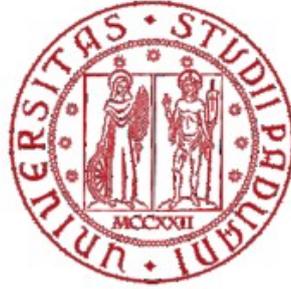


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



Facoltà di Scienze MM. FF. NN.
Dipartimento di Geoscienze
Direttore Prof.ssa Cristina Stefani

Tesi di Laurea Triennale in Scienze Geologiche
Classe L-34

Landform Analysis di un settore del deserto occidentale egiziano tra El Alamein e El Qattara

Relatore: Aldino Bondesan

Correlatore: Francesco Ferrarese

Laureanda: Cattò Silvia

n° matricola: 610302-SG

Anno Accademico 2012/2013

Indice

INTRODUZIONE

1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO

- 1.1 Inquadramento geografico dell'Egitto
- 1.2 Suddivisioni interne del territorio
- 1.3 Geologia dell'Egitto
- 1.4 Inquadramento dell'area di studio

2. METODOLOGIE APPLICATE

- 2.1 Geomorfometria
 - 2.1.1 DEM
 - 2.1.2 Interferometria da immagini radar (SRTM)
 - 2.1.3 Stereoscopia di immagini telerilevate (ASTER)
- 2.2 Pre-elaborazione
 - 2.2.1 Pre-elaborazione con ArcGis
 - 2.2.2 Pre-elaborazione con IdrisiGis
- 2.3 Elaborazione
 - 2.3.1 Derivate prime
 - 2.3.2 Derivate seconde
 - 2.3.3 Cluster Classes

3. INTERPRETAZIONE GEOMORFOLOGICA

- 3.1 Geomorfologia fluviale
- 3.2 Geomorfologia costiera
- 3.3 Geomorfologia strutturale
 - 3.3.1 Depressione di El Qattara
 - 3.3.2 Depressione di El Fayum

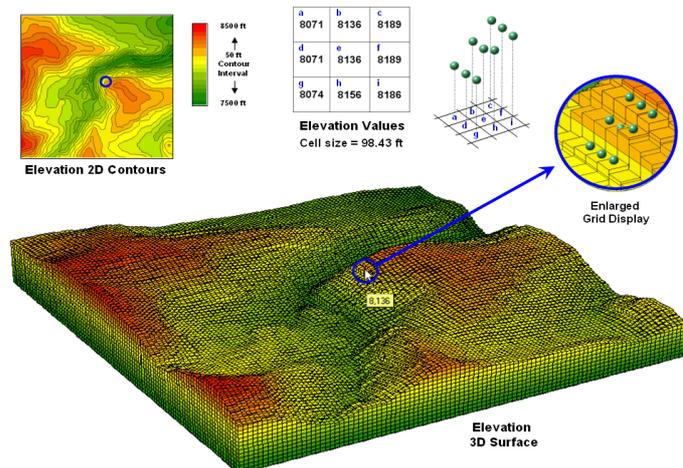
4. CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

INTRODUZIONE

Il presente lavoro si pone come scopo l'analisi delle principali forme che caratterizzano il settore del deserto occidentale egiziano compreso tra la città di El Alamein e la depressione d' El Qattara, circa 150 km a Sud-Ovest dalla prima.

Il supporto di per questo tipo di analisi è costituito dalla disponibilità dei DEM (Digital Elevation Model) ovvero dei modelli digitali della superficie che rappresentano la forma del terreno. La caratteristica di un DEM è fornire un dato di elevazione continuo in ogni punto: ciò può avvenire a partire da un insieme discreto di punti quotati attraverso l'applicazione di processi di interpolazione dei dati, come avviene nei TIN (Triangular Irregular Network) che si avvalgono di processi di triangolazione per creare una serie di faccette planari che approssimano la superficie. Nel caso specifico del presente lavoro, i DEM forniti sono di due tipi, SRTM e ASTER, scaricati rispettivamente dai siti internet <http://glovis.usgs.gov/> e <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>, che distribuiscono gratuitamente questi dati al pubblico.



*Un esempio di DEM
A sinistra: Elevazione in 2D
Al centro: Valori di elevazione inseriti nella griglia del DEM
A destra: Valori puntuali proiettati tridimensionalmente
Sotto: Modello tridimensionale continuo del terreno*

Le forme sono state rilevate tramite l'analisi in automatico dei DEM opportunamente pre-elaborati, mediante l'utilizzo di derivate prime, dalle quali si ricavano lo *Slope*, l'*Hillshade* e l'*Aspect* (rispettivamente inclinazione, lumeggiamento e esposizione), e di derivate seconde, ovvero le curvature, di cui si considerano la *Profile Curvature* e la *Plan Curvature* (rispettivamente la curvatura di profilo e la curvatura planare). Da queste analisi di base è possibile estrarre le principali forme, che possono essere successivamente analizzate e classificate.

Di seguito, viene fornito un breve inquadramento, dapprima generale poi più specifico, dell'area di studio, per poi procedere nel dettaglio all'illustrazione delle metodologie utilizzate.

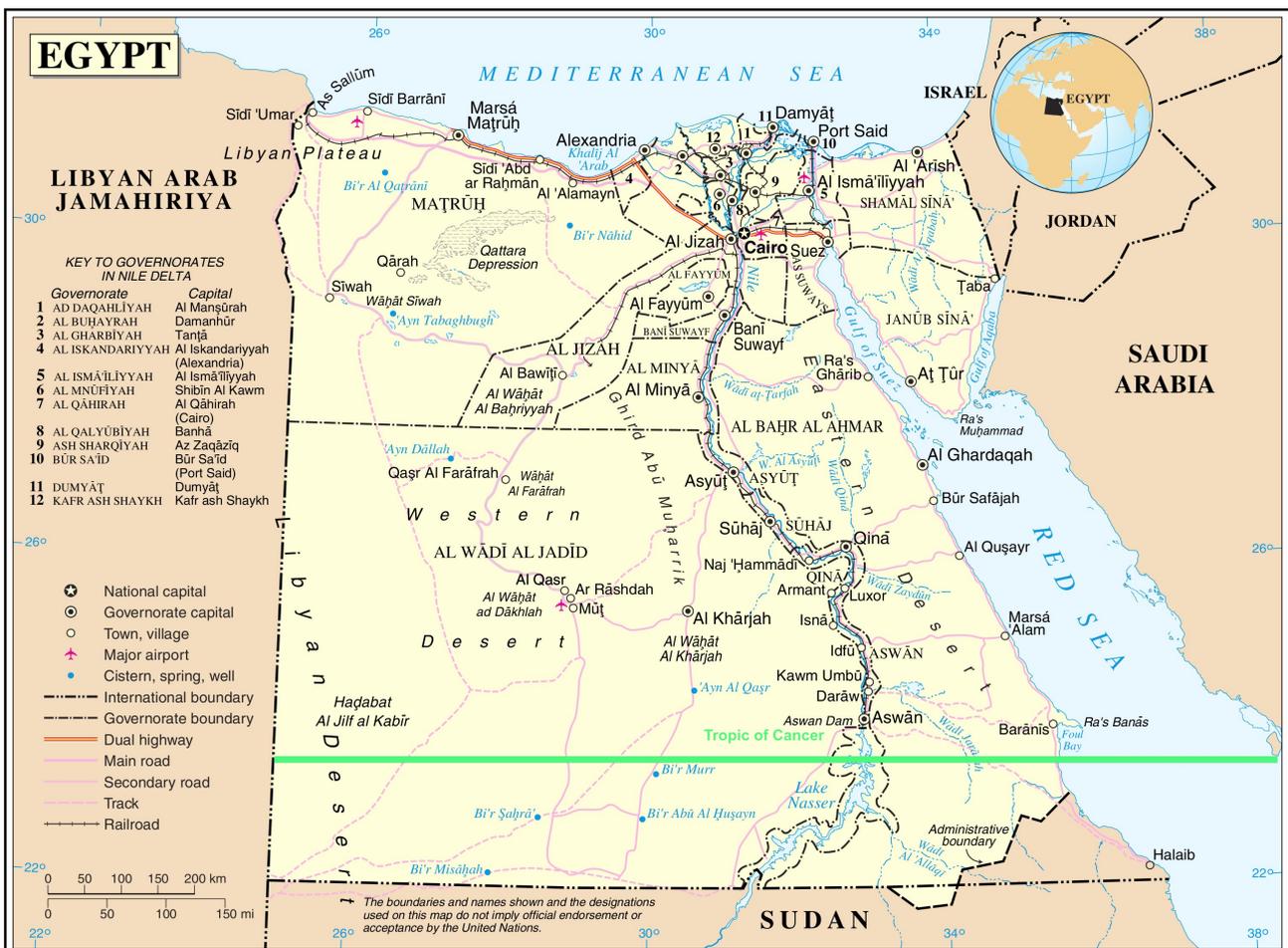
1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO

1.1 Inquadramento geografico dell'Egitto

La Repubblica Araba d'Egitto, denominata Misr in lingua autoctona, è uno stato collocato tra Africa ed Asia, che mette quindi in comunicazione questi due continenti; nello specifico, esso comprende sia una porzione dell'angolo nord-orientale africano, in gran parte occupata dalle sabbie del Sahara, sia la Penisola del Sinai, appartenente al Vicino Oriente. Questo rende effettivamente l'Egitto uno stato sia africano sia asiatico.

In generale, l'Egitto si estende tra latitudini di 22°N e 32°N e longitudini di 25°E e 37°E, e di conseguenza viene attraversato dal Tropico del Cancro (23° 26'), il che lo rende climaticamente una regione sia tropicale sia subtropicale. La sua forma può essere approssimata ad un quadrato, la cui massima lunghezza N-S è di 1.100 km, quella W-E è di 1.230 km, per una superficie totale di 1.001.449 km².

L'Egitto è delimitato a Nord dal Mar Mediterraneo, ad Ovest dalla Libia, a Sud dal Sudan, a Est da Israele, dalla Palestina e dal Golfo di Aqaba (Mar Rosso).



Carta geografica a scala regionale dell'Egitto, indicante i principali elementi presenti nella zona.

1.2 Suddivisioni interne del territorio

Geograficamente, l'Egitto può essere diviso in quattro regioni: la valle ed il delta del Nilo, il deserto occidentale, il deserto orientale e la Penisola del Sinai.

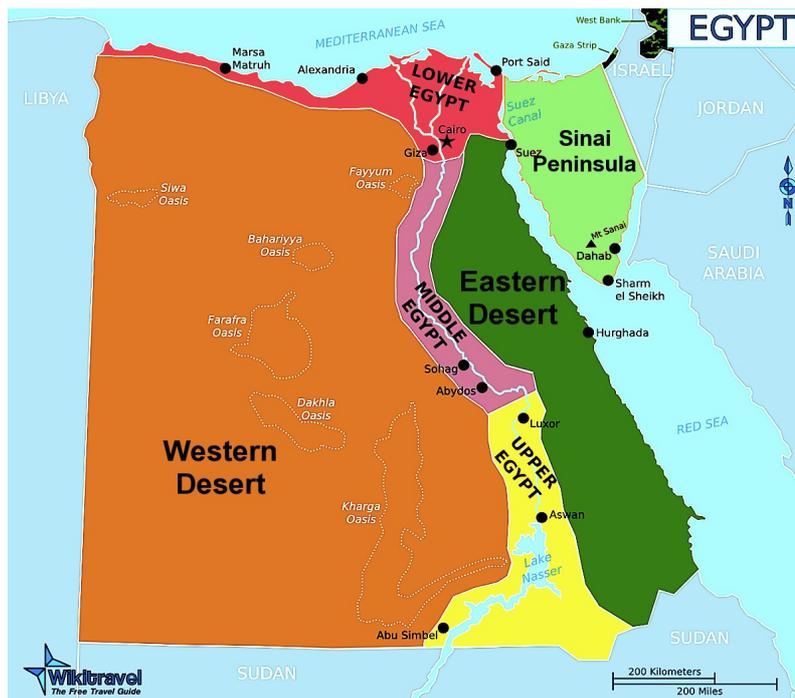
La valle ed il delta del Nilo formano la più piccola delle regioni dell'Egitto, con un'area di circa il 3,5% della superficie totale, ma l'importanza di questo fiume in una regione estremamente povera di corsi d'acqua rende questa zona la più peculiare di tutto lo stato.

Il Nilo attraversa tutto l'Egitto, correndo da Sud verso Nord per più di

1.530 km con un percorso meandriforme, scavando una valle che si allarga gradualmente procedendo verso Nord; durante il suo tratto egiziano esso non riceve acqua da nessun altro fiume perenne ma, soprattutto nella sua sponda orientale, sono visibili le tracce di diversi uadi, corsi d'acqua di carattere non perenne che, in seguito ad eventi piovosi sufficientemente intensi, vengono attivati e drenano le acque con regimi anche piuttosto turbolenti, come dimostrano i loro canali profondamente incisi, al punto da formare dei canyon. A Nord del Cairo la valle del Nilo si apre, formando il delta del fiume; in questo punto il Nilo si divide in due bracci, uno orientale detto Ramo di Damietta e uno occidentale detto Ramo di Rosetta.

Il deserto occidentale comprende tutto il territorio che si trova ad Ovest rispetto alla valle del Nilo, ed è la più grande delle regioni geografiche dell'Egitto, occupando più dei due terzi dell'area totale. In questa zona si possono trovare vasti mari di dune e piane sabbiose, penepiani e depressioni; infatti, numerose zone in quest'area sono al di sotto del livello del mare. Tra di esse spicca la vasta depressione di El Qattara, nel quale si ritrova il punto più basso dell'intero Egitto, con una quota di 145 m sotto il livello del mare.

La caratteristica più importante del deserto occidentale è il Grande Mare di Sabbia, parte nord-orientale del deserto libico, che presenta vaste dune longitudinali create a causa dei forti venti che spazzano la regione.



Suddivisione interna dell'Egitto



*La penisola del Sinai ed il deserto orientale
da The Gateway to Astronaut Photography of Earth*

Il deserto orientale comprende tutto il territorio che si trova ad Est rispetto alla valle del Nilo, ed è costituito da plateau e montagne che formano i picchi più alti dell'intero stato, con quote superiori ai 2.000 m sul livello del mare. Questa regione presenta inoltre condizioni più umide rispetto alla controparte occidentale, come si può dedurre dalla presenza di uadi piuttosto larghi, che drenano le acque sia in direzione del Mar Mediterraneo, sia in direzione del Mar Rosso.

La penisola del Sinai si colloca fra l'Africa e l'Asia, ed essendo circondata principalmente da mari (Mar Mediterraneo a Nord,

Golfo di Suez a Sud-Ovest, Golfo di Aqaba a Sud-Est) presenta caratteristiche peculiari e differenti dal resto della regione, con montagne e colline solcate da uadi a Sud e vaste piane sabbiose verso Nord.

Delle regioni alle quali è stato accennato, sole le prime due sono direttamente coinvolte nell'area di studio; tra di esse, è comunque il deserto occidentale ad essere presente in maniera preponderante.

