

## IMMAGINI SATELLITARI E MODELLI VIRTUALI: INTERPRETAZIONI GEOARCHEOLOGICHE DELLA REGIONE DEL SISTAN MERIDIONALE

### 1. INTRODUZIONE

Le scoperte degli ultimi trenta anni in Asia Centrale (e specificatamente nell'area iranica) hanno portato alla luce l'insospettata antichità del processo proto-urbano in questa zona del mondo lontana dalle tradizionali culle della civiltà (Egitto, Mesopotamia, civiltà proto-urbana di Harappa nella valle dell'Indo).

Durante il Calcolitico recente (a partire quindi dal 4000 a.C. in poi) compaiono nell'area iranica, in centri come Siyalk e nella Turkmenia meridionale, le prime segmentazioni sociali all'interno delle comunità di lignaggio; parallelamente si avvia anche una differenziazione strutturale all'interno degli abitati, riscontrabile nelle piante e nelle dimensioni delle case. L'economia è ancora essenzialmente rurale, integrata da artigianato e allevamento. Vengono ideati e realizzati anche i primi impianti di controllo e regimentazione delle acque (anche se ancora si tratta di modeste strutture come quelle scoperte in Turkmenia e a Tepe Yahya), che però non indicano un'integrazione tra villaggio e villaggio: questa si verificherà solo più tardi, con l'organizzazione dell'economia urbana e di un sistema razionale e organico di canalizzazioni aventi lo scopo di irregimentare il flusso idrico (Tosi 1978a, b).

Il processo di formazione dello stato si realizzerà per la prima volta, e compiutamente, tra il 3400 e il 3000 a.C.: il fenomeno avverrà, come già detto, nella valle del Nilo, in Mesopotamia, nelle pianure pedemontane della Persia, della Turkmenia e nella valle dell'Indo (con la civiltà proto-urbana di Harappa), grazie a una eccezionale crescita demografica; all'addensamento delle popolazioni lungo gli assi idrograficamente privilegiati; all'organizzazione nello sfruttamento delle risorse minerarie mediante la divisione del lavoro; a un ordinamento gerarchico della società, sempre più lontano dai sistemi di lignaggio e parentela caratteristici delle comunità pre-statali.

Il processo aggregativo pre-urbano nell'area iranica pone fine alla precedente tipologia insediamentale calcolitica, consistente in moduli abitativi caratterizzati da villaggi rurali sparsi su milioni di kmq, dalla catena degli Zagros alle depressioni desertiche dell'area "turanica". Tra il 3200 e il 2900 a.C. centinaia di villaggi vengono abbandonati creando per la prima volta una differenziazione precisa tra centro e periferia; questa disparità sarà poi una delle colonne portanti della storia socio-economica dell'area iranica, dove ai periodi di urbanizzazione faranno seguito

quelli di frammentazione socio-politica (Tosi 1978a, b).

In questa epoca si formano quindi centri urbani come Hissar, Tureng Tepe, Namazga Tepe, Altyn Tepe e Mundigak. Quest'ultimo insieme a Shahr-i Sokhta (di seguito abbreviato in S.i.S.), sarà uno dei due poli della cosiddetta "Civiltà dell'Hilmand" (BISCIONE, TOSI 1979). Il principale centro del Sistan, S.i.S. appunto, vero e proprio capoluogo della regione in epoca protostorica, venne fondato alla fine del quarto millennio su un terrazzo (il primo nucleo dell'insediamento fu impiantato sul margine orientale del pianoro; oggi l'abitato ricopre invece un'area compresa tra i 100 ed i 120 ettari), tra il delta endoreico del grande fiume Afghano a nord-est e il lago terminale (Hamuni-Hilmand) a ovest.

Gli scavi condotti dalla missione italiana dell'IsMEO hanno individuato in dieci anni di ricerche almeno undici orizzonti culturali (denominati anche "fasi strutturali") di sviluppo della città tra il 3200 a.C. e l'inizio del II millennio: le datazioni al radiocarbonio hanno permesso di collocare le fasi ultime della città attorno al 1800 a.C., quando l'insediamento venne progressivamente abbandonato.

Il Sistan è un sistema chiuso a lento ricambio, articolato in tre aree ecologiche: la fascia perilacustre, suddivisa in pianori totalmente aridi e in steppa a vegetazione xerofila; il delta irrigato, sottoposto a coltivazione intensiva; infine, i laghi acquitrinosi con vegetazione perilacustre (Fig. 1).

Gli abitanti preistorici si installarono su un delta diverso da quello attuale, ponendo gli insediamenti su terrazzi più elevati rispetto al piano irriguo, mettendosi così al riparo dai fenomeni alluvionali (diretta conseguenza del quantitativo di neve che si scioglieva sull'Hindu-Kush, dove si trovano le sorgenti che alimentano il fiume).

L'altro importante fattore climatico, oltre alla temperatura, è il vento. In seguito al forte irraggiamento solare, soprattutto nel deserto del Registan, si originano marcati gradienti della pressione atmosferica da cui si generano (soprattutto in estate) correnti che spirando da NW raggiungono velocità di 150 km/h, con un potenziale erosivo che può raggiungere anche i 2 mm annui. L'enorme deflazione eolica non solo accentua le depressioni lacustri rimuovendone i sedimenti argillosi, ma è anche la causa del *dasht* (ossia il deserto di ciottoli). Il vento infatti spazza via tutti i materiali più fini e leggeri tra le pietre (e i cocci di terracotta, di cui è letteralmente coperto il pianoro su cui si trovava S.i.S.), lasciandole in evidenza. Nel delta le aree preferenziali della deflazione eolica sono le sponde dei canali di distribuzione e le loro chiuse che vengono trasformate in *yardang*. Il materiale eroso si deposita a formare delle dune a forma di mezzaluna (*barchane*) in prossimità delle aree di deflazione con un continuo accumulo del substrato di sabbia e fango soprattutto a sud dell'Hilmand e nel Gardan Reg, condizionando in questo modo anche la distribuzione dei terrazzi coltivabili e, di conseguenza, gli insediamenti connessi.

Per i primi studiosi giunti sul luogo dell'antica città protostorica l'elemento che più di tutti si rivelò prezioso per la conservazione dell'intero abitato fu il sale. Questa sostanza infatti sotto forma di cloruri cristallizzati (il *serir*) aveva sigillato, quasi ermeticamente, preservandola dalla umidità e quindi dall'alterazione biochimica, l'intera città. La regione in epoca protostorica risultava caratterizzata da un'ampia potenzialità agricola non dissimile, anche nelle modalità di sfruttamento (per es., gli impianti aggregativi urbani ancora oggi si trovano sui pianori per non togliere spazio alle coltivazioni, e anche nella disposizione dei campi nella pianura si riscontrano analogie con il periodo protostorico), da quella concentrata nell'odierno delta, anzi forse anche maggiore, dal momento che si trovava nelle prime fasi dell'antropizzazione. Questo sfruttamento ha, da sempre, dovuto fare i conti con la veloce evaporazione tipica di queste zone e, di conseguenza, con la eccessiva concentrazione salina nel terreno. L'avanzata tecnologia irrigua e la fitta rete di canalizzazioni (oggi irreversibilmente perduta) del periodo protostorico permetteva però un adeguato drenaggio, capace di favorire la diluizione del sale evitandone un accumulo eccessivo.

Oggi, le rovine in questa zona sono la testimonianza di un ambiente palesemente diverso dall'attuale: alla sua trasformazione, oltre agli agenti ambientali, ha contribuito anche l'uomo. Man mano infatti che l'aspetto morfologico dell'ambiente cambiava, gli uomini mutavano le loro condizioni di vita, ponendo però la basi per un'ulteriore trasformazione dell'ambiente stesso. S.i.S. era situata in una zona "ecotonicamente" eccezionale, trovandosi tra il delta, le fasce perilacustri e, infine, nei pressi della steppa pre-desertica.

