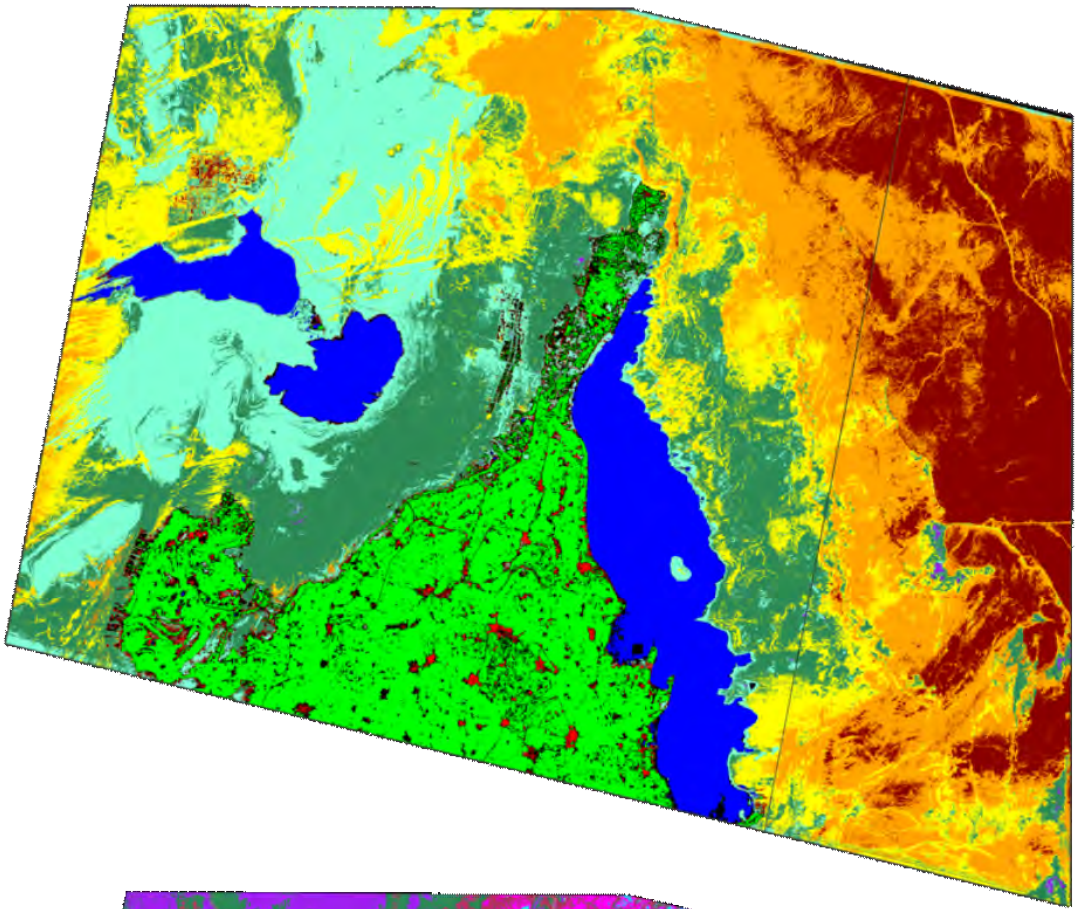


FIGURA IV.7: Sulla sinistra la classificazione SAM, a destra la K-means. In entrambe sono previste nove classi, anche se i colori per ovvie ragioni non corrispondono.

