

## RAPPORTI TRA MORFOGENESI CARSIKA ED EVOLUZIONE PALEO GEOGRAFICA NELLE AREE COSTIERE DELLA TOSCANA MERIDIONALE

Niccolò Iandelli<sup>1</sup>, Leonardo Piccini<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze; e-mail: leonardo-piccini@unifi.it.

RIASSUNTO: N. Iandelli & L. Piccini, *Rapporti tra morfogenesi carsica ed evoluzione paleogeografica nelle aree costiere della Toscana Meridionale*. (IT ISSN 0394-3356, 2007).

Nella Toscana Meridionale si trovano estesi affioramenti di brecce carbonatiche che presentano superfici a bassa pendenza con estesi fenomeni carsici. Un'analisi morfologica ha permesso di riconoscere due tipi di superfici: spianate sommitali e terrazzi marini d'erosione. Le prime sono presenti soprattutto nell'area del Poggio del Leccio, la cui natura permette di escludere per esse un controllo lito-strutturale. Queste superfici si trovano prevalentemente intorno a 250 m di quota e in misura minore intorno a 300 m s.l.m.. I terrazzi marini si trovano invece a quote comprese tra 0 e 70 m.

Le forme carsiche comprendono numerose grotte le quali possono essere distinte in due tipi principali: cavità relitte, di forma grosso-modo a camera, presenti soprattutto nelle zone sommitali a bassa pendenza; cavità ramificate a sviluppo orizzontale, appartenenti a due generazioni, di cui la più antica è situata intorno a 250 m di quota.

Sulla base delle caratteristiche del rilievo e delle cavità carsiche è stato possibile ipotizzare le principali fasi evolutive dei fenomeni carsici in relazione all'evoluzione morfotettonica di quest'area costiera. In occasione della trasgressione pliocenica, si forma probabilmente una vasta piattaforma d'erosione marina in rocce calcaree, che è poi smembrata e sollevata in modo differenziale durante il Pliocene Superiore e il Quaternario. Durante la progressiva emersione, si sviluppano forme carsiche legate alla presenza di una tavola d'acqua in prossimità della superficie della piattaforma, nonché cavità costiere ai suoi margini. Il sollevamento porta porzioni di questa superficie sino a 250-300 m di quota, conservati nelle spianate sommitali a bassa pendenza del Poggio del Leccio. Nel Pleistocene Medio-Superiore si ha l'esumazione di cavità relitte epifreatiche più antiche e la formazione di una nuova generazione di cavità costiere in corrispondenza della zona di oscillazione eustatica del livello del mare.

ABSTRACT: N. Iandelli & L. Piccini, Relationships between karst morphogenesis and palaeogeographic evolution in coastal areas of Southern Tuscany. (IT ISSN 0394-3356, 2007).

In Southern Tuscany, close to the border with Lazio Region, wide outcrops of carbonate breccias (Calcere Cavernoso) display a relief characterised by top horizontal surfaces and slope terraces with karst landforms. Morphometric analysis, based on a DTM with a resolution of 10 m, has allowed us to identify some low-gradient surfaces displaced from 0 to 300 m a.s.l.. Erosional surfaces are of two different kinds: old summit surfaces and marine terraces. The former occur mainly on Poggio del Leccio area, as smooth-relief areas not controlled by lithologic surfaces. Presently, these surfaces are located around 250 m a.s.l., up to 300 m a.s.l., whereas marine terraces are located between 0 and 70 m a.s.l..

The most peculiar feature of this area is the occurrence of surface karst and caves that can be related to palaeo-coastal environments. Caves show two different patterns: chamber-shaped relict caves, occurring mainly on low gradient surfaces, and horizontal maze caves. Those of first kind can be the result of the collapse of caves formed at the water table, in a coastal platform anciently located just a few tens of meters above the sea level, similar to those of many present coastal tropical karsts. Horizontal maze caves can be grouped into two generations. The first one regards only few caves located around 250 m a.s.l.. The second generation is located near the present sea level and is probably due to mixing solution in epiphreatic condition. Submerged caves, occurring up to 50 m below the present s.l., must be related to sea low-stands, because vadose speleothems occur inside them.

The morphologic features of the area, together with the geomorphic features of caves, indicate some of the evolutionary steps that fit well with the palaeo-geographic reconstructions proposed by Authors for Pliocene and Pleistocene. During the Pliocene transgression a wide marine platform develops on carbonate rocks. The platform is fragmented and differentially raised during Late Pliocene and Quaternary. During the emersion of this platform, caves form at the water table just near the topographic surface, whereas flank margin caves are developed along the coast. The uplift moves some portion of this old marine platform up to 250-300 m a.s.l.. During Middle-Late Pleistocene, relict epiphreatic caves are exhumed and destroyed by surface denudation, whereas a new generation of flank margin caves is forming in the zone of eustatic variation of sea level.

Parole chiave: chiave: carsismo, morfologia costiera, grotte marine, Toscana Meridionale, Orbetello.

Keywords: karst, coastal morphology, sea caves, Southern Tuscany, Orbetello.

### 1. INTRODUZIONE

Gran parte delle forme carsiche superficiali (escluse ovviamente quelle a piccola scala) e soprattutto sotterranee sono forme relitte, nel senso che si sono formate in condizioni morfologiche e climatiche, talvolta legate ad un lontano passato, diverse da quelle attuali. Ciò significa che gli ambienti carsici hanno un'elevata capacità di conservazione morfologica, a causa del ridotto ruolo dei processi erosivi di modellamento. Quest'elevata "inerzia" morfologica rende queste aree adatte per la ricostruzione delle principali tappe dell'e-

voluzione paleogeografica. Un caso particolare è quello dei contesti paleo-costieri, nei quali le forme carsiche possono servire come ulteriori elementi per il riconoscimento e la correlazione di antiche linee di riva, e fornire dati per la stima dei tassi di sollevamento.

In Italia sono presenti molte zone carsiche costiere, in corrispondenza di affioramenti carbonatici lungo le coste attuali o in prossimità di esse (CICOGNA *et al.*, 2003). In Toscana, gli esempi più interessanti si trovano in provincia di Grosseto e riguardano estesi affioramenti di brecce carbonatiche, cartografate genericamente come Calcere Cavernoso, che presentano diversi

aspetti morfologici peculiari (PICCINI, 2001). I maggiori affioramenti si trovano al M. Argentario e sui colli ad E di Orbetello, per una superficie totale di circa 80 km<sup>2</sup>.

La presenza di grandi cavità di sprofondamento, note localmente come “bottini”, aveva già attirato l’attenzione di MORI (1931), che aveva anche osservato il fatto che queste si concentravano in corrispondenza di superfici con bassa energia del rilievo che caratterizzano le parti sommitali di alcuni rilievi calcarei.

In anni relativamente recenti queste zone sono state oggetto di ricerche da parte di speleologi di Firenze e Grosseto (ADIODATI *et al.*, 1998; CAVANNA, 1998). Queste indagini hanno prodotto una ricca ed interessante documentazione e hanno portato alla scoperta di altre cavità, per un totale di 57 grotte conosciute. Parallelamente sono state condotte ricerche lungo la costa, che hanno permesso la scoperta di numerose grotte subacquee sino alla profondità di circa 50 m (ALVISI *et al.* 1987; ALVISI & BRUNI, 1990; BARD *et al.*, 2001).

