

I DEPOSITI CEMENTATI DEL GOLFO DI TRIESTE (ADRIATICO SETTENTRIONALE): DISTRIBUZIONE AREALE, CARATTERI GEOMORFOLOGICI E INDAGINI ACUSTICHE AD ALTA RISOLUZIONE

Emiliano Gordini¹, Ruggero Marocco², Giorgio Tunis² & Riccardo Ramella¹

¹Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale OGS, Trieste - egordini@ogs.trieste.it
rramella@ogs.trieste.it

²Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine, Università degli Studi di Trieste - marocco@units.it - tunis@units.it

RIASSUNTO: E. Gordini, R. Marocco, G. Tunis & R. Ramella, *I depositi cementati del Golfo di Trieste (Adriatico settentrionale): distribuzione areale, caratteri geomorfologici e indagini acustiche ad alta risoluzione*. IT ISSN 0394-3356, 2004.

L'elevato numero (ca. 250) d'affioramenti rocciosi individuati nei fondali poco profondi del Golfo di Trieste, la loro distribuzione areale e i loro caratteri morfologici essenziali hanno permesso di formulare alcune ipotesi sulla loro genesi e, più in generale, sulle vicende geologiche che hanno interessato questa parte più settentrionale dell'alto Adriatico. Questi veri e propri geositi che sotto vari punti di vista arricchiscono l'ambiente marino delimitato dalle acque slovene e croate, si distribuiscono essenzialmente nell'ampia fascia delle sabbie di piattaforma (d'orientazione NE-SW) e in quest'ambito maggiormente (85%) nel versante che degrada verso le profondità maggiori. Analoghe ricerche eseguite sul Golfo di Venezia e nel versante sloveno dell'alto Adriatico, fanno ritenere che queste rocce siano molto diffuse (sull'ordine delle migliaia) e che la loro presenza condizioni la morfologia e la vita acquatica di questo mare. Nell'area indagata la maggioranza degli affioramenti presenta una tipologia essenzialmente tabulare e subordinatamente a "panettoni" e pinnacoli; la loro concentrazione massima è di 3,2 affioramenti per km². L'analisi statistica elementare effettuata su un numero rappresentativo di affioramenti ha evidenziato che essi si rinvennero a profondità mediamente pari a 17,1 m (min 8,3 e max 21,5 m), e presentano spessori compresi tra un massimo di 2,7 ad un minimo di 0,4 m (medio 1,0 m). La tipologia di affioramento è stata definita in otto classi che comprendono forme essenzialmente tabulari (con quattro sottoclassi; da A a D, complessivamente 89%), a panettoni (E, 1%) e pinnacolari (F, pari al 10%). La classe tabulare è stata suddivisa ulteriormente a seconda della disposizione rispetto al fondale (apicale su alti morfologici, intensamente fratturato con nucleo più esteso, compatto e tondeggiante, assetto inclinato) nelle forme B1 (27%), B2 (10%), B3 (36%) e C (6%) mentre a seconda dello spessore, forma ed associazione con altri affioramenti nella tipologia D (9%). Raramente questi fondi duri si rinvennero nelle aree di bassura sottomarina (6%) o alla sommità delle Trezze (secche, 9% circa), sempre però nell'immediato intorno delle sabbie di piattaforma (36% sulle sabbie pelitiche e l'1% nelle peliti molto sabbiose). In questa fase della ricerca di particolare importanza si sono rivelate le osservazioni dirette in immersione che hanno palesato ammassi di concrezioni organogene poggianti su substrati costituiti da lastroni di sabbia cementata, adagiati o affioranti sul fondale sabbioso. Questi presentano solitamente fratture ortogonali alla stratificazione, altre ad andamento casuale e quasi sempre più o meno profonde nicchie d'erosione alla base che non fanno intravedere, però, una continuità con il substrato. Per far questo si è impiegata la metodologia *Sub-bottom profile Chirp* che ha permesso di indagare con notevole dettaglio l'assetto sedimentario del sottofondo marino (da 7 a 14 m ca.), con una risoluzione compresa tra 20 e 30 cm. Emerge che la maggioranza degli affioramenti tabulari presenta un limitato o talvolta quasi assente sviluppo radicale, che si esaurisce all'interno del materasso sabbioso riconducibile al tetto dei depositi continentali del sistema **LST** (30-40 cm dal fondo). Anche gli affioramenti a forma di "panettone", che presentano radici più profonde, sono radicati ai depositi continentali del corpo sedimentario **LST**, costituito da facies acustiche prevalentemente piano parallele, variabili in ampiezza e frequenza, con orizzonti torbosi e una diffusa presenza di gas, manifestata da evidenti lacune acustiche tipiche. Anche in superficie, sulla verticale degli affioramenti a volte si riscontrano emanazioni di gas e sul fondo si sono riconosciute macchie di solfo-batteri che porterebbero ad ipotizzare una genesi per ossidazione del metano. Ulteriori studi sono attualmente in corso al fine di verificare tali ipotesi.

Sulla base dei dati raccolti e soprattutto dalle risultanze delle prime analisi dei campioni di roccia si è propensi a ritenere che gli affioramenti rocciosi del Golfo di Trieste siano un insieme di forme poligeniche (costituite da depositi litorali e marini, ma anche alluvionali) messe a giorno dalla trasgressione Versiliana e poi rielaborate dai processi biologici e geomorfici attualmente in atto sui fondali adriatici.

ABSTRACT: E. Gordini, R. Marocco, G. Tunis & R. Ramella, The cemented deposits of the Trieste Gulf (Northern Adriatic Sea): areal distribution, geomorphologic characteristics and high resolution seismic. IT ISSN 0394-3356, 2004.