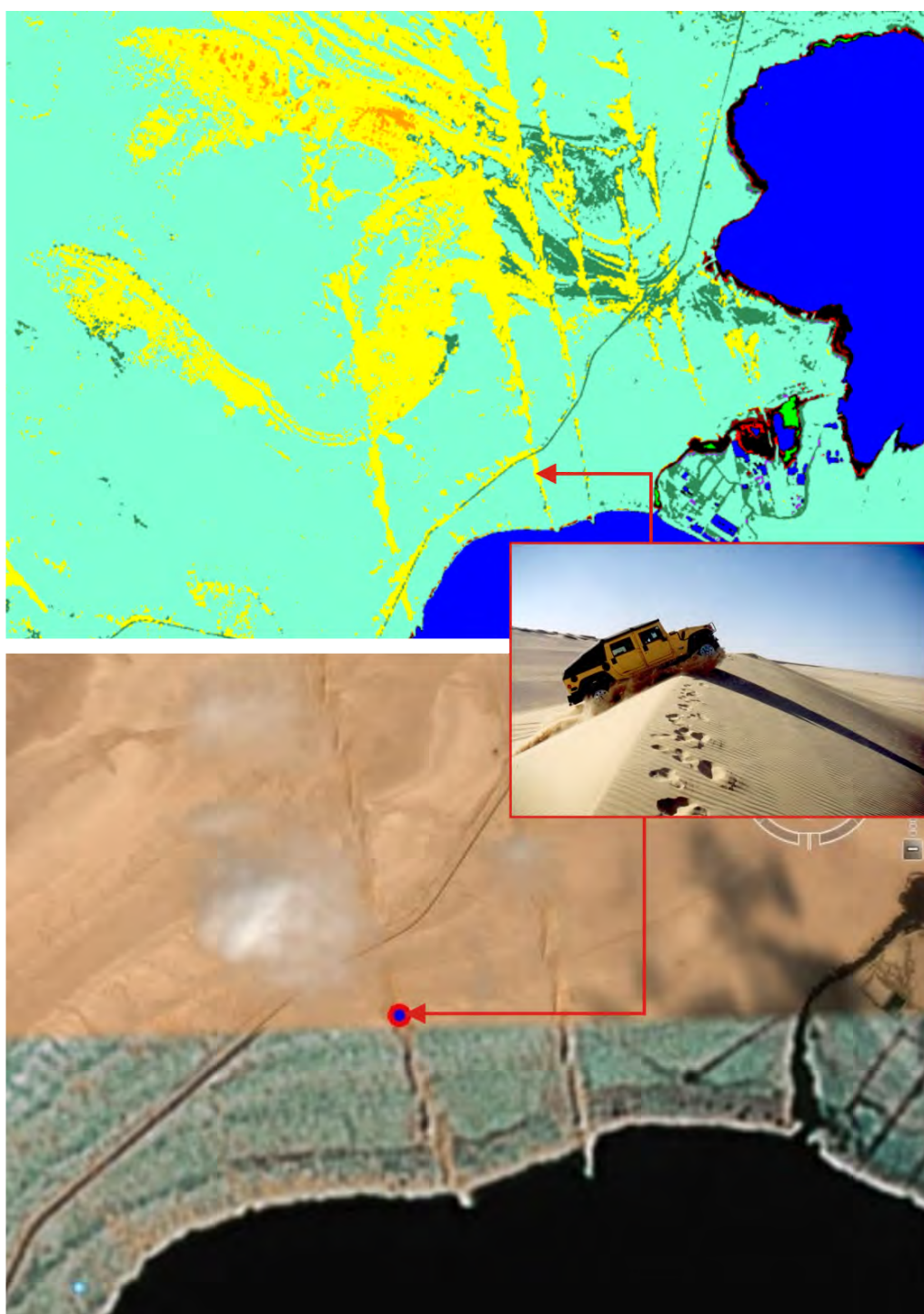


FIGURA IV.8: *In alto particolare della classificazione SAM di figura IV.7: si noti il colore giallo rappresentativo della classe sabbia sciolta. In basso la stessa zona nell'immagine disponibile su Google. Al centro sulla destra vista a terra della duna lineare. Si può concludere che l'area sia interessata da una serie di dune lineari, che si estendono, cioè, parallelamente alla direzione dei venti dominanti. Questa ipotesi può essere confortata dall'osservazione dei ripple presenti sulla superficie. Tale tipologia di duna è tipica di aree a bilancio di sabbia negativo.*

particolare attenzione alle zone comprendenti la fascia che divide l'oasi dalla valle del Nilo ed il bordo occidentale dell'oasi ai piedi della scarpata.

Al fine di porre in maggior risalto gli elementi lineari (di qualunque tipo) è stata eseguita una analisi delle componenti principali (PCA). Questa analisi consente di comprimere l'informazione utile contenuta nell'immagine in un numero di bande sintetiche minore del numero di bande originali (LILLESAND e KIEFER, 1987).