Queste scoperte, oltre ad avere evidenziato l’importanza di queste aree nel quadro dei fenomeni carsici della Toscana, permettono oggi di affrontare una prima analisi del fenomeno con l’obiettivo di capire la genesi di queste forme carsiche e i rapporti con l’evoluzione paleogeografica di questa zona costiera.

## 2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO

L’area in oggetto si trova in provincia di Grosseto, nell’estreme propaggini meridionali della Toscana, al confine con il Lazio. Essa comprende una serie di rilievi continentali (Poggio del Leccio, Colli di Capalbio) e para-insulari (Monte Argentario, Isola di Giannutri), caratterizzati, con l’eccezione dell’Argentario, da forme relativamente dolci (Fig. 1).

Da un punto di vista geologico, questa zona è caratterizzata dalla presenza di più unità tettoniche di per-

tenenza ligure-piemontese (Unità di Cala Grande, Unità di Santa Fiora), subligure (Unità di Cala Piatti) e toscana (Falda Toscana e unità toscane metamorfiche) (DECANDIA & LAZZAROTTO, 1980; BONAZZI *et al.*, 1992) (Fig. 2).

La Falda Toscana affiora come “Serie Ridotta”, in cui fenomeni di laminazione epicrostale, successivi all’accavallamento delle diverse unità, hanno portato all’elisione quasi completa della successione, lasciando spesso solo le formazioni evaporitiche basali (Anidriti di Burano) a interporsi tra basamento paleozoico e unità Liguri (DECANDIA *et al.* 1993). In gran parte dell’area, alle formazioni della Falda Toscana si accompagnano estesi affioramenti di breccie carbonatiche, cartografate come “Calcarea Cavernoso”, la cui genesi è per molti versi ancora controversa. Alle prime interpretazioni, che vedevano queste breccie come il risultato di una frammentazione autoclastica (per idratazione dei solfati) e/o tettonica delle formazioni basali della Falda Toscana, si sono aggiunte, con il tempo, ipotesi che vedono nel Calcarea Cavernoso principalmente il prodotto di un rimaneggiamento in ambiente subaereo di rocce carbonatiche già fortemente cataclastate, in un quadro di esumazione tettonica e di elevata dinamica superficiale (CARMIGNANI & KLIGFIELD, 1990; PANDELI & PADOA, 1998).

Al di là delle ipotesi sull’origine di queste breccie, è importante sottolineare il fatto che esse, salvo situazioni particolari e localizzate, presentano un discreta omogeneità ed un’alta isotropia “in grande”, e quindi non sono in grado di dare luogo a forme a controllo litostrutturale, se non alla scala dei singoli affioramenti.

## 3. ANALISI DELL’OROGRAFIA

In queste aree, e in particolare nella zona del Poggio del Leccio, poco a NE di Orbetello, sono presenti superfici a bassa pendenza, sommitali e non, già segnalate da diversi Autori (MORI, 1931; PASQUARÈ *et al.*, 1983; ZANCHI & TOZZI, 1987) e da questi interpretate come “antiche superfici d’erosione marina”.

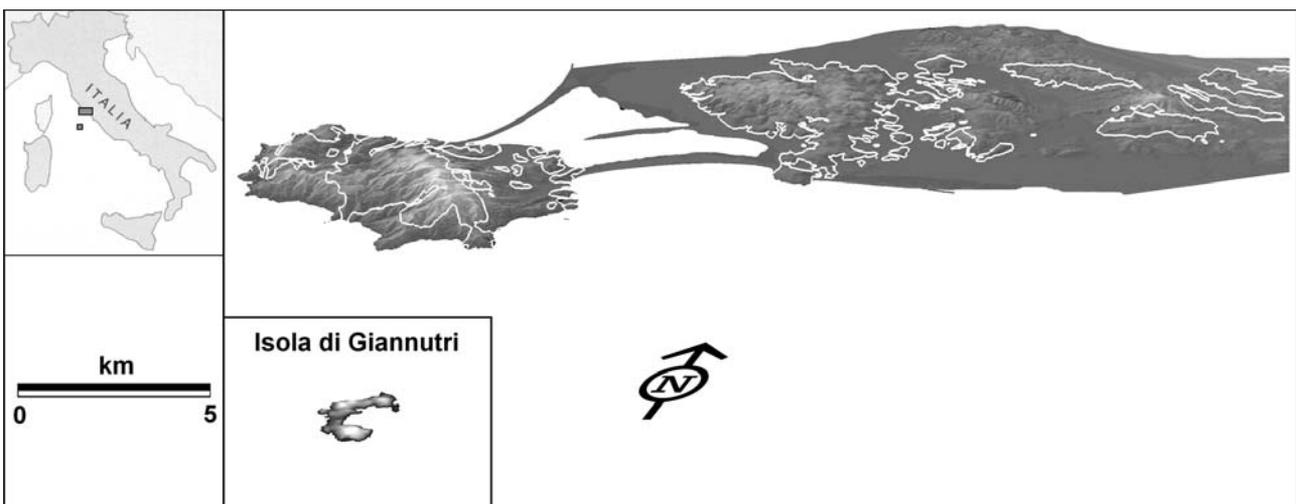


Fig. 1 - Localizzazione geografica dell’area di studio e modello tridimensionale della zona di Orbetello. La linea bianca delimita gli affioramenti di rocce carbonatiche; L’Isola di Giannutri è interamente costituita da rocce calcaree.

Location of study area and 3D model of Orbetello area. The white line encircles the carbonate outcrops; Giannutri Island consists entirely of limestone.

