

## STUDI PER LA PREVISIONE DELLE DINAMICHE EVOLUTIVE DELLA COSTA ADRIATICA AD EST DI LECCE

Marco Delle Rose

Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, CNR (m.dellerose@ba.irpi.cnr.it)

### RIASSUNTO

In questa nota sono esposti i risultati di studi condotti su tratti costieri del basso Adriatico, comprendenti arenili e coste rocciose basse. Modelli sedimentologici e geomorfologici elaborati in altri ambiti non si prestano ad essere adottati per i sistemi litoranei, dunari e retrodunari considerati. Le oscillazioni climatiche previste per l'immediato futuro potranno modificare l'intensità dei processi geomorfologici e sedimentologici degli ambienti costieri, indipendentemente dall'entità dell'innalzamento del livello marino. L'impatto sulle coste potrebbe incrementare i rischi cui sono esposti infrastrutture, attività umane, beni ambientali e culturali. L'approccio del geologo rilevatore si rivela insostituibile anche nell'era del telerilevamento e della modellistica computerizzata.

### 1. INTRODUZIONE

L'aumento del livello marino è considerato una delle principali conseguenze dell'incremento delle temperature medie che caratterizza le variazioni climatiche in atto (ENEA, 2007). La sua entità, tuttavia, è valutata diversamente dagli Autori e dai massimi organismi scientifici internazionali, con differenze di alcuni ordini di grandezza. Al termine del XXI secolo, ad esempio, studi dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (Church *et al.*, 2001; Church e White, 2006) prevedono una quota del livello marino attestata a circa 3 m al di sopra di quella attuale, mentre contributi della commissione *Sea Level Change and Coastal Evolution* della *International Union for Quaternary Research* prevedono variazioni di  $+ 10 \pm 10$  o persino di  $+ 5 \pm 15$  centimetri (Mörner, 2004). Stime intermedie, considerate più "realistiche", indicano invece per il secolo in corso valori di innalzamento eustatico medio di circa 1 centimetro all'anno (Lambeck *et al.*, 2004). A prescindere dall'entità dell'innalzamento reale del livello medio marino, le oscillazioni climatiche con incremento dei fenomeni estremi di tipo meteorico previste, tra gli altri, dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (2000), potrebbero comunque modificare sensibilmente l'intensità dei processi geomorfologici e sedimentologici degli ambienti costieri. In particolare, sono le variazioni con periodicità pluriennale e decennale a destare maggiore attenzione (Viles e Goudie, 2003).

L'impatto di tali processi sulle coste della Puglia, e specie su quelle basse, ossia elevate pochi metri sul mare (D'Alessandro, 2004), potrebbe quindi essere di notevole entità ed esporre infrastrutture ed attività umane ad alti rischi. E' pertanto evidente che il

livello di interesse, sia della comunità scientifica che dei pubblici amministratori, deve essere comunque elevato per le aree costiere più suscettibili di subire modificazioni ambientali in risposta ai cambiamenti delle forze esogene.

Sono già peraltro emerse incertezze sia sull'efficacia degli interventi di "difesa costiera" già realizzati che sui relativi impatti nello spazio e nel tempo. Infatti la Regione Puglia, nella misura 1.3 del Piano Operativo Regionale 2000-2006, pur prevedendo interventi immediati per i tratti definiti "in condizioni critiche" (quali interventi di ripascimento, di barriere a mare, di rinforzo delle rocce e di muri di contenimento), intende attivare "un approfondito monitoraggio sull'esito degli interventi stessi, pur in assenza del necessario bagaglio di conoscenze utili a prevedere gli impatti e gli andamenti dei sistemi di difesa e di consolidamento via via utilizzati [... stabilendo anche] l'attivazione del monitoraggio degli interventi finanziati ed attivati nel corso degli ultimi anni, per l'individuazione delle eventuali azioni correttive nella progettazione dei nuovi interventi" (POR PUGLIA 2000-2006).

In questa nota si espongono i primi risultati di studi condotti su tratti adriatici ad est di Lecce, che comprendono sia arenili che coste rocciose basse. Tali segmenti costieri rientrano in una delle Aree Pilota del sistema di monitoraggio Simon Costa della Provincia di Lecce che presenta più del 40% degli arenili "in erosione con valori massimi di trend erosivo pari a - 1,5 m/anno" mentre "gli habitat dunali, rivelando una generale erosione dei cordoni e la mancanza, in molti casi, di una tipica successione vegetazionale [indicano] l'effettivo degrado degli habitat stessi" (Refolo *et al.*, 2007a).



## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La bassa costa ad est dell'abitato di Lecce è delimitata da un'ampia piana costiera, tabulare e anch'essa poco elevata sul livello del mare (Palmantola, 1987). Tale caratteristica geomorfologica ha determinato il formarsi di numerosi specchi d'acqua costieri, più o meno salmastri, e di estese "zone umide" circostanti di estensione variabile in funzione dell'aridità climatica e quindi dai valori medi di precipitazioni e temperature. Questo territorio è stato estesamente interessato da opere di bonifica realizzate tra la fine del XIX secolo e l'inizio della seconda metà del XX, dapprima per contrastare la diffusione della malaria e poi per aumentare le potenzialità agricole della zona (Mainardi, 1988). I canali di bonifica sono stati talvolta inglobati in insediamenti sorti successivamente senza programmazioni urbanistiche, e risultano oggi percepiti come privi della originaria funzionalità idraulica.

Il tratto di costa qui considerato è compreso tra Torre Specchiolla e Torre Specchia Ruggeri (territori comunali di Lecce e Vernole) ed è uno tra quelli più interessati, a scala regionale, da fenomeni di arretramento (Caldara *et al.*, 1998). La particolare incidenza dei fenomeni costieri su tale tratto è emersa anche dal Progetto SeaLandSystem di Enea e Provincia di Lecce (Zacheo, 2006; Refolo *et al.*, 2007). Si tratta di una fascia di territorio punteggiata da insediamenti quali Casalabate, Torre Chianca, Frigole e San Cataldo, fruiti in origine essenzialmente durante la stagione estiva, ma sempre più utilizzati in modo permanente per residenza o dimora. Essa comprende anche bacini costieri usati come centri di ricerca per la pesca e l'acqua cultura (l'Acquatina), riserve naturali protette e zone umide di importanza internazionale (paludi delle Cesine). Non mancano inoltre emergenze archeologiche quali il Porto romano di "Adriano" a San Cataldo e i siti presso l'Edificio Idrovora e all'interno del parco delle Cesine (Harding, 1999). L'insieme di tali entità costituisce un complesso di Beni che fa di tale costa un ambito territoriale di particolare attenzione rispetto alle problematiche della protezione idrogeologica.

Il substrato è costituito prevalentemente da calcareniti del Miocene, Pliocene e Pleistocene (fig. 1), suddivise in differenti unità deposizionali la cui estensione e cui i relativi rapporti stratigrafici e tettonici sono oggetto di varie interpretazioni (Servizio Geologico d'Italia, 1968; Ciaranfi *et al.*, 1988; Bossio *et al.*, 1999; Delle Rose *et al.*, 2006). L'assetto tettonico-stratigrafico generale è quello di una

monoclinale interessata da faglie a gradinata che, verso nord-est, passa alla struttura ad horst e graben che caratterizza l'intera penisola salentina (Martinis, 1962). Nel sottosuolo sono presenti due falde idriche, una profonda contenuta nei calcari cretacei e l'altra superficiale, a struttura complessa e multistrato, contenuta nelle unità post-cretacee (Tadolini *et al.*, 1971; Delle Rose *et al.*, 2003). Esse determinano varie manifestazioni sorgentizie, di cui quelle delle Idume presentano le maggiori portate.