Questa posizione consentiva, da una parte, di sfruttare notevoli porzioni irrigabili che rendevano prodotti quali grano, orzo, cucurbitacee (un discorso a parte merita la vite, che veniva coltivata al limite della foresta di ripa - costituita principalmente da pioppi, frassini e tamerici in associazione con piante lianose a formare fitti intrecci impenetrabili - e in prossimità dei canali, in fasce densamente alberate per non sottrarre preziosi appezzamenti di terreno alle altre coltivazioni); dall'altra, di allevare nella steppa pre-desertica bestiame (soprattutto bovini).

Diversamente gli acquitrini perilacustri furono un'inalterata fonte di materie prime (soprattutto canne e giunchi, utilizzati per stuoie, recipienti e cordami), ma anche di cibo: pesci, uccelli e uova, di cui i numerosissimi frammenti venuti alla luce in seguito agli scavi ne indicano l'importanza nella dieta (Tosi 1969). Le menzionate modificazioni ambientali dovute all'intervento umano si verificarono (in maniera anche massiccia) principalmente sull'ambiente della foresta di ripa, in modo diretto (per es., con un consistente taglio degli alberi, sia per ricavarci materia prima, sia per ottenere spazi per le coltivazioni approfittando della ricchezza organica del suolo

forestale), ma anche indiretto: lo sfruttamento idrico causato dalle irrigazioni, indispensabili nelle terre aride, determinò una diminuzione dell'acqua a disposizione della biomassa a crescita spontanea, restringendo così gli indici di umidità lungo le sponde, dove appunto si addensavano le specie vegetali che costituivano l'ambiente forestale (COSTANTINI 1977).

Questi due fattori, uniti al lento processo di rinnovamento e recupero delle piante utilizzate, finirono per distruggere irreversibilmente questo delicato ecosistema. La mancanza poi di copertura vegetativa del terreno favorì di conseguenza (oltre, ovviamente, a una maggiore dispersione idrica per evaporazione) anche l'erosione eolica dello stesso: si capisce quindi, come le complesse trasformazioni geo-morfologiche di questa regione nei secoli, siano il prodotto di un intreccio dinamico e continuo di vari fattori umano-ambientali. Si ritiene invece che le zone perilacustri si siano salvate da questi disastri ecologici in quanto adatte all'allevamento, ma soprattutto perché offrivano agli abitanti la possibilità di esercitare le già ricordate attività di pesca e raccolta.

La città si trovava pure in posizione ottimale per esercitare il controllo sia sulla produzione e l'interscambio locale, sia sui commerci di lunga distanza (per es., il viaggio che compiva la preziosa merce costituita dai lapislazzuli, dagli altopiani afgani fino alle pianure dello stato elamitico oppure alla Mesopotamia o addirittura alla valle del Nilo). La suddetta posizione intermedia della città ci conferma quindi la sua posizione di centro coordinatore e amministrativo della regione (sin dalla fine del IV millennio a.C. l'organizzazione amministrativa si avvaleva di sigilli, contatori e tavolette incise – fino ad ora ne è stata ritrovata una soltanto – con segni attestanti la conoscenza della scrittura proto-elamitica). S.i.S. accentrava, sotto il controllo di élites, anche i grandi complessi cerimoniali e gli edifici di culto: questi purtroppo non sono ancora stati scoperti, ma si può avere un'idea di come essi fossero, guardando quelli venuti alla luce in altri centri protostorici dell'Asia Media (Altyn Tepe, Tureng Tepe, Mundigak).

Dalle co-occorrenze dei processi artigianali e dai reperti rinvenuti risulta che S.i.S., oltreché centro di smistamento e di commercio di prodotti locali ed extra-regionali, fosse anche un centro manifatturiero per produzioni di alto livello specialistico che necessitavano di zone e aree adeguate, identificate dalle ricerche archeologiche con veri e propri quartieri industriali (il cui impianto favorirà anche l'ingrandimento della città a partire dalla metà del III millennio a.C.). La lavorazione artigianale specializzata avveniva quindi in quartieri e aree ristrette: tali aree funzionali sono state rintracciate e individuate anche nei villaggi attorno alla città (principalmente sul delta protostorico e nella zona del Rud-i Biyaban). Sono stati trovati infatti, in determinate aree di questi villaggi, scarti di lavorazione della calcite, oppure, come Tepe Raikes, centro specializzato nella manifattura della

ceramica, decine di forni per la sua cottura affiancati. Poche decine di km più ad est, nel Gardan Reg (ma anche nella già ricordata zona del Rud-i Biyaban), si sono poi individuati spazi in cui, soprattutto la lavorazione del rame, ma anche del piombo e dell'argento (proveniente dai massicci del Chagai), era così intensa da dar luogo a una massa di centinaia di metri cubi di rifiuti e scorie del processo metallurgico.

Gli insediamenti minori (fino ad ora ne sono stati rinvenuti circa 50), tra i 2 e i 6 ettari di estensione, appartengono quasi tutti (solo una trentina hanno però una datazione certa) alla fase proto-statale (dal 2500 circa in poi: la prima metà del III° millennio è comunque ben documentata a Tepe Rud-i Biyaban 2). Questo periodo sembra sia stato caratterizzato, da una parte, oltre che da un notevole arricchimento culturale e da un miglioramento tecnologico, anche da un particolare sviluppo insediamentale (con l'allargamento delle zone abitate) e da una maggiore centralizzazione demografica; dall'altra, inizia però a svilupparsi un processo di conservazione e di segregazione culturale (come anche nelle zone più a nord della pianura turcomanna e in quella di Gorgan: Tosi 1978a, b) dovuto principalmente allo spostamento degli assi culturali e commerciali convenzionali che univano la Mesopotamia e l'Elam con la civiltà dell'Indo e dell'Oriente asiatico, che non sarebbero più passati all'interno del continente asiatico ma sulla costa del Golfo Persico.

Questo processo verrà poi accelerato durante tutto il II millennio dalla scomparsa delle strutture urbane nell'area iranica. Si può comunque ipotizzare che il Sistan continuasse a rappresentare un ponte tra gli insediamenti della Turkmenia meridionale e il Golfo Persico. La maggioranza dei siti di epoca precedente (IV millennio) sono stati invece erosi completamente dalla deflazione eolica. La distribuzione dei siti minori è chiaramente a profilo molto concavo (addirittura l'estensione di questi insediamenti è molto inferiore di quanto predirebbe il modello log.normale), con S.i.S. che occupa nella fase della sua massima espansione fino al 60-70 % del totale di superficie abitata (in tale fase, II metà del III millennio, la città era una delle più grandi del mondo protostorico). Si evince quindi quanto poca fosse l'autonomia relativa di questi centri minori, quasi soffocati dall'opprimente accentramento amministrativo ed economico del capoluogo.

La crisi di S.i.S. e, in generale, del sistema proto-statale nel Sistan intervenne attorno all'inizio del II millennio. Mentre la città subisce in questo periodo una notevole contrazione (si riduce a 5-6 ettari, agli estremi SE e NW del pianoro), il numero degli insediamenti minori sembra invece rimanere costante (così come la popolazione). Non si tratta di una decadenza, ma semplicemente della fine di un modello socio-economico e dell'inizio di un nuovo sistema abitativo, l'oasi.