Si consideri uno spazio n -dimensionale, nel quale ogni dimensione è rappresentativa di una banda di acquisizione dell'immagine di partenza. Se si rappresenta ogni *pixel* come un punto, avente per coordinate il *digital number* in ciascuna banda, si ottiene una nuvola variamente distribuita nello spazio. Attraverso l'analisi della matrice di covarianza, è possibile individuare la direzione di massima variabilità del *data set*. Questa direzione è detta prima componente principale. La seconda componente sarà definita come la seconda direzione di massima variabilità e risulterà ortogonale alla prima. Analogamente saranno definite le successive. La posizione di ciascun punto può dunque essere espressa in un nuovo sistema di coordinate, definito dalle direzioni delle componenti principali. Il valore numerico di ogni nuova coordinata può essere inteso come *digital number* di una nuova banda sintetica.

Sebbene per mantenere l'intera informazione sia necessario un numero di bande sintetiche pari al numero di quelle originarie, si osserva che, per come sono state costruite, le prime componenti principali racchiudono la maggior parte della varianza. Pertanto il contenuto informativo di una ripresa viene ad essere concentrato in un'immagine sintetica costituita soltanto da poche bande. L'informazione contenuta nelle ultime componenti principali può essere normalmente considerata come rumore di fondo o disturbo. L'interpretazione di questa nuova immagine risulta spesso più agevole rispetto alla lettura della ripresa originale (JENSEN, 1986), perché molti elementi appaiono più nitidi e meglio definiti.

Prendendo come immagine di partenza quella ottenuta dal *layer stacking* comprendente le tre bande del VNIR e le sei bande dello SWIR, sono state calcolate nove componenti principali. Le analisi successive sono state condotte su un *subset* spettrale, limitato alle sole prime tre componenti, e spaziale, restringendo il campo di ricerca a quelle aree in cui risultavano visibili alcuni elementi lineari di incerta attribuzione.

A questo punto si pone il problema di come ottenere una classificazione di questi elementi che possa semplificarne la vettorializzazione. Sebbene nell'immagine ottenuta dall'analisi delle componenti principali alcuni di essi risultino