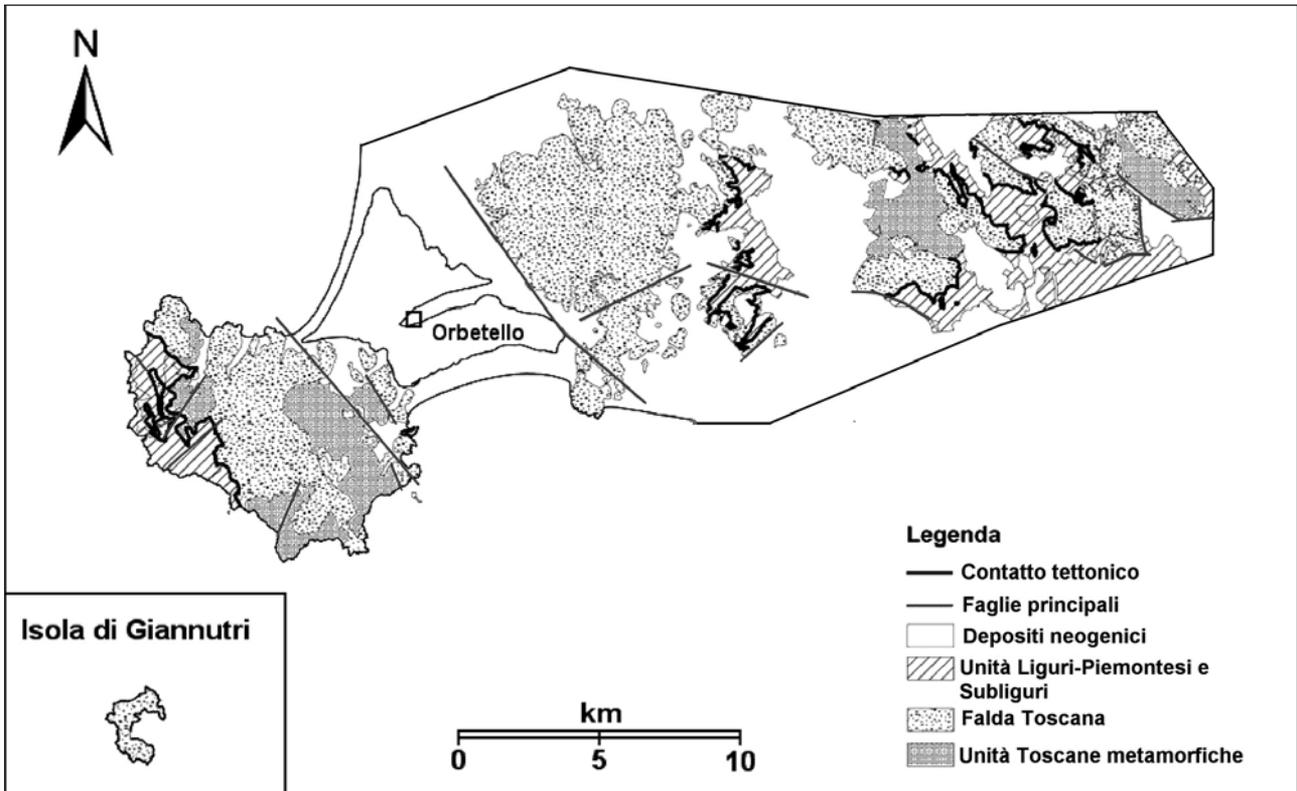


Fig. 2 - Schema tettonico dell'area di Orbetello e dell'Isola di Giannutri.  
Tectonic sketch map of the Orbetello region and Giannutri Island.

Allo scopo di analizzare queste superfici da un punto di vista morfologico, è stato realizzato un modello digitale del terreno (DTM) basato su un'elaborazione, che prende il nome di TIN (*Triangulated Irregular Network*), che unisce tutte le quote note, distribuite nello spazio irregolarmente, attraverso segmenti. In questo modello, costruito utilizzando la cartografia numerica in scala 1:10.000 della Regione Toscana, con l'uso del software ArcGis 8.3 di ESRI, la superficie topografica è approssimata da triangoli i cui vertici corrispondono ai punti quotati. Dal TIN è stato estrapolato un *grid* a celle quadrate con una risoluzione di 10 m. Sul *grid* sono state compiute diverse analisi morfometriche ed elaborazioni statistiche allo scopo di mettere in risalto la presenza "anomala" di zone a bassa pendenza sulle sommità dei rilievi e lungo i versanti.

Le prime analisi, tese a descrivere l'ipsografia dell'area, hanno riguardato il calcolo della superficie delle fasce altimetriche, definite su diversi intervalli di quota, e la distribuzione altimetrica delle zone a bassa pendenza.

La distribuzione altimetrica per fasce di quota su tutta l'area considerata (Fig. 3a) mette in evidenza la presenza di estese superfici a quote comprese tra 75 e 100 m. Al di sopra dei 100 m, l'andamento dell'istogramma ipsografico mostra un profilo regolare, tipico di un rilievo che potremmo definire "evoluto", e non mette in evidenza la presenza di estese superfici sommitali a basso gradiente topografico.

Più significative risultano le analisi della distribuzione altimetrica delle superfici a bassa pendenza (Fig. 3b). Per la scelta del limite locale di "bassa pendenza"

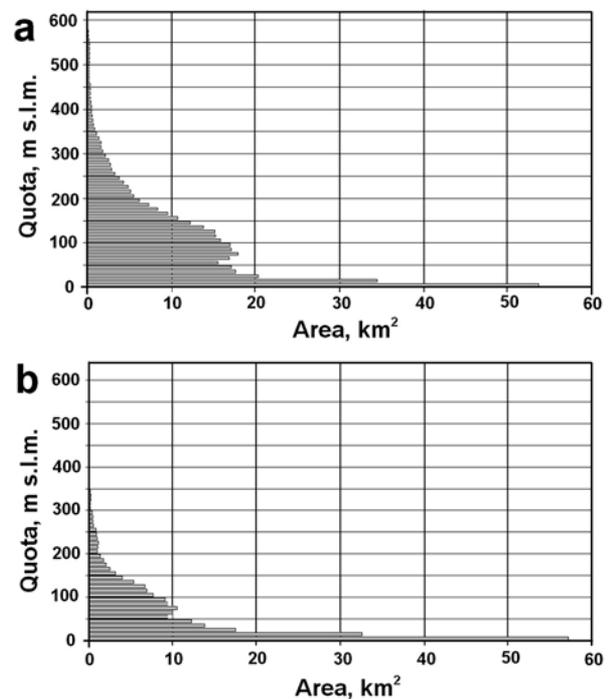


Fig. 3 - a) Iistogramma ipsografico (fasce di quota di 10 m) dell'area studiata. b) Distribuzione altimetrica delle superfici a bassa pendenza (< 14%).

a) Hypsographic histogram (altitudinal ranges = 10 m) in the study area. b) Altitudinal distribution of low-gradient surfaces (< 14%).

è stata prima effettuata un'analisi delle acclività, sulla base del DTM. Da queste analisi sono state derivate, utilizzando diverse classi di pendenza, varie carte che hanno permesso di individuare in 8°, pari a circa una pendenza del 14 %, il valore che meglio discrimina le superfici a basso gradiente topografico presenti sui rilievi e in particolare su quelli a litologia calcarea (Calcarea Cavernosa). Questo tipo di analisi è stato effettuato sia su tutta l'area in esame, sia separatamente sui 3 gruppi orografici principali: Monte Argentario, Poggio del Leccio e Colli di Capalbio. I grafici ottenuti denotano la presenza di zone a bassa pendenza distribuite su diverse fasce di quota.

Sul M. Argentario (Fig. 4) si nota la presenza di zone pianeggianti soprattutto a quote di qualche decina di metri sul livello del mare. Significativa è pure la presenza di zone di cresta arrotondate nelle parti alte del rilievo, di modesta estensione complessiva ma percentualmente rilevanti (le aree a quote comprese tra 550 e 580 m s.l.m. sono in gran parte a bassa pendenza).

Al riguardo occorre precisare che una parte, anche percentualmente significativa, delle zone di cresta che il grafico mostra come a "bassa pendenza" possono essere il prodotto dell'interpolazione tra curve di livello che il software opera nella costruzione del DTM. Rilievi sul terreno e da foto aeree mostrano però l'effettiva presenza di zone di cresta arrotondate e a tratti pianeggianti.