## 2. IL QUADRO GEOLOGICO

L'area compresa tra la catena dell'Hindukush a N, i monti Suleiman a E, i rilievi del Baluchistan a S e il corrugato margine dell'altopiano iranico a W rappresenta un unico bacino intermontano di ragguardevoli dimensioni (circa 200 x 400 km), posto a quote inferiori ai 1000 m s.l.m., dall'aspetto genericamente pianeggiante e caratterizzato da un ambiente desertico (Tav. IV, a). Le frontiere che lo attraversano, ripartendolo tra Iran, Afghanistan e Pakistan, hanno un carattere puramente politico-amministrativo, e ignorano per lo più gli aspetti fisiografici del territorio (Tavv. I, a; IV, a). Al contrario, la sua suddivisione geografica tradizionale nelle due regioni del Regestan e del Sistan (Tav. IV, a) trova piena giustificazione nelle caratteristiche ambientali: mentre il Regestan è occupato da un tipico deserto sabbioso, il Sistan è solo localmente interessato dalla deposizione di sabbie eoliche e ha l'aspetto di un'ampia pianura alluvionale sassosa, incisa in livelli terrazzati posti a diverse quote (JUX, KEMPF 1983).

Il confine tra queste due regioni è dato dal tratto inferiore del fiume Hilmand (Tav. I, a). Questo corso d'acqua scorre per più di 1000 km verso SW a partire dai monti dell'Afghanistan centro-meridionale, senza però poter giungere al mare visto che, come già accennato, il suo bacino è completamente isolato tra montagne che superano spesso i 3000 m di quota s.l.m.. Si tratta cioè di un reticolo idrografico di tipo endoreico che arriva a perdere, per evaporazione, nella sua corsa verso la pianura sistanaica circa il 25% delle acque. Interessante poi, da un punto di vista geo-ambientale, è il fatto che, quando il quantitativo d'acqua del grande lago terminale dell'Hamun supera una certa soglia, si inizia ad allagare una seconda depressione che si trova più a SE, il Gaud-i-Zirreh, attraverso un vero e proprio scarico di "troppo pieno" rappresentato dallo Shelag Rud (Tav. I, a). La profondità di entrambi questi bacini è assai limitata (uno o due metri al massimo); è notevole invece la loro perdita idrica per evaporazione, che può arrivare anche al 50% del volume totale.

L'area del bacino dell'Hilmand è di circa 350.000 kmq; l'area irrigabile e coltivabile è quella entro la rete dei canali e nei pressi dei rami deltizi del fiume (Tav. I, a-b), dove il fertile limo depositato dalla corrente era prezioso quanto quello del Nilo per i coltivatori egiziani. Il limo e, in generale, le particelle in sospensione nell'acqua, aumentando il loro peso specifico, rendono possibile il trasporto di sostanze più pesanti (sabbie e ciottoli): queste, accumulandosi nelle conoidi di deiezione e nei delta, favoriscono la formazione di falde acquifere sotterranee che si rivelano serbatoi idrici importanti (sia per l'uomo che per la vegetazione) durante i periodi di siccità. Ancora oggi, in alcuni rami ormai fossili (soprattutto nella zona del Rud-i Biyaban), è stato notato un flusso d'acqua permanente, e prova ne è la presenza di

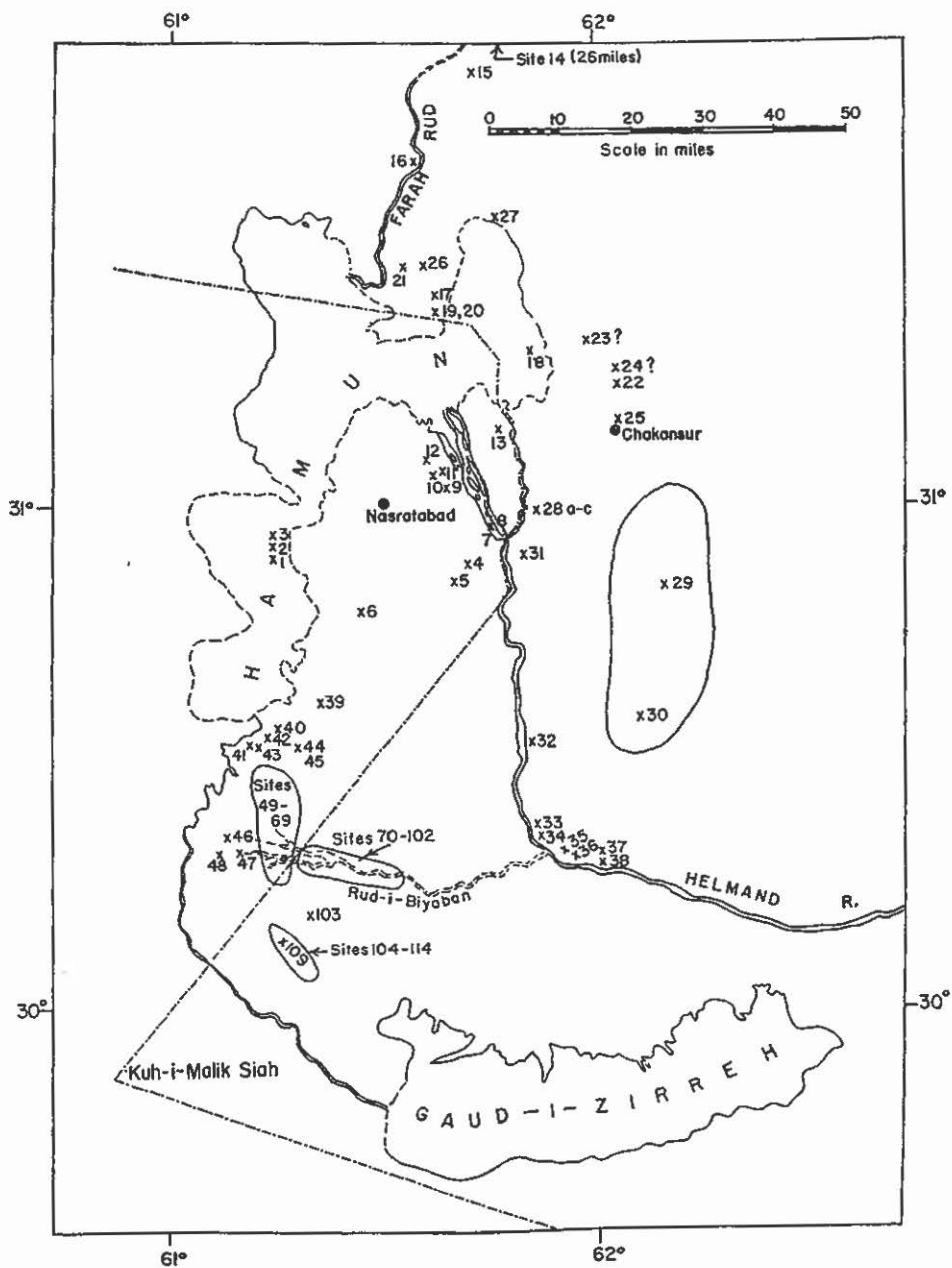


Fig. 1 - Cartografia del Sistan (da FAIRSERSV 1961).

piante freatofitiche. Gran parte delle sostanze (soprattutto il limo) trasportate dall'Hilmand si depositano però sul fondo del grande lago terminale causando un innalzamento annuo di circa 5 mm (questi caratteristici depositi argillosi, i *takyr* in lingua persiana, si possono apprezzare bene sull'immagine satellitare: Tav. I, a-b).

La presente ricerca si incentra sulla porzione terminale del corso dell'Hilmand, dove il fiume alimenta alcuni bacini lacustri (Hamun-i-Hilmand, Hamun-i-Saberi, Hamun-i-Puzak) e, depositando definitivamente il suo carico sedimentario, costruisce dei *terminal fans*, dei delta interni (Tav. I, b). Il fine è quello di fornire un primo quadro di riferimento sull'evoluzione geologico-geomorfologica di quest'area durante il Quaternario superiore, cercando di delineare quali siano state le relazioni tra la dinamica dell'ambiente fisico e il popolamento umano pre-protostorico (Tav. V, a).