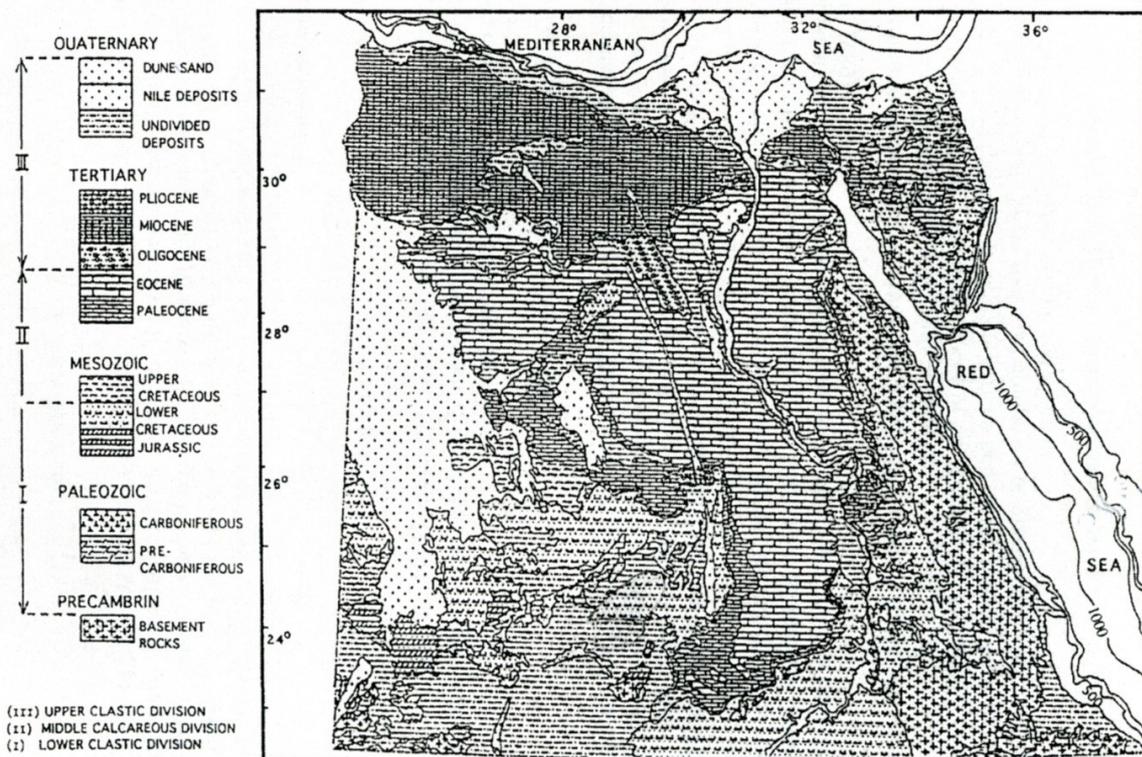
1.3 Geologia dell'Egitto

Le formazioni rocciose dell'Egitto possono essere divise in due categorie principali: il basamento cristallino e la copertura sedimentaria.

Il basamento cristallino è di età Precambriana (le rocce più antiche sono datate 2.7 Ga) e, pur affiorando piuttosto sporadicamente, è presente in tutto l'Egitto al di sotto della copertura sedimentaria. Questo basamento fa geologicamente parte dello Scudo Nubiano, separatosi dallo Scudo Arabo in seguito all'apertura del Mar Rosso.

Le rocce del basamento possono essere collocate in tre distinte unità tettonico-stratigrafiche (Hermina et al., 1989, da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari): un'unità Archeana e primo-Proterozoica fortemente metamorfosata, composta da rocce granoblastiche, graniti gneissosi e miloniti, un'unità tardo-Proterozoica composta da ofioliti di arco-isola con sottili intercalazioni marine di natura più o meno carbonatica, e un'unità Fanerozoica che comprende intrusioni magmatiche intraplacca essenzialmente alcaline e sporadicamente le loro controparti effusive.

Le rocce del basamento sono sovrastate da una copertura sedimentaria che può a sua volta essere suddivisa in tre unità (Said, 1962, da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari): l'unità Clastica Inferiore, di età Paleozoica fino a tardo-Cretacea, comprendente strati clastici (con intercalazioni lievemente calcaree) composti da sabbie depositatisi in diversi ambienti (marino, di spiaggia, fluviale), la cui origine è stata controllata principalmente dai cicli di trasgressione e regressione marina, l'unità Intermedia Calcareea depositatasi dal tardo-Cretaceo alla fine dell'Eocene e comprendente una serie di strati calcarei, e l'unità Clastica Superiore, la più recente e visibile sull'intero territorio egiziano. Di questa, i depositi del Cenozoico alla base sono sabbie fluviali o marine intercalate a sedimenti vulcanoclastici, quelli del Quaternario sono costituiti da sabbie, silt e argille depositatesi in periodo recente e quindi modellate dagli agenti geomorfologici attuali: si possono riconoscere forme eoliche come mari di sabbia e campi di dune, preponderanti nel territorio egiziano, forme fluviali, deposte essenzialmente dal Nilo e da uadi di varia importanza, e forme marine e costiere, consistenti in calcari oolitici, marne, evaporiti e silt. Una caratteristica interessante è il ritrovamento nell'unità Clastica Inferiore di uno strato di till di origine glaciale, che fa supporre che nel tardo-Carbonifero la zona si trovasse a latitudini subpolari.



(Fig. 2-1) Geological Map of Egypt (Simplified and modified from the Geologic Map of Egypt, scale 1:2,000,000).

Mappa geologica semplificata dell'Egitto
da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari

1.4 Inquadramento dell'area di studio

L'area in esame costituisce la parte più a Nord dell'Egitto, bagnata quindi dal Mar Mediterraneo, e comprende, come già accennato, una porzione della valle del Nilo ed un settore del deserto occidentale.

Nella parte nord-orientale della zona è possibile riconoscere il delta del Nilo, inciso dal Braccio di Rosetta; sono inoltre presenti tre lagune di delta, il Lago Borollos, il Lago Idku ed il Lago Maryut. Nella porzione costiera fra questi ultimi due sorge la città di Alessandria d'Egitto.

Subito ad Ovest di Alessandria si apre il Golfo degli Arabi: qui la costa mostra delle forme piuttosto particolari, con dorsali sottili alternate a depressioni allungate che ricalcano l'andamento della costa (*kurkar*). Nella parte più occidentale del Golfo sorge la città di El Alamein.

Nel settore sud-occidentale dell'area si estende la depressione di El Qattara, bordata a Sud da un ampio mare di dune. Nell'area sud-orientale si può osservare una parte della depressione di Fayum.



Mapa satellitare dell'Egitto con definizione dell'area di studio



Zona di studio con principali toponimi

METODOLOGIE APPLICATE

2.1 Geomorfometria

Lo scopo del presente lavoro è l'estrazione delle principali forme dell'area in esame; l'assegnazione di una forma ad una particolare classe geomorfologica è tuttavia un processo complesso, che richiede attente analisi e molta esperienza da parte dell'operatore. Per questo motivo, per quanto riguarda la parte prima parte di lavoro è più corretto parlare di estrazione di classi geomorfometriche, successivamente inserite nel contesto dell'area ed interpretate in chiave geomorfologica.

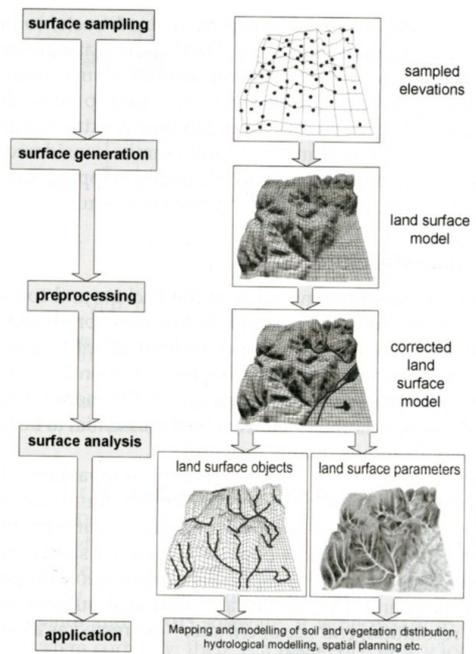
Con geomorfometria si intende l'analisi quantitativa della superficie a partire dai DEM, mediante l'utilizzo di specifici software, in cui ogni pixel contiene un dato di elevazione che può essere facilmente elaborato mediante l'utilizzo di specifici algoritmi che lavorano su matrici di varie dimensioni (i DEM, appunto) mettendo quindi in relazione i parametri di pixel vicini. Questo si basa sull'assunto che pixel vicini hanno un alta possibilità di far parte della stessa forma, mentre per pixel lontani questa possibilità è molto più remota.

Un valore molto importante è la spaziatura dei nodi della maglia, poiché essa determina la risoluzione. I principali elementi di superficie che possono essere estratti sono i pozzi, ovvero i punti di minimo altimetrico, i picchi, ovvero i punti di massimo, le linee di dorsale e di avvallamento.

2.1.1 DEM

Come già accennato, la base per la realizzazione di uno studio geomorfometrico è un DEM (Digital Elevation Model) che fornisca dati della superficie sulla quale si lavora.

Nel caso specifico, si è lavorato su due DEM diversi, ovvero SRTM e ASTER, con lo scopo di mettere a confronto le due metodologie di acquisizione dati per comprenderne i difetti ed i pregi.

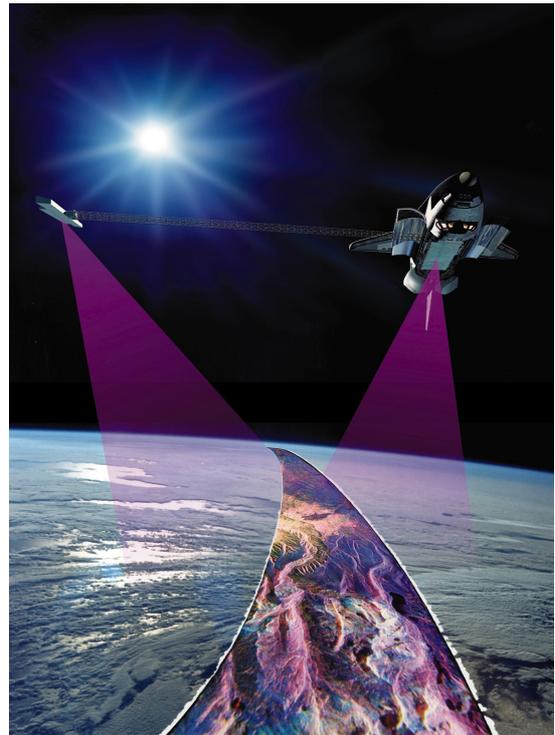


*Schema semplificato dei passaggi atti all'estrazione delle forme geomorfometriche
Da "Geomorphometry" di Hengl & Reuter.*

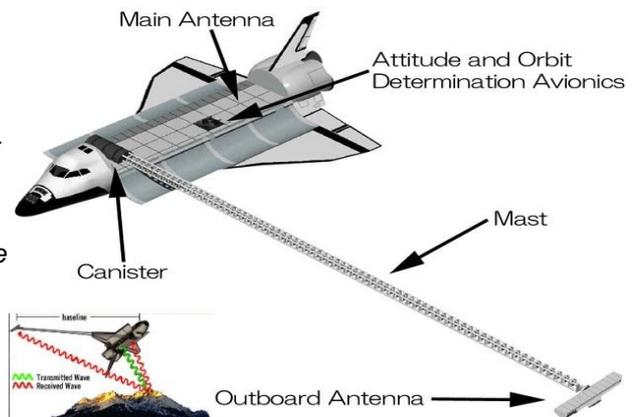
2.1.2 Interferometria da immagini radar (SRTM)

SRTM è un acronimo per Shuttle Radar Topography Mission, una missione iniziata ed ultimata nel febbraio del 2000 durante la quale lo shuttle Endeavour ha coperto tutta l'area tra il 60°N parallelo ed il 58°S parallelo, più dell'80% della superficie terrestre; l'acquisizione della topografia è avvenuta mediante l'uso di due antenne radar, che hanno registrato i dati con una risoluzione di 30 m (nel territorio USA) e di 90 m (nel resto del mondo). La risoluzione verticale è inferiore ai 16 m e risente di eventuali ostacoli che possono trovarsi sopra al suolo: fitte coperture vegetali o costruzioni antropiche possono sfasare i valori di elevazione anche di diversi metri.

La missione SRTM ha lasciato ampi spazi vuoti, che sono stati ricostruiti tramite algoritmi.



Principali accessori dello Shuttle Endeavour e modello di invio e ricezione del segnale



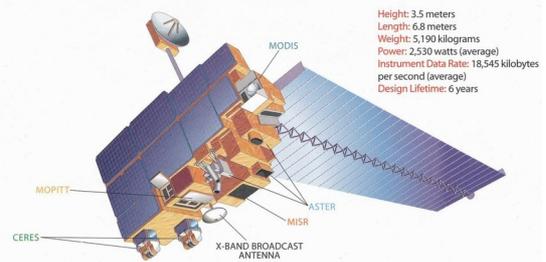
Disponibilità di DEM SRTM con risoluzione 30 m del territorio europeo. Le aree mancanti non sono state acquisite a causa della carenza di energia alla fine della missione. Da "Geomorphometry" di Hengl & Reuter.

2.1.3 Stereoscopia di immagini telerilevate (ASTER)

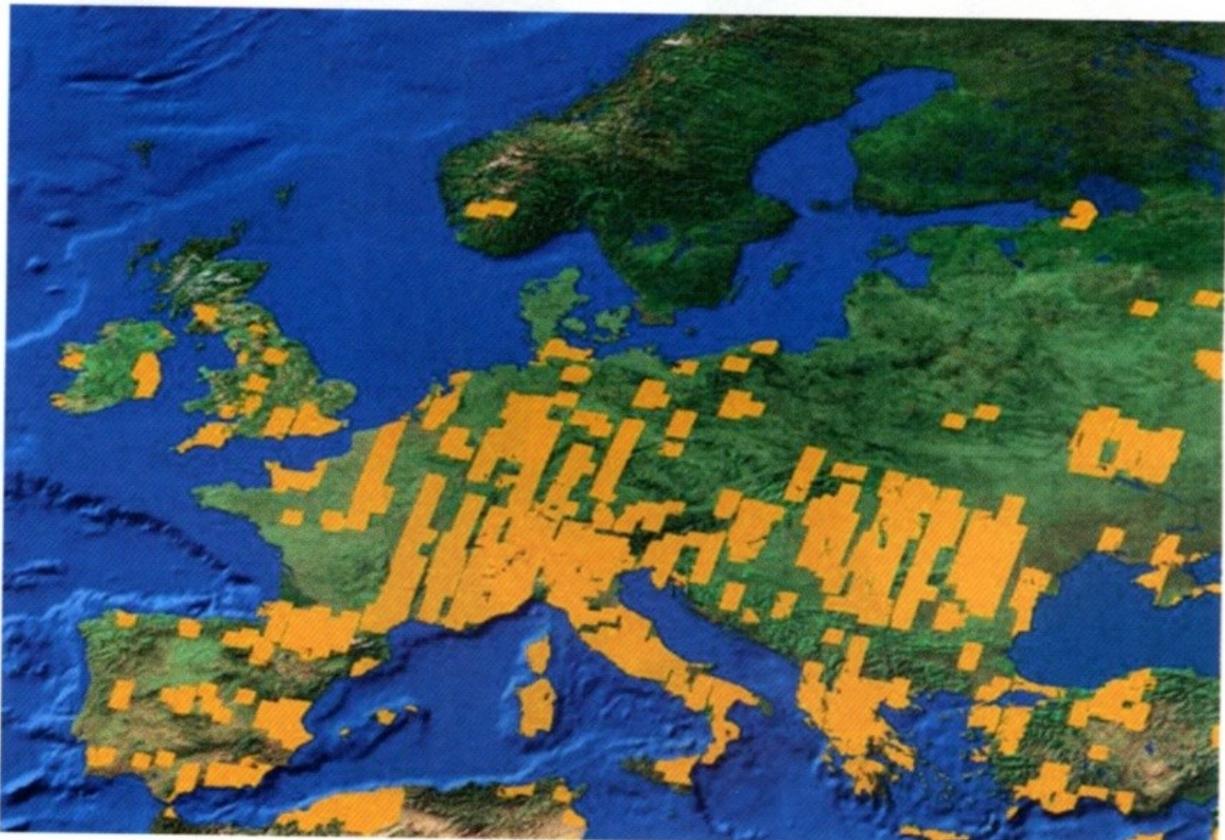
Il termine ASTER, invece, viene utilizzato per identificare l'Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer, uno strumento montato a bordo del satellite Terra lanciato nel 1999; esso possiede un sottosistema dotato di due telescopi, il primo collocato in posizione nadirale, il secondo orientato all'indietro di 27.7°. I dati sono acquisiti con lunghezze d'onda VNIR (Visible and Near InfraRed, 400-1400 nm), SWIR (Short-Wavelength InfraRed, 1400-3000 nm) e TIR (Thermal InfraRed, 8000-1500 nm); allo scopo della costruzione di un DEM sono però utilizzate le immagini acquisite in lunghezze VNIR.