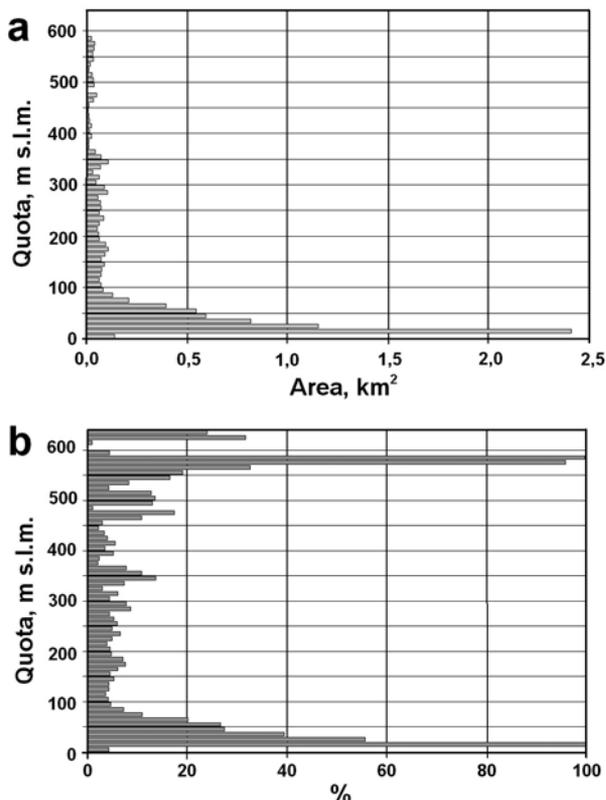


Fig. 4 - a) Distribuzione altimetrica (10 m) delle superfici a bassa pendenza (< 14%) al Monte Argentario. b) Rapporto percentuale tra superfici a bassa pendenza e superficie totale per fasce di quota (10 m).

a) Altitudinal distribution (10 m) of low-gradient surfaces (< 14%) in the Monte Argentario. b) Percent ratio between low-gradient surface and total surface as function of 10 m altitudinal ranges.

Al Poggio del Leccio (Fig. 5), oltre alle ampie superfici della piana costiera attuale, situate a quote comprese tra 10 e 20 m, si nota un modesto ma significativo picco a quote intorno a 250 m, la cui importanza è messa ben in risalto dal grafico che mostra il peso percentuale di queste superfici. Anche qui il grafico che mostra la percentuale di superfici a bassa pendenza per ogni fascia di quota evidenzia la significativa presenza di zone a basso gradiente nelle aree sommitali, per le quali c'è il ragionevole dubbio che si tratti, in alcuni casi, di superfici fittizie create dal DTM.

Nella zona dei Colli a NW di Capalbio (Fig. 6), le superfici a bassa pendenza sono localizzate soprattutto tra 70 e 100 m, senza contare l'attuale piana costiera, e corrispondono principalmente alle superfici di terrazzi fluviali del Pleistocene e a superfici d'erosione che interessano diverse litologie del substrato, tra cui i conglomerati poligenici del Miocene.

Le superfici a bassa pendenza individuate sono state oggetto d'indagini di campagna e con foto aeree, permettendo di distinguere, limitatamente a quelle d'erosione, due categorie: antiche superfici sommitali e piattaforme d'erosione marina.

Le prime sono arealmente significative soprattutto nell'area del Poggio del Leccio e sono impostate prevalentemente sul Calcarea Cavernosa, la cui natura litologica, come già detto, permette di escludere per esse un controllo lito-strutturale per l'assenza di stratificazione.

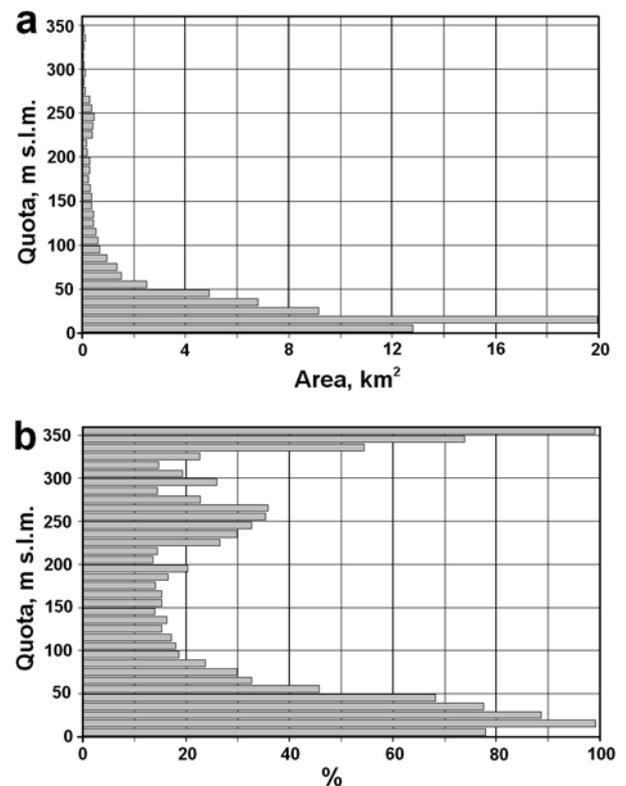


Fig. 5 - a) Distribuzione altimetrica (10 m) delle superfici a bassa pendenza (< 14 %) al Poggio del Leccio. b) Rapporto percentuale tra superfici a bassa pendenza e superficie totale per fasce di quota (10 m).

a) Altitudinal distribution (10 m) of low-gradient surfaces (< 14%) in the Poggio del Leccio area. b) Percent ratio between low-gradient surface and total surface as function of 10 m altitudinal ranges.

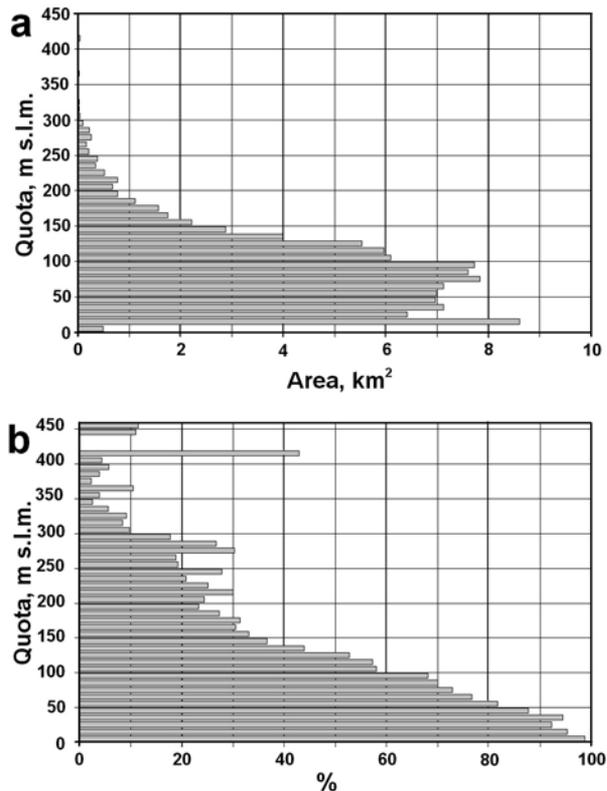


Fig. 6 - a) Distribuzione altimetrica (10 m) delle superfici a bassa pendenza (< 14%) nell'area dei Colli di Capalbio. b) Rapporto percentuale tra superfici a bassa pendenza e superficie totale per fasce di quota (10 m).

a) *Altitudinal distribution (10 m) of low-gradient surfaces (< 14%) in the Colli di Capalbio area.* b) *Percent ratio between low-gradient surface and total surface as function of 10 m altitudinal ranges.*

Più che di vere e proprie superfici pianeggianti si tratta di zone a basso gradiente topografico, con pendenze solitamente inferiori al 10 %, modellate in forme dolci e arrotondate e con idrografia poco accentuata. Come risulta dai grafici, queste superfici si trovano localizzate prevalentemente intorno a 250 m di quota e, in misura minore intorno a 300 m s.l.m. Queste zone risultano anche quelle maggiormente carsificate e ricche di cavità relitte.