A tale scopo si sono utilizzate immagini multispettrali satellitari (Landsat TM) e un DTM derivato da carte topografiche. Dall'interpretazione geomorfologica dei dati disponibili risulta che l'area terminale del bacino dell'Hilmand non è occupata da un singolo delta, ma consiste piuttosto in un mosaico di antichi apparati deltizi, o di ciò che di loro resta. Il sistema attualmente attivo si incunea tra i laghi Hamun-i-Hilmand, Hamun-i-Saberi e Hamun-i-Puzak, e spicca nelle immagini da satellite a causa dell'alto contenuto in umidità del suolo e della presenza di una rigogliosa copertura vegetale. La deposizione di queste unità sembra essere fortemente diacronica, nel senso che la giustapposizione laterale riconoscibile nelle immagini da satellite rappresenta eventi che si tagliano tra loro, stratigraficamente sovrapposti l'uno all'altro. La numerazione progressiva delle unità riportata nella carta geomorfologica (Tav. I, b, nn. 1-9) rappresenta appunto un primo tentativo di abbozzo di una scala morfo-stratigrafica di riferimento, in cui i numeri crescenti stanno a contrassegnare episodi sedimentari via via meno antichi.

I delta relitti più recenti occupano una posizione avanzata in direzione di quello che appare essere il "depocentro" del bacino, posto al piede dal sistema plicativo degli East Iranian Mountains. Questi sono anche, com'è ovvio, i sistemi meglio conservati. Le loro originarie direttrici di deflusso sono ancora ben leggibili sulle immagini e, in parte, nella topografia, consentendo spesso di discernere il fitto intreccio dei canali anastomizzati. Complessivamente si delinea una tipologia di delta a forme digitate e lobate, con apertura a ventaglio verso valle a partire dalle linee di adduzione principali delle acque, del tutto simile all'apparato attuale.

Le superfici deposizionali dei lembi di ciascun delta si estendono a quote differenti, e sono comunemente delimitate da scarpate alte da qualche metro a decine di metri, solitamente ben visibili nelle immagini da satelliti. Si delincono dunque dei livelli terrazzati. Queste scarpate sono dovute ad erosione fluviale per incassamento della rete idrografica, e sono state succes-



sivamente modificate dallo sviluppo di aree calanchive (*gully erosion*) e dalla deflazione eolica (Tav. I, b).

Quest'ultimo processo geomorfologico ha, tra l'altro, interessato anche la superficie alluvionale, portando alla formazione di *yardang* (solchi erosivi) e dune, entrambi disposti secondo la direzione dei venti dominanti (NW-SE) e ben visibili nelle immagini satellitari (Tavv. I, a; II, a-b).

Di natura differente sembrano invece essere delle scarpate che contornano le digitazioni dei delta relitti 4 e 3, isolando aree ad alta riflettanza (Tavv. II, a; IV, a) di forma triangolare sede della tipica sedimentazione argilloso-siltosa lacustre. Le loro caratteristiche e le relazioni con gli altri elementi geomorfologici indicano che si tratta di probabili ripe di erosione costiera.

A tale riguardo è necessario fare alcune considerazioni. Le immagini multispettrali Landsat TM disponibili per questo studio coprono un arco di vari anni e sono state acquisite in stagioni differenti. Un elemento che risulta palese dalla visione multitemporale dell'area consiste nella grande variabilità dell'estensione degli specchi lacustri. Questi, anche grazie alla bassa profondità dei bacini idrici (pochi metri) e ai moderati gradienti della piana (inferiori a 1 m/km) soffrono espansioni e contrazioni stagionali di centinaia di kmq, funzione diretta delle variazioni di portata dei corsi d'acqua che li alimentano. La stagione di massima portata di questi fiumi (Hilmand Rud, Khas Rud, Farah Rud, Harut Rud) è la primavera, corrispondente al periodo di maggiori precipitazioni nelle porzioni montane del bacino (JUX, KEMPF 1983). L'immagine risalente al 1990 (Tav. IV, a) è quella che mostra la maggiore espansione dei laghi ma, nonostante ciò, le aree argillose comprese tra le ripe di erosione non risultano essere inondate. Il livello dell'Hamun-i-Hilmand si presenta talmente alto che l'acqua può defluire verso sud nella depressione del Gaud-i-Zirreh, bacino effimero, privo di immissario proprio; dunque, prima che si possa verificare una ulteriore espansione del perimetro dell'Hamun-i-Hilmand, tutto il Gaud-i-Zirreh si dovrebbe riempire.

Tale eventualità appare poco probabile nelle attuali condizioni climatiche, anche tenendo conto della diminuzione delle portate avvenuta negli ultimi decenni in seguito alla costruzione di dighe a monte. Da tutto ciò parrebbe risultare che il congiunto genetico di forme fondo lacustre/ripa di erosione costiera non è attualmente attivo, evidentemente a causa di un abbassamento relativo del livello medio delle acque del lago. Il complesso di osservazioni geomorfologiche discusse sopra ci spinge a suggerire l'esistenza di un sollevamento neotettonico complessivo dell'area, attivo durante tutto il Quaternario superiore. La persistenza delle aree lacustri al margine occidentale del bacino pare indicare che qui il movimento verticale è stato minore rispetto alle aree poste più a oriente (basculamento? blocchi tettonici minori a dinamica differenziata?), ma nel complesso la presenza solo di un esiguo manto di depositi pleistocenici fluvio-lacustri al di sopra delle argille terziarie del

substrato (per lo più inferiore a 10 m: JUX, KEMPF 1983) convalida pienamente il modello. In tale cornice si inquadra inoltre bene la presenza delle importanti superfici terrazzate e delle linee di costa fossili, senza che sia necessario invocare cicliche, drastiche variazioni del volume idrico dei bacini lacustri.

L'attività neotettonica ha verosimilmente interagito con la dinamica fluviale dell'Hilmand, influenzandone le direzioni di deflusso. Per quanto riguarda gli apparati deltizi meglio conservati, le direttrici di scorrimento sembrano in effetti mostrare due mode principali: una verso NW-NNW, subparallela al margine orientale degli East Iranian Mountains e seguita dal corso attuale dell'Hilmand, e un'altra orientata in direzione WSW-SW, quasi ortogonale alla precedente.

Anche il disattivamento sistematico (su tempi presumibilmente dell'ordine di 102-104 anni) dei successivi delta trova la sua ragione d'essere in un'ipotesi di sollevamento tettonico. Un bell'esempio è rappresentato dal caso del Ram Rud, un ramo dell'Hilmand che si diparte verso W poco a valle dell'abitato di Cahar Burjak e che in tempi sub-attuali alimentava il delta interno n. 9 (Tav. I, b), mentre ora è inattivo, trovandosi a un livello di poco superiore a quello dell'Hilmand e potendo raccogliere solo acque irrigue appositamente canalizzate. Tentando di sintetizzare il meccanismo che porta a una tale variazione del reticolo idrografico, si può considerare che l'abbandono di una direttrice di deflusso avviene quando la velocità di incassamento dell'asta fluviale per erosione è inferiore al tasso di sollevamento tettonico locale; tale situazione comporta infatti il progressivo sviluppo di una contropendenza lungo il corso che favorisce lo scorrimento verso altre direzioni, secondo angoli acuti rispetto alle precedenti.

La documentata instabilità dell'assetto idrografico si traduce in una fluttuazione nella disponibilità di una risorsa fondamentale allo sviluppo di comunità umane in ambiente desertico: l'acqua. È lecito aspettarsi che i siti archeologici di una data epoca si concentrino nelle aree di delta interno attive in quel momento, territori di maggiore attrazione rispetto alle ormai inaridite porzioni relitte dei delta precedenti. Un caso di questo tipo potrebbe essere rappresentato dall'importante sito protostorico di S.i.S., che risulta essere ubicato all'estrema propaggine dell'unità deltizia 4, quasi alla convergenza con l'unità 8, in posizione adiacente alle antiche aree lacustri. Analogamente, i siti protostorici appaiono concentrarsi in gran parte in corrispondenza del delta relitto 8.