La particolare configurazione dei telescopi permette l'acquisizione stereoscopica della scena, della quale si possono ricavare le elevazioni e la conseguentemente realizzare dei DEM con un'accuratezza verticale variabile da 7 a 50 m e una risoluzione da 15 a 30 m.

Terra and Its Five Climate-Monitoring Sensors



Il satellite Terra ed i suoi accessori. Visibili i due telescopi per la realizzazione di ASTER.



Disponibilità di DEM ASTER con risoluzione 30 m del territorio europeo (prima del gennaio 2006)
Da "Geomorphometry" di Hengl & Reuter.

Entrambi i metodi utilizzano come sistema di riferimento il WGS84.

2.2 Pre-elaborazione

La fase di preelaborazione dei dati consiste nella preparazione dei DEM per la successiva analisi geomorfometrica. L'obiettivo di questa prima fase è ottenere una corretta inquadratura e georeferenziazione dei DEM, ed il loro filtraggio, atto sia ad eliminare eventuali errori sistematici, sia a ridurre per quanto possibile i "rumori di fondo".

In questa prima fase sono stati utilizzati due programmi: ArcGis™ ed IdrisiGis™.

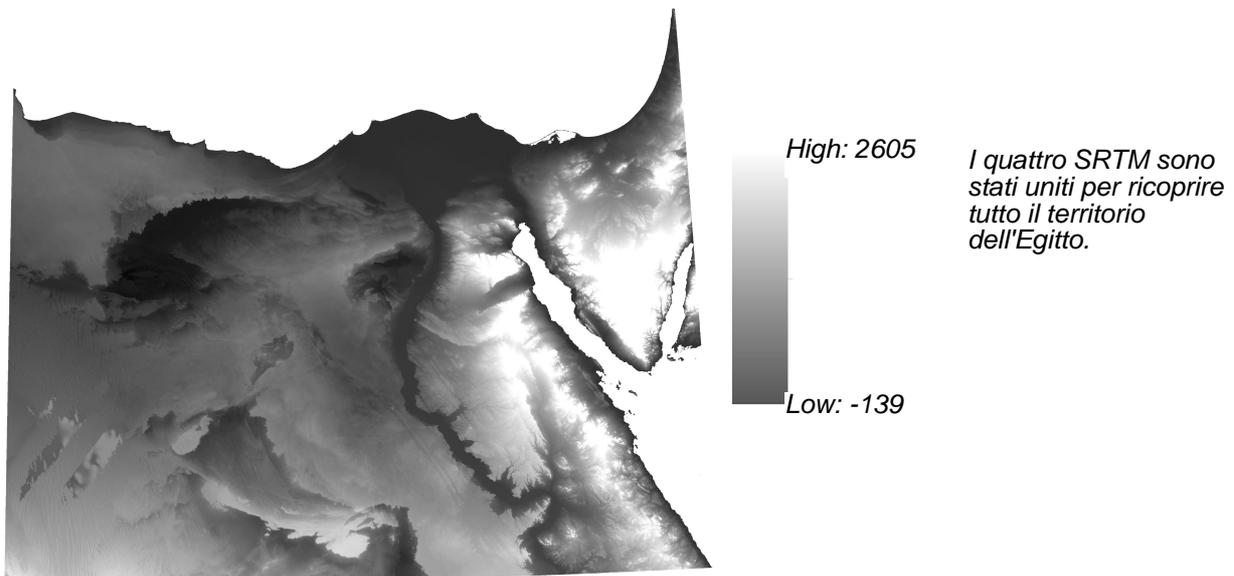
ArcGis™ è una raccolta di software che permettono l'importazione (o la creazione stessa) di DEM e la loro rielaborazione mediante una vasta serie di tools contenenti una serie di algoritmi geomorfometrici che permettono l'estrazione delle forme superficiali. Questo software risulta particolarmente indicato per DEM con dimensioni importanti e numerose serie di parametri.

IdrisiGis™ è costituito da un'interfaccia principale che permette di accedere a svariati moduli atti all'analisi dei dati topografici per ricavarne le forme principali. Il software è ottimo per le operazioni di filtraggio e per l'estrazione delle Cluster Classes.

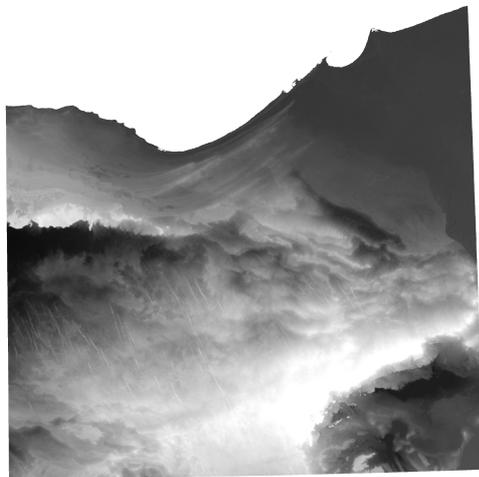
In generale, si può dire che entrambi i programmi sono strumenti molto potenti per la raccolta, archiviazione, analisi e visualizzazione di dati GIS, con la differenza che ArcGis offre prestazioni visive eccezionali mentre Idrisi, pur

2.2.1 Preelaborazione con ArcGis

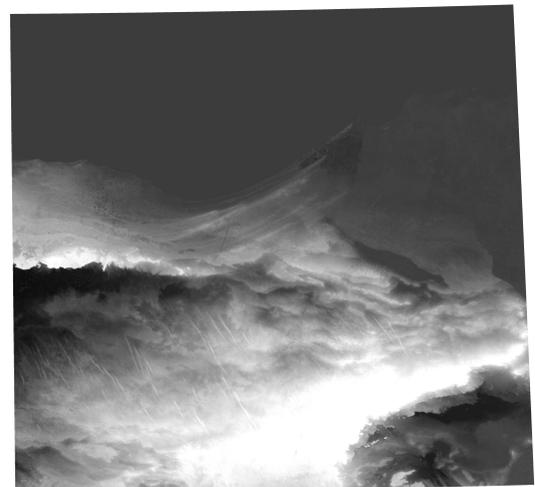
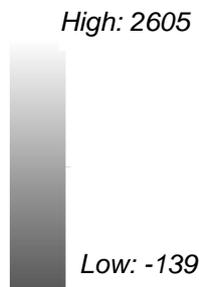
Inizialmente, sono stati elaborati i DEM SRTM della zona in esame, scaricati dal sito <http://glovis.usgs.gov/>. Gli SRTM erano quattro e, per consentire una più rapida ed efficace elaborazione sono stati uniti in un unico DEM tramite il comando Mosaicing di ArcGis.



In seguito si è provveduto a scaricare il file ASTER della zona, di dimensioni molto minori ma con risoluzione maggiore. Per far sì che la zona in esame coincidesse nei due DEM, questi sono stati sovrapposti e l'SRTM è stato ritagliato su modello dell'ASTER, più piccolo.



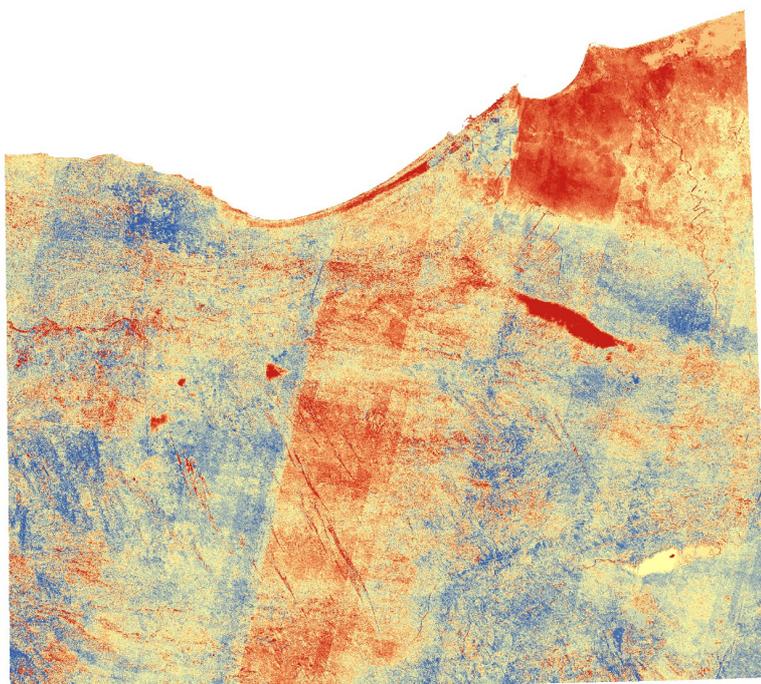
SRTM della zona in esame



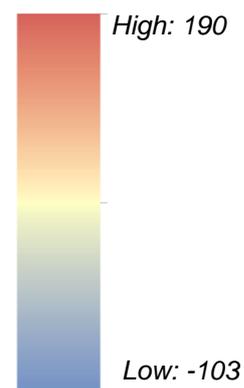
ASTER della zona in esame

Entrambi i DEM, che il sistema propone automaticamente in gradi, sono stati convertiti in sistema metrico, sia per uniformare le unità di misura, sia per eliminare le deformazioni dovute alla rappresentazione su un piano di una superficie sferica.

In seguito, l'ASTER è stato sottratto all'SRTM, con lo scopo di metter in luce le differenze tra i due per poter attuare un confronto.

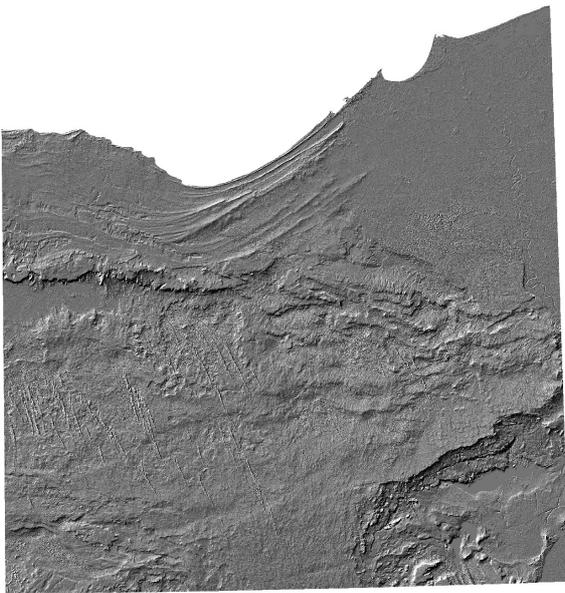


*Differenze tra SRTM e ASTER
È possibile notare lo striping presente nell'ASTER, generato dai passaggi del satellite; alcuni passaggi presentano quote sistematicamente più basse.*

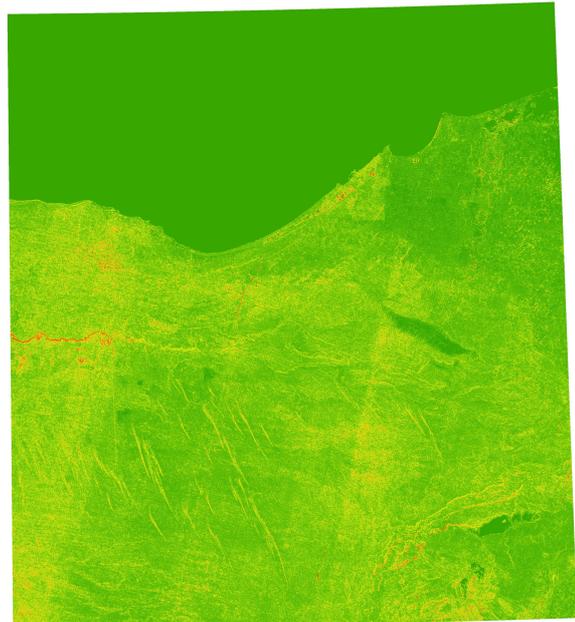


Sui due DEM è stato quindi eseguito un primo studio delle derivate prime, che verranno discusse in seguito, al fine di valutare l'intensità del filtraggio da effettuare. Sono stati fin da subito evidenti i problemi di "granularità" dell'SRTM, che rendono poco significativa l'analisi della superficie ed impossibile l'individuazione di un reticolo idrografico strutturato.

Il DEM ASTER invece, pur presentando problemi di "granularità", mette in evidenza uno spiccato problema di striping, con strisciature non derivate dalla presenza di particolari forme, ma da diversità sistematiche nel passaggio del satellite.



"Granularità" dell'immagine nell'SRTM



Problemi di striping nell'ASTER

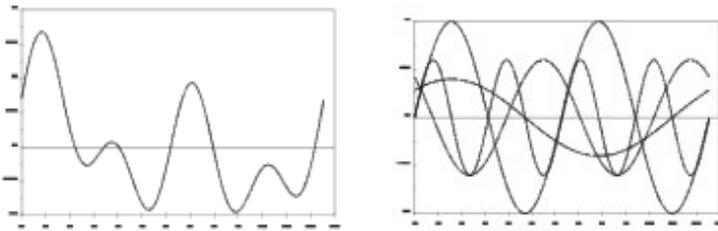
Qualsiasi analisi morfometrica attuata su questi due DEM sarebbe quindi poco utilizzabile.

Si è proceduto quindi al filtraggio tramite l'analisi di Fourier del solo SRTM, poiché nell'ASTER si è preferito preservare per quanto possibile l'integrità dei dati: su di esso sono stati applicati semplicemente due leggeri filtri passa-basso.