Gli arenili sono formati da sedimenti, ridistribuiti verso sud est dal trasporto longitudinale litoraneo, che provengono da tre aree sorgenti: Monte Vulture, che contribuisce con clasti vulcanoderivati immessi nell'Adriatico dal Fiume Ofanto; coste rocciose che forniscono clasti carbonatici; ambienti marini come la "Poseidonia matte" e il Coralligeno che producono bioclasti (Ambrosano *et al.*, 1986; Amoroso e Ranieri, 1997; Tropeano e Spalluto, 2006). Parte di questi sedimenti vengono dispersi verso i fondali adriatici specie attraverso Canyon sottomarini come quello al largo di Otranto (Caldara *et al.*, 1998).

Il tratto di costa studiato è stato sede negli ultimi decenni di episodi di dissesto idrogeologico quali sprofondamento del suolo, erosione costiera e allagamento (Delle Rose e Fiorito, 2000; Delle Rose *et al.*, 2004; Palazzo *et al.*, 2002; Refolo *et al.*, 2007) L'abitato di Casalabate (fig. 2) ad esempio, è stato interessato a partire dal 1993 da una serie di sprofon-

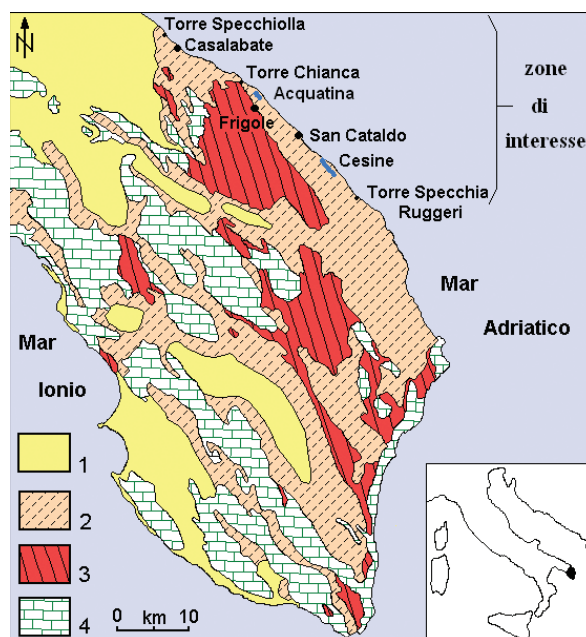


Figura 1 - Schema geologico. 1, Pleistocene Inferiore-Medio; 2, Pliocene-Pleistocene Inferiore; 3, Oligo-Miocene; 4, Cretaceo

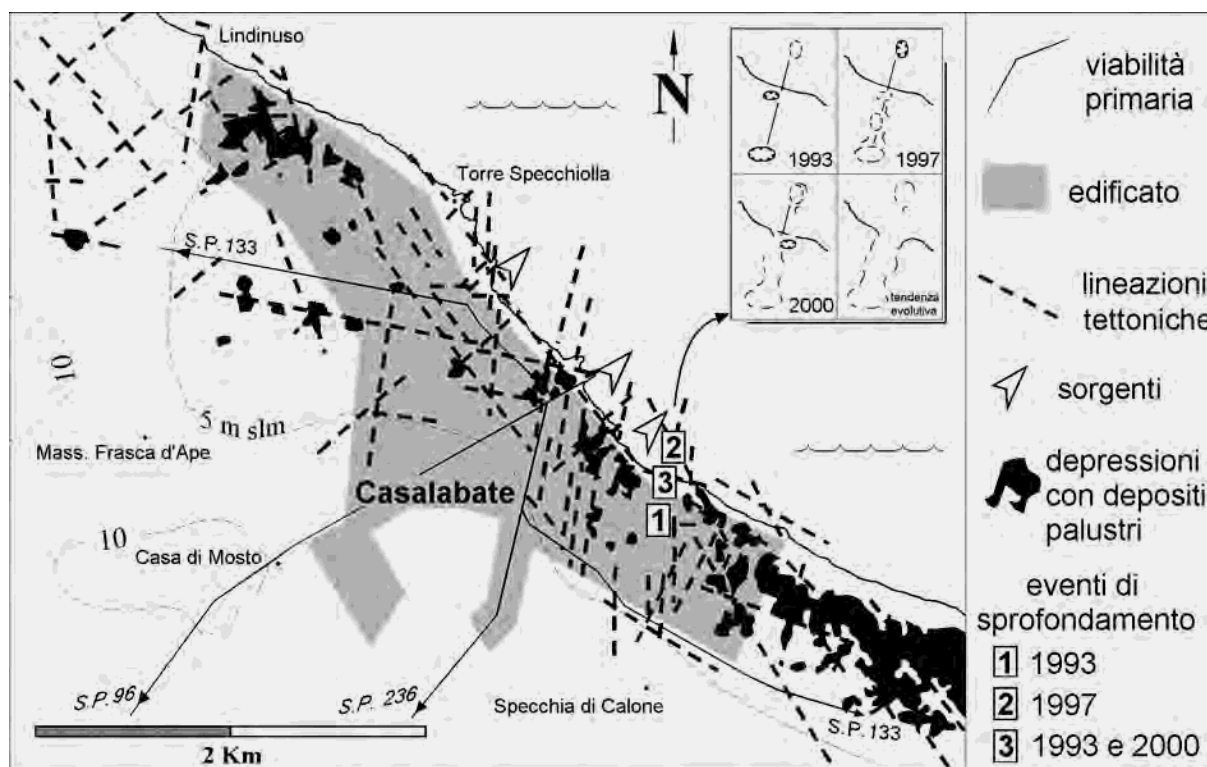


Figura 2 - Schema morfologico-strutturale di Casalabate

damenti che hanno determinato la distruzione di decine di abitazioni (Delle Rose e Federico, 2002). Gli sprofondamenti hanno maggiore rilevanza e pervasività, sino ad assumere carattere di subsidenza, nella zona delle Cesine (fig. 3) dove i loro effetti morfologici sono osservabili in genere solo per limitati periodi, prima di essere mascherati dalla vegetazione (Delle Rose e Parise, 2002). L'evoluzione geomorfologica del sito è dovuta ad una particolare inci-

denza dei fenomeni ipercarsici (*sensu* Cigna, 1983). Le Cesine sono considerate specchi d'acqua retroduali (Boenzi e Ricchetti, 1999; Mastronuzzi e Sansò, 2002).

L'erosione degli arenili è stata evidenziata, per mezzo di immagini telerilavate: tra il 1998 e il 2001 su 13 km di litorale, il 50% è risultato in arretramento con perdite complessive di circa 20.000 mq di sabbie e un valore massimo di ben 29 metri (Palazzo *et al.*,