La presenza di estesi fenomeni carsici può avere avuto un ruolo importante, non solo nella conservazione, ma anche nel modellamento di queste superfici, contribuendo a conferire loro una bassa acclività "in grande" come risultato della coalescenza di depressioni carsiche dovute all'infiltrazione.

I terrazzi marini sono invece localizzati a quote comprese tra 0 e 70 m. Si tratta di lembi di superfici, di estensione solitamente ridotta, relativamente piane, in qualche caso associate a paleo linee di riva o a depositi costieri e sono attribuiti alle fasi trasgressive succedutesi durante il Pleistocene Medio-Superiore (MORI, 1968; GRAUSO e ZARLENGA, 1991; MAZZANTI, 1995).

#### 4. IL CARSISMO

L'altro elemento peculiare di questa zona è la presenza di diffuse forme carsiche di superficie e di cavità sotterranee con morfologia molto particolare (MORI, 1931, 1932; ADIODATI *et al.*, 1998). Forme carsiche di superficie sono presenti a tutte le scale. Alla scala dell'affioramento si osservano le tipiche alveolature del Calcare Cavernoso, dovute a processi di alterazione e di dissoluzione differenziale dei clasti, accompagnati da fenomeni di disaggregazione fisica che porta alla formazione di fori passanti, crepacci e rilievi ruiniformi.

Le forme più interessanti, come già accennato, sono però quelle a scala media e grande (*sensu* PICCINI, 1999) presenti soprattutto nelle zone superiori a bassa pendenza. Rilievi sul terreno e con foto aeree hanno permesso di individuare un centinaio di doline, di diametro variabile da pochi metri sino a oltre 100. Alcune grandi depressioni presenti nelle zone periferiche dei rilievi carbonatici e controllate anche da elementi strutturali, possono essere assimilate a *polje* marginali.

È importante ricordare che nella zona di pianura sono presenti diversi laghi, e molti di più ve n'erano in passato (MORI, 1932), che in gran parte possono essere interpretati come il prodotto di fenomeni di sprofondamento (*sinkhole*) analoghi a quello verificatosi recentemente nei pressi di Roselle, poco a nord di Grosseto (BERTI *et al.*, 2001). Al riguardo, un'ipotesi che necessiterebbe di studi più approfonditi è che molti di questi sprofondamenti si siano formati durante l'ultima fase di basso eustatico, come conseguenza dell'abbassamento della superficie piezometrica, nelle zone ove sedimenti costieri avevano coperto aree di affioramento del Calcare Cavernoso.

Molte delle doline e delle depressioni presenti nelle zone sommitali a bassa pendenza sono legate a crolli di cavità sotterranee, alcune delle quali sono ancora parzialmente accessibili. Le dimensioni arrivano a superare i 20 m di diametro con profondità sino a 35 metri. Le depressioni più accentuate sono note come "bottini" e presentano spesso vani laterali la cui morfologia fa pensare ad un'origine in ambiente sommerso, per la presenza di alveolature e forme di corrosione tipo *spongework* sulle pareti.

Per quanto riguarda i fenomeni carsici più propriamente sotterranei, in tutta la zona sono note 57 grotte, concentrate per lo più nell'area del Poggio del Leccio. Le dimensioni sono in genere modeste e non sono al momento conosciuti sistemi carsici complessi.

La grotta più estesa è la Grotta di Punta degli Stretti (numero catasto: 250/GR, Fig. 7), che si apre sul bordo occidentale del Monte Argentario, a pochi metri dalla laguna di Orbetello. Questa cavità è costituita da

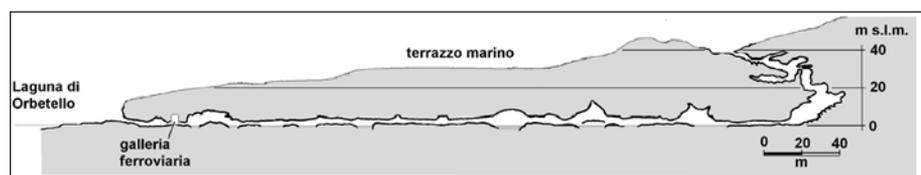


Fig. 7 - Profilo schematico della Grotta di Punta degli Stretti (250 T/GR).  
*Sketch profile of Grotta di Punta degli Stretti (250 T/GR).*

una galleria ad andamento orizzontale con brevi ramificazioni, che si sviluppa in corrispondenza del livello del mare attuale. La grotta è prevalentemente di origine epifreatica, dovuta a processi di dissoluzione a livello della tavola d'acqua, legati a fenomeni di miscelazione tra acque d'infiltrazione e acque salmastre. Nelle parti iniziali della grotta sono presenti riempimenti clastici che ricoprono antichi corpi di concrezione di età non conosciuta (SEGRE, 1959). Nella grotta sono evidenti i segni di stazionamento del livello delle acque a circa 3-4 m di altezza, rispetto al livello attuale, riconducibile all'alto eustatico Tirreniano.

Altre modeste cavità a sviluppo orizzontale si trovano nelle zone di versante del Poggio del Leccio, intorno a quota 200 m s.l.m. La maggior parte delle grotte ha però sviluppo misto. Ad un primo tratto verticale, segue un tratto orizzontale od inclinato, che corrisponde al pavimento detritico di ambienti a camera, anche molto vasti, spesso di pianta ellittica. Si tratta per lo più di cavità prive di ramificazioni, di forma emisferica, comunicanti con l'esterno tramite crolli che ne hanno interessato la volta. Tra queste, la più ampia e profonda è il Bottino della Corbacchiara (1413/GR) che si apre con un grande pozzo di 35 m, che da accesso ad una vasta camera il cui pavimento scende sino ad una profondità di 73 m (Fig. 8 e 9).

Le numerose grotte sottomarine, note soprattutto allo scoglio dell'Argentarola e a Giannutri (ALVISI *et al.* 1987; ALVISI & BRUNI, 1990) hanno dimensioni modeste ed andamento prevalentemente orizzontale. In molti casi sono chiaramente connesse con paleofalesie ora sommerse (Fig. 10).

Da segnalare, infine, la presenza in molte cavità di riempimenti detritici costituiti da brecce con matrice rossastra, spesso bene cementate, ricche in molti casi di resti di grossi vertebrati erbivori (cervidi, equidi) e carnivori (canidi, felidi, ursidi, ...) (Fig. 11) che molti autori fanno risalire al Pleistocene Superiore (BLANC, 1955; RADMILLI *et al.*, 1955; SEGRE, 1959; AZZAROLI *et al.*, 1990)

## 5. MORFOGENESI DELLA CAVITÀ CARSIICHE

Da un punto di vista morfologico è possibile distinguere due tipi principali di grotte: cavità di forma grossomodo a camera, presenti soprattutto nelle zone sommitali a bassa pendenza, e cavità ramificate a sviluppo prevalentemente orizzontale. Nessuna delle grotte, anche tra le poche a sviluppo prevalentemente verticale, ha le caratteristiche di cavità di percolazione o di paleo-inghiottitoi.