2.2.2 Preelaborazione con IdrisiGis

Il filtraggio dell'SRTM è stato effettuato con il modulo per l'analisi di Fourier presente in Idrisi. L'analisi di Fourier è una tecnica di scomposizione di un'immagine (o di un segnale) in una combinazione di elementi più semplici: infatti, anche la superficie topografica più complessa può essere scomposta e vista come una combinazione di onde sinusoidali semplici, con diversa frequenza, ampiezza e fase, e viceversa: questo permette un passaggio dal dominio spaziale a quello dell'ampiezza, un filtraggio all'interno di

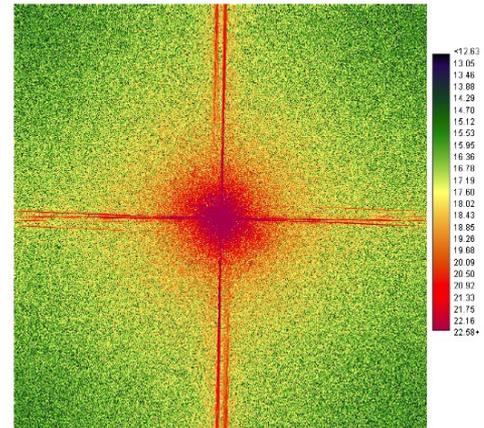
quest'ultimo ed una ricomposizione nel primo.



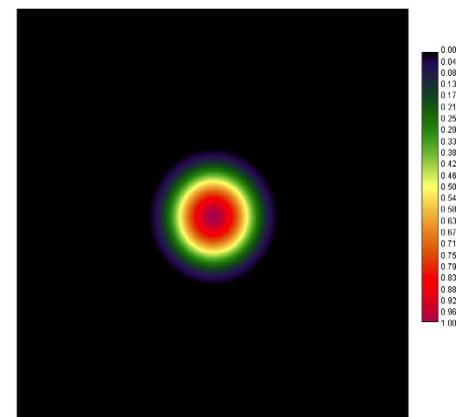
Scomposizione di un'onda complessa in una combinazione di onde armoniche semplici

In IdrisiGis l'analisi di Fourier necessita che il numero di colonne e quello delle righe dell'immagine (DEM), in cui è organizzato il DEM sia una potenza di 2, si procede a tale adattamento utilizzando il comando Zeropad e scegliendo il valore più adatto.

Di seguito, vengono estratte mediante la trasformata diretta la parte reale e la parte immaginaria, per poter effettuare un'analisi numerica della frequenza, ed il Power Spectrum, che fornisce una rappresentazione visiva della distribuzione delle frequenze e della loro ampiezza facilitando in questo modo la scelta delle frequenze di taglio più opportune; per questo filtraggio sono state scelte tre soglie di taglio, precisamente di 50, 150 e 300 pixel, e la funzione usata per il filtraggio passa-basso è una funzione sigmoidale di Hanning. Dato che con l'aumentare del valore del taglio diminuisce l'intensità del filtraggio, risulta evidente che l'SRTM con taglio a 50 pixel sarà estremamente filtrato e quindi ottimo per illustrare le forme a grande scala del paesaggio ma con una forte perdita di dettaglio, mentre il filtrato a 300 pixel sarà più simile all'immagine originale e conserverà quindi gran parte dei dettagli, a discapito però della nitidezza delle forme a grande scala. Il filtrato a 150 pixel mostrerà caratteristiche intermedie fra i due.

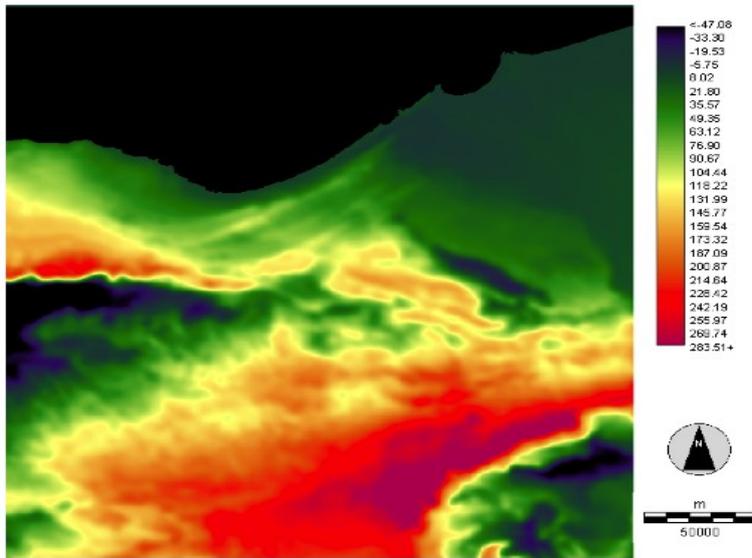


Power Spectrum

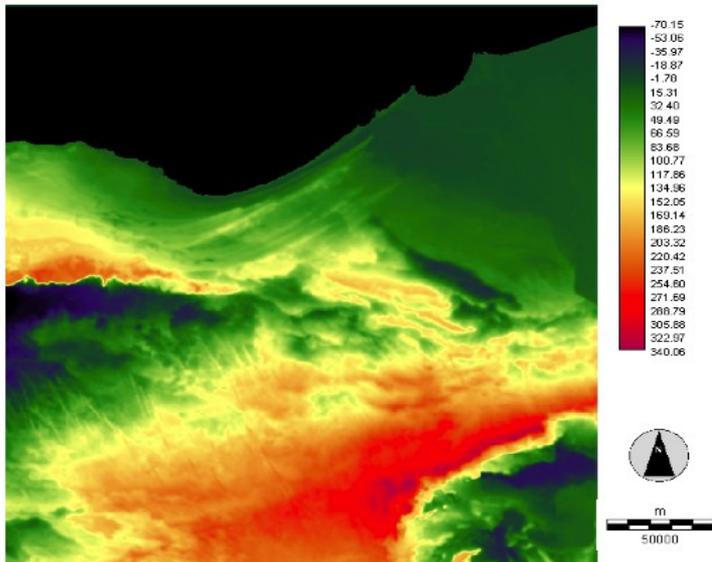


Filtro Hanning ricavato dal Power Spectrum.

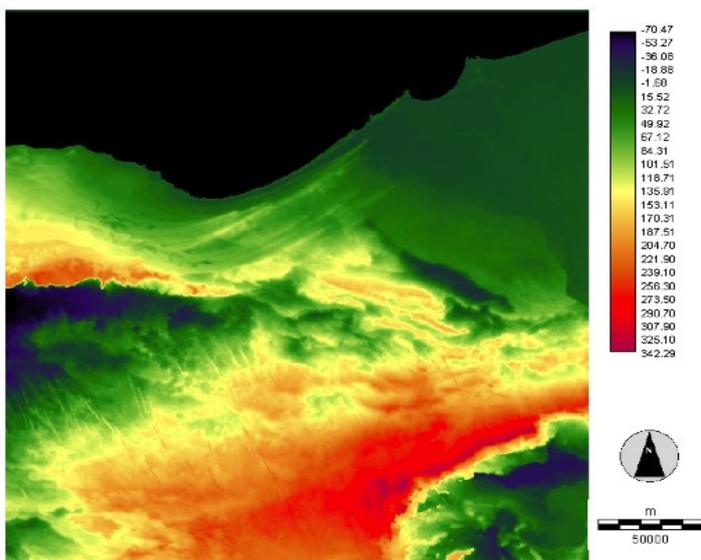
L'immagine viene infine ricomposta attuando la trasformata inversa di Fourier: gli SRTM così possono essere nuovamente importati in ArcGis per una nuova analisi delle derivate prime e seconde.



Filtrato SRTM con soglia di taglio a 50 pixel



Filtrato SRTM con soglia di taglio a 150 pixel



Filtrato SRTM con soglia di taglio a 300 pixel

2.3 Elaborazione

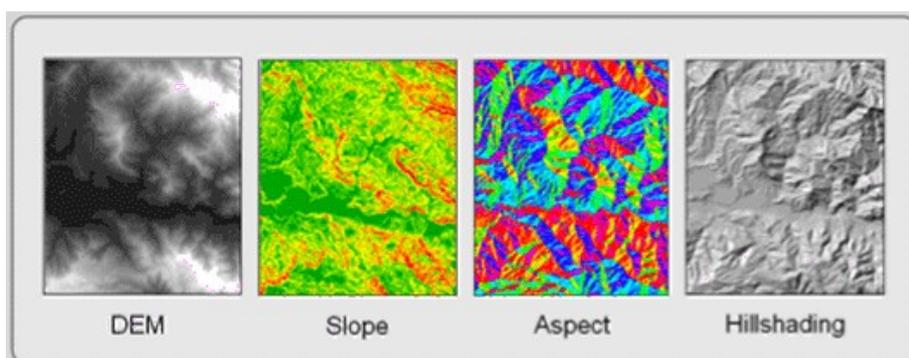
La fase di elaborazione consiste nell'estrazione dai DEM precedentemente pre-elaborati delle classi morfometriche principali: mediante uno studio delle derivate prime è possibile visualizzare le caratteristiche di Inclinazione, Lumeggiamento ed Esposizione dei Versanti, analizzando le derivate seconde, invece, si possono evidenziare la Curvatura Planare e la Curvatura di Profilo; inoltre, applicando particolari moduli atti all'analisi di superficie, è possibile estrarre l'Idrologia del terreno. Uno studio finale multiparametro, infine, permette di riunire i dati estratti per ottenere delle Cluster Classes di landform principali, il fine ultimo di questo lavoro.

2.3.1 Derivate prime

Inclinazione ed Esposizione sono delle variabili topografiche che possono essere estratte mediante lo studio delle derivate prime (sono quindi assimilabili a dei gradienti) con processi puramente geometrici e matematici. L'Inclinazione (Slope) rappresenta il massimo intervallo di variazione del valore di elevazione, ed è rappresentato come l'angolo tra il piano orizzontale ed un vettore tangente alla superficie; quindi, più esso sarà elevato più il versante risulterà verticalizzato.

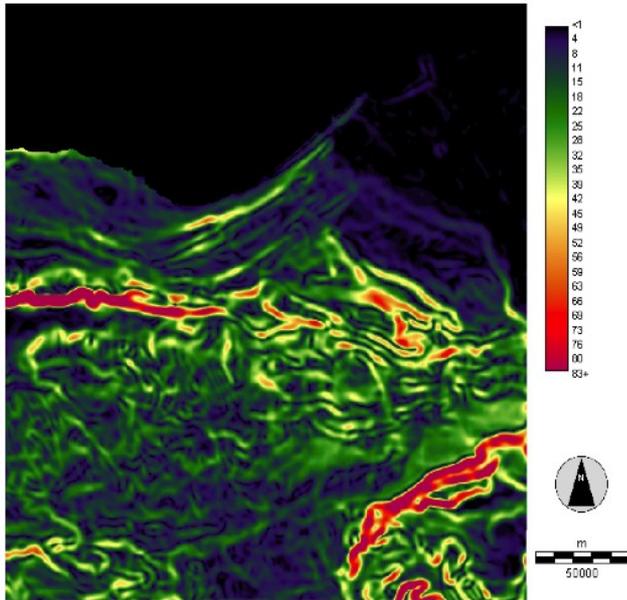
L'Esposizione (Aspect) è una variabile strettamente legata all'inclinazione e rappresenta la direzione di massima inclinazione del versante; proprio per questo motivo, essa può essere utilizzata per calcolare la quantità di luce che il versante riceve, a seconda dell'emisfero e della latitudine.

Aspect e Slope sono le variabili basilari di ogni studio geomorfometrico e possono essere calcolate con vari algoritmi; una combinazione delle due è inoltre utilizzata per creare il Lumeggiamento (Hillshade), che conferisce all'immagine un aspetto più tridimensionale che la rende più facilmente interpretabile all'occhio umano.

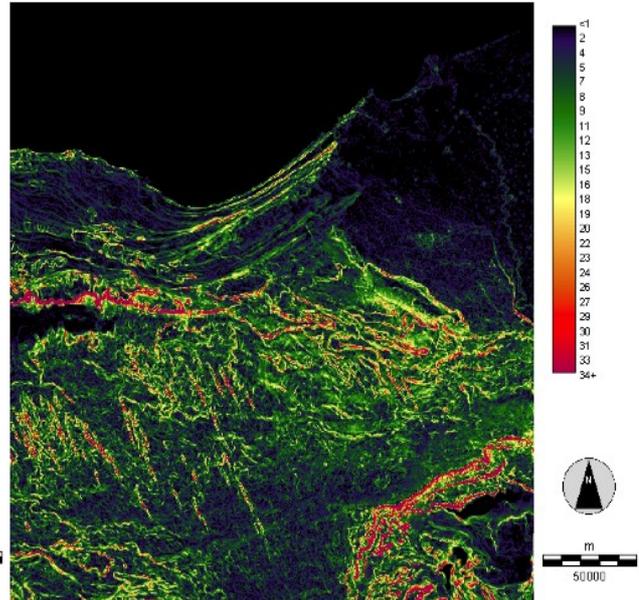


Esaminando i valori di Slope della zona in esame, si possono cominciare ad individuare i primi e più importanti lineamenti della zona: spiccano le elevate pendenze delle scarpate che bordano a Nord la depressione del Qattara e a Nord-Est la depressione di Fayum, viene accennato poco a Sud della prima un sistema di sottili lineamenti longitudinali, paralleli fra di loro e lunghi diverse decine di km, con pendenze non estremamente alte ma comunque

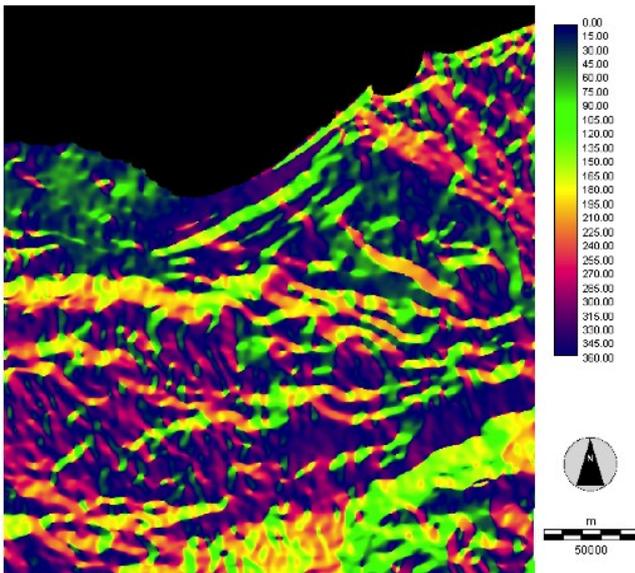
sufficientemente elevate da spiccare in contrasto all'ambiente particolarmente pianeggiante che le circonda, che verranno in seguito identificate come dune. Quest'analisi viene compiuta sia sull'SRTM, che fornisce le sopraccitate forme, sia sull'ASTER, il quale però, a causa del blando filtraggio, fornisce dati poco significativi soprattutto a causa della permanenza di un accentuato striping.