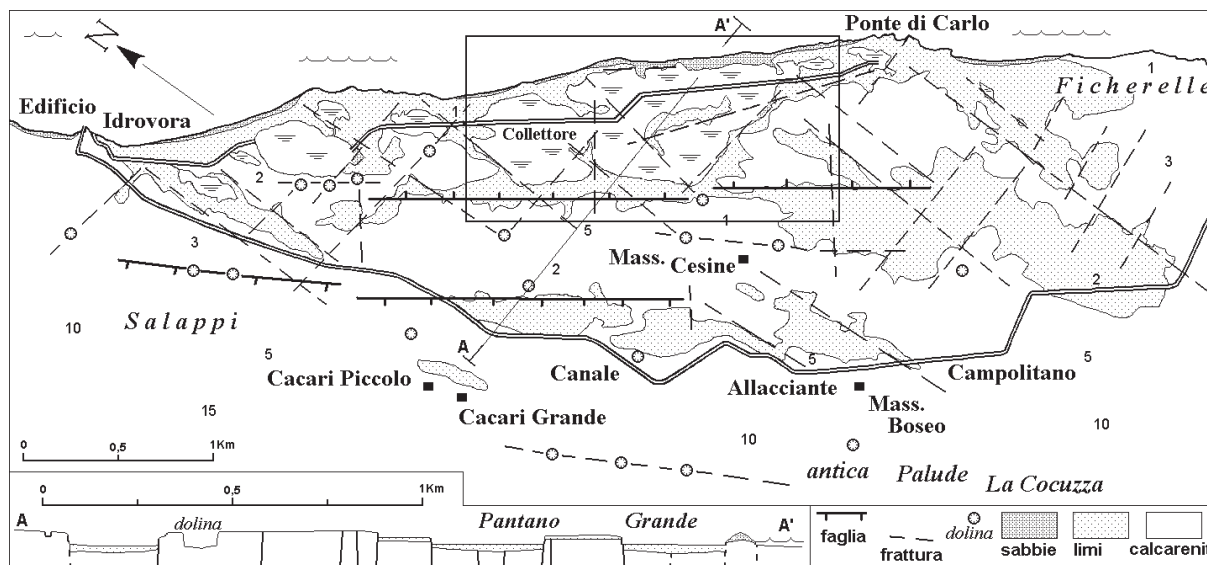


Figura 3 - Schema geologico-morfologico delle Cesine



2002). L'arretramento della linea di riva ha assunto carattere di ricorrente attualità cronachistica specie per il tratto di San Cataldo, estesamente occupato da stabilimenti balneari. Tale questione è oramai dibattuta da una decina d'anni, e non mancano pareri controversi sia sull'efficacia delle opere di difesa realizzate, quali barriere trasversali, che sulle operazioni da adottare per il ripascimento degli arenili. Peraltro, marcati arretramenti della linea di costa causati da processi erosivi accelerati dalla costruzione di massicciate a difesa di abitazioni e approdi, erano già stati individuati e segnalati a Casalabate (Delle Rose e Fiorito, 2000). San Cataldo è inoltre anche il luogo di scarico a mare dell'impianto di fognatura a servizio della città di Lecce, aspetto anch'esso da considerare nell'ottica della pericolosità del tratto di costa.

### 3. APPROCCIO METODOLOGICO E STUDI ESEGUITI

Le coste sono sistemi dinamici sottoposti ad adattamenti di forme e processi a diverse scale spaziali e temporali, in risposta a fattori geomorfologici e oceanografici (Cowell *et al.*, 2003). Le attività umane esercitano su di esse "pressioni" addizionali che possono superare gli effetti dei processi naturali. Le previsioni (e i modelli) sull'evoluzione morfologica sono basate in genere su ricostruzioni paleoambientali a scala millenaria o su processi studiati su scala sub-annuale (Nicholls *et al.*, 2007). Gli adattamenti ai cambiamenti climatici globali, tuttavia, richiedono la profonda comprensione di processi pluridecennali, e anche a scala temporale maggiore, la cui conoscenza è poco sviluppata (De Groot, 1999). L'approccio adoperato in questo studio è quindi geologico ambientale, e non applicativo in senso stretto. Sono stati infatti eseguiti rilievi di terreno finalizzati alla definizione di concetti quali: pericolosità geomorfologica dei luoghi, sensibilità dei tratti di costa e resilienza degli ambienti, che non implicano l'individuazione contestuale di soluzioni per fronteggiare i dissesti idrogeologici e permettono una adeguata analisi della complessità dei processi e della loro evoluzione spazio-temporale.

L'IPCC definisce la vulnerabilità di un sistema come il grado di suscettibilità agli effetti dei cambiamenti climatici, includendo anche eventi estremi, ed è funzione di: tipo, grandezza e tasso di cambiamento al quale è sottoposto (esposizione), sensibilità e capacità di adattamento o resilienza (Nicholls *et al.*, 2007).

Il concetto di pericolosità esprime la probabilità che un potenziale fenomeno di dissesto si verifichi

in una determinata area più o meno antropizzata; esso consente, unitamente a vulnerabilità ambientale (intesa come l'insieme complesso popolazione, costruzioni, infrastrutture, attività economiche, organizzazione sociale e programmi di espansione e potenziamento di un certo territorio) e esposizione di quantificare i rischi (Panizza, 1987). In questo studio, sono stati considerati le componenti stratigrafiche, sedimentologiche, tettoniche, strutturali e geomorfologiche, mentre per le altre componenti fisiche dei sistemi (idrogeologia, idrologia, climatologia) e naturalistiche (pedologia, componenti vegetazionali e faunistiche) si rimanda agli studi delle specifiche discipline.

La Sensitività può essere definita come la possibilità che cambiamenti di forze esterne agenti sulla costa producano effetti geomorfologici riconoscibili, oppure come la capacità di un tratto di costa di subire cambiamenti in risposta a modificazioni delle forze esterne (Brunsdon e Thornes, 1979). Essa descrive quindi la propensione di un sistema morfologico ai cambiamenti e la sua capacità di assorbire ogni *disturbing force*. La sua misura quantitativa è espressa dalla relazione tra le forze esterne che agiscono sul sistema e quelle interne che si oppongono ai cambiamenti, ed è conosciuta, in geomorfologia, come "fattore di sicurezza" o "indice di stabilità" (Brunsdon, 2001). Tale concetto ha sia un significato temporale, funzione di frequenza e intensità degli eventi modellatori, che uno spaziale, relativo alla ubicazione di cambiamenti quali, ad esempio, la sorgente dei sedimenti (Thomas, 2000). Le forze di disturbo, i *forzanti fisici*, sono normalmente considerate applicazioni di energia da parte di fattori di controllo sulla struttura interna del sistema. I cambiamenti delle forme del paesaggio si manifestano come processi di risposta e riguardano: trasporto di materiali, evoluzione geomorfologica e riorganizzazione della struttura interna del sistema. Le forze resistenti (interne) sono quelle che si oppongono ai cambiamenti, e riguardano: le proprietà fisico-mecchaniche delle rocce; la distribuzione dell'energia potenziale nell'ambito del sistema geomorfologico; uso, distribuzione e immagazzinamento dell'energia ricevuta; lo stato iniziale del sistema stesso (precedente al manifestarsi delle forze di disturbo); la storia geologica.

Lo stato di un sistema naturale complesso, come un tratto di costa, richiede anche la conoscenza del grado di recupero successivo ad una situazione di stress. Gli ecologisti definiscono con il termine Resilienza, la capacità delle comunità biotiche di



recuperare le condizioni precedenti a episodi di disturbo (Westman, 1978). Per il tratto costa studiato tale concetto appare pertinente specie per i depositi dunari. Essi ospitano vegetazione costiera che, tramite un “effetto siepe”, ne limita la sensitività rispetto alla rimobilizzazione eolica. L’attecchimento di specie psammofile favorisce infatti l’accumulo della sabbia e il consolidamento *in situ* delle dune (Audisio *et al.*, 2002). In geomorfologia la capacità di adattamento esprime comunque un concetto più ampio, essendo intesa come l’abilità dei sistemi ad aggiustarsi in risposta a sollecitazioni esterne (i cambiamenti climatici, nel caso in questione, includendo anche gli eventi estremi) per “moderare i danni, sfruttare le opportunità e far fronte alle conseguenze (IPCC, 2007). Infine, per i cordoni litorali un ulteriore e imprescindibile riferimento concettuale è l’“accomodation space” (Jervey, 1998), ossia lo spazio potenzialmente disponibile per l’accumulo dei sedimenti che è funzione di eustatismo, tettonica e tasso di sedimentazione.