A conclusione si può affermare che, nonostante il carattere preliminare di questa ricerca, appare evidente come l'elaborazione di chiavi interpretative per l'analisi dei patterns spazio/temporali delle emergenze archeologiche della regione debba forzatamente tenere conto della sua evoluzione paleoidrografica e geomorfologica.

### 3. LA METODOLOGIA

Al di là di quanto storicamente noto e acquisito sull'archeologia preistorica del Sistan, il reperimento di immagini satellitari della regione ci ha suggerito di implementare ulteriori tecniche di analisi, indirizzando il percorso metodologico all'interpretazione geoarcheologica dei dati digitali e cartografici. In particolare risultava quanto mai interessante avviare un'analisi esplorativa e comparativa fra l'evoluzione geomorfologica del paesaggio e i sistemi insediativi antichi specificatamente fra il IV e il II millennio a.C., considerando come background le immagini multispettrali e il DEM (modello digitale del terreno), e individuando, nell'integrazione dei dati, la costruzione di un modello virtuale multidimensionale e accessibile interattivamente.

Considerate le finalità della ricerca e i dati disponibili ci si è posti i seguenti obiettivi e percorsi metodologici:

- digitalizzazione cartografica vettoriale su più layer (Tav. I, a);
- georeferenziazione dei dati cartografici sulle immagini satellitari (Tav. I, a; III, a);
- rettificazione delle immagini satellitari;
- costruzione del DEM dalle isoipse cartografiche (Tav. V, d);
- elaborazione multispettrale delle immagini satellitari a "colori naturali" (Tav. I, a);
- elaborazione a falsi colori per ciascuna banda spettrale (Tav. II, a);
- filtraggi numerici con tecniche di segmentazione ed elaborazioni a falsi colori (esaltazione dei contrasti e delle discontinuità: Tav. III, b);
- classificazione *unsupervised* (Tav. II, b);
- analisi tridimensionale delle riflettanze per le bande 2, 4 e 5 e comparazione con il DEM (Tav. IV, a);
- integrazione dei dati raster (immagini) con i dati vettoriali (cartografia, terrazzi, isoipse, interpretazioni geomorfologiche, siti archeologici: Tav. I, a; III, a);
- integrazione e sovrapposizione di tutti i dati, vettoriali e raster sul DEM, con texture mapping delle immagini del satellite (Tav. III, a-b);
- texture mapping tematici (cioè per banda e per classificazione) dei dati bidimensionali sul modello 3D (DEM);
- proiezione multidimensionale e multistrato dei modelli così ottenuti, con la visualizzazione contemporanea degli stessi (Tav. IV, a);
- navigazione interattiva in tempo reale (Realtà Virtuale non immersiva) dei diversi modelli ricostruiti con visualizzazione digitale dell'intero modello alla massima scala di dettaglio (Tav. III, c);
- visualizzazione stereoscopica a monitor (con appositi occhiali VR) del modello tridimensionale arricchito dei dati raster, vettoriali e cartografici;
- analisi spettrale ed elaborazione puntuale 2D-3D dell'area di S.i.S. (Tav. V, b).

Date le premesse, il primo vero problema si è manifestato nella georeferenziazione cartografica dei dati, in quanto l'unica base di riferimento era rappresentata da una carta del Sistan sud-orientale di produzione russa in

scala 1: 500.000 e in coordinate UTM, redatta nel 1972 e che, per insufficiente scala spaziale e scarse informazioni di dettaglio (pochi punti georeferenziati e quotati, e scarse curve di livello), poco si adattava alle necessità del modello.

A tali difficoltà si deve aggiungere il fatto che le evoluzioni microclimatiche, ambientali e tettoniche di quest'area del Sistan comportano sostanziali modifiche territoriali nel breve volgere dei mesi e degli anni. In particolare la superficie del grande lago terminale (Hamun-i-Hilmand) subisce continue sequenze di espansione e contrazione, così come la portata dei corsi d'acqua; modifiche che si assommano alla forte azione eolica prima citata. Del resto la veicolazione idrica della regione, in termini anche di portata d'acqua, ha fortemente condizionato tutti i fenomeni insediativi, come si è evidenziato nella localizzazione e georeferenziazione dei siti archeologici nel territorio (Tavv. III, c; IV, b; V, a, d). La georeferenziazione cartografica dell'immagine satellitare, pur con molte difficoltà, ha di fatto permesso di verificare anche la topografia antica della regione, per quanto noto e con alcuni dubbi.

Il completamento del lavoro di georeferenziazione, comunque, ha avviato un considerevole aggiornamento della base cartografica integrandola con un'analisi multitemporale della zona, grazie anche alle stampe fotografiche di altre riprese satellitari. Date le premesse, si viene a evidenziare una rappresentazione dinamica del paesaggio della regione, che in questo modo viene a essere monitorata in base alle prospettive di indagine (FORTE 1995, 1996a)

Dalle isoipse rintracciabili in cartografia e dai punti quotati sparsi georeferenziati e cartografati si è proceduto per interpolazione alla costruzione del DEM (modello digitale del terreno: Tav. V, d), i cui dati raster sono stati trattati con un filtro *low pass*, al fine di attenuare le discontinuità, soprattutto nelle aree lacunose di dati altimetrici (la cartografia disponibile era infatti incompleta sotto questo aspetto). In questo modo pur dovendo rinunciare alla realizzazione di un DEM molto risoluto si è riusciti a produrre un modello altimetrico sufficientemente significativo per la caratterizzazione geomorfologica della regione e per la virtualizzazione computazionale della stessa (FORTE, GUIDAZZOLI 1995; FORTE 1996b). Per la modellazione finale si è operato con diversi livelli di interpolazione dei dati altimetrici accentuando il raffinamento per le aree meglio coperte dalle curve di livello e accentuando le discontinuità nelle aree di pianura.

Il DEM infatti risulta sufficientemente rappresentativo per le aree montuose occidentali (catena degli East Iranian Mountains) in cui sono documentate isoipse cartografiche a intervalli regolari (50 m), mentre utilizza dati altimetrici puntiformi per la regione centrale e settentrionale di pianura, i cui dislivelli altimetrici sono comunque minimi (anche inferiori al metro); l'escursione altimetrica risulta comunque eclatante e ben visibile: si passa infatti dai 1200 m di altezza della catena montuosa occidentale ai 500 m circa s.l.m. della piana dell'Helmand. A completamento del DEM e del relativo allinea-

mento con i dati raster (georeferenziazione per banda spettrale), si è proceduto al texture mapping del raster sul DEM medesimo (Tavv. III, a-b; IV, a) secondo differenti livelli di risoluzione: la scelta della risoluzione della texture deve essere proporzionale al dettaglio di scala necessario per l'interpretazione (FORTE, GUIDAZZOLI 1996; FORTE 1997a).

Con l'ultima versione del software utilizzato, ER MAPPER 5.5, è stato possibile riprodurre in tre dimensioni la risoluzione fisica dell'immagine satellitare (4573 x 4573 pixel, per banda), con una notevole visibilità della texture sul DEM. L'incremento qualitativo della risoluzione della texture è infatti assolutamente basilare per procedere a interpretazioni puntuali nello spazio tridimensionale, ottenendo in questo modo un contributo informativo davvero unico.