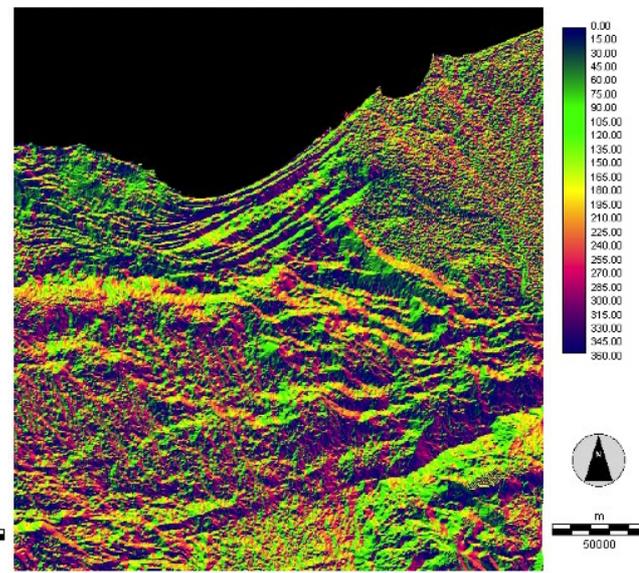
Slope su filtrato SRTM con soglia di taglio a 50 pixel



Slope su filtrato SRTM con soglia di taglio a 300 pixel



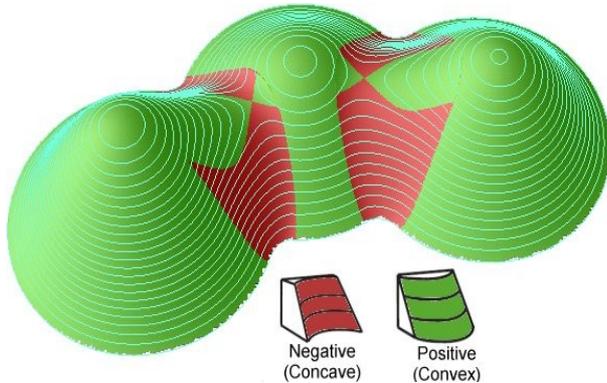
Aspect su filtrato SRTM con soglia di taglio a 50 pixel; N a 0°, E a 90°, S a 180°, W a 270°



Aspect su filtrato SRTM con soglia di taglio a 300 pixel; N a 0°, E a 90°, S a 180°, W a 270°

2.3.2 Derivate seconde

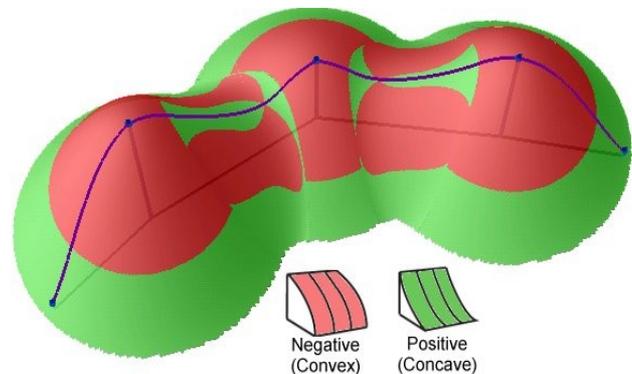
Secondariamente viene compiuto uno studio sulle derivate seconde, legate alla concavità e alla convessità della superficie; i dati ottenuti sono quindi delle curvature.



Plan Curvature

In particolare, la Curvatura Planare (Plan Curvature) rappresenta la curvatura del piano orizzontale della superficie, ovvero la concavità e convessità dell'isoipsa passante per il punto specifico considerato; essa è positiva per superfici convesse, negativa per superfici concave, il suo valore assoluto è elevato per curvature strette, e viceversa.

La Curvatura di Profilo (Profile Curvature) rappresenta, invece, la curvatura della superficie in direzione della massima pendenza; contrariamente a quanto vale per la Plan Curvature, è positiva per superfici concave e negativa per superfici convesse.



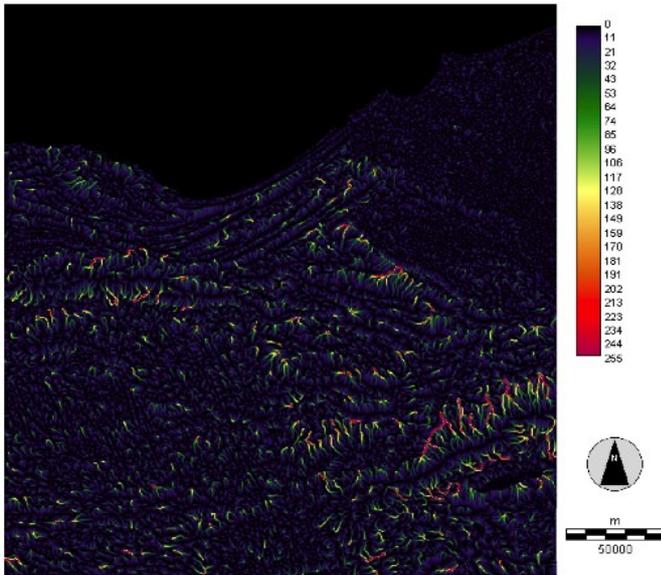
Profile Curvature

Entrambi i parametri di curvatura risultano utili per determinare l'intensità, la direzione e l'accumulo dei flussi d'acqua sulla superficie.

Proprio a questo scopo è dedicato il tool Hydrology di ArcGis, le cui due variabili qui usate sono la Flow Direction e la Flow Accumulation; a differenza delle precedenti, quest'ultima variabile può essere considerata regionale, poiché non considera solo una porzione discreta della superficie, bensì tiene conto del contributo dell'intera area, dato che i flussi si muovono sotto l'azione della forza di gravità.

La Flow Direction esprime la direzione preferenziale di discesa dell'acqua lungo il versante, ed è calcolata partendo essenzialmente dai valori delle due curvature sopra già illustrate.

La Flow Accumulation o Runoff, invece, esprime i luoghi di scorrimento ed accumulo del flusso, considerando il contributo, in termini di quantità di flusso, di tutti i punti più a monte. Per questo motivo, essa fornisce in un certo grado anche una sorta di organizzazione gerarchica dei corsi d'acqua presenti.



Runoff su filtrato SRTM con soglia di taglio a 300 pixel

Nel caso specifico dell'area di studio l'estrema aridità del clima, non consente la formazione di corsi d'acqua perenni all'infuori del Nilo, ma solo di uadi turbolenti e temporanei, come già accennato. La rete di drenaggio, comunque, appare nel complesso molto ben organizzata.

Anche in questo caso, i dati più rappresentativi sono forniti dal solo SRTM, poichè nell'ASTER permane una granularità che ne rende difficoltose le analisi; le grandi dimensioni dell'immagine, dovute all'alto grado di dettaglio, ne rendono impossibile l'analisi

con i programmi a disposizione, se non suddividendo l'immagine in parti più piccole, che genererebbero però dei difetti che potrebbero pregiudicare i risultati delle analisi.

2.3.3 Cluster Classes

L'elaborazione delle immagini prosegue con l'estrazione degli elementi specifici caratteristici della morfologia del terreno: pozzi, punti di minimo topografico locale, picchi, punti di massimo topografico locale, linee di cresta, che uniscono fra di loro dei punti di massimo locale, fondivalle, che uniscono invece punti di minimo locale, passi, che corrispondono a punti di sella, e piani, zone che non presentano curvature. Questi punti specifici della superficie fungono da base per il riconoscimento in automatico delle landform; con questo termine si intende ogni caratteristica della superficie terrestre che abbia una forma particolare e riconoscibile, come ad esempio delle montagne, delle colline, delle vallate o delle pianure.

Il riconoscimento in automatico delle landform si basa sull'individuazione delle classi principali e delle loro caratteristiche specifiche, che vengono poi ricercate all'interno dell'immagine e riunite in un'unica landform.

Il programma utilizzato per l'estrazione degli elementi specifici è Landserf, un software dedicato essenzialmente alle analisi di DEM basate sulla scala; la sua caratteristica principale è il poter eseguire caratterizzazioni multiscala di superficie dove i parametri come inclinazione o curvatura possono essere misurati in un intervallo di scale diverse. Inoltre, esso permette la visualizzazione in 3D del terreno in esame.

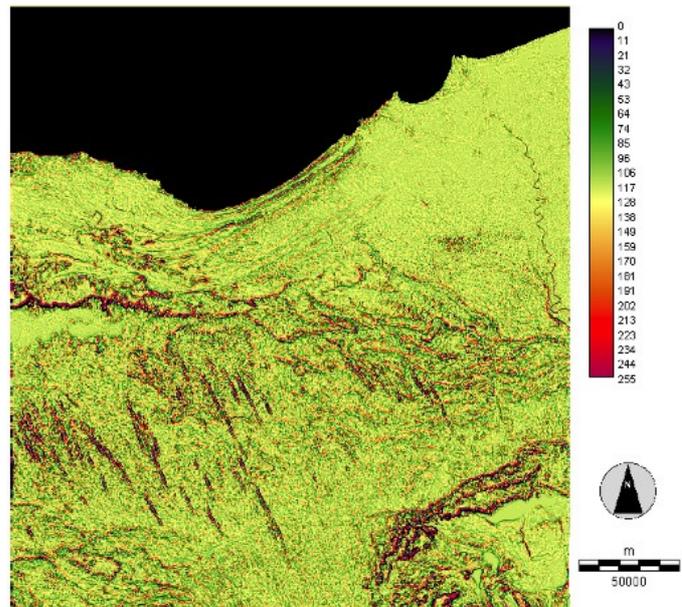
Gli elementi specifici estratti vengono successivamente importati in Idrisi, dove si procede alla creazione delle Cluster Classes; la creazione di Cluster Classes rientra nell'insieme delle tecniche per il riconoscimento dette Hard

Classifiers, poiché è il modulo stesso a compiere una decisione definitiva sulla landform a cui ogni pixel appartiene, diversamente a quanto avviene per i Soft Classifiers, nei quali i pixel sono organizzati in gruppi senza però che l'assegnazione sia definitiva.

Nel primo caso, il sistema possiede poche informazioni preliminari fornite dall'operatore riguardo alle classi da identificare, e procede a tale raggruppamento in automatico: dati n parametri differenti, il programma procede alla loro collocazione in uno spazio n-dimensionale in cui i punti si concentreranno in nebulose più o meno concentrate. Questi nuclei di maggior densità vengono rilevati attraverso un'analisi spettrale delle frequenze attraverso degli istogrammi ed identificati come un singolo Cluster. L'immagine viene quindi ricostruita spazialmente, creando regioni con caratteristiche morfologiche simili tra loro.

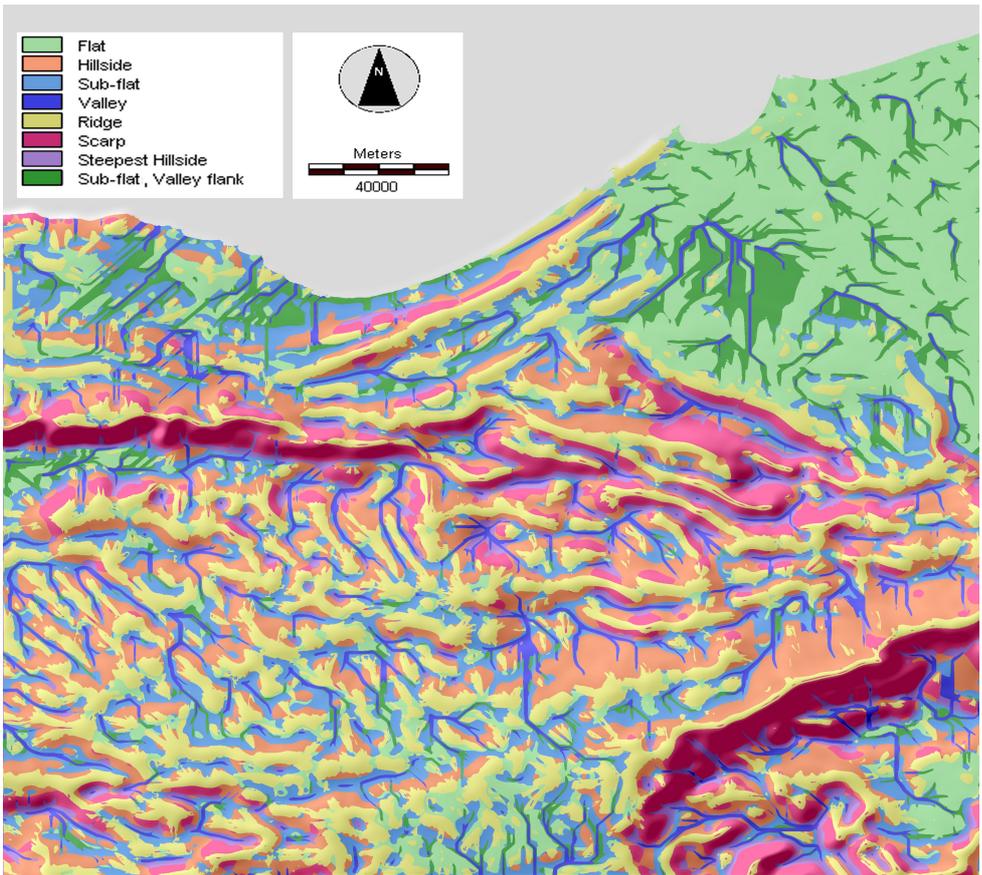
Nel caso specifico, si è provato a creare Cluster Classes con tre diversi moduli: Isodata, Isoclust e Kmeans; i risultati ottenuti sono stati piuttosto simili fra di loro, quindi si è scelto di tenere i soli dati derivanti da Isoclust, che sembravano possedere un'accuratezza leggermente più elevata; questo metodo, infatti, si presenta come un ponte tra Hard e Soft Classifiers, e l'operatore deve scegliere manualmente il numero dei Clusters che si vogliono creare. Nel programma possono essere inseriti fino a sette parametri per poter effettuare la suddivisione.