#### 4. PRIMI RISULTATI

I rilievi di terreno hanno portato alla definizione dell’assetto geologico di dettaglio della costa in questione, rivelando la reale complessità alla scala degli affioramenti al di là delle rappresentazioni cartografiche. Il substrato roccioso è in prevalenza affiorante o sub-affiorante, e solo lungo alcuni tratti esso è sormontato da arenili il cui spessore è valutabile nell’ordine di alcuni metri. Da Torre Specchiolla, estremità nord occidentale dell’area di studio, sino a Torre Rinalda il substrato roccioso, tranne che per brevi tratti, affiora con continuità lungo la costa. Più a sud est, in corrispondenza del Bacino Torricella dove sgorgano le sorgenti Idume, la costa è invece sabbiosa ma torna ad essere prevalentemente rocciosa già in corrispondenza di Torre Chianca e tale permane sino alla zona umida delle Cesine, ad eccezione principalmente dei tratti antistanti lo specchio d’acqua dell’Acquatina e il canale Foca, e della falcatura a sud del faro San Cataldo. Più a sud est il substrato roccioso riprende progressivamente ad affiorare con continuità per attestarsi attorno a qualche metro sul livello del mare in corrispondenza di Torre Specchia Ruggeri ed assumere quindi i caratteri di falesia rocciosa. Per tutta la lunghezza della costa studiata, i depositi dunari appaiono adattarsi non solo alla fisiografia dei depositi di spiaggia, ma anche alla morfologia imposta dagli affioramenti del substrato, oltre che da strutture antropiche.

I tratti lungo i quali il substrato è affiorante non

sono deducibili dalla cartografia IGM né da quella tecnica provinciale. Ad esempio, per varie centinaia di metri a nord ovest e a sud est di Torre Chianca, affiorano calcari e calcareniti in strati decametrici (fig. 4). In direzione del bacino dell’Acquatina, il substrato è parzialmente ricoperto da arenili che appaiono più spessi e continui in prossimità dello sbocco del Canale Giammatteo. Il suddetto bacino, usato dall’Università di Lecce come centro di ricerca per la pesca e l’acqua cultura, è delimitato da un cordone litorale la cui sponda interna è stabilizzata da interventi antropici. Le aree circostanti non presentano affioramenti rocciosi, suggerendo un locale abbassamento del tetto del substrato.

Analoghe situazioni sono state riscontrate a sud est dell’Edificio Idrovora di San Cataldo, allo sbocco del sistema fognario, dove sono presenti rovine archeologiche prive di protezione.

Il substrato affiorante in prossimità della riva, presenta sistematicamente gli effetti dei processi ipercarsici, quali vaschette di corrosione e altre microforme. Verso l’entroterra le piane costiere, elevate pochi metri sul livello del mare ed estese sino a 2 chilometri dalla costa (Torre Specchiolla, Rauccio) sono interessate da doline di crollo (chiamate *spunulate* o, meno propriamente, *avisì*) di varie fogge e dimensioni. I processi speleogenetici e gravitativi divengono a luoghi così pervasivi da determinare subsidenza carsica, e laddove interessino insediamenti o altre opere antropiche, ne possono determinare il danneggiamento sino alla completa distruzione, come per il già menzionato caso di Casalabate. Per tale località, gli sprofondamenti succedutesi tra il 1993 e il 2000, allineati secondo linee tettoniche trasversali alla costa, indicano un processo di formazione di una insenatura (inserto di fig. 2) secondo quanto già definito a Palude del Capitano (Delle Rose, 2000). Al fine della Zonazione delle aree soggette a subsidenza carsica, è emerso che l’altimetria dei siti sembra rivestire un ruolo significativo. Infatti, nell’esperienza maturata, le aree comprese tra l’isoipsa 5 m e la riva sono state maggiormente interessate dagli episodi di sprofondamento.

Per la zona delle Cesine e l’immediato entroterra, la definizione del relativo assetto tettonico ad horst e graben e le osservazioni condotte sulle forme carsiche di superficie (Delle Rose e Parise, 2002), suggeriscono lo spostamento verso ovest del sistema geomorfologico secondo fasce parallele alla costa.

Per ciò che attiene agli aspetti sedimentologici dei depositi sabbiosi, il dettaglio degli studi eseguiti permette di valutare e considerare la sensitività



## CAMBIAMENTI CLIMATICI E RISCHI GEOLOGICI IN PUGLIA

CASTELLO DI SANNICANDRO DI BARI - 30 Novembre 2007

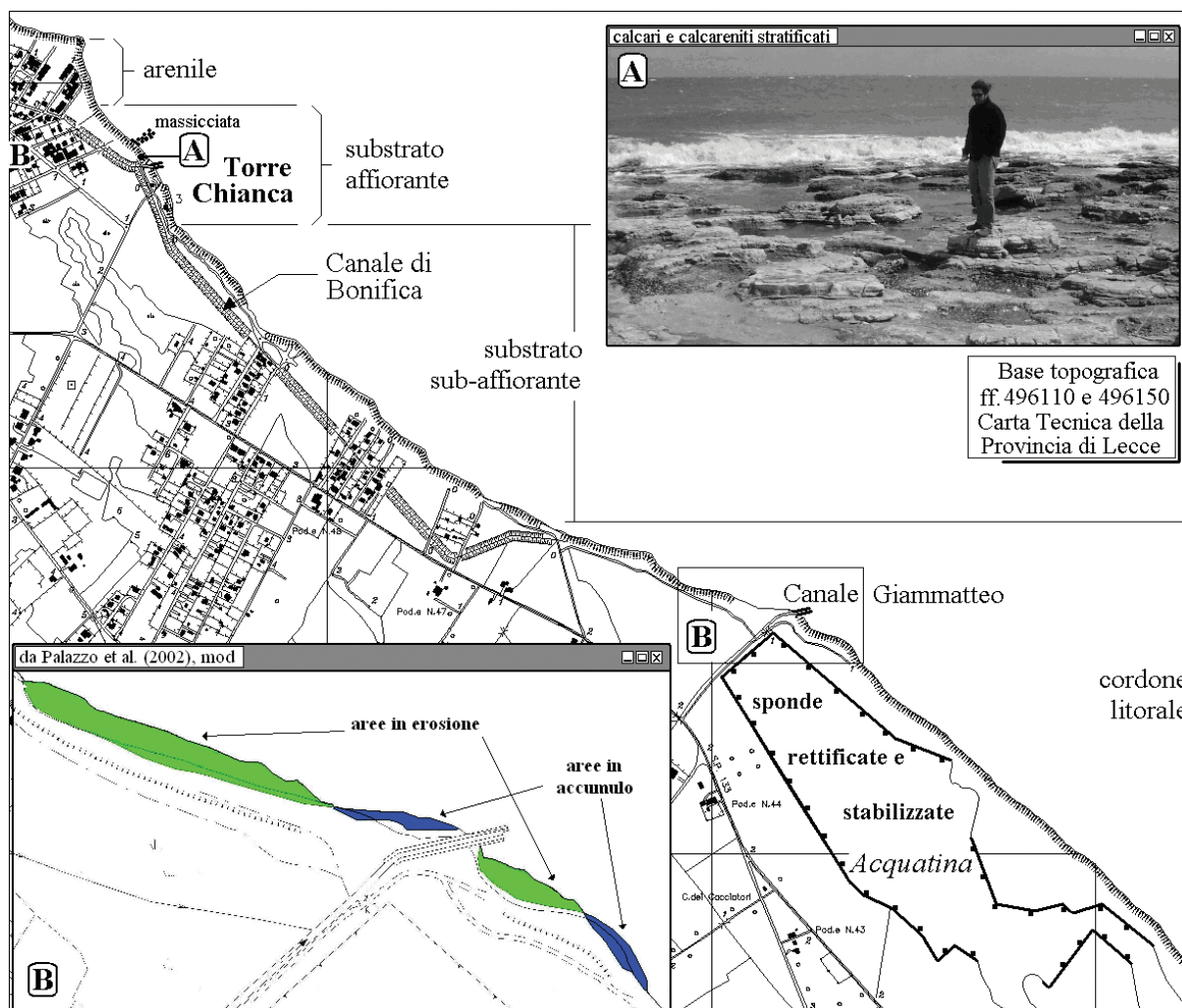


Figura 4 - Raccolta di dati di terreno e di letteratura mediante GIS. Tratto Torre Chianca – Acquatina