Echo-sounding profiles, lateral scanning echo-sounding surveys and scuba diversions carried out in several years allowed the identification of at least 250 rocky outcrops in the Gulf of Trieste. The analysis of the areal distribution and of the main geomorphic characteristics (extension, shape, thickness, etc.) showed that these very peculiar rocks lie beyond the coastal sedimentary prism (13 to 21 m depth), in correspondence to the shelf sands, displaying a NE-SW direction, reaching the Gulf of Venice. The rocky outcrops are located, almost in continuum, along the southern sides of the banks (the morphological reliefs called "Trezze"), and on the small depressions among them, where they reach the maximum values of density of about three outcrops squared kilometres. The outcrops are made of sandstone and they emerge from shelf sands usually (73%) showing planar-tabular morphotypes (with clear stratification), sometimes massive or pinacular, always covered by cap reefs. Bubbling reefs, locally defined as "bromboli" are rarely present. Their mean thickness is one metre and they show a preferential elongation following the 13, 16 and 19 m bathymetric countours.

The statistical analysis performed on morpho-sedimentological parameters characterising these subaqueous outcrops has shown that they are essentially strictly related to the morphology and the water depth such as sediment texture and outcropping type. On the basis of specific characteristics, the rocky outcrops can be divided, at least, into four main groups.

Direct diving observations highlighted that sandstones are often fractured orthogonally to stratification and appear associated to more irregular trends and small caves or erosional niches at the base. These fractures do not reveal the presence of roots nor do they suggest a further extension under the sea-bed.

The sub-bottom profile Chirp methodology appeared a good application in the definition of the buried geometric characteristics of these numerous rock outcrops present in the seafloor of the Trieste Gulf, but also allowed to define a good sedimentological characterization of the sub-surficial sediments. The acoustic penetration of the seismic signal is varying from 7 to 14 meters being notably influenced by the type of investigated sediment, while the resolution range is between 20 and 30 cm.

From this study it has emerged that the investigated rock outcrops reveal a limited, or sometimes absent radical development within

the sandy mattress, of the system **TST** (Transgressive Sistem Tract). The thickness of the rocky outcrops (about 1 m) puts them of to the top of the continental deposits of the **LST**. In this situation the most reasonable hypothesis about their genesis is referable to lithification processes in the ancient lowland before the sea transgression or to recent cementation processes of the sea foundation. Then, they outcropped and underwent the colonization of calcareous algae, Briozoas and Serpulidi, which provided actual configuration. The sedimentary body **LST** is constituted by acoustic facies marked by parallel reflections. They appear predominantly plain, of varying amplitude and frequency, with the main reflectors few meters spaced and thin packages, characterized by less reflectivity. In this alluvial sedimentary blanket, peat horizons and a diffused presence of gas have been recognized, as revealed by transparent facies in the seismic profiles.

On the basis of the above data, as preliminary results, due to the high number of surveyed and hypothesized rocky outcrops along with their shape and areal distributions, it is presumed that they were not produced by a single process, but that several different processes interacted on the littoral and marine environment, as well as on alluvial deposits of the paleo-plain, which outcropped as the consequence of the Versilian transgression.

Parole chiave: Affioramenti rocciosi, Geomorfologia subacquea, Facies acustiche, Golfo di Trieste, Italia.

Keywords: Rock outcrops, Subaqueous geomorphology, Acoustic facies, Trieste Gulf, Italy.

1. INTRODUZIONE

Da tempo si sta indagando sugli affioramenti rocciosi del Golfo di Trieste. In lavori precedenti e attraverso indagini essenzialmente dirette si è messo in evidenza la distribuzione areale e i variegati aspetti morfologici di questi fondi duri che sono una ricchezza biologica per l'alto Adriatico (Caressa et al., 2001; Gordini et al., 2003), tanto da giustificare un inserimento di questi geotopi in aree marine vincolate (Fig. 2). La ricerca è proseguita poi, con diverse campagne marine incentrate su indagini indirette (*Side scan sonar*, ecoscandaglio digitale, *Sub-bottom profiler Chirp*; Gordini et al., in stampa) e dirette (immersioni subacquee, campionature dei sedimenti e delle rocce) attualmente in fase di elaborazione. I risultati fino ad ora raggiunti non permettono di definire con precisione la genesi di questi affioramenti subacquei che secondo altri autori (Colantoni et al., 1998; Stefanon & Zuppi, 2000; Conti et al., 2002) sono il prodotto dell'ossidazione del metano fuoriuscito dal sottofondo marino, tramite un meccanismo diagenetico analogo a quello individuato nei Mari del Nord da Jensen et al., 1992 (*bubbling reef*). L'elevato numero d'affioramenti individuati in una relativamente ristretta area del Golfo di Trieste, delimitato dai confini con la Slovenia e Croazia, e i caratteri d'insieme degli affioramenti (estensione, forma, potenza, fatturazione, ecc), inducono ad ipotizzare un insieme di forme poligeniche (costituite da depositi litorali e marini, ma anche alluvionali, "messi a giorno" dalla trasgressione Versiliana), rielaborate dai processi biologici e geomorfici attualmente in atto sui fondali adriatici. L'analisi del cemento delle rocce e del gas che gorgoglia dal fondo del mare, oggetto di una prossima ricerca, dovrebbe dar risposta a questi quesiti.

2. GENERALITÀ ED ACQUISIZIONE DEI DATI

Per l'individuazione degli affioramenti rocciosi si sono utilizzate le numerose segnalazioni dei pescatori e dei subacquei che sono state in parte verificate, poi, con una serie di strisciate batimetriche e *Side scan sonar*.

Preziosa sotto questo punto di vista è stata la collaborazione con il sub Nino Caressa di Grado che ha fornito circa 250 segnalazioni di affioramenti rocciosi, determinate con traguardi a terra, coordinate Loran, e

ultimamente, rilevamenti GPS (Caressa et al., 2001). Tutti questi siti sono stati schedati secondo coordinate geografiche, profondità del fondale e spessore (potenza) dell'affioramento; sono state calcolate inoltre la distanza dalla costa e la tipologia morfologica e sedimentologica del fondale circostante. Caressa ha fornito anche una succinta descrizione degli affioramenti che ha permesso una prima classificazione della loro forma (Caressa et al., 2001). Tutti questi dati sono stati, in seguito, verificati in immersione.