Grandi cavità a camera, prive di estese diramazioni laterali e non inquadrabili in sistemi di drenaggio sotterraneo di acque d'infiltrazione, sono di

solito attribuite a fenomeni ipercarsici (*sensu* FORTI, 1993), per lo più dovuti a miscelazione localizzata tra acque a carattere chimico diverso, legate solitamente a risalita di acque termali, fenomeni di ossido-riduzione di mineralizzazioni o intrusione di acque marine (PALMER, 1991).

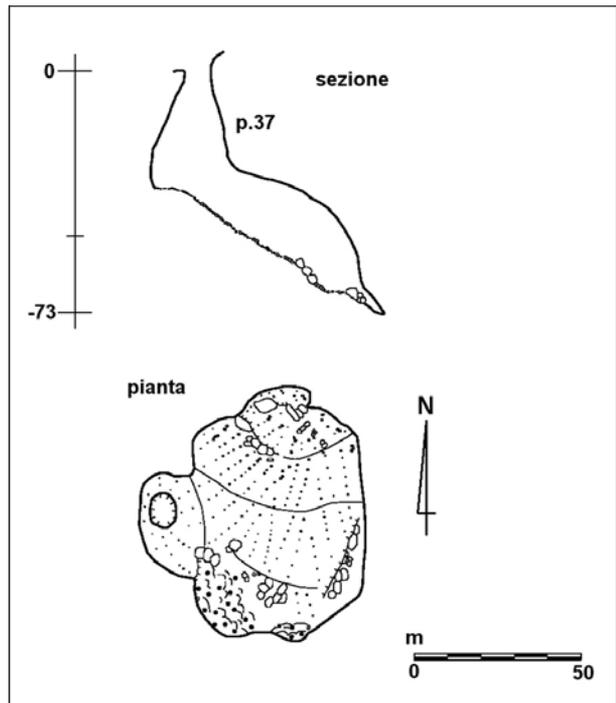


Fig. 8 - Rilievo topografico del Bottino della Corbacchiara (1413 T/GR).

*Topographic survey of Bottino della Corbacchiara (1413 T/GR).*



Fig. 9 - Il grande ambiente alla base del pozzo d'ingresso del Bottino della Corbacchiara.

*The big chamber at the foot of the external pit of Bottino della Corbacchiara.*

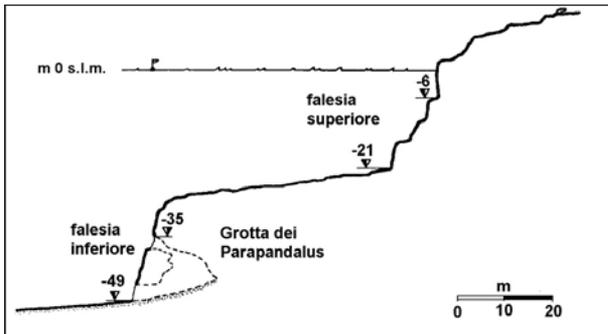


Fig. 10 - Profilo batimetrico della scogliera sommersa in corrispondenza della Grotta dei Parapandalus, all'Isola di Giannutri, (da Alvisi et al., 1987, modificato).

*Batimetric profile of submerged reef close to the Grotta dei Parapandalus, at Giannutri island (after Alvisi et al., 1987, modified).*

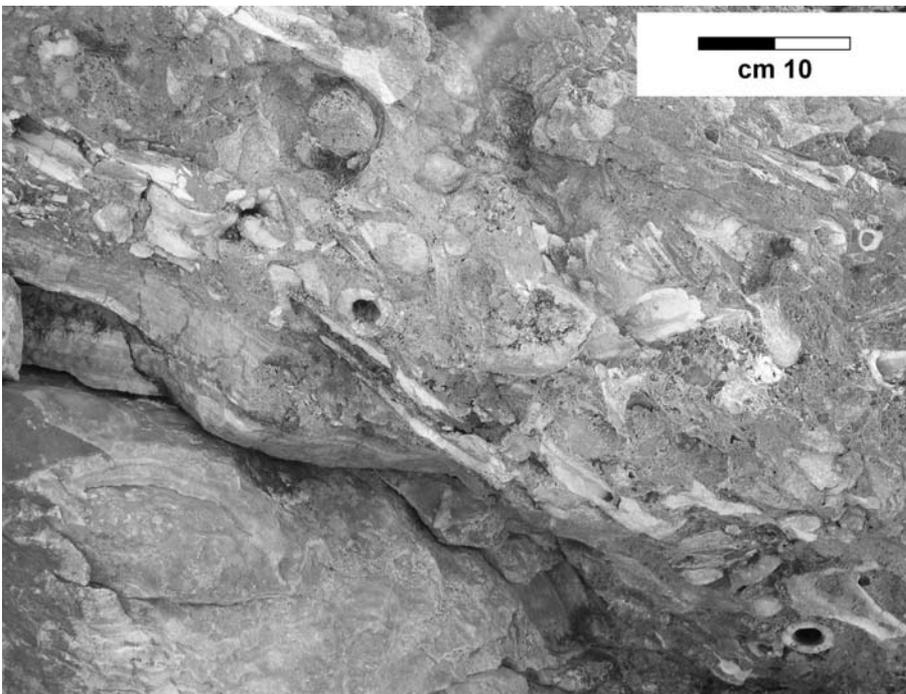


Fig. 11 - Le breccie ossifere, deposte sopra crostoni calcitici, che riempiono relitti di cavità carsiche all'Isola di Giannutri, presso Cala Maestra, .

*The bones breccias, laying on a calcite flowstone, filling relict karst caves in the Giannutri Island, at Cala Maestra.*

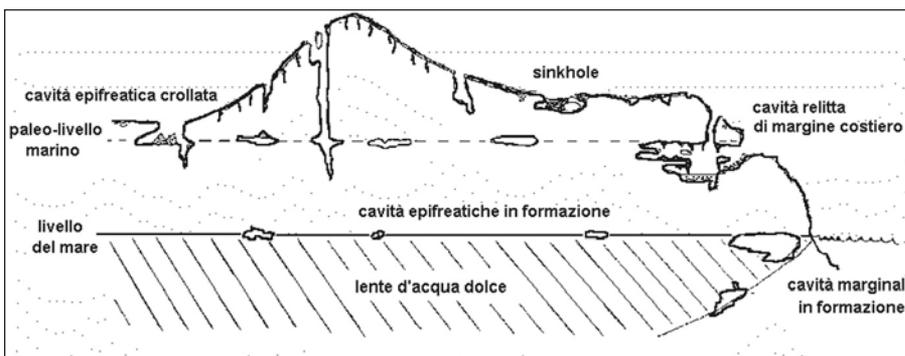


Fig. 12 - Schema di formazione di cavità carsiche in ambiente costiero (da: MYLROIE & CAREW, 2000, modificato).