anche di brevi tratti rispetto all'idrodinamismo marino. Sono stati così individuati alcuni settori particolarmente inclini a subire cambiamenti imposti da forzanti esterne, quali gli incrementi delle capacità erosive del moto ondoso, privi di substrato roccioso affiorante e con depositi sabbiosi spessi almeno alcuni metri in corrispondenza della linea di costa. I tratti con maggiore sensibilità sono risultati quelli antistanti le sorgenti Idume, l'Acquatina e le Cesine, e per quest'ultimo in particolare il segmento prospiciente il Pantano Grande (fig. 5).

I rilievi di terreno hanno inoltre permesso di individuare alcune incongruenze (non corrispondenze) tra rappresentazioni topografiche e realtà dei luoghi. Oltre che a Torre Chianca, anche per i tratti prossimi all'Acquatina e alle Cesine, uno degli elaborati cartografici di maggiore dettaglio, e senz'altro uno dei più usati, ossia la Carta Tecnica della Provincia di Lecce a scala nominale 1:10.000, non riporta diffe-

renze grafiche tra tratti rocciosi e sabbiosi. Inoltre anche le quote della fascia costiera appaiono in più luoghi non caratterizzanti i dettagli morfologici osservati. Occorre considerare comunque che la stessa cartografia, ottenuta da restituzione fotogrammetrica di ripresa aerea, è elaborata con tolleranze planimetriche sino a 4 m e tolleranze altimetriche sino a 2,5 m (in particolare l'errore massimo è di 1,8 m per il 90% dei casi).

Non di meno anche la cartografia geologica esistente non risulta utilizzabile senza dovute verifiche di terreno. Ad esempio proprio in corrispondenza di Torre Chianca, il substrato geologico affiorante è attribuito a diverse unità stratigrafiche: mentre la CGI a scala 1:100.000 (Servizio Geologico d'Italia, 1968) rappresenta l'affioramento dell'unità denominata calcareniti di Andrano, una cartografia a scala 1:25.000 attribuisce il medesimo tratto di substrato alla cosiddetta formazione di Leuca (Bossio *et al.*,



1999). Si tratta di tipi di substrato le cui caratteristiche litologiche predispongono le coste a differenti gradi di erodibilità. E' questo un esempio, forse il più lampante nelle zone di interesse, della insostituibilità del rilevamento geologico di dettaglio quale strumento di base per l'analisi del territorio e delle sue tendenze evolutive.

I segni dell'erosione sugli arenili sono particolarmente evidenti lungo il tratto di costa prospiciente il bacino Acquatina (fig. 4), mentre a causa della conformazione del tetto del substrato roccioso, la piana retrostante appare esposta a subire fenomeni di allagamento per ingressione marina qualora l'erosione progredisce ulteriormente. Altro aspetto di pericolosità dell'area è determinato dalla assenza di manutenzione dei canali, interessati anche da interrimento alle foci per accumulo di sabbie. Ulteriore interesse per le tendenze evolutive di tale tratto scaturisce dalla sua ubicazione rispetto alle strutture turistico-balneari di Frigole e San Cataldo e alle dinamiche del trasporto longitudinale lungo costa dei sedimenti.

**5. CONSIDERAZIONI**

Valutazioni riguardanti l'intero territorio nazionale, basate su stime dei tassi di eustatismo, isostasia e movimenti tettonici, non includono la Puglia nelle regioni a rischio di allagamento da parte del mare (ENEA, 2007). D'altra parte la relativa letteratura sui processi geodinamici crostali quaternari, risulta incompleta e con aspetti contrastanti. Gli Autori infatti considerano il sollevamento tettonico regionale post infra pleistocenico: costante, variabile o polifasato; intervallato o meno da subsidenze; unitario o a blocchi con differenti rigetti, oppure con dislocazioni recenti rispetto a blocchi più stabili; e ancora uniforme oppure con basculamenti; con valori del tasso di sollevamento, per il solo Pleistocene Superiore, stimati in un intervallo che varia da 0,5 a 0 mm/a; inoltre anche in merito all'incidenza isostatica vi sono incertezze e pareri differenti (Delle Rose in preparazione, *cum biblio*). Manca quindi per la Puglia una adeguata sintesi neotettonica, necessaria per la valutazione degli effetti delle variazioni climatiche sulla dinamica costiera.

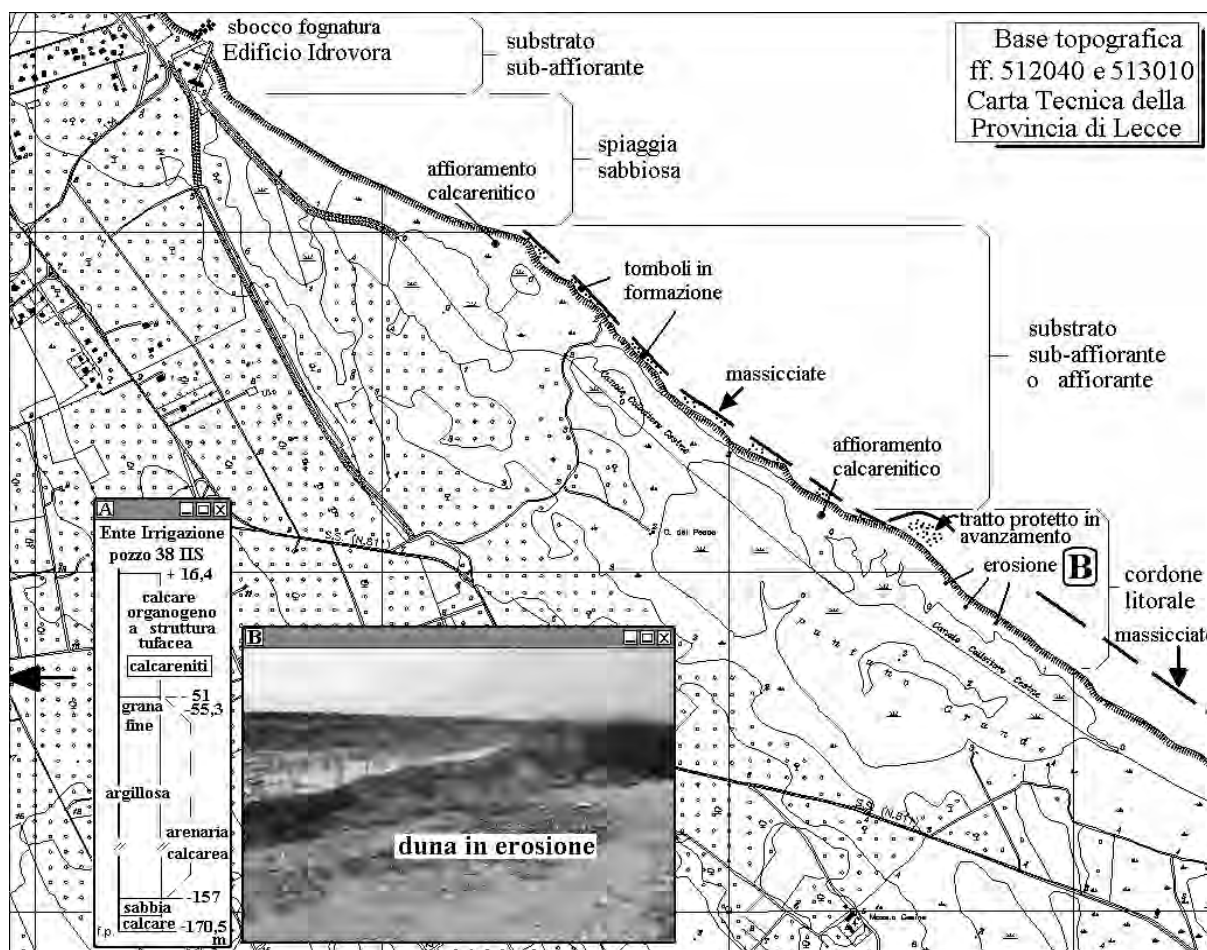


Figura 5 - Raccolta di dati di terreno e di letteratura mediante GIS. Tratto Edificio Idrovora – Cesine