Il rilievo batimetrico è stato eseguito con la M/n "Castorino 2" (Fig. 1), utilizzando un ecografo X - 16 COMPUTER SONAR LOWRENCE e un ecoscandaglio digitale LOWRENCE X16c *Digital computer sonar*. La posizione è stata definita in tempo reale con strumentazione GPS e DGPS. Il posizionamento è stato quindi elaborato con un software di navigazione: l'errore planimetrico medio è stato stimato essere inferiore a 5 m. La registrazione del fondo marino è stata corretta considerando la profondità del sensore dell'ecoscandaglio, l'escursione della marea, riportando il valore così ottenuto al livello medio mare locale (Trieste). L'errore di profondità stimato è di 10 +/- 5 cm.

In seguito all'individuazione delle aree d'affioramento, su alcuni siti, ritenuti più interessanti, sono stati eseguiti rilievi *Side scan sonar* ed immersioni subacquee.

Il sistema *Side scan sonar* utilizzato è quello della *Transceiver Unit* della *Edgetech* DF-1000 DCI Kit interfacciato con *workstation Coda Octopus*; il *Digital Tow Fish* è della *Edgetech* DF-1000 SAF-T-LINK™ *Digital Towfish*, con doppia frequenza simultanea di acquisizione 100/500Khz. Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati è il CODA *Geosurvey Mosaic*. Il *Tow Fish* è stato trainato a poppa dell'imbarcazione a circa 6 m di profondità e ad una distanza di 15 m. La differenza di posizione tra il "pesce" e l'antenna GPS è stata calcolata e inserita nel programma attraverso il software d'acquisizione dati.

Per il rilievo subacqueo degli affioramenti sono state adottate le normali tecniche *Scuba*. Durante le operazioni in immersione, particolare attenzione è stata rivolta alla descrizione della forma dell'affioramento, alla presenza di stratificazioni al letto della roccia, alla disposizione delle fratture e alla presenza, o meno, di fenomeni di gorgogliamento di gas dal substrato. Si è passato quindi alla campionatura della roccia e dei sedimenti nell'intorno.

Grazie a questi rilievi il quadro delle conoscenze sui geotipi ha raggiunto un buon livello e in particolare ha permesso di elaborare statisticamente le informazioni ottenute (elaborazione eseguita su 104 affioramenti dei 250 segnalati inizialmente) e di raggruppare gli affioramenti in otto tipologie morfologiche (Caressa *et al.*, 2001).

A completamento della ricerca è stata promossa una campagna di indagine acustica ad alta risoluzione nel sottofondo marino utilizzando il *Sub-bottom profiler Chirp* (CAP-6600 della *Datasonics* con *tow vehicle* TTV-190). La configurazione adottata ha permesso di acquisire contemporaneamente il segnale acustico su due bande di frequenza differenti, rispettivamente con sweeps da 2 a 7 kHz e *pattern* radiativo conico di 45° e simultaneamente anche con sweeps da 8 a 23 kHz con cono da 30°. Il *tow vehicle* è stato trainato a poppavia dell'imbarcazione, ad una profondità di 3 m dalla superficie ed ad una distanza di 12 m. La penetrazione ottenuta varia da 7 a 14 m essendo notevolmente influenzata dai diversi tipi di sedimento indagato; la risoluzione è stata mediamente compresa tra 20 e 30 cm.

3. BREVE INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Le caratteristiche del fondo e del sottofondo del Golfo di Trieste sono il risultato di processi evolutivi tardo-pleistocenici ed olocenici che hanno visto da un lato la progressiva ingressione marina postglaciale e

dall'altro l'aggradazione della costa alluvionale, alimentata dai paleofiumi Tagliamento ed Isonzo, due dei più importanti fiumi dell'Italia settentrionale (Colantoni *et al.*, 1985; Marocco, 1991).

La situazione attuale del golfo palesa la presenza lungo costa di un primo esteso prisma sedimentario che copre una fascia continua che va dall'apparato deliziosi isontino (ad Est) al delta del fiume Tagliamento ed oltre (ad Ovest), fino alla profondità di ca. 12-13 m (Gordini *et al.*, 2003). Questo corpo sedimentario presenta la classica stratigrafia di conoide progradazionale ed è costituito da sedimenti fluviali attuali/recenti, rielaborati continuamente dal moto ondoso e dalle correnti litoranee. Il prisma sedimentario costiero rappresenta il tratto finale del sistema **HST** (Highstand System Tract) che termina in una zona sub-pianeggiante e mossa per la presenza di rilievi sabbiosi e affioramenti rocciosi che si inseriscono nell'ambito dei depositi trasgressivi del **TST** (Trasgressive System Tract). La sottile coltre dei depositi trasgressivi (variabile da 30 a 40 cm, salvo valori particolari di 1,5 m in corrispondenza di dune sommerse) assume, in corrispondenza dell'alto morfologico della Trezza Grande, massima potenza (6 m) e definisce un cono deliziosi annegato in seguito all'innalzamento del livello marino nel Tardiglaciale (Gordini *et al.*, 2002). Questi depositi sono sabbie medie e mediofini, carbonatiche derivate da sedimenti rielaborati dalla trasgressione marina (Colantoni *et al.*, 1985; Marocco, 1991). Sono ricchi di frammenti organogeni, alghe calcaree, spugne, molluschi, echinodermi, briozoi, ecc.