### 3.1 L'analisi multispettrale

Le immagini da satellite sulle quali abbiamo lavorato sono del 1990 e si riferiscono al sensore TM del satellite americano Landsat 5 (7 bande multispettrali), che ha una risoluzione al suolo di 28.5 mt per pixel. Essendo due bande illeggibili (la 1 e la 3), abbiamo elaborato le bande 2, 4, 5, 6, 7, ognuna per 40 Mb di estensione. Di seguito viene riportato il contenuto dell'*header file*:

```
EOSAT Fast format (Band Sequential) header
Scene ID           : 2231019-01 WRS =157/03900
Satellite          : L5
Instrument          : TM10
Product Type       : ORBIT ORIENTE
Projection         : SOM
Pixel size (meters) > 28.50
List of bands      : 1,2,3,4,5,6,7
Pixels per scanline > 6967
Scanlines per image > 5965
```

Se per quanto concerne le applicazioni archeologiche la risoluzione al suolo dei dati Landsat appare insufficiente per analisi puntuali (circa 30 m per pixel), di contro la facoltà di operare su più bande spettrali permette di separare le componenti dell'immagine scegliendo di volta in volta il percorso di visualizzazione sulla base del contenuto spettrale della classificazione. Nel nostro caso poi l'obiettivo si poneva nella complessiva ricostruzione del paesaggio geo-archeologico a grande scala.

Il primo processo di elaborazione è stato finalizzato ad ottenere dalla composizione delle bande un'immagine che si avvicinasse ai colori naturali, inserendo la banda 5 nella componente del rosso, la banda 4 nella componente del verde, e la banda 2 nella componente del blu. Successivamente si è proceduto all'equalizzazione e all'elaborazione dell'istogramma digitale, imple-

mentando poi le classiche tecniche di segmentazione e filtraggio (filtri sharpen, edge detection, ecc.) per migliorare la lettura dell'immagine (Tav. III, b).

Di particolare interesse si è rivelata l'elaborazione a falsi colori delle bande 4, 5 e 7 (Tav. III, b) che ha agevolato l'interpretazione e classificazione geomorfologica dell'area deltizia (Tav. I, b, nn.1-9); la *palette* scelta (RGB) ha sottolineato le discontinuità al suolo nelle componenti a falsi colori. A questa ha fatto seguito una classificazione digitale di tipo *unsupervised*, del tutto adeguata agli obiettivi della ricerca e una discriminazione di massima delle principali firme spettrali; la *unsupervised* di fatto ha confermato l'interpretazione proposta (Tav. II, b).

Di una certa utilità si è rivelata anche l'analisi digitale dell'area di S.i.S., ben visibile come elemento di discontinuità del paesaggio (Tav. V, b-c) e di forma ovaleggiante allungata. Le cospicue dimensioni e l'isolamento (anche digitale) di S.i.S. rimarcano assai bene il quadro storico-topografico disegnato, soprattutto in relazione al rango prioritario del sito rispetto al popolamento coevo della regione (Tav. I, b, n. 8).

La discontinuità della risposta digitale si evidenzia particolarmente nella visualizzazione tridimensionale (Tav. V, b), in cui l'area appare distintamente concava rispetto all'intorno. Inoltre l'applicazione di filtri di segmentazione e l'equalizzazione dell'istogramma ci restituiscono una migliore lettura della topografia del sito: le regioni meridionali campite dai pixel a componenti cromatiche più scure (colore rossastro) si riferiscono alle aree scavate negli anni '70.

### 3.2 Il modello tridimensionale e le applicazioni di Realtà Virtuale

L'acquisizione dei punti quotati e delle curve di livello cartografiche ha consentito la creazione del DEM del territorio in esame che copre circa 3/4 dell'intera immagine. Le informazioni altimetriche, come si è evidenziato, sono risultate piuttosto discontinue, soprattutto nel quadrante NE, più pianeggiante. Nella fattispecie ci si è aiutati anche con l'analisi tridimensionale delle riflettanze, che ha permesso una migliore individuazione e marginatura delle morfostrutture del paesaggio. In particolare la visibilità in tre dimensioni ha evidenziato nel quadrante NE dell'immagine le morfostrutture della sedimentazione deltizia (Tav. III, b-c).

La rappresentazione finale del DEM (Tav. V, d, in rosso e nelle tonalità del giallo le aree sommitali) in relazione alle informazioni note e presunte ha complessivamente soddisfatto le aspettative di insieme anche nel modello tridimensionale. L'ulteriore verifica è risultata dal completamento del texture mapping dell'immagine satellitare georeferenziata sul DEM: i dati altimetrici hanno aderito perfettamente all'immagine riproducendo un modello di buona qualità (Tav. III, c; IV, a). Sarà cura, nel prosieguo del lavoro, affinare i dati altimetrici e di costruzione del DEM con nuove informazioni cartografiche *in situ*: è infatti prevista una nuova campagna di ricognizioni topo-

grafiche con acquisizione dei dati tramite GPS. Questo dovrebbe permettere anche una ulteriore e definitiva verifica della topografia dei siti preistorici noti in letteratura, molti dei quali sono stati pubblicati su supporti cartografici abbastanza approssimativi o incompleti.

Le tecniche di texture mapping tridimensionale su modelli territoriali, ormai consolidate (FORTE 1993a), in passato erano vincolate a rendering ottenuti con progressive interpolazioni e tempi lunghi di elaborazione (anche 10-20 ore di registrazione *frame by frame*: FORTE 1993a 1993b); in particolare poi si era vincolati a una scelta "a priori" del percorso di navigazione e di esplorazione tridimensionale (FORTE 1993a). Ora, invece, grazie all'evoluzione del software (ER MAPPER, nel nostro caso) e dell'hardware (workstation grafiche di maggiore potenza), si possono ottenere eccellenti performance in tempo reale e in modo interattivo (CALORI, FORTE, GUIDAZZOLI 1996; FORTE 1997a): il software infatti consente un rendering alla massima risoluzione fisica dell'immagine (mentre prima era vincolato a 1024 x 768), mentre i nuovi processori grafici calcolano il rendering in tempo reale. Per la nostra applicazione abbiamo fatto girare il modello sia su una workstation O2 che sulla Onyx 2 SGI, con risultati non molti dissimili nonostante le differenze di potenza (ovviamente a favore della Onyx 2).

Dal punto di vista operativo l'utente può interagire con il modello ingrandito a pieno schermo (su monitor a 21") in tempo reale, muovendosi nello spazio 3D utilizzando un mouse o un joystick. L'applicazione si può definire quindi pienamente multimediale e lascia intendere interessanti sviluppi futuri per la realizzazione di GIS multimediali (FORTE 1997a).

Il software è in grado anche di generare immagini stereo tridimensionali che si possono ben apprezzare con appositi occhiali stereoscopici (ad es., i VR Crystal Eyes), che visualizzano il modello in modo olografico restituendo all'immagine una piena e realistica profondità. Il risultato finale è stato la registrazione di un filmato in tempo reale o meglio di numerose navigazioni effettuate dagli utenti scegliendo via via le prospettive di esplorazione più idonee; questo per consentire anche una destinazione *off line* delle elaborazioni.

Nel nostro esperimento di visualizzazione tridimensionale dei dati raster e vettoriali inoltre abbiamo sfruttato per la prima volta le potenzialità della nuova versione del software (ER MAPPER 5.5), realizzando una visualizzazione multilayer e multidimensionale in 3D delle immagini georeferenziate e delle informazioni afferenti (Tav. IV, a). Questo aspetto ci sembra particolarmente rilevante sia per il prosieguo della ricerca che per progetti o applicazioni analoghi. Come possiamo infatti apprezzare dalla Tav. IV, a, è stato possibile visualizzare elaborazioni differenti delle medesime immagini, operando una proiezione tridimensionale "multistrato" e contemporanea delle stesse: in questo modo la ricerca sviluppa le massime potenzialità nelle analisi comparative. La proprietà di questa applicazione è di poter creare e visualizzare

nello stesso momento molteplici superfici digitali in 3 dimensioni comparandone contenuto qualitativo e quantitativo: la georeferenziazione dei dati garantisce poi un adeguato esito comparativo su più livelli di informazione.