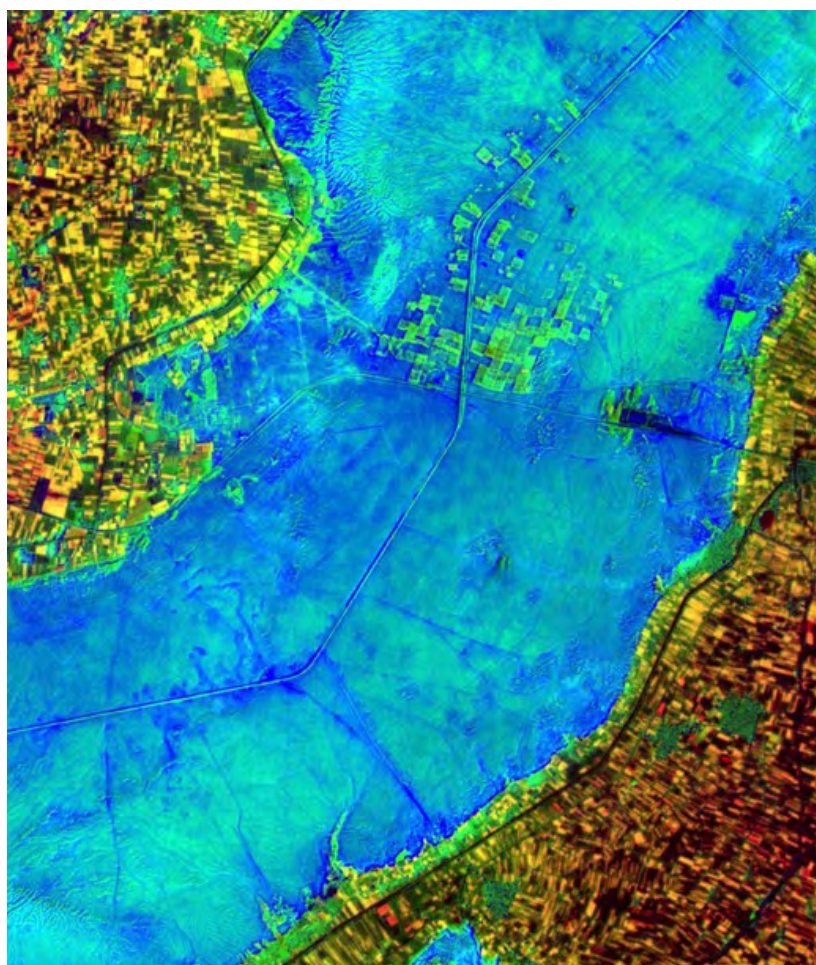


FIGURA IV.9: *Composizione cromatica delle prime tre componenti principali: sul rosso la seconda banda, sul verde la terza, infine sul blu la prima. Si noti che la parte arida assume un colore azzurro, mentre la parte coltivata assume tonalità tra il giallo ed il verde. Nella zona arida, spiccano alcuni elementi lineari di colore più scuro.*

particolarmente evidenti (si veda figura IV.9), l'utilizzo di ROI di tipo polilinea per addestrare un algoritmo supervisionato risulta del tutto inadeguato, in quanto non è in grado di isolare i pochi *pixel* appartenenti all'elemento lineare in una classe specifica.

Altrettanto inefficace si è rivelato l'impiego della funzione “*RX Anomaly Detaction*”, che in teoria dovrebbe appunto evidenziare anomalie radiometriche rispetto all'area circostante.

Si è allora pensato di ricorrere ad un filtraggio dell'immagine. Si è costruita una prima banda attraverso un filtro a passo basso gaussiano (supponendo gaussiana la distribuzione del *data set*) ed una seconda attraverso un filtro a passo alto. La maschera utilizzata è di 17 *pixel*, pari a 255 m. Il passo alto esalta le differenze radiometriche a piccola scala, quindi i dettagli minori, mentre il passo basso evidenzia le differenze a grande scala. Il successivo tentativo di classificazione è stato condotto su un'immagine composta da queste due bande più la banda tre del VNIR su cui non è stato applicato alcun trattamento.

Sono stati testati diversi algoritmi di classificazione: mentre i risultati forniti dalla massima verosimiglianza, dalla minima distanza e dalla distanza Mahalanobis sono simili, il risultato fornito dalla *Spectral Angle Mapper* appare ancora una volta il più accurato ed è riportato in figura IV.10.



FIGURA IV.10: *Classificazione SAM eseguita sull'area corrispondente alla parte centrale del divisorio tra la valle del Nilo e l'oasi del Fayyum. Sebbene permanga ancora del rumore, risultano ben evidenziati alcuni elementi lineari.*

In assenza di dati di verità a terra non è possibile tentare un'interpretazione dei risultati. In generale si può comunque affermare che, per il riconoscimento di eventuali paleocanali, può fornire indicazioni utili l'osservazione del modello digitale del terreno. Ad esempio in figura IV.11 è riportata una vista tridimensionale del terreno con una forte esagerazione verticale.