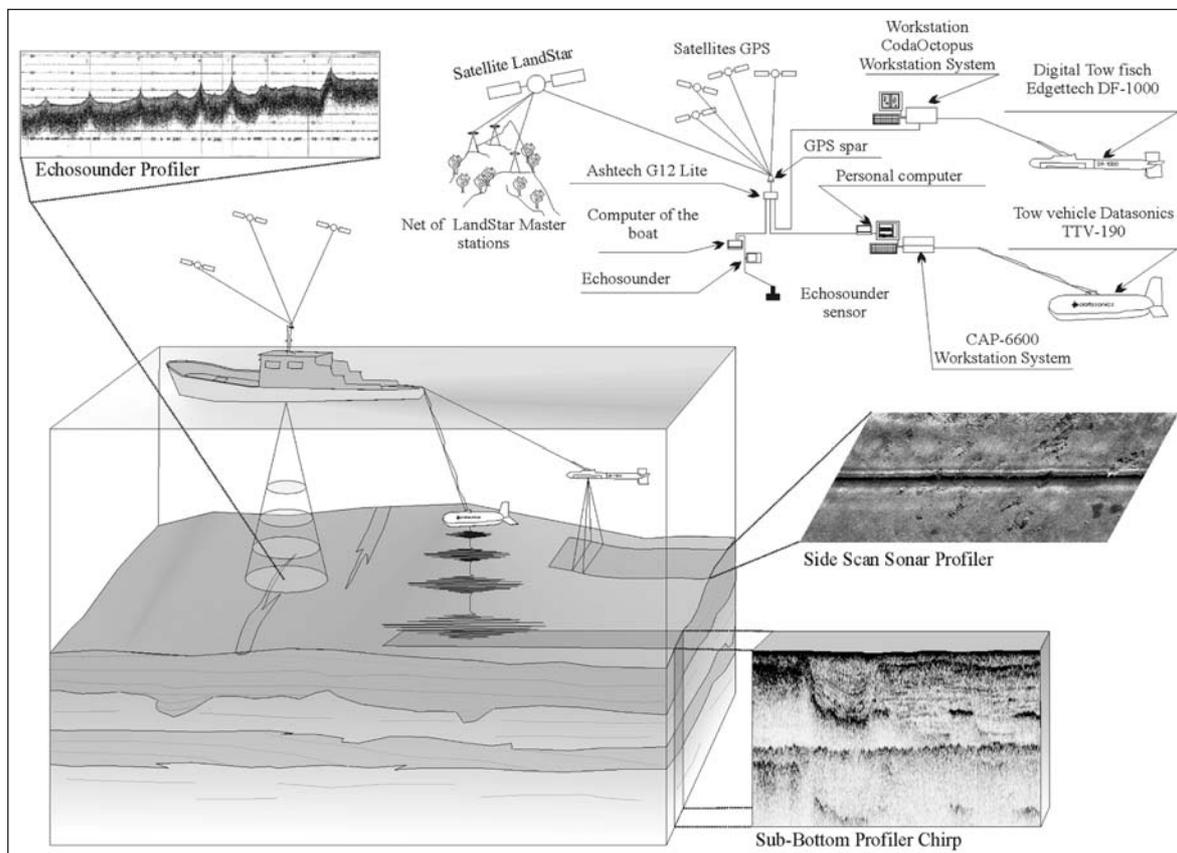


Fig. 1 - Schema del sistema d'acquisizione dei rilievi acustici (batimetrici, Side scan sonar, Chirp).

Sketch of the acoustic profiles acquisition system (echo-sounding, Side scan sonar, Chirp).

Essi presentano, nel loro limitato spessore, una gradazione normale con all'interno livelli di tritume conchigliare ad indicare una trazione da parte di correnti di fondo e, in altri casi, contatti erosivi tra sedimenti grossolani e sedimenti pelitico-torbosi continentali. L'età dei depositi trasgressivi non è stata determinata analiticamente; sulla base di considerazioni climatiche ed eustatiche generali e in relazione alla età di formazione del delta tilaventino (Marocco, 1991) e della laguna di Caorle, nel retroterra (ca. 9.000 anni; Marocco *et al.*, 1996; Galassi & Marocco, 1999), si può ritenere che almeno l'annegamento del corpo sedimentario della Trezza sia avvenuto tra i 16.000 e 11.300 anni fa (Gordini *et al.*, 2002). I depositi sabbiosi sormontano con contatti netti il corpo dei sedimenti pelitico-torbosi continentali del sottofondo, ascrivibili al sistema **LST** (Lowstand System Tract) e con età Pleniglaciale (da 19.945 a 22.120 anni BP; sempre Gordini *et al.*, 2002).

Per la descrizione morfo-sedimentologica dei fondali del golfo di Trieste si rimanda a Gordini *et al.* (2003) e Caressa *et al.* (2001). Per quanto riguarda gli studi eseguiti sugli affioramenti rocciosi dell'Alto Adriatico si rimanda a Stefanon (1967); Stefanon (1979); Braga & Stefanon (1969); Stefanon & Mozzi (1972; 1973) Newton & Stefanon (1975; 1976); Boldrin (1979) e recentemente da Colantoni *et al.* (1998); Mizzan (1999) oltre a Caressa *et al.* (2001) e Gordini *et al.*, in stampa.

4. SINTESI DEI RISULTATI

Un primo risultato conseguito da questa ricerca (ancora in corso) è stato l'identificazione di un cospicuo numero di campi d'affioramenti rocciosi, ognuno costituito da più rocce singole, molto ravvicinate e solo in parte conosciute dagli autori precedenti. Pertanto questi affioramenti non sono singoli ammassi rocciosi che spuntano dal fondale, ma gruppi di rocce, tutte con caratteristiche abbastanza simili che si estendono su vasti areali marini (Fig. 2). Solamente le formazioni a "panettone" che sono molto estese (50-80 m), si presentano singolarmente o al massimo in coppia. Su un centinaio di campi di rocce sottomarine e sui panettoni è stata condotta un'analisi morfologica quantitativa degli elementi più rappresentativi (forma, estensione, profondità, distanza dalla costa, tessitura e morfologia del fondale circostante, ecc).