Possiamo dunque scomporre l'immagine in ciascuna banda spettrale e visualizzarle tutte contemporaneamente e/o a falsi colori, verificare il DEM sulle diverse componenti spettrali, comparare DEM (dati altimetrici) e livelli di riflettanza (risposte spettrali in altezza), scomporre insomma l'intero palinsesto digitale per poi riassemblarlo in proiezioni tridimensionali. Nella ricomposizione "multistrato" delle immagini è possibile operare anche sul livello di trasparenza di ogni layer in modo da permettere la visibilità della regione sottostante di un'altra immagine. Seguendo questo approccio metodologico arriviamo di fatto a definire una vera e propria stratigrafia digitale dei dati elaborati che, nella condizione di sovrapposizione tematica, indicano ulteriori percorsi di analisi e di confronti sperimentali.

In questo senso si deve sottolineare l'importanza di sovrapporre ai dati digitali "fisici" i dati cartografici e interpretativi (geo-archeologici, nel nostro modello), che codificano il modello secondo parametri oggettivi. Nel nostro caso (Tav. I, b) ad esempio abbiamo inserito in un primo layer il modello multispettrale a colori naturali con in sovrapposizione le interpretazioni geologiche in formato vettoriale (nn. 1-9), mentre nel secondo layer o superficie abbiamo utilizzato il modello multispettrale delle riflettanze in 3D e a colori naturali (Tav. IV, a). La proiezione tridimensionale così ottenuta abbraccia un'analisi comparativa su più superfici 3D con il risultato di poter campionare dati spettrali, analogici e altimetrici, classificandone il contenuto e verificando le ipotesi interpretative.

### 3.3 *L'hardware: le potenzialità del VIS.I.T. (Visual Information Technology Lab) al CINECA*

L'acquisizione da parte del CINECA di una workstation Onyx2 Silicon Graphics apre nuove frontiere alla ricerca scientifica interdisciplinare soprattutto nel campo delle applicazioni di Realtà Virtuale desktop, immersiva e semimmersiva. L'architettura della piattaforma è del tipo *symmetric multiprocessor* basata su microprocessore Mips R10K. L'espansibilità massima del sistema consente configurazioni fino a 24 nodi e fino a 12Gbyte di memoria RAM. La parte grafica consente di configurare fino a 8 pipeline, ciascuna equipaggiata da *geometry engine*, *raster manager* e *display generator*; la potenza computazionale nella massima configurazione sfiora i 10 Gflop, mentre la potenza grafica supera gli 80 milioni di poligoni al secondo. La configurazione CINECA prevede la installazione di un sistema con case del tipo *deskside* configurato con 4 processori R10K e 1Gbyte di memoria RAM, in grado di erogare una potenza computazionale dell'ordine di 1.5Gflop, e 1 pipeline



grafica in grado di elaborare fino a 11 milioni di poligoni al secondo.

L'evoluzione dunque del VIS.I.T. si indirizza nelle applicazioni di grafica tridimensionale immersiva e del Virtual prototyping. Queste dotazioni lasciano intendere per il futuro un cospicuo sviluppo nell'ambito delle applicazioni interattive, sottolineando però il fatto che l'applicazione qui presentata ottiene sufficienti performance anche su una workstation di tipo O2 SGI, il cui costo complessivo supera di poco quello di un PC di fascia alta ben equipaggiato.

#### 4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il progetto interdisciplinare sul Sistan iraniano ci ha permesso di implementare tecnologie di elaborazione avanzate sia per l'elaborazione delle immagini multispettrali che per la ricostruzione multitemporale e "multistrato" di un modello a larga scala del paesaggio geo-archeologico della regione. Le immagini Landsat, sebbene offrano un modesto contributo, data la risoluzione, alla lettura dettagliata del suolo, in realtà hanno dischiuso fondamentali orizzonti interpretativi in relazione ai diversi tematismi di indagine, tenendo anche conto della cospicua lacunosità di documentazione per l'area in esame.

La lettura geo-archeologica ad ampio spettro delle immagini e della cartografia non solo ha fornito per la prima volta un'aggiornata seriazione degli apparati deltizi meglio conservati, ma ha imposto un'analisi spaziale comparativa multitemporale fra l'evoluzione del paesaggio archeologico (in particolare nella preistoria) e le caratteristiche tettoniche e geomorfologiche della regione, con riferimento all'area di S.i.S., ancora straordinariamente evidente come discontinuità cromatica nelle risposte spettrali delle bande esaminate. Le prospettive che possono offrire le analisi spettrali e multitemporali di questo territorio aprono nuovi scenari alla ricerca, specialmente considerando la fluidità della dinamica evolutiva della zona. Un monitoraggio digitale-satellitare della regione, scandito anche nel corso di diversi anni restituirebbe certamente nuovi livelli di visibilità del suolo e delle componenti morfologiche.

Di particolare significato è stata poi la creazione del modello tridimensionale del paesaggio, arricchito di tutti i dati noti e disponibili (raster, vettoriali, cartografia, DEM, ecc.), che possiamo descrivere come un vero e proprio modello computazionale cognitivo, in quanto nella sua specifica espressività multidimensionale e multiinformativa ha offerto alla ricerca impensabili facoltà di analisi e di simulazione. L'ulteriore visualizzazione stereoscopica a monitor, ad altissima risoluzione e confortata dalla completa interattività dell'utenza (navigazione all'interno del modello in tempo reale), qualifica questa applicazione come Realtà Virtuale semi-immersiva, teoricamente accessibile anche a più utenti contemporaneamente.

Sebbene siamo generalmente portati a considerare questi esperimenti

interattivi tridimensionali come semplicemente "suggestivi", in realtà dobbiamo riconoscere che il contributo di questo tipo di visualizzazione è davvero efficace e comporta notevoli progressi nell'interpretazione finale dei dati. Se si evidenzia il fatto che al modello 3D così costruito possiamo aggiungere e sovrapporre pressoché infiniti layers informativi, ne consegue che la simulazione riesce a percorrere sviluppi cognitivi altrimenti impraticabili. Il modello viene infatti accresciuto dalle proprietà di visualizzazione multipla e contemporanea di soggetti tematici tridimensionali, invitando in questo modo la nostra interattività a immaginare una stratigrafia cognitiva del modello stesso, strato per strato, livello informativo per livello informativo.

In modo paradossale possiamo enunciare che secondo questo approccio perveniamo, alla fine dell'elaborazione e della navigazione interattiva, alla prima e più significativa "pubblicazione virtuale" del modello geo-archeologico. Con questo siamo ancora lontani da un'analisi esaustiva dei dati, ma poniamo le basi per immaginare in futuro la pubblicazione multimediale e tridimensionale delle informazioni elaborate, in modo da fornire all'utenza scientifica le più ampie facoltà di esplorazione e verifica sui modelli ricostruiti e indagati (ad es. su CD ROM).

Si deve per altro rimarcare, infine, che un modello virtuale tridimensionale ad alta risoluzione, come quelli qui indagati, avanza notevoli facoltà predittive, in quanto ci proietta in uno spazio evocativo e rappresentativo, non simbolico ma pienamente calato nella simulazione del reale e che acquisisce significato nella dinamicità dell'esperimento.

Per quanto riguarda eventuali sviluppi futuri del progetto si potrà prevedere di integrare i pochi dati disponibili con una campagna ricognitiva sul posto con strumenti GPS che offriranno nuovi contributi sulla topografia antica e ulteriori elementi informativi sull'altimetria della regione, particolarmente per le aree depresse.