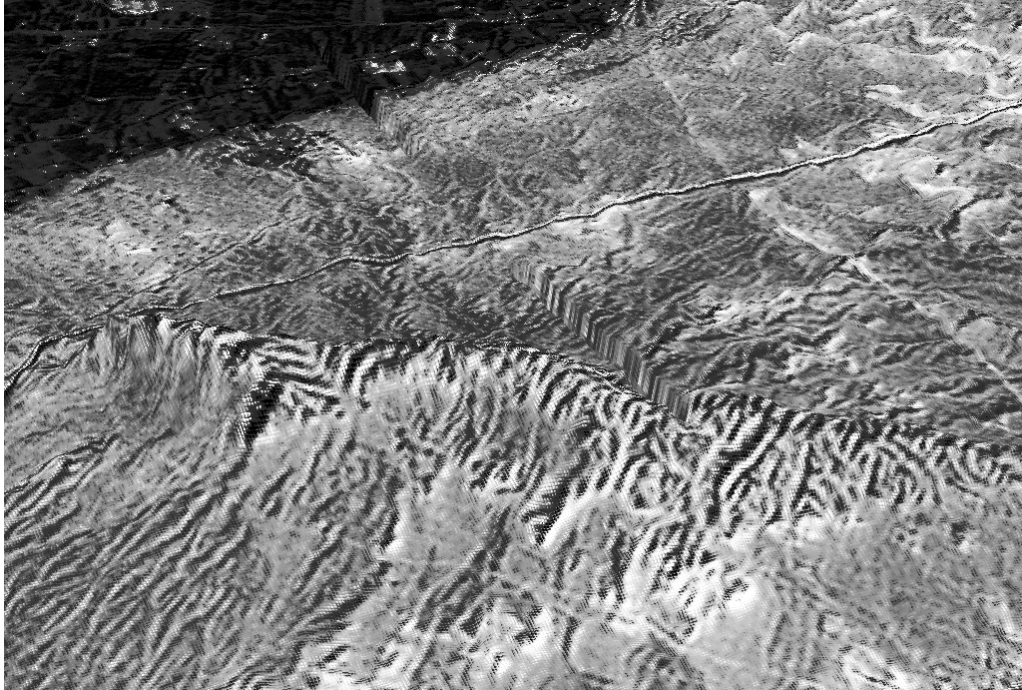


FIGURA IV.11: Superficie 3D ottenuta proiettando l'immagine ASTER sul modello digitale del terreno SRTM, con un'esagerazione verticale pari a 25X. Si noti una depressione a V che attraversa tutto il terreno interrompendosi soltanto in corrispondenza della strada.

Si osserva una depressione a V ben definita, di scarsa profondità ma di notevole larghezza, considerando che il passo del DTM è 90 m. Tale forma potrebbe anche indicare l'alveo di una canale, magari interrotto dal terrapieno realizzato per la costruzione della strada; in realtà si tratta banalmente di un artefatto del DTM, dovuto ad un *mismatch* di alcuni punti. Questo fatto è un'ulteriore dimostrazione, qualora ce ne fosse bisogno, della necessità di puntuali verifiche sul campo.

IV.4 Faglie

Dalla semplice osservazione diretta dell'immagine risultano immediatamente riconoscibili alcuni elementi geologici e morfologici. Ad esempio sul tratto di

scarpata che delimita l'oasi nel settore sud-occidentale sono ben visibili le testate degli strati emergenti. Queste stratificazioni sono interessate da sistemi di faglie, alcune delle quali facilmente riconoscibili.

Anche in questo caso il fatto di disporre di un'immagine ortorettificata consente di effettuare delle misurazioni. In figura IV.12 è riportato un esempio particolarmente evidente.