Dalla distribuzione areale dei campi di rocce emerge un andamento abbastanza disperso nell'ambito del golfo, con punti o allineamenti di concentrazione nella direzione NE-SW, che coincide con l'area di distribuzione delle sabbie di piattaforma. Quest'area è stata contraddistinta da generali fenomeni d'erosione dei sedimenti superficiali, avvenuta con forte intensità durante la fase trasgressiva postglaciale e ancora presente in forma più lieve in concomitanza con le mareggiate più

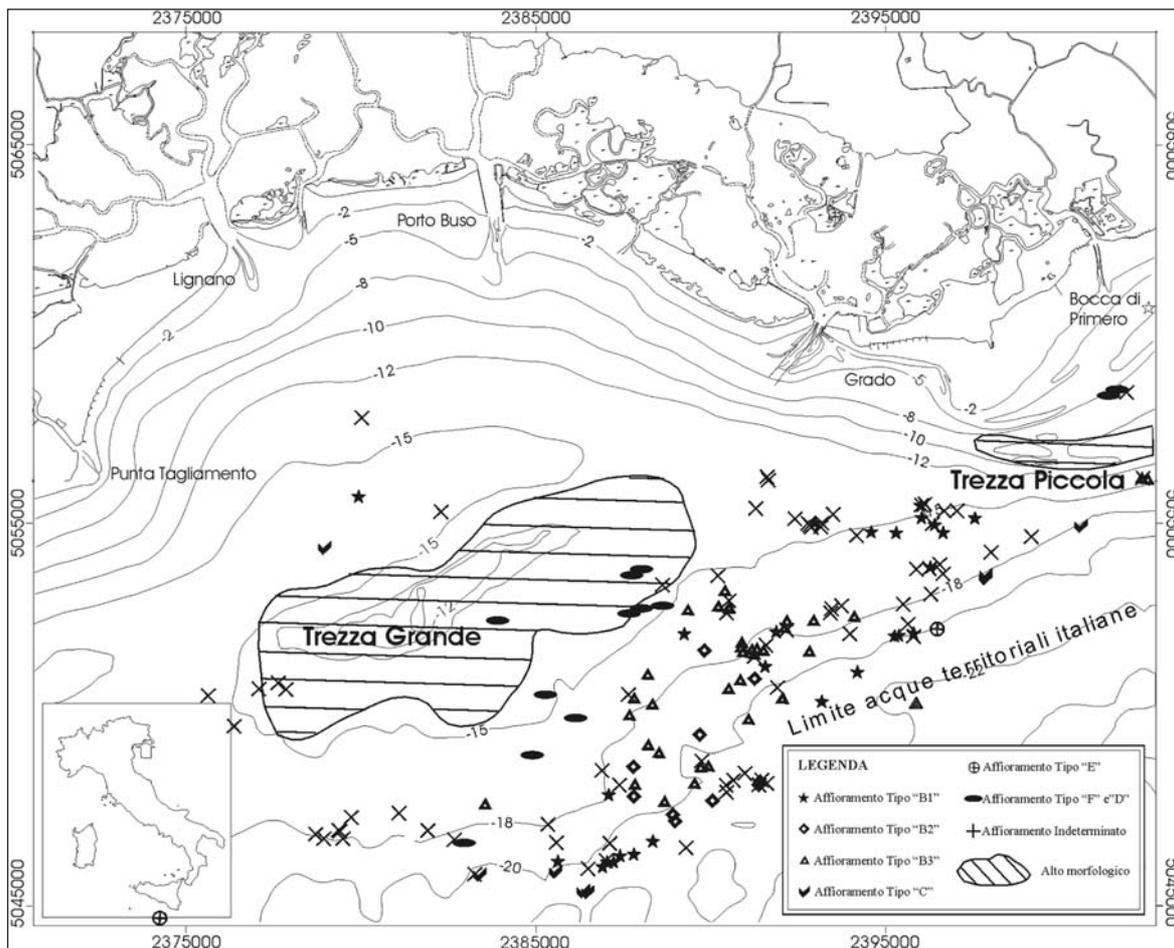


Fig. 2 – Distribuzione e tipologia degli affioramenti rocciosi nel Golfo di Trieste.
Distribution and types of the rocky outcrops in the Gulf of Trieste.

violente. Nell'ambito di questo *trend* distributivo, sembrano assumere particolare valenza i locali allineamenti fra affioramenti morfologicamente simili, distribuiti secondo l'andamento delle batimetriche 13, 16 e 19 m.

La concentrazione massima di queste rocce è di 3,2 affioramenti per km². Statisticamente (Fig. 3) si rinvencono mediamente a 17,1 m (min 8,3 e max 21,5 m), con spessori compresi tra un massimo di 2,7 ad un minimo di 0,4 m (medio 1,0 m). Raramente questi fondi

duri si rinvencono nelle aree di basso morfologico o avvallamenti sottomarini (6%) o alla sommità delle Trezze (secche, 9% circa), sempre però nell'immediato intorno alle sabbie di piattaforma (36 % sulle sabbie pelitiche e l'1% nelle peliti molto sabbiose). La distanza dalla costa è risultata di ca. 17 km, quella minima di 2 e quella media di 10 km.

La tipologia d'affioramento è stata definita in otto classi (Fig 3 e 4) che comprendono forme essenzial-