Per questo lavoro i parametri inseriti per attuare la distinzione sono stati tre: lo Slope, la Flow Accumulation e un doppio filtrato passa-alto; il primo rappresenta bene le derivate prime dei versanti, la seconda esprime i valori delle curvature, mentre l'ultimo, grazie al tipo di filtraggio, accentua di molto le differenze di elevazione fra pixel adiacenti, accentuando i cambiamenti repentini di altezza della topografia, ovvero linee di cresta e fondovalle. Inseriti questi dati, è stato scelto un numero di Clusters pari a otto, che consente una buona distinzione delle forme senza essere però

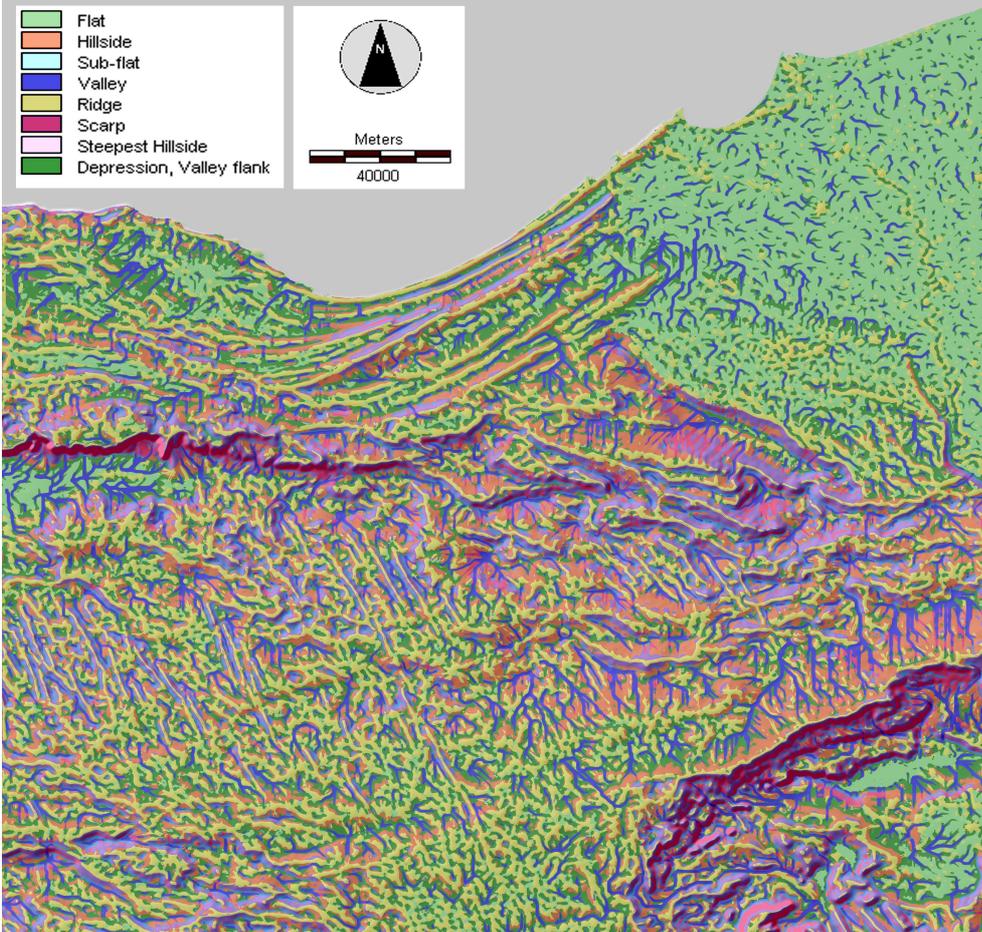


Filtrato passa-alto su SRTM con funzione di Hanning

eccessivamente dettagliato e quindi poco rappresentativo; il programma ha quindi suddiviso i pixel negli otto Clusters richiesti, assegnando a ciascuno valori diversi. Si è poi proceduto all'identificazione di ogni classe come una particolare classe geomorfologica, osservando i valori di Slope e le curvature.



*Le otto Cluster
Classes estratte dal
filtrato SRTM a 50
pixel*



*Le otto Cluster
Classes estratte dal
filtrato SRTM a 150
pixel*

La classe "Flat" identifica le zone fortemente pianeggianti, dove non si rilevano bruschi cambi di elevazione e i valori di curvatura sono quasi nulli. Questa forma identifica particolarmente la zona del delta del Nilo, che è ovviamente una vasta pianura con pendenze minime, ed il fondo delle depressioni, in particolare di quella di Fayum, poiché sul fondo di questa è presente un lago permanente, che viene identificato come una zona perfettamente pianeggiante, senza alcuna irregolarità.

Il secondo gruppo è il "Sub-Flat", ovvero le zone subpianeggianti con curvature e pendenze maggiori rispetto alle prime, pur rimanendo sempre piuttosto basse; essa è poco rappresentata, e compare alla base delle principali scarpate o tra linee di cresta parallele ravvicinate, e spesso confina con i lineamenti del reticolo idrografico, in bande sottili.

Il terzo Cluster è definito "Depression", in quanto si nota sia come esso individui effettivamente delle piccole depressioni nelle zone pianeggianti, o Valley Flank, poiché circonda in gran parte gli elementi del reticolo idrografico, ovvero gli uadi, che incidono ovviamente dei fondivalle, dei quali questa classe rappresenta quindi i fianchi.

Il quarto gruppo è definito "Valley", e rappresenta per l'appunto le linee di fondovalle: esse possono essere definite come il reticolo idrografico, poiché è il luogo dove gli eventuali flussi si incanalano. A causa delle condizioni climatiche i corsi d'acqua sono asciutti per la maggior parte dell'anno ma, a causa della turbolenza del flusso generata dalla sua repentinità, risultano generalmente ben delineabili, piuttosto scarsi in zone pianeggianti e concentrati soprattutto lungo i fianchi delle aree più ripide e nelle zone interdunali.

I gruppi successivi descrivono invece le forme del versante.

Il quinto gruppo è detto "Hillside", e rappresenta i fianchi moderatamente pendenti dei rilievi: esso descrive soprattutto le morfologie più dolci e smussate, come i lineamenti ondulati che ricalcano la linea di costa ad Est di El Alamein, e sono spesso intaccati dal reticolo idrografico; minore la loro importanza come piedi di rilievi più accentuati.

Il sesto Cluster è definito "Steepest Hillside", e presenta quindi forti analogie con il gruppo precedente, pur essendo generalmente più inclinato: borda la parte più a monte dell'Hillside nei rilievi elevati, di cui costituisce la parte prossima alla linea di cresta, e delinea in maniera particolare la costa più occidentale, che quindi sarà di tipo falesia, contrariamente al settore orientale interessato dai fenomeni di deposizione del Nilo, che forma ampie spiagge pianeggianti.

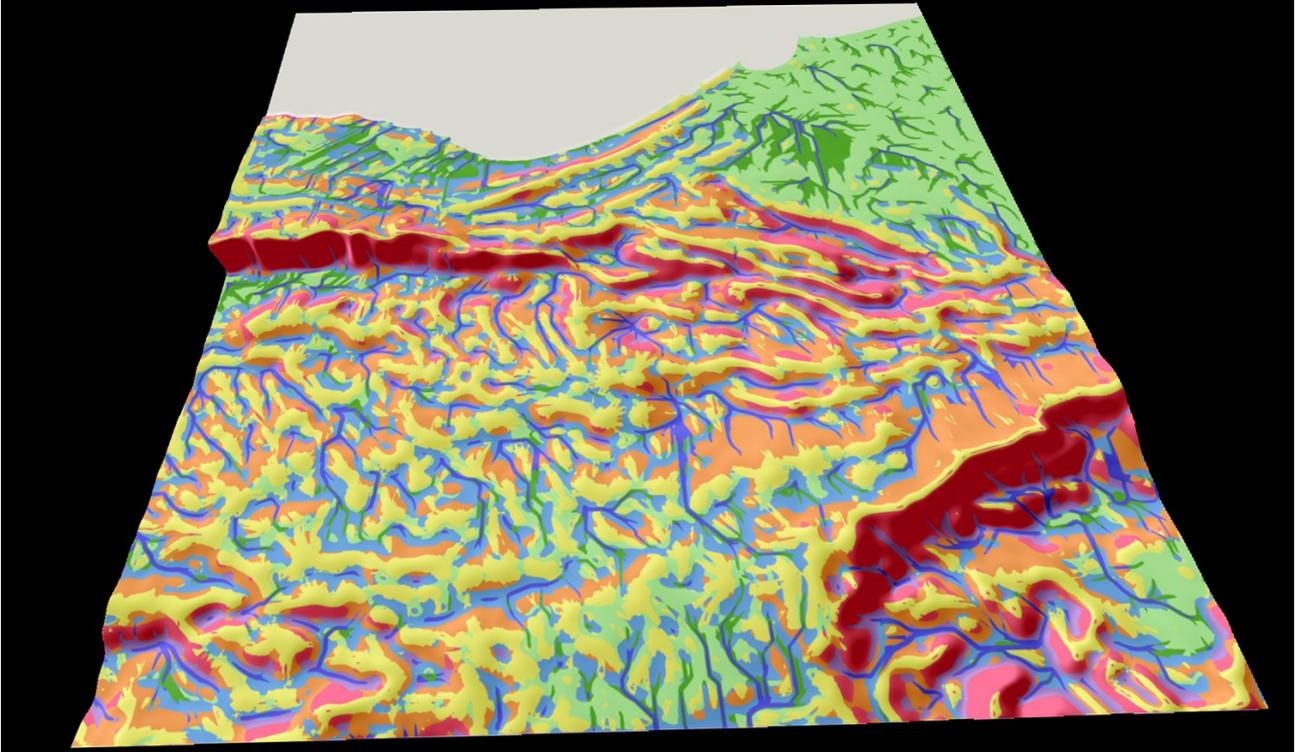
La settima Classe è denominata "Ridge", ed identifica le linee di cresta del paesaggio, ovvero l'insieme di punti di massimo locale adiacenti: essa costituisce quindi la parte sommitale delle alture e delinea tutti i rilievi presenti, anche quelli moderatamente accentuati, e si presenta quindi come linee molto sottili.

L'ottavo e ultimo gruppo è detto "Scarp", e rappresenta quindi le zone di scarpata interessate da cambiamenti repentini di elevazione quindi da Slope molto elevato. Esse bordano in maniera importante i settori più settentrionali delle depressioni di El Qattara e di El Fayum.

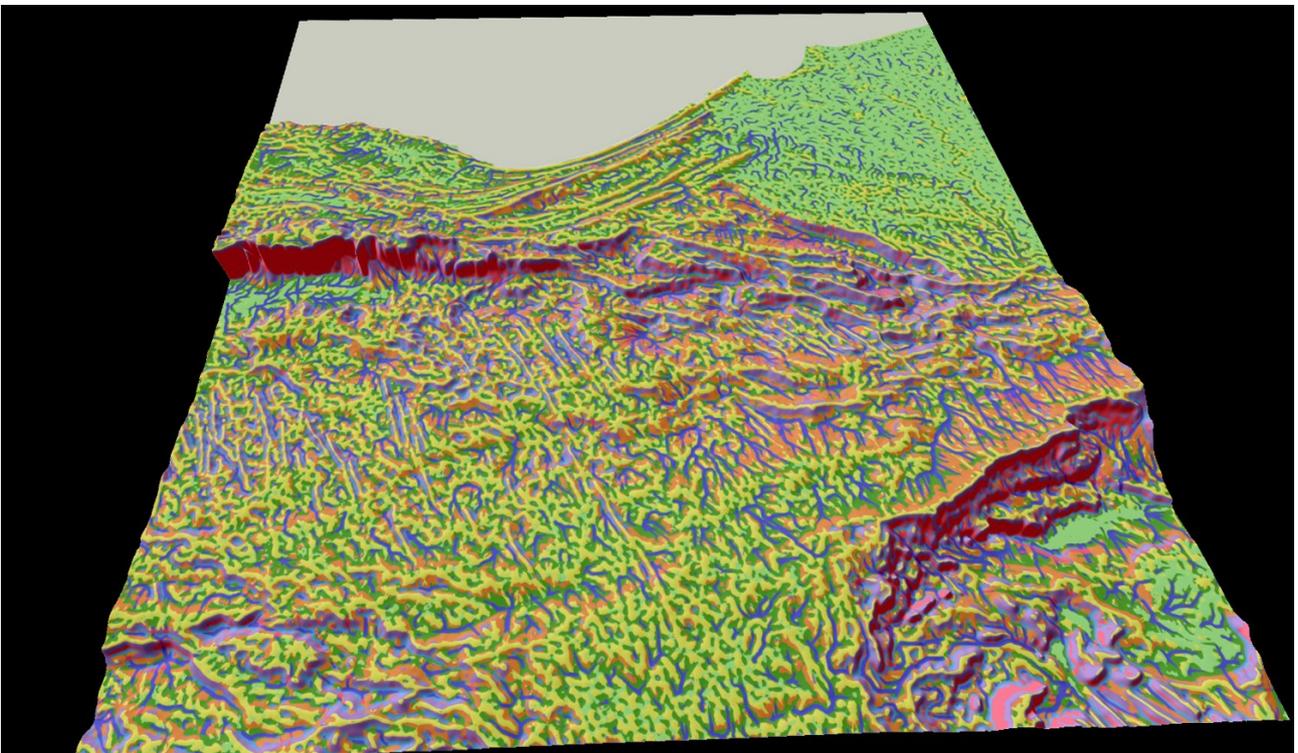
Nella seguente tabella, vengono presentati gli intervalli generali dei valori di pendenza e curvatura di ciascuna delle Cluster Classes.

Filtrato	Parametro	Cluster Classes	Minimo	Massimo	Media	Variabilità	Deviazione Standard
150 Slope		Flat	0	0	0	0	0
		Hillside	0	1	1	1	0
		Sub-Flat	0	0	0	0	0
		Valley	0	3	0	3	0
		Ridge	0	1	0	1	0
		Scarp	0	12	2	12	2
		Steepest Hillside	0	4	1	4	0
		Depression,Valley Flank	0	1	1	1	0
150 Runoff		Flat	1	439	10	438	13
		Hillside	1	398	19	397	18
		Sub-Flat	1	1149	32	1148	50
		Valley	1	69574	390	69573	1659
		Ridge	1	53	5	52	4
		Scarp	1	3341	55	3340	124
		Steepest Hillside	1	290	11	289	9
		Depression,Valley Flank	1	2493	43	2492	90
150 High Pass		Flat	0	0	0	0	0
		Hillside	0	0	0	0	0
		Sub-Flat	0	0	0	0	0
		Valley	-1	0	0	1	0
		Ridge	0	1	0	1	0
		Scarp	-1	1	0	3	0
		Steepest Hillside	0	2	0	2	0
		Depression,Valley Flank	-1	0	0	1	0
50 Slope		Flat	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
		Hillside	0,0	2,3	0,1	2,3	0,1
		Sub-Flat	0,0	2,0	0,2	2,0	0,1
		Valley	0,0	1,8	0,2	1,8	0,1
		Ridge	0,0	0,9	0,3	0,9	0,2
		Scarp	0,0	0,8	0,2	0,8	0,1
		Steepest Hillside	0,0	4,3	0,6	4,3	0,5
		Depression,Valley Flank	0,0	1,6	0,4	1,6	0,3
50 Runoff		Flat	1,0	848,0	58,2	847,0	86,3
		Hillside	1,0	3145,0	88,9	3144,0	135,9
		Sub-Flat	1,0	1494,0	67,1	1493,0	90,1
		Valley	157,0	209266,0	4765,2	209109,0	9730,4
		Ridge	1,0	214,0	39,0	213,0	33,5
		Scarp	1,0	288,0	40,4	287,0	39,5
		Steepest Hillside	1,0	1141,0	51,1	1140,0	45,7
		Depression,Valley Flank	1,0	130,0	26,4	129,0	19,6
50 High Pass		Flat	0,0	255,0	118,3	255,0	6,5
		Hillside	0,0	255,0	117,3	255,0	29,4
		Sub-Flat	0,0	255,0	122,1	255,0	34,9
		Valley	0,0	255,0	91,6	255,0	30,9
		Ridge	0,0	255,0	122,5	255,0	40,9
		Scarp	0,0	255,0	125,2	255,0	29,0
		Steepest Hillside	0,0	255,0	108,8	255,0	56,1
		Depression,Valley Flank	0,0	255,0	144,4	255,0	49,6
300 Slope		Flat	0,0	0,3	0,1	0,3	0,1
		Hillside	0,3	1,2	0,6	0,9	0,2
		Sub-Flat	0,0	0,6	0,3	0,6	0,1
		Valley	0,0	4,1	0,4	4,1	0,2
		Ridge	0,0	1,0	0,3	1,0	0,2
		Scarp	0,0	19,1	2,5	19,1	2,3
		Steepest Hillside	0,0	4,9	1,4	4,9	0,7
		Depression,Valley Flank	0,0	1,9	0,8	1,9	0,4
300 Runoff		Flat	1,0	266,0	5,8	265,0	10,1
		Hillside	1,0	359,0	10,6	358,0	15,0
		Sub-Flat	1,0	775,0	21,2	774,0	40,7
		Valley	1,0	51091,0	177,0	51090,0	840,3
		Ridge	1,0	131,0	2,9	130,0	2,9
		Scarp	1,0	5930,0	38,0	5929,0	128,5
		Steepest Hillside	1,0	298,0	6,5	297,0	8,0
		Depression,Valley Flank	1,0	1276,0	32,6	1275,0	71,6
300 High Pass		Flat	102,0	132,0	117,6	30,0	5,5
		Hillside	68,0	178,0	115,5	110,0	19,5
		Sub-Flat	57,0	140,0	99,8	83,0	14,5
		Valley	0,0	255,0	98,9	255,0	24,1
		Ridge	48,0	255,0	151,1	207,0	31,3
		Scarp	0,0	255,0	82,2	255,0	71,4
		Steepest Hillside	51,0	255,0	157,7	204,0	50,7
		Depression,Valley Flank	0,0	97,0	47,2	97,0	22,9

Come passaggio finale, per rendere l'immagine più fruibile per l'occhio, essa è stata tridimensionalizzata tramite Idrisi.