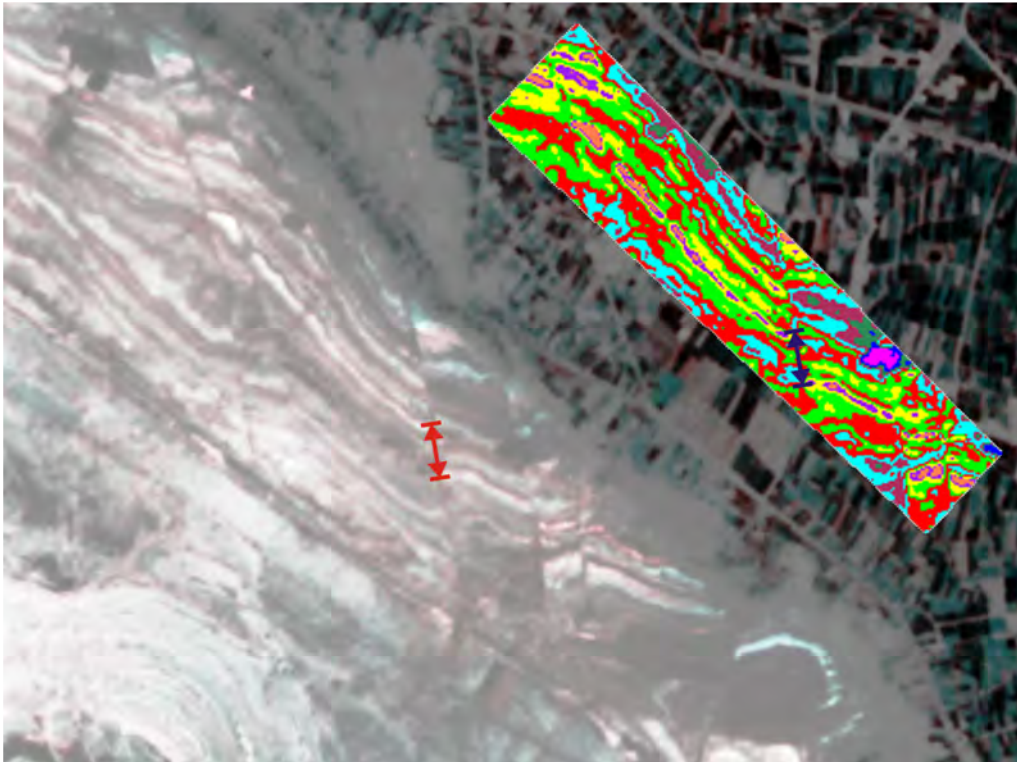


FIGURA IV.12: La scarpata che delimita l'oasi nella parte sud-occidentale. Sono ben visibili almeno cinque o sei faglie. Il rettangolo in alto a destra mostra una classificazione non supervisionata di tipo IsoData, condotta su un subset molto ristretto, al fine di identificare meglio gli strati corrispondenti tra i due lembi delle faglie. Nel punto indicato dalla freccia è stato misurato un rigetto in senso planimetrico di $350(\pm 15)$ metri.

Conclusioni

La tesi nasce da una collaborazione di ricerca, attiva da anni, tra il DISTART - Area Topografia ed il Dipartimento di Archeologia dell'Università di Bologna, impegnato da lungo tempo in scavi archeologici nella regione egiziana del Fayyum. All'iniziale interesse per l'uso di tecniche geomatiche e del telerilevamento nella validazione di ipotesi di tipo archeologico, si è affiancata una sperimentazione più ampia, atta a caratterizzare il territorio anche sotto altri aspetti.

Lo scopo di questa tesi è offrire un contributo alla creazione di un *database* multiscala di informazioni georeferenziate, che possa essere di supporto ad ulteriori approfondimenti sul territorio del Fayyum, la cui complessità, sia dal punto di vista geologico-ambientale, sia dal punto di vista storico-insediativo, è emersa con chiarezza ad ogni passo della ricerca.

Il lavoro svolto, pur non potendosi considerare esaustivo su una problematica così vasta, ha messo chiaramente in luce le potenzialità del telerilevamento, sia sul campo dell'ottico che del radar, nel supporto ad indagini multidisciplinari che interessano la geologia, l'archeologia e la ricerca sullo sviluppo del territorio.

Il raggiungimento degli obiettivi preposti è stato perseguito mediante l'utilizzo sistematico di algoritmi di classificazione su immagini satellitari a media risoluzione registrate ed ortorettificate. Le proprietà metriche di tutti i prodotti ottenuti consentono un'agevole implementazione di queste informazioni in un sistema informativo geografico (GIS). Le immagini classificate, tra l'altro, possono essere esportate in modo automatico in un formato vettoriale.

In assenza di dati di controllo, le classificazioni sono state condotte sulla base delle frammentarie (e di non sempre facile reperimento!) informazioni presenti in letteratura. I risultati sono stati quindi confrontati con quelli ottenuti da algoritmi non supervisionati e con i dati ricavabili dalla cartografia o da risorse di rete (es. *Google Earth*).

Per quanto riguarda la classificazione litologica è stata ottenuta una mappa della fascia desertica che circonda l'oasi, in cui sono distinte diverse tipologie:

sabbie sciolte recenti, arenarie mioceniche, calcareniti dell'Eocene superiore, calcari dell'Eocene medio, basalti tardo-oligocenici. L'interpretazione congiunta dell'immagine originale e dell'immagine classificata ha consentito, tra l'altro, il riconoscimento di interessanti caratteristiche, quali dune e sistemi di faglie, delle quali è stato possibile misurare il rigetto.

Inoltre è stata messa a punto una procedura per giungere ad una classificazione automatica di anomalie sul terreno che presentano una forma lineare. L'applicazione di questa procedura potrà rivelarsi utile per ulteriori indagini finalizzate alla individuazione di paleocanali, naturali o artificiali, ed alla ricostruzione dell'assetto idrografico nel passato.

L'attività di ricerca potrà dunque trovare prosecuzione futura nell'approfondimento di alcune ipotesi emerse nello svolgimento del presente lavoro, le quali richiedono anche dati di validazione a terra oggi non disponibili, e nell'impiego di ulteriori strumenti e dati multispettrali.