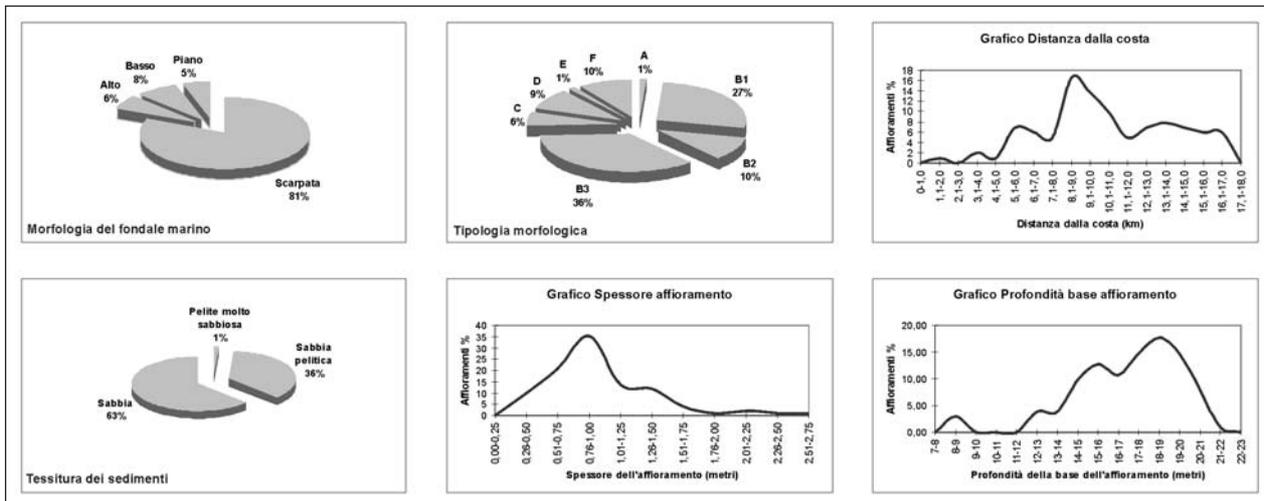


Fig. 3 – Distribuzione di frequenza dei principali parametri che caratterizzano gli affioramenti rocciosi del Golfo di Trieste.
Frequency distribution of the main parameters characterising the rocky outcrops in the Gulf of Trieste.

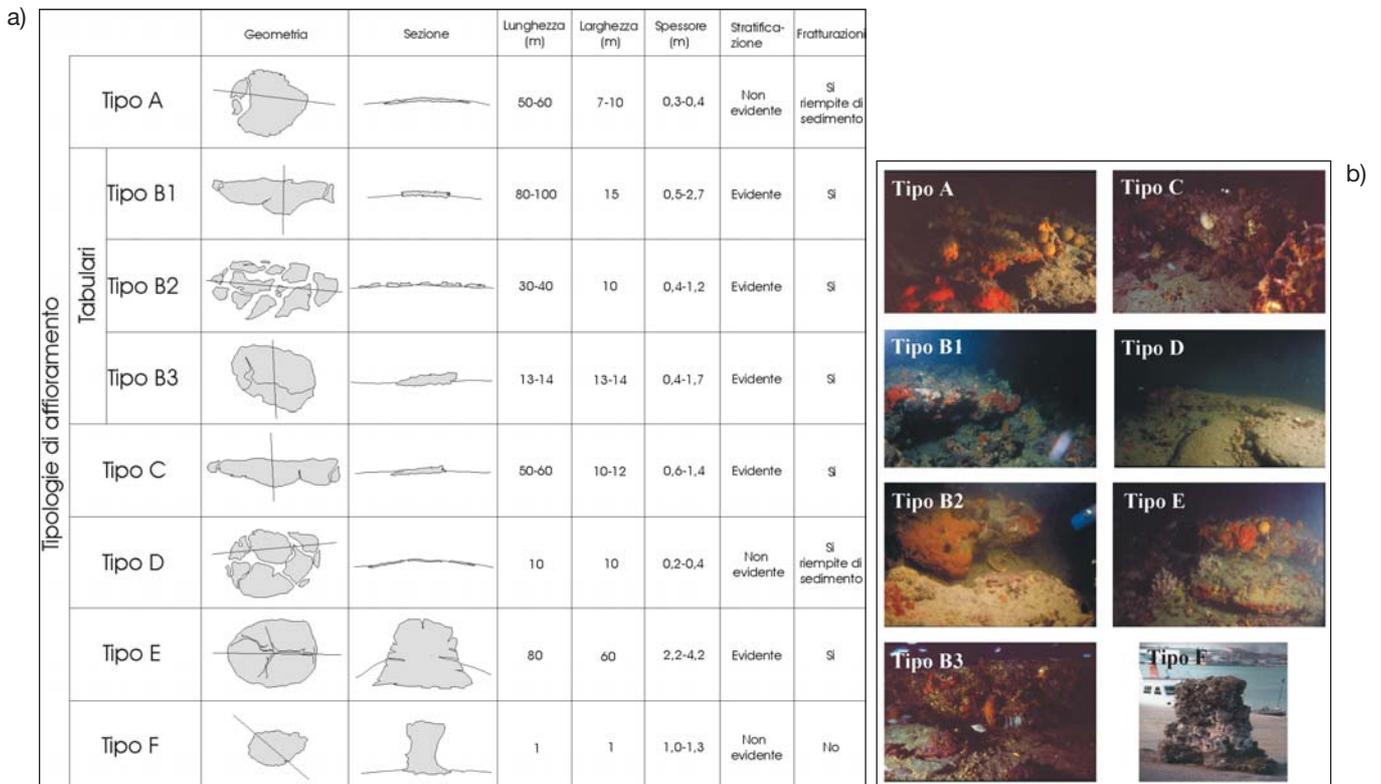


Fig. 4 - (A sinistra, 4a) Tabella riassuntiva dei principali caratteri morfologici e geometrici degli affioramenti rocciosi del Golfo di Trieste (da Caressa et al., 2001 modificato). (A destra, 4b) Fotografie delle varie tipologie morfologiche.

(Left, 4a) The main morphological features of the rock outcrops in the Trieste Gulf (from Caressa et al., 2001 modified). (Right, 4b) Photographs of the different morphological typologies.

mente tabulari (con quattro sottoclassi; da A a D, complessivamente 89%), a panettone (E, 1%) e pinnacolari (F, pari al 10%). La classe tabulare è stata suddivisa ulteriormente a seconda della disposizione rispetto al fondale e alle fatturazioni presenti (apicale su alti morfologici, intensamente fratturato con nucleo più esteso, compatto e tondeggiante) nelle tre forme B1 (27%), B2 (10%) e B3 (36%; Fig. 5); mentre le tipologie C (6%; affioramenti inclinati), D (circolari, abbinati a pinnacoli; 9%); ed E (1%; panettoni) e, infine F (10%; pinnacoli).