Certo è che le problematiche che insistono sui tratti di costa considerati in questo studio sono di grande importanza e, peraltro, comuni ad altri tratti delle coste regionali ed extraregionali. E' noto che le coste sabbiose rappresentano un sistema reattivo (*responsive system*), epistemologicamente considerato capace di adattarsi rapidamente a cambiamenti delle condizioni ambientali dominanti. Tuttavia tale approccio può condurre a sottostimare l'incidenza delle "eredità" sedimentologiche (*inheritance*) nella formulazione dei modelli e nelle valutazioni delle tendenze evolutive. Al contrario le coste rocciose sono generalmente ritenute sistemi a "risposta lenta" (*slow-responding systems*) che permangono pressoché immutati per lunghi periodi e richiedono maggiori sollecitazioni per subire apprezzabili modificazioni, benché tale concetto può portare a non corrette valutazioni degli effetti dei cosiddetti eventi *High-Magnitude Low Frequency*, quali ad esempio le "onde estreme" delle tempeste catastrofiche (Hansom, 2001; Mastronuzzi e Sansò, 2004).

Gli studi condotti lungo la costa adriatica salentina, hanno evidenziato l'incidenza dei fenomeni ipercarsici e della conseguente subsidenza sulla evoluzione della linea di riva e delle adiacenti piane costiere. Il collasso della volta di ampie cavità a poca profondità dalla superficie determina la frequente formazione di doline (fig. 6). La loro successiva coalescenza forma più ampie depressioni, separate dal mare da diaframmi di roccia calcarenitica instabile e intensamente carsificata che possono, infine, essere demoliti e permettere l'ingresso del mare oppure consentire la formazione di cordoni litorali. Laddove la coalescenza delle doline si sviluppi secondo sistemi di fratture trasversali alla costa, come a Casalabate, essa determina la formazione di insenature (Delle Rose, 2000). In base a tale evoluzione morfologica, l'individuazione delle depressioni palustri è indipendente dalla formazione della dune, diversamente da quanto stabilito dai modelli di formazione delle "paludi retrodunari" per effetto dello sbarramento di insenature costiere da parte di cordoni litoranei (De Pippo, 2004), modello comunque valido, ad esempio, per il Lago di Sabaudia presso il Monte Circeo o, tornando in ambito regionale, per le paludi costiere della zona di Ostuni (Mastronuzzi e Sansò, 2002). Una valenza ecologica del concetto di "palude retrodunare" (Audisio *et al.*, 2002) non ne comporta, quindi, un significato geomorfologico.

Per la ricostruzione dell'evoluzione recente delle Cesine è necessario considerare che la componente

eustatica delle variazioni del livello del mare successive all'*Optimum* climatico medio olocenico, è oggetto di tre distinte scuole di pensiero. La prima sostiene che negli ultimi millenni non si sarebbero verificati sostanziali variazioni; la seconda invece suggerisce che il livello del mare ha oscillato di alcuni metri al di sopra e al di sotto del livello attuale; la terza scuola, infine, indica negli ultimi 5-6000 anni un lento e costante innalzamento eustatico (Kidson, 1982). In ogni caso, in base a dati palinologici, gli attuali ambienti paludosi delle Cesine si sarebbero sviluppati non prima di 2000 anni fa circa, mentre in precedenza essi erano probabilmente in collegamento col mare (Harding, 1999). Intorno a 2500 anni fa è inoltre datata una fase di sviluppo di depositi dunari lungo le coste della Puglia (Mastronuzzi e Sansò, 2002). Il sistema delle paludi carsiche delle Cesine migra inoltre verso l'entroterra, secondo fasce parallele alla costa, in conseguenza dell'assetto tettonico e dei processi carsici e costieri che si evolvono secondo varie scale temporali (fig. 6). L'elevata sensibilità della costa antistante la Zona Umida di Interesse Internazionale delle Cesine all'erosione degli arenili, giustifica le motivazioni all'origine degli interventi di difesa costiera realizzati. Tuttavia i programmi di conservazione naturalistica del sito, dovranno considerare la realtà geologica dei luoghi anche in ragione dell'aumento di intensità dei processi geomorfologici e sedimentologici lungo le coste (Viles e Goudie, 2003), dell'aumento degli eventi estremi di tipo meteorico, degli effetti dell'innalzamento del livello del mare, nonché delle conseguenti variazioni del livello di falda (IPCC, 2007).

L'aumento degli eventi estremi potrebbe anche incidere sulla frequenza degli sprofondamenti carsici. Bisogna infatti considerare che il Salento è stato spesso interessato negli ultimi decenni da sprofondamenti del suolo per effetto del cedimento improvviso di cavità sotterranee (naturali e antropiche), con una media di quasi un evento all'anno (Delle Rose *et al.*, 2004) e per gli eventi analizzati con maggiore dettaglio, è stato evidenziato come gli sprofondamenti siano stati in genere preceduti da intense e prolungate piogge (v. ad es. Delle Rose, 2007; Refolo *et al.*, 2007b). Le acque di infiltrazione meteorica ridurrebbero infatti la stabilità delle volte degli ipogei a causa dell'aumento delle pressioni interstiziali nei piani di discontinuità e della imbibizione delle masse rocciose (Bieniawski, 1973; Barton, 1976; Hutchinson *et al.*, 2002). Non a caso, la Scheda del Progetto Sinkhole dell'APAT, indica



tra le cause innescanti gli eventi di sprofondamento ben tre differenti situazioni legate agli aspetti idrogeologici, e cioè: precipitazioni eccezionali, alternanza di eventi alluvionali e siccità, variazione rapida della superficie piezometrica (Nisio *et al.*, 2007).

Tuttavia, gli eventi di formazione delle doline di crollo delle piane costiere studiate, risultano complessi e condizionati da molte altre variabili, quali ad esempio le variazioni del moto ondoso all'interno delle cavità e le relative spinte idrostatiche sugli ammassi rocciosi.

Occorre considerare anche un prevedibile aumento dei processi di ipercarsismo (Cigna, 1983; Delle Rose, 2000) per effetto delle variazioni del regime di dilavamento e ruscellamento. Queste ultime cambieranno infatti i tempi di residenza delle acque nelle rispettive reti idrologiche, le stratificazione verticali di salinità e temperatura e il tasso di sviluppo degli organismi fitoplanctonici (Nicholls

*et al.*, 2007). All'aumentare dell'intensità degli eventi meteorici, la conseguente diminuzione del grado di saturazione delle soluzioni acquose determinerà infine episodi di intensa dissoluzione dei carbonati.