*Formation of caves in coastal environment (after: MYLROIE & CAREW, 2000, modified).*

Un esame, peraltro non ancora completo, delle principali cavità carsiche non ha mostrato indizi di una loro possibile origine termale, come invece avviene per altre grotte della Toscana Meridionale, presenti in provincia di Grosseto in contesti idrotermali ancora attivi (ad esempio presso Roselle e Saturnia). D'altra parte, la consistenza e la diffusione delle forme carsiche permette di escludere l'azione di acque rese aggressive da fenomeni di ossido-riduzione di mineralizzazioni, in particolare solfuri, presenti in alcune aree localizzate (Monte Argentario, Capalbio) ma non al Poggio del Leccio, dove invece si segnala il maggior numero di grotte.

Queste considerazioni, insieme a diversi altri indizi di tipo morfologico, fanno propendere per un'origine in seguito a fenomeni di miscelazione tra acque dolci ed acque salate, o comunque in un contesto costiero. Nel

complesso, infatti, i diversi tipi di cavità si inquadrano bene in un modello di speleogenesi costiero (Fig. 12) secondo il classico schema proposto da MYLROIE & CAREW (1990; 2000).

Le cavità a camera si sono probabilmente formate a livello della tavola d'acqua, in un ambiente prospiciente ad un'antica linea di costa, e in una situazione morfologica paragonabile a quella di alcune piattaforme calcaree, emerse o sommerse, attualmente presenti in aree tropicali (ad esempio Florida, Bahamas, Yucatan). In questi contesti, risultano importanti anche i fenomeni di dissoluzione innescati da processi di degradazione di sostanza organica in condizioni anossiche, che portano alla formazione di  $H_2S$  e che danno anche origine a quelle cavità note come blue hole (MYLROIE & CAREW, 2000). Si tratterebbe quindi di fenomeni isolati, non connessi a veri sistemi carsici di drenaggio sotterraneo, che si sviluppano in corrispondenza di punti di maggior infiltrazione, spesso coincidenti con incroci di fratture.

Le cavità a sviluppo orizzontale, sovente ramificate, sono riconducibili ad almeno due generazioni. Tale circostanza risulta dalla distribuzione altimetrica delle grotte ad elevato indice di orizzontalità, definito come il rapporto tra sviluppo planimetrico e sviluppo spaziale di una grotta (PICCINI, 1998), come mostrato nel grafico di Figura 13.

Sopra il valore di 0,8, le grotte risultano suddivise in due gruppi ben distinti: il primo formato da

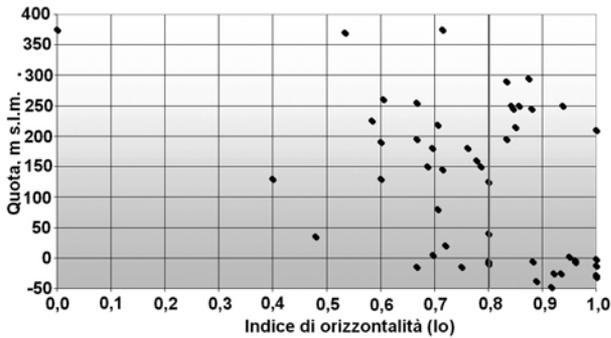


Fig 13- Distribuzione altimetrica delle cavità carsiche in funzione del loro indice di orizzontalità (*Io*). Si noti come per valori superiori a 0,8, le cavità risultino divise in due famiglie ben distinte.

*Altitudinal distribution of caves vs horizontal index (Io). Note that caves with indexes more than 0.8 are grouped in two well shared sets.*

poche cavità relitte, situate intorno a 250 m di quota, con morfologie riconducibili a fenomeni di miscelazione in ambiente freatico lungo margini costieri; il secondo ubicato a quote inferiori e quindi più recente, formato da cavità a sviluppo orizzontale, situate in prossimità dell'attuale livello del mare o anche sotto a esso, e legate a fenomeni di miscelazione, innescati dal moto delle maree, in corrispondenza della tavola d'acqua, vale a dire in corrispondenza della linea di costa.

Le cavità sottomarine, per le quali, a dire il vero, non si hanno descrizioni morfologiche di dettaglio, sono da mettere in relazione a fasi in cui il livello del mare era più basso dell'attuale e contengono abbondante concrezionamento formatosi in condizioni vadose. Su queste concrezioni sono state seguite datazioni U/Th, che hanno dato, per un campione preso in una cavità dello scoglio dell'Argentarella, età comprese tra 206 e 245 ka, riferibili dunque alle fasi di basso eustatico tra gli stadi MIS 7.1 e MIS 6.4 (BARD *et al.*, 2002).

## 6. CONCLUSIONI

Le particolarità morfologiche dell'area, unitamente ai caratteri speleogenetici delle cavità, permettono di riconoscere alcune tappe evolutive dei fenomeni carsici che si conciliano abbastanza bene con le ricostruzioni paleogeografiche proposte per il Pliocene e il Quaternario da diversi autori (ad esempio PASQUARÈ *et al.*, 1983; ZANCHI & TOZZI, 1987).

L'origine delle superfici sommitali a bassa energia del rilievo, presenti ad esempio al Poggio del Leccio, rimane, in mancanza di indizi geologici significativi, un problema aperto. Una prima ipotesi è che in occasione della trasgressione Pliocenica si sia formata una vasta piattaforma d'erosione marina, che interessa l'insieme di isole di natura prevalentemente carbonatica in cui è suddivisa la porzione meridionale della dorsale medio-toscana. L'origine di questa piattaforma può essere stata favorita dalla litologia e dalla elevata permeabilità delle brecce carbonatiche. In queste condizioni si hanno, infatti, fenomeni di corrosione per miscelazione

a livello della tavola d'acqua, che agiscono anche lontano dai margini costieri. Questi processi danno origine a cavità ramificate che, una volta che sono intercettate dall'arretramento delle falesie, facilitano il lavoro di smantellamento del moto ondoso. Non si può tuttavia escludere che la morfologia dolce delle zone sommitali, nelle zone di affioramento del Calcere Cavernoso, sia in parte ereditata dalla conformazione originaria del tetto di questa formazione o essere anche il prodotto di processi di modellamento in ambiente continentale durante le prime fasi di messa a nudo della successione toscana.

Durante il Pliocene Superiore, le aree carbonatiche sono smembrate dalla tettonica e sollevate in modo differenziale. Alcune porzioni sono depresse sotto il livello del mare, mentre su quelle che vanno progressivamente sollevandosi si sviluppano forme carsiche legate alla presenza di una tavola d'acqua in prossimità della superficie, nonché cavità costiere ai margini. Il sollevamento, che prosegue anche nel Pleistocene, porta porzioni del *plateau* calcareo sino a 250-300 m di quota, conservati nelle superfici sommitali a bassa pendenza del Poggio del Leccio.

Nel Pleistocene Medio-Superiore, si ha probabilmente l'esumazione e lo smantellamento delle forme carsiche più antiche in corrispondenza delle superfici sommitali e dei versanti a controllo strutturale. Lungo le linee di costa si ha invece la formazione di una nuova generazione di cavità costiere, in corrispondenza della recente zona di oscillazione eustatica del livello del mare.

Terrazzi e cavità carsiche legate a questa fase, sono attualmente dislocati sino a 70 m di altezza sul livello del mare attuale lungo le coste meridionali del M. Argentario. Secondo alcuni autori ciò potrebbe essere attribuito ad un basculamento verso N pre-Tirreniano che ha interessato l'Argentario (GRAUSO E ZARLENGA, 1991).