L'indagine in immersione ha confermato quanto riportato da studi precedenti (Stefanon, 1967; Braga & Stefanon, 1969; Stefanon & Mozzi, 1972; Stefanon & Mozzi, 1973; Newton & Stefanon, 1975; Newton &

Stefanon, 1976; Boldrin, 1979), ovvero il ricoprimento organogeno da parte d'individui costruttori (*Lithophilum*, *Peyssonelia* e *Lithothamnium*) di un substrato solido sabbioso, non sempre ben visibile, ma quando rilevabile caratterizzato da una marcata stratificazione piano parallela, resa più evidente da fenomeni d'erosione selettiva. Si è constatato, inoltre, che i litosomi sono incisi da profonde fenditure per l'intero spessore e che assumono andamenti quasi sempre ortogonali alla stratificazione. L'origine di tali fenditure sembra essere recente e da ricercarsi nell'azione erosiva delle correnti di fondo che scalzano alla base la roccia cementata, determinando una prima fenditura e poi il crollo delle parti sospese. Da queste indagini non è stato possibile

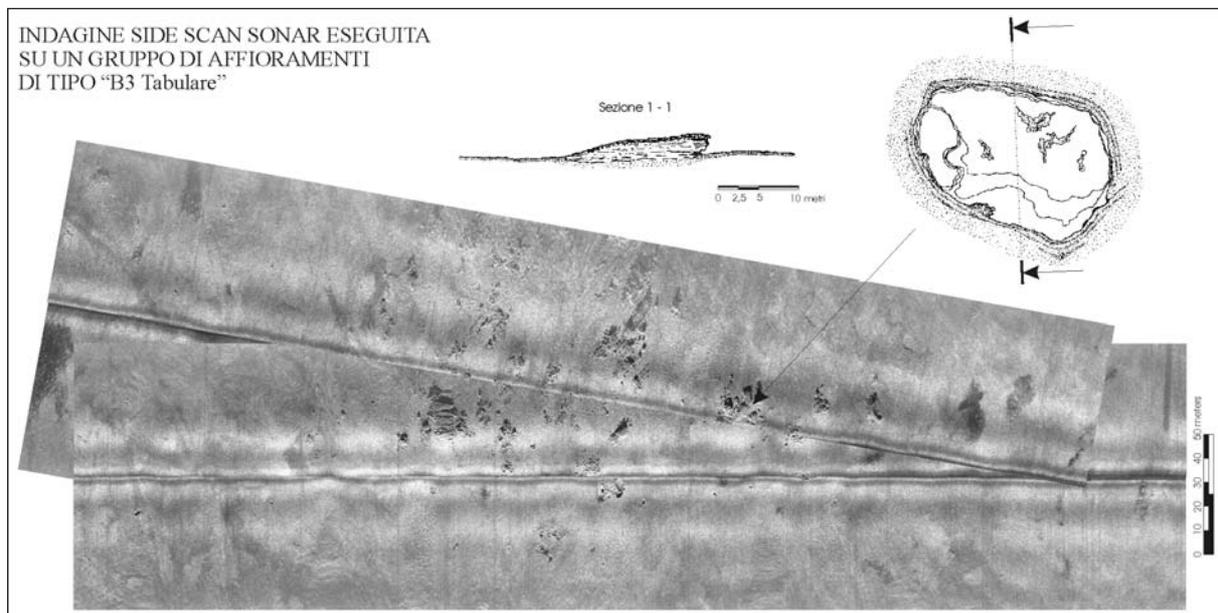


Fig. 5 – Mosaico di sonogrammi a scansione laterale di un gruppo d'affioramenti di tipo "B3 Tabulare".
Mosaic lateral scanning echosounding diagram showing an outcrop group "Tabular B3" type.

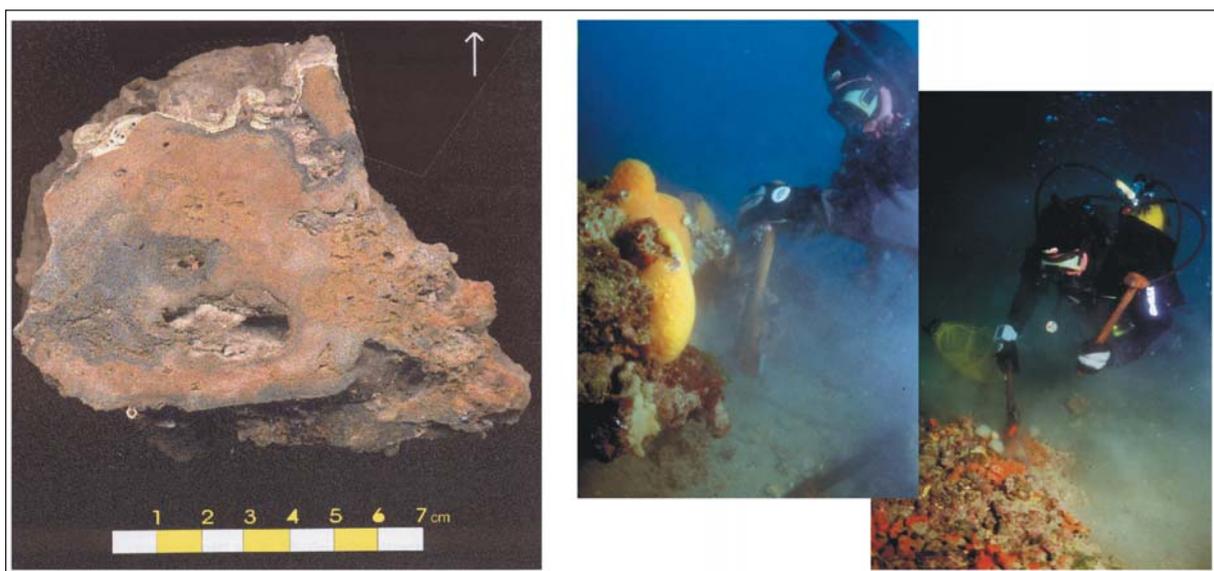


Fig. 6 – Operazioni di campionatura delle rocce (destra) e sezione di un campione (sinistra).
Rocks sampling (right) and sample section (left).

definire la profondità del letto dell'affioramento che risulta annegato sui sedimenti del fondo.