Questi ultimi processi appaiono comunque scanditi secondo scale temporali più estese di quelle secondo cui potrà manifestarsi l'erosione degli arenili per effetto dei cambiamenti climatici. Sono stati infatti riconosciuti tratti di costa sabbiosa piuttosto sensibili e con bassa capacità di adattamento, come l'Acquatina e le Cesine, per i quali sono prevedibili per il prossimo futuro scenari d'allagamento.

**6. CONCLUSIONI**

Le oscillazioni climatiche con durata da alcuni anni sino ad un secolo, come quelle previste per l'immediato futuro, potranno modificare sensibilmente l'intensità dei processi geomorfologici e sedimentologici degli ambienti costieri, indipendente-

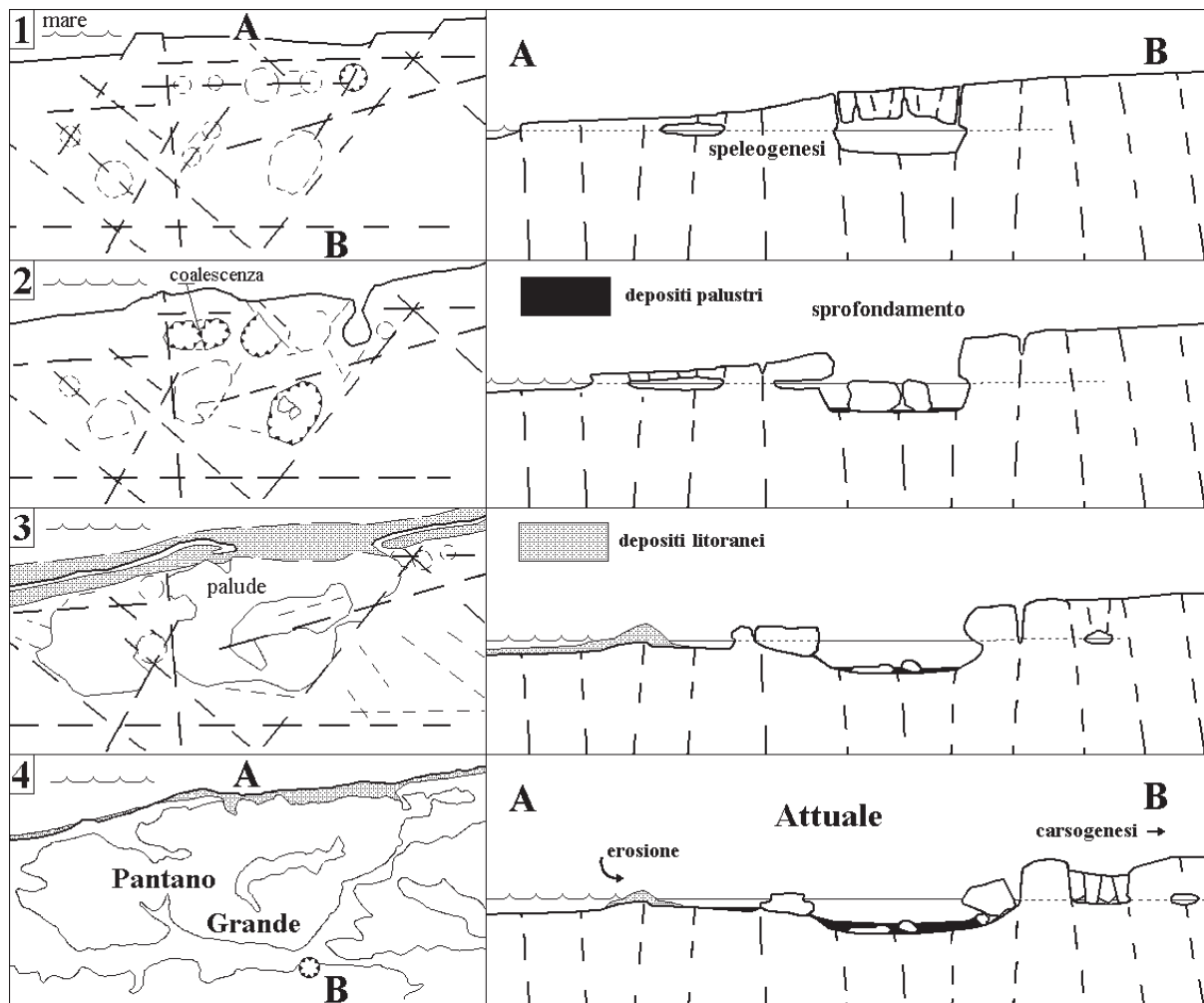


Figura 6 - Modello di evoluzione morfologica e sedimentologica delle Cesine (v. riquadro di fig. 3)



mente dall'entità dell'innalzamento reale del livello marino. L'impatto sulle coste basse della Puglia potrebbe essere di notevole entità ed esporre ad alti rischi infrastrutture, attività umane, Beni culturali e ambientali. La protezione dai dissesti idrogeologici è di conseguenza una ineludibile incombenza per politici e ricercatori. Le ricerche svolte hanno evidenziato come modelli sedimentologici e geomorfologici elaborati in altri ambiti non si prestano ad essere adottati per i sistemi litoranei, dunari e retrodunari studiati. Sono state inoltre evidenziate incongruenze tra aspetti topografici e geologici e le rispettive rappresentazioni cartografiche, che rendono l'approccio del geologo rilevatore insostituibile anche nell'era del telerilevamento e della modellistica computerizzata.