Bibliografia

- BARKER G., “L’archeologia del paesaggio italiano: nuovi orientamenti e recenti esperienze.”, in: *Archeologia Medioevale*, vol. XIII, 1986.
- CAMBI F., TERRENATO N., *Introduzione all’archeologia dei paesaggi*, Carocci, Roma, 1998.
- CAMPANA S., “Le immagini da satellite nell’indagine archeologica: stato dell’arte, casi di studio e prospettive.”, in: *Archeologia Aerea. Studi di Aerotopografia Archeologica.*, vol. 1, 2004.
- COX C., “Satellite imagery, aerial photography and wetland archaeology: an interim report on an application of remote sensing to wetland archaeology: the pilot study in Cumbria, England.”, in: *World Archaeology*, vol. 16-2: pp. 249–267, 1992.
- CÀSSOLA F., RUGGINI L.C., *Storia Antica delle Grandi Civiltà*, vol. I, La Nuova Italia, 1982.
- DIGREGORIO A., JANSEN L.J.M., “Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual.”, Rap. tecn., Environment and Natural Resources Service (SDRN), GCP/RAF/287/ITA Africover - East Africa Project, Soil Resources, Management and Conservation Service (AGLS), 1998.
- FORTE M., *I Sistemi Informativi Geografici in archeologia*, MondoGIS, 2002.
- HASSAN E.A., “Climatic change, Nile floods and civilization.”, in: *Nature and Resources*, vol. 34, 2: pp. 34–40, 1998.
- JENSEN J.R., *Introductory digital image processing. A remote sensing perspective.*, Prentice-Hall, 1986.
- LILLESAND T.M., KIEFER R.W., *Remote sensing and image interpretation (Second edition)*, John Wiley & Sons, 1987.

- MAGNAGHI A., *Il progetto locale*, Bollati Boringhieri, 2000.
- MARCOLONGO B., MASCELLARI M., “Immagini da satellite e loro elaborazioni applicate alla individuazione del reticolato romano nella pianura veneta.”, in: *Archeologia Veneta*, vol. I, 1978.
- MCCAULEY J.F., BREED C.S., SCHABER G.G., MCHUGH W.P., ISSAWI B., HAYNES C.V., GROLIER M.J., EL-KILANI A., “Paleodrainages of the Eastern Sahara - The radar rivers revisited (SIR A/B implications for a mid-Tertiary trans-African drainage system).”, in: *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-24, 4: pp. 624–648, 1986.
- MCHUGH W.P., BREED C.S., SCHABER G.G., MCCAULEY J.F., SZABO B.J., “Acheulian Sites along the Radar Rivers, Southern Egyptian Sahara.”, in: *Journal of Field Archaeology*, vol. 15, 4: pp. 361–379, 1988.
- PEREGO A., CREMASCHI M., ZERBONI A., “I dati da telerilevamento nella ricostruzione della paleoidrografia olocenica. Il caso di studio di Wadi Tanezzuft, Libia SO.”, in: , 2007.
- POPE K., DAHLIN B., “Ancient Maya wetland agriculture: new insights from ecological and remote sensing research.”, in: *Field Archaeology*, vol. 16: pp. 87–106, 1989.
- RODRIGUEZ E., MORRIS C.S., BELZ J.E., CHAPIN E.C., MARTIN J.M., DAFFER W., HENSLEY S., “An assesment of the SRTM topographic products.”, Rap. tecn., Jet Propulsion Laboratory, Nasa, 2005.
- SHOWALTER P.S., “A Thematic Mapper analysis of the prehistoric Hohokam canal system, Phoenix, Arizona.”, in: *Journal of Field Archaeology*, vol. 20, 1: pp. 77–90, 1993.

Bibliografia per il Fayyum

AREF M.A.M., “Classification and depositional environments of Quaternary pedogenic gypsum crusts (gypcrete) from east of the Fayum depression, Egypt.”, in: *Sedimentary Geology*, vol. 155: pp. 87–108, 2003.

BYRNES A., “Predynastic Faiyum, S. Cairo and the Western Delta”, Sito Internet, URL <http://www.faiyum.com/>, 2007.