La georeferenziazione delle immagini con i dati cartografici e vettoriali, e la relativa integrazione con database territoriali, prospettano la creazione e l'implementazione di uno strumento GIS completo. L'evoluzione quindi delle attuali applicazioni raster in un GIS vettoriale potrebbe costituire un primo passo per la realizzazione della carta archeologica digitale del Sistan, con nuove proposte ricostruttive del popolamento antico.

MAURIZIO FORTE

C.N.R. - Istituto per Le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali  
Area della Ricerca di Roma - Montelibretti

PAOLO MOZZI

Dipartimento di Geografia Università di Padova

MASSIMILIANO ZOCCHI

Laureando in Protostoria, Università di Bologna

## Ringraziamenti

Si desidera ringraziare il Prof. Maurizio Tosi dell'Università degli Studi di Bologna per l'opportunità dataci di svolgere questa ricerca, fornendo le immagini da satellite e il materiale cartografico e bibliografico, oltre che indispensabili delucidazioni sugli aspetti archeologici dell'area; un vivo ringraziamento anche al Dr. Bruno Marcolongo del CNR di Padova (Istituto di Geologia) e al Prof. Gilmo Vianello dell'Istituto di Chimica Agraria dell'Università di Bologna per avere contribuito all'interpretazione delle immagini e della cartografia. Il fondamentale contributo computazionale del VIS.I.T. del CINECA ha permesso di portare a termine il progetto in tempi estremamente contenuti, nell'ambito dell'attività di diffusione del programma di ricerca europeo ICARUS.

## BIBLIOGRAFIA

- BISCIONE R., TOSI M. 1979, *Protostoria degli stati turanici. Aspetti dell'evoluzione urbana e forme di insediamento nel popolamento dell'Asia Centrale nell'età del Bronzo (2500-2100 a.C.) alla luce dei dati archeologici*, Annali dell'Istituto Universitario Orientale, Sez. Orientale, Supplemento n. 20, Napoli.
- CALORI L., FORTE M., GUIDAZZOLI A. 1996, *3D virtual scientific visualization of archaeological sites: New navigation metaphores*, «Scienza e Supercalcolo», luglio 9-12.
- COSTANTINI L. 1977, *I legni lavorati di Shahr-i-Sokhta*, Museo Nazionale d'Arte Orientale, Roma, 1-63.
- FAIRSERVIS W.A. jr. 1961, *Archaeological Studies in the Seistan Basin of South Western Afghanistan and Eastern Iran*, vol. 48, part 1, Anthropological Papers of the American Museum of Natural History, New York.
- FORTE M. 1993a, *Il paesaggio archeologico al calcolatore*, «Le Scienze», giugno 46-54.
- FORTE M. 1993b, *Image processing applications in archaeology: Classification systems of archaeological sites in the landscape*, in J. ANDRESEN, T. MADSEN, I. SCOLLAR, CAA92. *Computing the Past: Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Aarhus, Aarhus University Press, 53-61.
- FORTE M. 1995, *Tra archeologia e realtà virtuale: verso l'archeologia virtuale*, «Archeologia e Calcolatori», 6, 105-118.
- FORTE M. 1996a, *Visualizzazione scientifica e computer grafica in archeologia: le prospettive dell'informazione archeologica*, in S. ANTONELLI et al., *Section 2. Archaeometry. Colloquium IV: Digital Image Processing for the Exploitation of Archaeological Settlements and Landscapes*, XIII International Congress of Prehistoric and Protohistoric Sciences (Forlì 1996), Forlì, A.B.A.C.O. Edizioni, 97-118.
- FORTE M. (ed.) 1996b, *Archeologia. Percorsi virtuali delle civiltà scomparse*, Milano, Arnoldo Mondadori Editore.
- FORTE M. 1997a, *Il progetto ARCTOS: tra GIS, realtà virtuale e multimedialità*, in *Seconde giornate internazionali di studi sull'area elima*, Atti del Congresso (Gibellina, 22-26 ottobre 1994), Pisa-Gibellina, 693-710.
- FORTE M. 1997b, *Tra reale e virtuale: le geometrie dell'informazione archeologica al calcolatore*, in S. BIANCHI, M. CAMPOLONGO, S. SUTERA, *Archeologia e tecnologia*, Firenze, 79-93.
- FORTE M., GUIDAZZOLI A. 1995, *Archeologia computazionale tra visualizzazione scientifica, computer vision e realtà virtuale*, «Technographics», 5-6, 36-41.
- FORTE M., GUIDAZZOLI A. 1996, *Archaeology, GIS and Desktop Virtual Reality: the ARCTOS Project*, in H. KAMERMANS, H. FENNEMA (edd.), *Interfacing the Past. Com-*

- puter Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, CAA 95, Analecta Prehistorica Leidensia, n. 28, Leiden, 439-451.
- JUX U., KEMPF E.K. 1983, *Regional geology of Sistan (South West Afghanistan)*, in M. TOSI (ed.), *Prehistoric Sistan*, Roma, 5-60.
- MARIANI L. 1979, *Problems and methods in resource mapping for the palaeoeconomic study of the Hilmand Valley in protohistoric times*, in *South Asian European Archeologist, Proceedings of the Congress*, Berlin, 13-27.
- MEDER O. 1977, *Sistan. L'ambiente geografico*, in *La città bruciata nel deserto salato*, Venezia, Ediz. Erizzo.
- RAIKES R.L. 1983, *Environmental studies at Shahr-i-Sokhta*, in M. TOSI (ed.), *Prehistoric Sistan*, Roma.
- TOSI M. 1969, *Excavations at S.i.S. Preliminary report on the second campaign, September-October 1968*, «East and West», 19, 283-386.
- TOSI M. 1978a, *Ricerche archeologiche sulla protostoria del Sistan*, in *Un decennio di ricerche archeologiche*, Quaderni della Ricerca Scientifica del C.N.R., Roma, 519-547.
- TOSI M. 1978b, *L'area iranica*, in AA.VV., *Archeologia: culture e civiltà del passato nel mondo europeo ed extra-europeo*, Milano.
- TOSI M. 1984, *Il crocevia dell'Asia*, in AA.VV., *Le grandi scoperte dell'archeologia*, Milano, 1754-1832.
- TOSI M. 1985, *Dalla molle S.i.S. alla rigida Moenjedarò ovvero il consiglio disatteso*, in *Studi di paletnologia in onore di Salvatore M. Puglisi*, Roma, Università degli Studi La Sapienza, 277-288.
- TOSI M., JARRIGE J.-F. 1979, *The natural resources of Mundigak. Some observation of the site in relation to its economical space*, in *South Asian European Archeologist, Proceedings of the Congress*, Berlin, 115-139.
- TOSI M., MARIANI L. 1987, *L'universo famigliare a S.i.S attraverso le attività domestiche e le strutture residenziali*, in G. GNOLI, L. LANCIOTTI (edd.), *Orientalia Iosephi Tucci Memoriae Dicata*, Roma, Ediz. IsMEO, 853-879.

## ABSTRACT

Main target of the Sistan Project is the reconstruction of the prehistoric archaeological landscape beginning from multispectral satellite data. In order to draw a new map (historical, cartographic, geological) of Southern Sistan we have used a TM image of Landsat 5 satellite with a resolution of 28.5 mt per pixel, including 7 spectral bands. Comparing geological features with the position of archaeological sites in prehistoric age and processing digital data, we have obtained new information and hypothesis about the ancient population of the region. In particular DTM (digital terrain model) reconstruction, multispectral classification (raster data) and vectorial integration of data (archaeological sites, terraces, geomorphological features, contour levels), have allowed us to visualise a complex and dynamic model in 3 dimension. For this aim virtual reality techniques (not immersive) have been used: on workstation the user can explore in 3D the landscape model in interactive way, navigating through the digital data and choosing different perspectives and points of view. Moreover it was possible also to process at the same time multidimensional information, such as altimetrical model, unsupervised classification, natural spectral color, different spectral bands, vectorial data and so on.