## BIBLIOGRAFIA

- ALCAMO, J., J.M. MORENO, B. NOVÁKY, M. BINDI, R. COROBOV, R.J.N. DEVOY, C. GIANNAKOPOULOS, E. MARTIN, J.E. OLESEN, A. SHVIDENKO (2007) – *Europe. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. IPCC, Fourth Assessment Report, Cambridge Univ. Press, 541-580.
- AMBROSANO E., FERRETTI O., FALCINELLI F. (1986) – *Tipologia geomorfologica costiera e caratterizzazione mineralogica dei sedimenti di spiaggia del litorale pugliese*. ENEA, 55-67.
- AMORUSO V., RANIERI G. (1997) – *Il trasporto solido del Fiume Ofanto ed evoluzione della costa in prossimità della foce*. Giornate di studio E. Orabona, 247-260.
- AUDISIO P., MUSCIO G., PIGNATTI S., SOLARI M. (2002) – *Dune e spiagge sabbiose*. Quaderni Habitat, 4, 159 pp.
- BARTON N.R. (1976) - *The shear strength of rock and rock joints*. Int. Jour. Rock Mechanics and Mining Sciences, 13, 255-279
- BIENIAWSKI Z.T (1973) – *Engineering Classification of Jointed Rock Masses*. Trans. S. Afr. Inst Civ. Eng., 15, 335-344.
- BOENZI F., RICCHETTI G. (1999) – *Idrologia*. In: AA.VV., Puglia e Monte Vulture, Guide Geologiche Regionali, 9. Società Geologica Italia, 69.
- BOSSIO A., FORESI L.M., MARGIOTTA S., MAZZEI R., MONTEFORTI B. & SALVATORINI G. (1999) – *Carta geologica del settore nord orientale della provincia di Lecce*, scala 1:25.000; settori 7, 8, 10 scala 1:10.000, Università di Siena.
- BRUNSDEN D., THORNES J.B. (1979) – *Landscape sensitivity and change*. Transactions of the Institute of British Geographers, 4, 463-484.
- CALDARA M., CENTENARO E., MASTRONUZZI G., SANSÒ P., SERGIO A. (1998) – *Features and present evolution of Apulian Coast (Southern Italy)*. Journal of Coastal Research, 26, 55-64.
- CHURCH J.A., GREGORY J.M., HUYBRECHTS P., KUHN M., LAMBECK K., NHUAN M.T., QIN D., WOODWORTH P.L. (2001) – *Changes in sea level in Climate Change 2001: The scientific basis*, Cambridge Univ. Press, 639-694.
- CHURCH J.A., WHITE N.J. (2006) – *A 20th century acceleration in global sea-level rise*. Geophysical Research Letters, 33, L01602.
- CIARANFI N., PIERI P., RICCHETTI G. (1988) – *Note illustrative alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centro-meridionale)*. Mem. Soc. Geol. It., 41, 449-460.
- CIGNA A. (1983) – *Sulla classificazione dei fenomeni carsici*. Le Grotte d'Italia, 11, 497-505.
- COWELL P.J., STIVE M.J.F., NIEDORODA A.W., SWIFT D.J.P., DE VRIEND H.J., KAMINSKY G.M., CAPOBIANCO M. (2003) – *The coastal-tract (part. 1)*. Jour Coastal Res. 19, 812-827.
- D'ALESSANDRO L. (2004) – *Coste basse: spiagge, dune costiere*. In Istituto Geografico Militare, Italia, Atlante dei Tipi Geografici, 192-195.
- DELLE ROSE M. (2000) – *Influenza dell'ipercarsismo sull'evoluzione delle coste rocciose basse del Salento*. Atti 50° ann. CARS, Altamura, dicembre 2000, 156-162.
- DELLE ROSE M. (2007) – *La voragine di Gallipoli e le attività di Protezione Civile dell'IRPI-CNR*. Geologi e Territorio, 4/2006-1/2007, 3-12.
- DELLE ROSE M., FEDERICO A., (2002) – *Karstic phenomena and environmental hazard in Salento coastal plains*. Proc. IX° IAEG Congress, Durban, 1297-1305.
- DELLE ROSE M., FIORITO F. (2000) – *Ipotesi di recupero del territorio di Casalabate (Lecce)*. Economia e Società, 2, 71-81.
- DELLE ROSE M., DE MARCO M., FEDERICO A., FIDELIBUS C., INTERNÒ G., ORGIATO W., PISCAZZI A. (2003) – *Studio preliminare sul rischio di desertificazione nel territorio carsico di Lecce*. Thalassia Salentina, 26 (suppl.), 135-143.
- DELLE ROSE M., FEDERICO A., PARISE M. (2004) – *Sinkhole genesis and evolution in Apulia, and their interrelations with the anthropogenic environment*. Natural Hazards and Earth System Science, 4, 747-755.
- DELLE ROSE M., PAPPAFICO G., RESTA F. (2006) – *Problematiche stratigrafiche e cartografiche del Pliocene a est di Lecce*. Atti 83ª Riunione SGI, 117-120.



- DELLE ROSE M., PARISE M. (2002) – *Karst subsidence in south-central Apulia, southern Italy*. International Journal of Speleology, 30B, 181-199.
- DE PIPPO T. (2004) – *Coste basse: lagune, tomboli, stagni costieri*. In Istituto Geografico Militare, Italia, Atlante dei Tipi Geografici, 196-198.
- DE GROOT T.A.M. (1999) – *Climate shifts and coastal changes in a geological perspective. A contribution to integrated coastal management*. Geol. Mijnbouw, 77, 351-361.
- ENEA (2007) – *Dossier per lo studio dei cambiamenti climatici e dei loro effetti*. ENEA, Roma, 84 pp.
- JERVEY, M.T. (1988) – *Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression*. In AA. VV., *Sea-level changes: an integrated approach*, Tulsa, SEPM, 47-69.
- HARDING J.L. (1999) – *Environmental change during the Holocene in south-east Italy: an integrated geomorphological and palynological investigation*. Larix Books, Sheffield, 137 pp.
- HANSOM J.D. (2001) – *Coastal sensitivity to environmental change: a view from the beach*. Catena, 42, 291-305.
- HUTCHINSON D.J., PHILLIPS C., CASCANTE G. (2002) – *Risk consideration for crown pillar stability assessment for mineral closure planning*. Geotech. and Geol. Eng., 20, 41-63.
- IPCC (2000) – *Special report on emission scenarios*. Cambridge Univ. Press, 599 pp.
- IPCC (2007) – *Climate Change 2007: Gli Impatti dei Cambiamenti Climatici, l'Adattamento e la Vulnerabilità. Sintesi per i decisori politici*. Vers. It., 23 pp.
- KIDSON C. (1982) – *Sea level changes in the Holocene*. Quaternary Science Reviews, 1, 121-151.
- LAMBECK K., ANTONIOLI F., PURCELL A., SILENZI S. (2004) – *Sea level change along the Italian coast for the past 10,000 yrs*. Quat. Science Revue, 23, 1567-1598.
- MAINARDI M. (1988) – *L'urbanità predatrice*. Terra d'Otranto, 3, 71-73.
- MARTINIS B. (1962) – *Lineamenti strutturali della parte meridionale della Penisola Salentina*. Geol. Romana, 1, 11-23.
- MASTRONUZZI G., SANSÒ P. (2002) – *Holocene coastal dune development and environmental changes in Apulia (southern Italy)*. Sedimentary Geology, 150, 139-152.
- MASTRONUZZI G., SANSÒ P. (2004) – *Large boulder accumulations by extreme waves along the Adriatic coast of southern Apulia (Italy)*. Quaternary International, 120, 173-184.
- MÖRNER (2004) – *Estimating future sea level changes from past records*. Global and Planetary Change, 40, 49-54.
- NICHOLLS R. J., WONG P.P., BURKETT V., CODIGNOTTO J., HAY J., MCLEAN R., RAGOONADEN S., WOODROFFE C.D. (2007) – *Coastal systems and low-lying areas*. IPCC, Fourth Assessment Report, Cambridge Univ. Press, 315-356.
- PALAZZO M., RESTA F., CIURLIA S., ACCOGLI M.P., VASANELLI L. (2002) – *Valutazione della variazione della linea di costa mediante immagini telerilevate ad alta definizione. Litorale del comune di Lecce*. Interreg II Italia-Grecia, Università di Lecce.
- PALMENTOLA G. (1987) – *LINEAMENTI GEOLOGICI E MORFOLOGICI DEL SALENTO LECCESE*. Quad. Ric. Geot. Ing., 11, 7-30.
- PANIZZA M. (1987) – *Morphological Hazard Assessment and the Analysis of Geomorphological Risk*: In "Intern Geomorph.", London, 225-229.
- REFOLO G., SANSÒ P., SELLERI G. (2007b) – *Evoluzione del paesaggio carsico e pericolosità geomorfologica nel Salento leccese*. Geologi e Territorio, 4/2006-1/2007, 25-31.
- REFOLO G., STERPONI L., MOSCHETTINI F., URRUTIA C., CIURLIA S., PERRONE R. (2007a) – *Sistema di monitoraggio satellitare delle aree costiere della Provincia di Lecce*. 10a conf. ESRI, Roma, 6 pp.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1968) – *Carta geologica d'Italia a scala 1:100.000, Foglio 204 – Lecce, II ed.*, Roma.
- THOMAS M.F. (2000) – *Landscape sensitivity in time and space*. Catena, 42, 83-99.
- VILES H.A., GOUDIE A.S., 2003 *Interannual, decadal and multidecadal scale climatic variability and geomorphology*, Earth-Science Reviews, 61, 105-131.
- TROPEANO M., SPALLUTO L. (2006) – *Present-day temperate-type carbonate sedimentation on Apulia shelves (southern Italy)*. GeoActa, 5, 129-142.
- WESTMAN W.E. (1978) – *Measuring the inertia and resilience of ecosystems*. Bioscience 28, 705-710.
- ZACHEO A. (2006) – *Il paesaggio costiero salentino: trasformazioni naturali e antropiche*. Giornate della Geografia, Università degli Studi di Udine, 17 pp.