DOLSON J., EL-BARKOOKY A., WEHR F., GINGERICH P.D., PROCHAZKA N., SHANN M., “The Eocene and Oligocene paleo-ecology and paleogeography of Whale valley and the Fayoum basin: implications for hydrocarbon exploration in the Nile delta and eco-tourism in the greater Fayoum basin.”, Rap. tecn., American Association of Petroleum Geologists, Egypt Petroleum Exploration Society, Society of Exploration Geophysicists, Egyptian Geophysical Society, European Association of Geologists & Engineers, URL http://www.searchanddiscovery.net/documents/cairo/images/cairo_lrg.pdf, 2002.

EVANS J.A.S., “The Faiyum and the lake Moeris”, in: *The Ancient History Bulletin*, vol. 5, 3: pp. 66–74, 1991.

GARBRECHT G., “Water storage (lake Moeris) in the Fayum depression, legend or reality?”, in: *Irrigation and Drainage Systems*, vol. 1: pp. 143–157, 1987.

GARDNER E.W., “The origin of the Faiyum depression: a critical commentary of new view of its origin.”, in: *The Geographical Journal*, vol. 74, 4: pp. 371–383, 1929.

GHABOUR T.K., DAELS L., “Mapping and monitoring of soil salinity of El-Fayoum depression by the aid of Landsat imagery.”, in: *Egyptian Journal of Soil Science*, vol. 33, 4: pp. 355–370, 1993.

- HAMBLIN R.D., “Stratigraphy and depositional environments on the Gabel El-Rus area, Eastern Faiyum, Egypt.”, in: *Birmingham Young University Geology Studies*, vol. 34, 1: pp. 61–83, 1987.
- HASSAN F.A., “Holocene lakes and prehistoric settlements of the Western Faiyum, Egypt.”, in: *Journal of Archaeological Science*, vol. 13: pp. 483–501, 1986.
- HASSAN M.M., MOHAMED M.H., EL-HAG I.A., “Sedimentological study on Quaternary sediments from North East Faiyum, Egypt.”, in: *Annals of Geological Survey of Egypt*, vol. XIV: pp. 217–229, 1984.
- HAWELA F.M., EL-KATTIB H.M., “Geomorphology and classification of soils of Wadi El-Rayan using Aerial Photography and remote sensing techniques.”, in: *Egyptian Journal of Soil Science*, vol. 30, 1-2: pp. 29–42, 1990.
- ISSAWI B., MCCAULEY J.F., “The Cenozoic landscape of Egypt and its river systems.”, in: *Annals of Geological Survey of Egypt*, vol. XIX: pp. 357–384, 1993.
- ISSAWI B., OSMAN R.A.K., MEIBED A.Z., “The Fayium depression - Qarun lake: a geological study.”, in: “The Second International Conference on the Geology of Africa”, Assiut University, vol. II, pp. 307–322, 2001.
- KATER E.A., ABD-EL-AAL T.S., ABOU-ARAB A.A., AWADALLA A.A., “Mineralogical and chemical composition of the main soil types in Fayoum area.”, in: *Egyptian Journal of Soil Science*, vol. 37, 2: pp. 153–174, 1997.
- MORINI A., *Il territorio del Fayyum nell'antichità: il sistema idrografico tra continuità e innovazione*, Tesi di dottorato, Dipartimento di Archeologia, Università di Bologna, relatore: Prof. S. Pernigotti, 2007.
- PHILLIPS W.R., “Ancient civilizations and geology of the Eastern Mediterranean.”, in: “Excavations at Seila, Egypt”, Religious Studies Center, Brigham Young University, cap. 1, pp. 1–18, 1988.
- SAID R., *The Geology of Egypt*, Balkema, 1990.
- SAMPSELL B.M., *A traveler's guide to the geology of Egypt*, The American University in Cairo Press, 2003.
- SWEDAN A.H., “Stratigraphy of the Eocene sediments in the Fayum area.”, in: *Annals of the Geological Survey of Egypt*, vol. V, XVIII: pp. 157–166, 1992.

TAMER A., EL-SHAZLY M., SHATA A., “Geology of El Faiyum Beni Suef region. Part I Geomorphology.”, in: *Desert Institute Bulletin*, vol. 25, 1: pp. 17–26, 1975a.

TAMER A., EL-SHAZLY M., SHATA A., “Geology of El Faiyum Beni Suef region. Part II Stratigraphy.”, in: *Desert Institute Bulletin*, vol. 25, 1: pp. 27–47, 1975b.