Tridimensionalizzazione delle Cluster Classes estratte dal filtrato SRTM a 50 pixel



Tridimensionalizzazione delle Cluster Classes estratte dal filtrato SRTM a 150 pixel

3. INTERPRETAZIONE GEOMORFOLOGICA

Ultimata la parte di elaborazione geomorfometrica, si può passare all'interpretazione delle landform in chiave geomorfologica.

Ad una prima analisi, risulta evidente che le principali classi presenti nell'area interessano la geomorfologia fluviale, costiera, eolica e strutturale.

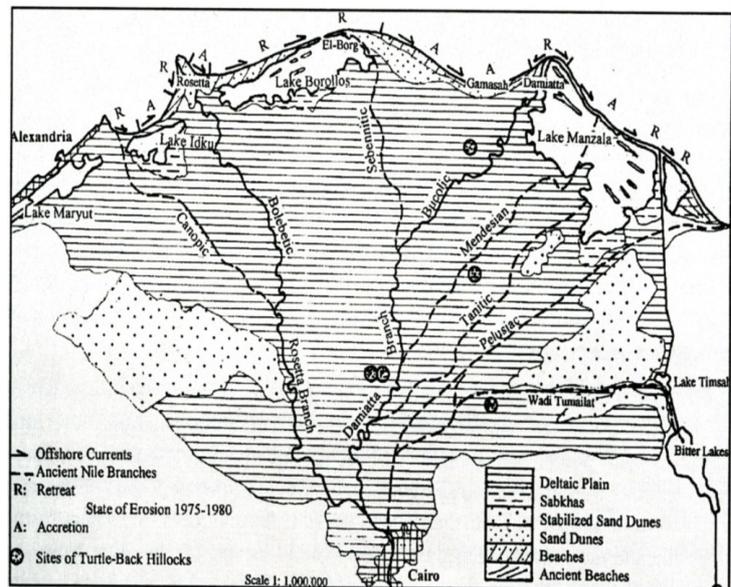
3.1 Geomorfologia fluviale

La geomorfologia fluviale è riscontrabile in maniera preponderante nel settore nord-orientale della zona, dove si può notare il vasto delta del Nilo, ma interessa nel complesso tutta la topografia, poiché la rete di uadi è presente su tutto il territorio.

Il fiume Nilo rappresenta una delle caratteristiche più evidenti dell'intera regione, a causa delle sue dimensioni imponenti e della sua portata ragguardevole. Questo fiume, secondo degli studi preceduto durante l'Oligocene da un corso d'acqua di dimensioni ancora più importanti, si è evoluto dalla metà del Miocene fino ad acquisire le sue attuali caratteristiche, attraverso vari stadi che hanno rispecchiato le variazioni eustatiche e climatiche avvenute. Tuttavia, la creazione in periodo recente della Diga di Assuan e la conseguente formazione del Lago Nasser, ha portato ad una modificazione repentina delle forme fluviali generate. Comunque, nel contesto di questo lavoro ciò risulta irrilevante, poiché la zona interessata comprende solo una porzione del delta fluviale, espressione della parte terminale del corso d'acqua.

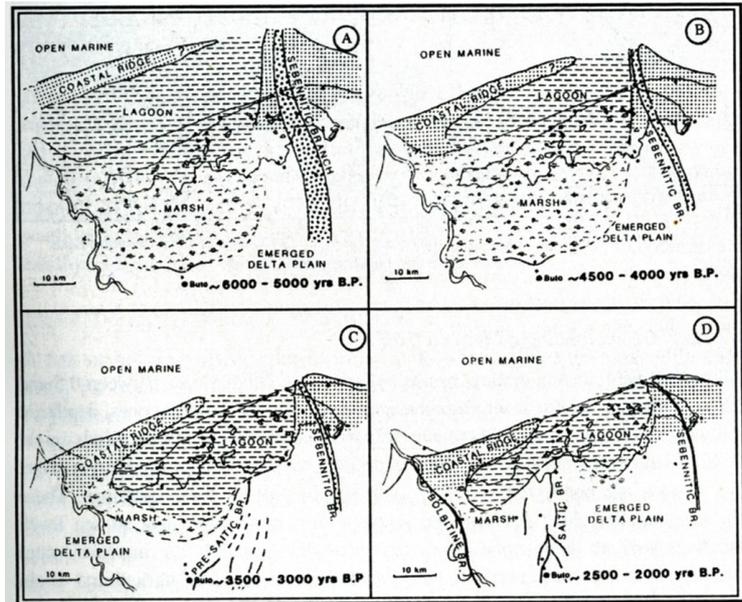
A circa 160 km dalla costa, il fiume, come già detto, si divide in due bracci, uno dei quali, il Ramo Rosetta, il più occidentale, è visibile nell'area di studio: esso attraversa la pianura con un percorso meandriforme che si genera soventemente in presenza di pendenze molto basse.

Il delta presenta una forma a ventaglio e pendenze decisamente poco elevate, generando un'ampia superficie pianeggiante che degrada dolcemente verso Nord: osservando le linee di contouring, si può notare che la parte di delta interna ai due bracci è più elevata rispetto a quella esterna, com'è tipico in questo tipo di deposito; nella parte più a Nord sono presenti delle aree depresse piuttosto vaste, che formano tre lagune di delta denominate, da Est verso Ovest, Lago Borollos, Lago Idku ed Lago Maryut; esse sono ben visibili osservando l'Hillshade della zona.



Rami del Nilo recenti ed antichi
da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari

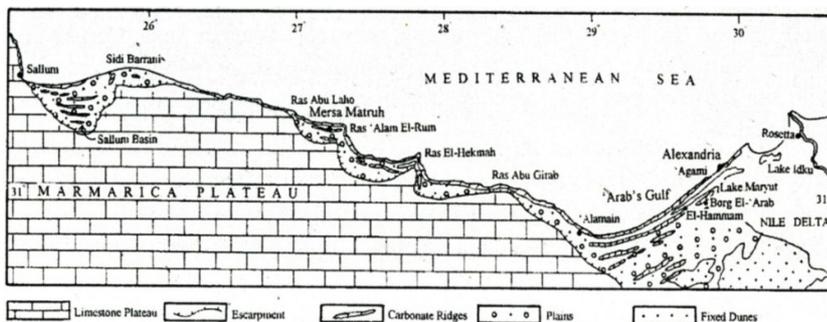
L'origine di queste lagune è piuttosto recente, probabilmente dovuta a fenomeni di subsidenza della zona. Nel caso specifico del Lago Borollos, la sua evoluzione è avvenuta in più fasi: all'inizio nella zona era presente un piccolo lago circondato da una vasta palude, in seguito i sedimenti depositati dal Ramo Rosetta a Ovest sono stati trascinati sempre più a Est dalle correnti, generando una lingua di terra che è andata a chiudere quel braccio di mare, formando una laguna di delta (Arbouille & Stanley, 1991, da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari). Il Lago Maryut e il Lago Idku, invece, sono separate da delle barriere allungate che rappresentano delle linee di cresta oolitiche. La profondità dei bacini può essere anche solo di pochi centimetri e non supera mai i tre metri.



Evoluzione del Lago Borollos da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari

Oltre il Ramo Rosetta, ancora presente e riconoscibile nella zona, in epoca più antica il Nilo possedeva diversi altri bracci, ora non più attivi; si può tuttavia notare come parte di essi sia ancora visibile nell'SRTM, poichè alcuni di questi sono stati riaperti dalla popolazione e sono attualmente utilizzati come canali d'irrigazione.

3.2 Geomorfologia costiera

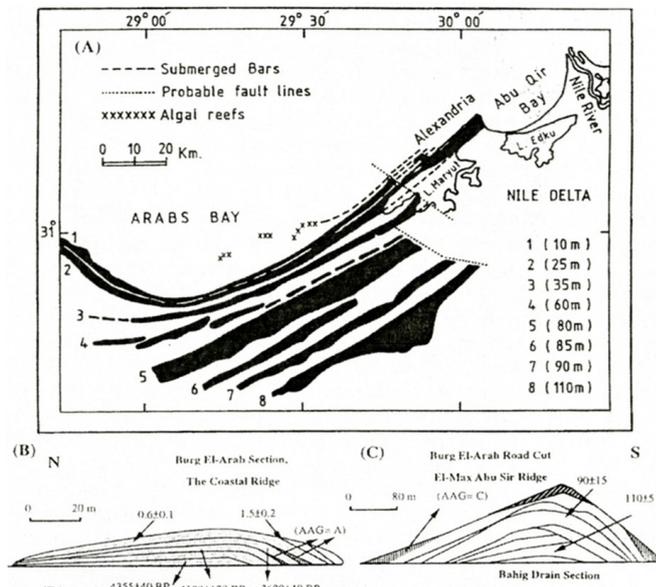


Principali Caratteristiche della costa mediterraneo dell'Egitto da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari

della costa per un lungo tratto del Golfo degli Arabi, intervallate tra di loro da depressioni altrettanto lunghe e sottili. Questa particolare morfologia viene chiamata Sistema Dorsale-Depressione ed è piuttosto peculiare, tanto da

Sempre nella parte settentrionale dell'area è possibile notare come, subito ad Ovest del delta fluviale, si sviluppi una morfologia piuttosto peculiare: lunghe e sottili linee di cresta, tutte parallele tra di loro, si sviluppano ricalcando fedelmente i lineamenti

essere stato rilevato solo in questa zona all'interno di tutto il Mar Mediterraneo. Il numero delle linee di cresta varia a seconda della scala alla quale si compie l'osservazione, tuttavia vengono solitamente considerate otto, in concordanza a quanto mette in luce anche l'elaborazione precedentemente compiuta.



Ridges costali del Golfo degli Arabi

(A) Mappa della distribuzione

(B) Sezioni di due delle unità

da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari

Le creste in prossimità della costa sembrano essere più sottili ed allungate, con altezze modeste (circa 10 m), mentre quelle situate più a Sud risultano più corte e spesse, soprattutto nella parte centrale, e sono nettamente più alte (fino a 110 m). Verso Est queste creste sembrano terminare bruscamente: due sono le ipotesi formulate, o la presenza di due faglie con direzione perpendicolare all'andamento del sistema che abbiano dislocato le creste, oppure la persistenza di queste al di sotto della copertura sedimentaria depositata da Nilo (Butzer, 1960, da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari).; nella parte ad Ovest, invece, si può notare che le dorsali più costiere cambino

bruscamente direzione assumendo andamento Sud-Est. Tali ridges si ritrovano anche sommersi in prossimità della costa e mostrano una tipica forma a duna, con il lato Sud meno inclinato (circa 2°) e quello Nord più inclinato (fino a 15°).

Geologicamente, questi ridges hanno composizioni ed età piuttosto differenti tra di loro, tuttavia ognuno sembra essere composto da un'insieme di sedimenti marini, fluviali ed eolici in diverse proporzioni, ricoperte da un substrato duro di sedimento, a sua volta rivestito da depositi eolici di origine recente. La loro composizione, quindi, è di natura prevalentemente carbonatica, le loro età spaziano da circa 600 anni per la cresta più giovane, collocata a Nord, a circa 950.000 anni (Pleistocene Inferiore) per quella più antica, posta a Sud.

Per quanto riguarda le depressioni inter-ridge, esse sono occupate da diversi tipi di sedimenti: alcune presentano coperture di tipo lagunare e di sabkha, altre mostrano depositi fluviali, gesso e argille. Con sabkha si intendono depositi generati in ambiente paludoso e ipersalino, con importanti processi chimico-fisici che portano alla formazione di evaporiti. La seconda di queste depressioni è occupata da un braccio occidentale del Lago Maryut, detto Braccio Marino, dello spessore di 2-5 km e di profondità variabile da qualche metro sotto al livello del mare a qualche metro al di sopra di esso; il fondo di questa depressione mostra alternanze di stati di gesso, di argille e di depositi marini, ad indicare diversi cicli di alternanza tra ambiente marino e ambiente paludoso. In tutta la zona circostante El Alamein, infine, si sviluppano piccoli laghi salati del diametro di qualche centinaio di metri e con profondità di pochi

metri, il cui livello è costante grazie alle condizioni di equilibrio fra evaporazione e afflusso di acqua marina.

Tanto le creste quanto le depressione sono interessate da una rilevante presenza di uadi.

L'origine di questo sistema è stata a lungo discussa. L'ipotesi più affidabile, realizzata sulla base di recenti studi, è che il Sistema Dorsale-Depressione sia l'espressione di un ambiente di spiaggia formatosi durante condizioni eustatiche stazionarie di mare piuttosto alto; i ridge si sarebbero dunque formati da Sud verso Nord come barre di spiaggia mentre il livello del mare scendeva o rimaneva stazionario; durante questo periodo di regressione il vento avrebbe trasportato piccole porzioni di detrito del ridge dentro la depressione sottostante. Dunque, i processi marini ed eolici sarebbero alla base della formazione del sistema, ma da studi sedimentari sul campo risulta che anche i processi fluviali e di alterazione avrebbero avuto una discreta importanza nella sua genesi.

Questa teoria è comprovata dagli studi compiuti sull'età delle dorsali: esse spazierebbero dai 500 anni per le creste ancora sommerse ai 950.000 anni per quelle più esterne (da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari).

3.3 Geomorfologia strutturale

Una delle caratteristiche più rilevanti del deserto occidentale sono le depressioni ivi presenti, che possono essere organizzate in una scala gerarchica a seconda delle dimensioni; si può inoltre notare come nelle forme più grandi siano ne siano riconoscibili altre più piccole, il che fa pensare che le depressioni maggiori siano generate per coalescenza di più forme minori. Le dimensioni delle depressioni sono quindi estremamente variabili, e spaziano da conche di pochi metri ad enormi forme di diverse centinaia di chilometri di diametro definite mega-depressioni; proprio di questo gruppo fanno parte le depressioni del Qattara e di Fayum, visibili in carta.