In effetti, la morfologia del Monte Argentario si differenzia notevolmente da quella del Poggio del Leccio e dei Colli di Capalbio, anche in situazioni con litologia simile, indicando una maggiore attività morfodinamica legata sia alla maggiore esposizione ai processi d'erosione litorale sia, forse, ad un sollevamento più marcato e disomogeneo.

Dati cronologici in grado di chiarire meglio la successione temporale delle fasi principali di sviluppo dei fenomeni carsici, al momento solo abbozzate, potranno venire dallo studio e dalla datazione dei riempimenti clastici, in particolare quelli fossiliferi, e dalla datazione con metodi radiometrici delle concrezioni, previsti per il proseguimento di questo studio.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il Prof. Carlo Bartolini e il Prof. Ugo Sauro per gli utili suggerimenti e il lavoro di revisione del primo manoscritto.

## BIBLIOGRAFIA

AZZAROLI A., BORSELLI V., RUSTIONI M. (1990) - Nuovi ritrovamenti di fossili continentali in alcune isole

- minori dell'arcipelago toscano. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A*, 97, 15-30.
- ADIODATI G., FALLANI F., MAGAZZINI P., MORI E. (1998) - L'area carsica dei Poggi ad est di Orbetello. *Allegato a Talp, Fed. Spel. Tosc.*, 18, 16 pp.
- ALVISI M., BRUNI R. (1990) - Le grotte sommerse dell'Argentaro. *Speleologia, Soc. Spel. It.*, 23, 17-22.
- ALVISI M., BRUNI R., CASADEI C., CHIESI M. (1987) - Giannutri: gioiello del Tirreno. *Speleo, Speleo Club Firenze*, 17, 3-12.
- BARD E., ANTONIOLI F., SILENZI S. (2002) - Sea-level during the penultimate interglacial period based on a submerged stalagmite from Argentaro Cave (Italy). *Earth and Planetary Science Letters*, 196, 135-146.
- BERTI G., CANUTI P., CASAGLI N., PRANZINI G., MICHELI L. (2001) - Risultati preliminari delle indagini sullo sprofondamento in loc. Bottegone. In: "Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana". Ed. Regione Toscana, 242-256.
- BLANC A., (1955) - Breccia ossifera a leone delle caverne di Orbetello. *Quaternaria*, 2, 313-314.
- BONAZZI U., FAZZINI P., GASPERI G. (1992) - Note alla carta geologica del bacino del fiume Albegna. *Boll. Soc. Geol. It.*, 11, 341-354.
- CAVANNA C., (1998) - Le grotte della provincia di Grosseto. *Soc. Nat. Spel. Maremmana. Scripta Manent Ed. Grosseto*, 174 pp.
- CARMIGNANI L., KLIGFIELD R., (1990) - Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane Core Complex. *Tectonics*, 9, 6, 1275-1303.
- CIGOGNA F., NIKE BIANCHI C., FERRARI G. & FORTI P. (eds.) (2003) - Grotte Marine: cinquant'anni di ricerca in Italia. *Min. Ambiente e Tutela Territorio*, 505 pp.
- DECANDIA A., LAZZAROTTO A. (1980) - Le unità tettoniche del Monte Argentario (Toscana Meridionale). *Mem. Soc. Geol. It.*, 21, 385-393.
- DECANDIA A., LAZZAROTTO A., LIOTTA D. (1993) - La "Serie Ridotta" nel quadro della evoluzione geologica della Toscana Meridionale. *Mem. Soc. Geol. It.*, 49, 181-191.
- FORTI P. (1993) - Meccanismi genetici ed evolutivi delle Grotte Marine. *Speleologia, Soc. Spel. It.*, 28, 63-68.
- GRAUSO S., ZARLENGA F., (1991) - Il Quaternario di P.ta dell'Avoltore (Monte Argentario - Toscana Meridionale). *Il Quaternario*, 4(2), 311-326.
- MAZZANTI R., (1983) - Il punto sul Quaternario della fascia costiera dell'arcipelago di Toscana. *Boll. Soc. Geol. It.*, 102, 419-556.
- MORI A. (1931) - I fenomeni carsici dell'orbetellano e del capalbiese. *Mem. R. Soc. Geogr. It.*, 17, 1-83.
- MORI A. (1932) - Ricerche sui laghi dell'orbetellano e del capalbiese. *Boll. Soc. Geol. It.*, 51, 1-52.
- MORI A. (1933) - Grotte nelle breccie ossifere del Monte Argentario. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, 37, 44-51.
- MORI A. (1968) - Caratteri geologici e morfologici del promontorio Argentario secondo le acquisizioni più recenti. *Boll. Soc. Geogr. It., serie IX, v. 10*, 44-51.
- MYLROIE J.E., CAREW J.L. (1990) - The flank margin model for dissolution cave development in carbonate platform. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 413-424.
- MYLROIE J.E., CAREW J.L. (2000) - Speleogenesis in coastal and oceanic setting. In: Klimchouk A.B., Ford D.C., Palmer A.N. and Dreybrodt W. Eds. "Speleogenesis: Evolution of Karst Acquifers". National Speleological Society, 226-233.
- PALMER A. N. (1991) - Origin and morphology of limestone caves. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 103: 1-21.
- PANDELI E., PADOA E. (1998) - Le rocce brecciate triassiche delle Colline Metallifere: Calcare Cavernoso e Anidriti di Burano. In: "Il sillabario - Foglio di poesia, letteratura e scienza". Riv. Ass. turistica "Pro Pomarance". *Tip. Grafitalia Peccioli*, vol. 4, 9-10.
- PASQUARÈ G., CHIESA S., VEZZOLI L. & ZANCHI A. (1983) - Evoluzione paleogeografia e strutturale di parte della Toscana Meridionale a partire dal Miocene Superiore. *Mem. Soc. Geol. It.*, 25, 145-157.
- PICCINI L. (1998) - L'Analisi morfometrica delle grotte carsiche - Atti 18° Congr. Naz. Spel., Chiusa Val Vesio, Ottobre 1998. *Suppl. Nuovi Sentieri*, 3 (2001), 145-149.
- PICCINI L. (1999) - Geomorfologia e speleogenesi carsica. *Quaderni Didattici, Società Speleologica Italiana*, 1, 22 p.p.
- Piccini L. (2001) - L'evoluzione plio-pleistocenica del carsismo in Toscana. In: "Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana". Ed. Regione Toscana, 99-109.
- RADMILLI M.A., ROMAGNOLI L., TONGIORGI E. (1955) - Il deposito eolico sul versante occidentale del promontorio di Ansedonia e la fauna fossile della grotta Rose Mary. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., ser. A*, 62 (1), 73-83.
- SEGRE A. (1959) - Giacimenti pleistocenici con fauna e industria litica a monte Argentario (Grosseto). *Rivista di Scienze Preistoriche*, 14, f. 1-4, 1-18.
- ZANCHI A., TOZZI M. (1987) - Evoluzione paleogeografia e strutturale recente del bacino del Fiume Albegna (Toscana Meridionale). *Geologica Romana*, 26, 305-325.

Ms. ricevuto il 10 maggio 2006

Testo definitivo ricevuto il 10 ottobre 2006

Ms. received: May 10, 2006

Final text received: October 10, 2006