Depression	Maximum Length (km)	Maximum Breadth (km)	Area (km ²)	Lowest point (m)	Highest Point (m)	Depth (m)	Orientation
Qattara	340	245	45,000	- 145	200	345	East - West
Siwa	95	50	2,950	- 18.5	200	217	East - West
Wadi El-Natron	65	24	1,100	- 24	200	204	Northwest-Southeast
El-Fayum	100	80	4,370	- 45	350	395	East - West
Wadi El-Rayan	96	78	5,040	-64	350	414	Northwest-Southeast
El-Bahariya	95	42	2,800	118	300	182	NE-SW
El-Farafra	150	150	15,600	25	330	305	NE-SW
El-Dakhla	175	50	6,250	109	450	559	East - West
El-Kharga	200	85	12,250	2	471	470	N - S

Caratteristiche morfometriche delle mega-depressioni del deserto occidentale da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari

3.3.1 Depressione di El Qattara

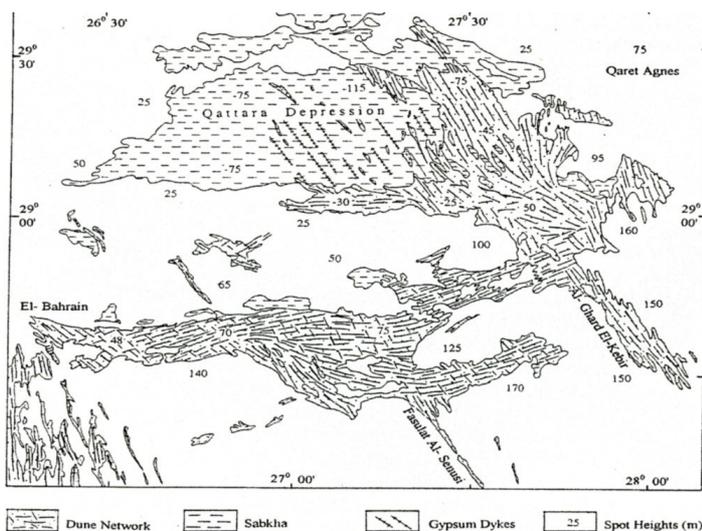
La depressione di El Qattara è situata nel settore occidentale della zona esaminata, a soli 56 km dal Mar Mediterraneo, e ne occupa una grande area; l'area totale coperta è di più di 45.000 km². Essa si presenta come una zona estremamente depressa, infatti vi si ritrova il punto con la quota minore di tutto l'Egitto, ed il secondo in tutta l'Africa, con una quota di -145 m.

Questa depressione è orientata all'incirca Nord-Ovest ed è bordata in queste due direzioni da una ripida scarpata con dislivelli di 100-275 m la quale, a causa della litologia variabile, presenta una struttura a grandi gradini. Le pareti sono profondamente incise da brevi uadi con piccoli bacini idrografici, che si interrompono bruscamente ai suoi piedi formando piccoli fans.



Scarpate che bordano a Nord la depressione di El Qattara

La base della depressione risulta leggermente inclinata verso Sud-Ovest per motivi ancora poco chiari: si presuppone che la tavola d'acqua sotterranea fosse più elevata e salina a Sud-Ovest, a causa dell'evaporazione più spinta, e che quindi la cristallizzazione delle evaporiti abbia portato alla rottura del substrato e alla sua rimozione, contrariamente a quanto avveniva nella parte nord-orientale, rimasta dunque più rialzata (Aref et al., 2002, da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari).



Distribuzione delle coperture nella depressione di El Qattara
da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari

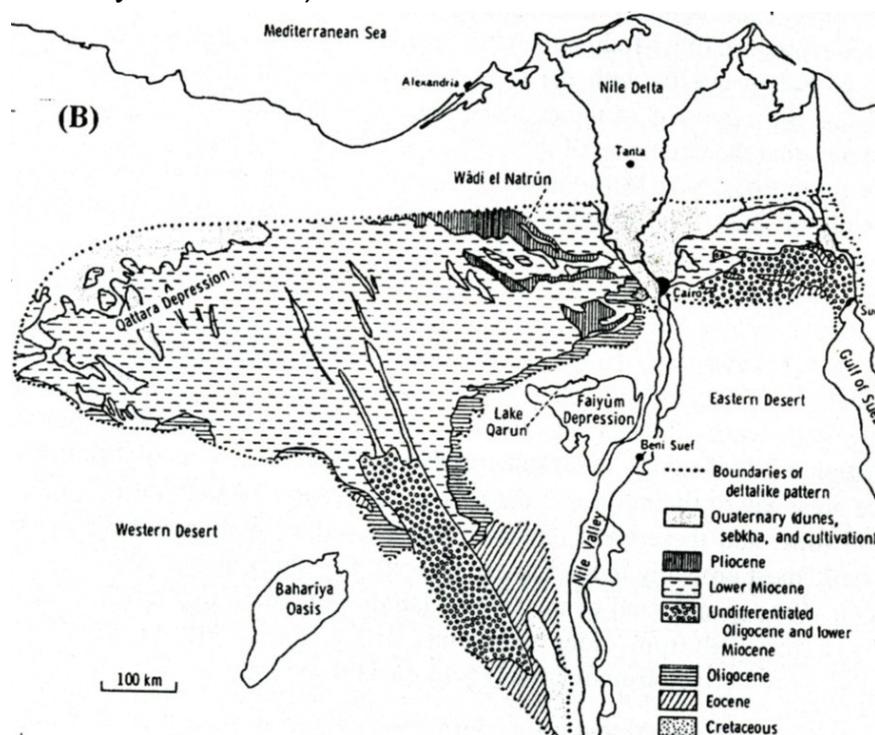
Il fondo della depressione presenta coperture di tipo sabkha non continue ma disposte in grossi lembi, che si fanno uniformi nella zona settentrionale alla base della scarpata: sono costituite da alternanze di strati evaporitici di sale contenenti piccoli livelli o noduli di gesso, ed indicano la presenza in tempi più remoti di una grossa laguna.

Localmente il richiamo di acqua dal sottosuolo può superare l'evaporazione, formando così piccoli laghi più o meno salini.

Le forme più importanti che fungono però da copertura

della depressione sono grandi dune sabbiose modellate dal vento, che ricoprono la parte meridionale e orientale della depressione; esse appartengono al Mare di Sabbia del Sud Qattara e sono lunghe anche più di 100 km e alte più di 100 m. Queste dune sono chiaramente longitudinali, e mostrano una caratteristica orientazione NW-SE e una disposizione spiccatamente parallela le une con le altre: questo indica che il loro modellamento è avvenuto sotto l'azione di un unico vento dominante. Le dune sono ancora attive e si muovono a tassi variabili di anche 4-5 m l'anno. È risultato da studi recenti che la copertura sabbiosa non sembra avere origine esterna come avviene nella maggior parte del deserto occidentale (depositi fluviali provenienti dallo Scudo Nubiano a Sud), bensì origine interna per smantellamento dello stesso Qattara.

Per quanto riguarda l'origine di questo bacino, numerose sono le ipotesi formulate: viene attribuita a processi erosivi del vento controllati dalla tavola d'acqua, viene considerata come una depressione controllata strutturalmente, oppure viene identificata come un bacino scavato da un antico ed imponente fiume, poiché la sua forma in pianta presenta notevoli analogie con un delta fluviale (Embabi, 1967; Brooks, 1994; Busche, 2001, da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari).



Riconoscimento di una possibile forma a delta presso El Qattara.
da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari

La maggior parte degli autori, tuttavia, preferisce identificarla come un'originaria valle scavata da un fiume profondamente erosa da fenomeni di carsismo, particolarmente intensi vista la composizione prettamente carbonatica del substrato, ed in seguito ulteriormente approfondita da alterazione eolica e processi fluviali mentre il livello eustatico diminuiva. Fenomeni di carsismo sono tuttora presenti ed interessanti laddove l'assenza di coperture eoliche o di sabkha faccia affiorare il substrato carbonatico.

3.3.2 Depressione di El Fayum

Il settore sud-orientale dell'area in esame è occupato da un'altra depressione, conosciuta come depressione di Fayum, anch'essa facente parte del gruppo delle mega-depressioni egiziane; similmente ad El Qattara, anche questo bacino è bordato a Nord da una ripida scarpata alta più di 250 m, mentre ad Est è separato dalla valle del Nilo da uno stretto lembo di terra. Il bacino copre un'area di 4.500 km² e presenta una quota minima pari a -45 m al di sotto del livello del mare.

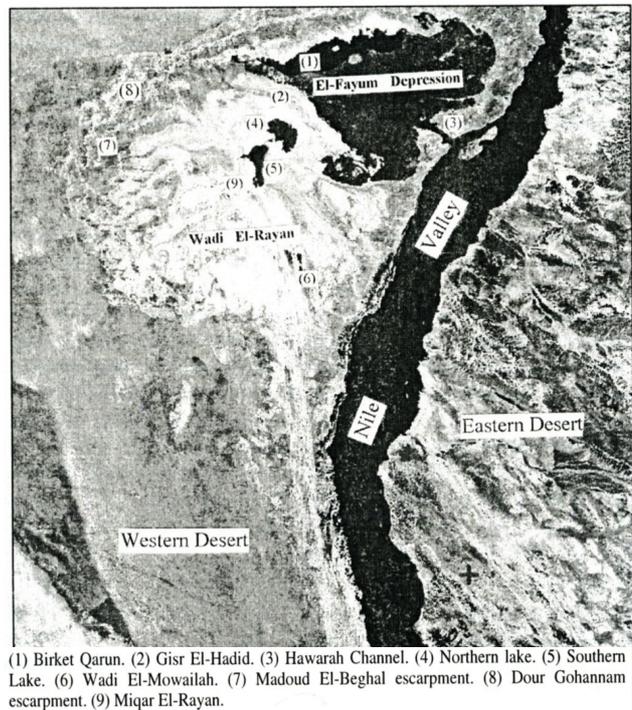


Scarpate che bordano a Nord la depressione di El Fayum

La caratteristica distintiva di questa depressione rispetto alla precedente è l'assenza di forme eoliche di copertura, in quanto il microclima umido presente impedisce la formazione di mari di sabbia e dune. Infatti, la depressione è stata messa in contatto con il Nilo durante il Quaternario e quindi invasa dalle acque del fiume; più precisamente, El Fayum riceve le acque di Bahr Youssef, un corso d'acqua

meandriforme che scorre nella valle del Nilo, nella parte occidentale della piana fluviale, attraverso il canale di Hawara. Questo canale presenta una caratteristica molto particolare: infatti, si è formato a partire da due corsi d'acqua con uguale direzione ma drenanti l'uno verso la depressione di Fayum, l'altro verso la valle del Nilo. Per fenomeni di arretramento della testata del fiume, i due corsi si sarebbero incontrati a metà percorso ed il primo, più largo e più ripido, avrebbe catturato il secondo, provocando in esso un'inversione della vergenza, come è dimostrato dall'analisi di scavi nel paleoalveo del canale di Hawara (Abul-Aggag, 1967, da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari)..

Il fondo di El Fayum è occupato dal Lago Qarun, un lago permanente che copre un'area di 200 km², visibile in carta, di origine artificiale: infatti, esso si è creato in seguito all'eccesso di acque antropiche utilizzate dalla popolazione per l'irrigazione dei campi, drenate da un fitto reticolo idrografico.



(1) Birket Qarun. (2) Gisir El-Hadid. (3) Hawarah Channel. (4) Northern lake. (5) Southern Lake. (6) Wadi El-Mowailah. (7) Madoud El-Beghal escarpment. (8) Dour Gohannam escarpment. (9) Miqar El-Rayan.

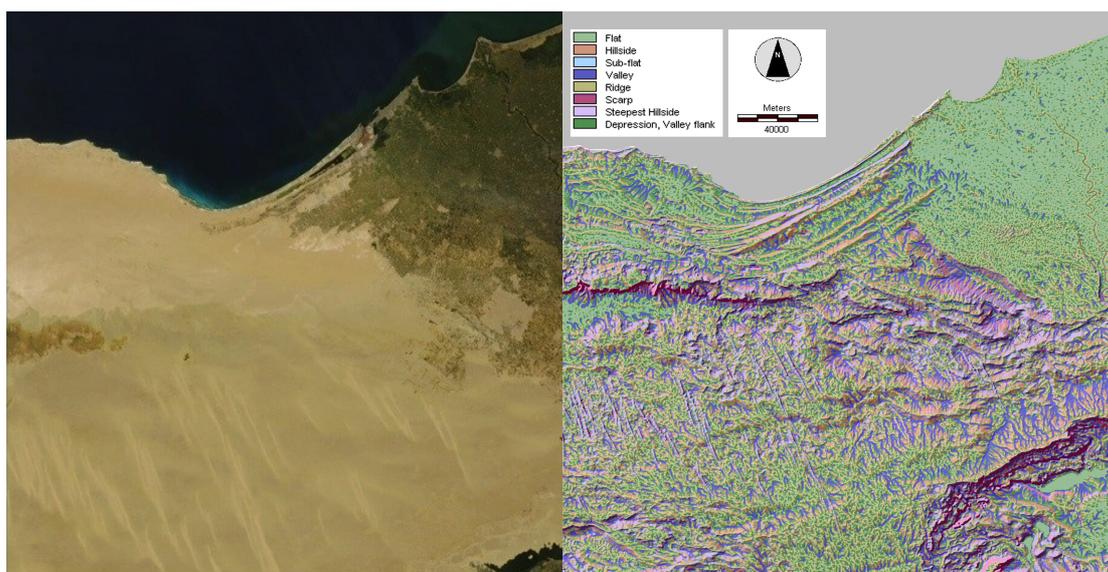
Fotografia dallo spazio di El Fayum, del deserto occidentale ed orientale e della valle del Nilo da "The Geomorphology of Egypt" Nabir Sayed Embari

In questo bacino, si può notare una serie di uadi meandrici profondamente incisi, al punto da formare pareti simili a canyon. La loro presenza indica che in epoca precedente, dove ora si colloca il Lago Qarun esisteva un antico lago, di dimensioni maggiori, prosciugatosi nel corso del tempo. Proprio questo approfondimento del livello della tavola d'acqua avrebbe generato uadi sempre più profondi.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro si pone come fine ultimo l'analisi delle forme dell'area in esame, a partire da modelli digitali dell'elevazione. La zona è stata inquadrata mediante dei DEM realizzati con due tecniche diverse, SRTM e ASTER, opportunamente preparate per poter effettuare le analisi necessarie. I procedimenti a cui questi DEM sono stati sottoposti consistono in una fase di preelaborazione, atta all'inquadratura e al filtraggio dei modelli, e ad una fase di elaborazione, durante la quale sono state estratte le landform tramite processi in automatico.

Le classi morfometriche così estratte sono state interpretate in chiave geomorfologica, in parte mediante l'analisi delle forme stesse, in parte tramite il confronto con lavori precedenti.



Fotografia della zona in esame da Google Earth

Cluster Classes estratte dal filtrato SRTM a 300 pixel

Bibliografia

Geomorphometry: Concept, Software, Applications, Hengl & Reuter;

IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing, Ronald Eastman;

The Geomorphology of the Egypt, Volume I, The Nile Valley and the Western Desert, Nabil Sayed Embabi;

Origin of the Qattara Depression, Egypt, Claude Albritton, James Brooks, Bahay Issawi and Ahmed Swedan