Analisi eseguite sui campioni di roccia (in fase di perfezionamento) e sui sedimenti evidenziano una analogia mineralogica e granulometrica dei depositi cementati con le sabbie di piattaforma adiacenti. Le rocce sono arenarie fini, grano o fango sostenute, con minimo cemento carbonatico, ricristallizzato (Fig. 6). Da

un punto di vista paleontologico le rocce sono prive di macro e microfaune ad eccezione di pochi casi.

Al fine di verificare il radicamento di questi affioramenti rocciosi nel sottofondo e per indagare sulla loro possibile continuità con i depositi trasgressivi superficiali (del sistema **TST**) o con quelli più profondi (del sistema **LST**) è stata utilizzata la metodologia *Sub-bottom profile Chirp* (Fig. 7). E' emerso che la maggioranza

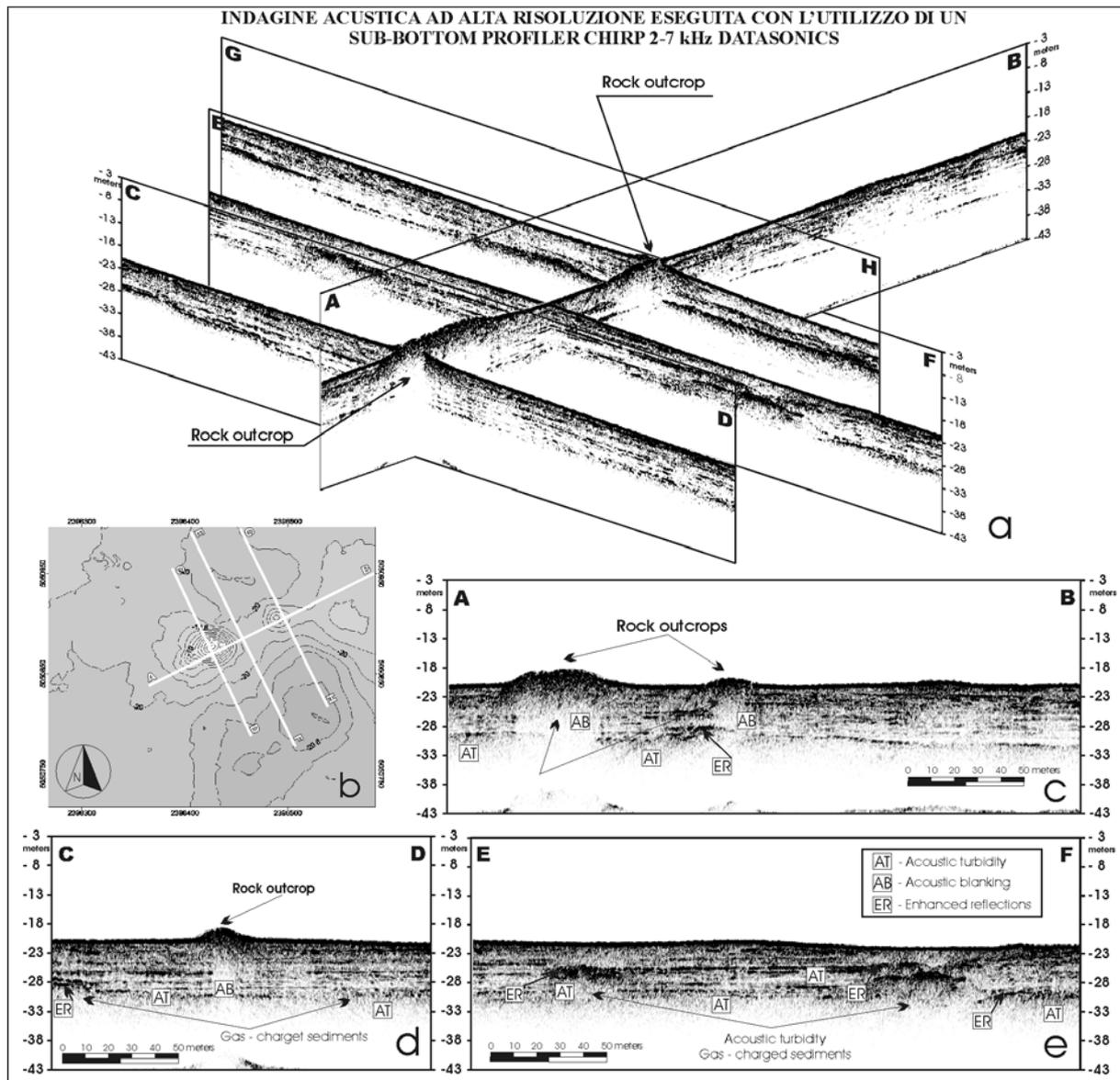


Fig. 7 - Indagine acustica *Sub-bottom profiler Chirp* (2-7 kHz). (a) Rappresentazione 3d; (b) Mappa del fondale marino (prospezione con ecoscandaglio digitale); (c) Profilo acustico (e interpretazione) eseguito in corrispondenza di due affioramenti rocciosi (A-B). Il profilo evidenzia la tipica forma a panettone di questa tipologia morfologica d'affioramento. In particolare mostra una soluzione di continuità tra i due affioramenti rocciosi presenti, sottolineata dall'ottima penetrazione del segnale nella successione sedimentaria intermedia. I corpi rocciosi presentano radici estese all'interno della coltre sedimentaria superficiale; (d, e) Profili acustici (e interpretazioni) eseguiti perpendicolarmente alla direzione di massimo sviluppo degli affioramenti rocciosi (C-D ed E-F). I due transeiti evidenziano molto bene la geometria tabulare degli orizzonti sedimentari presenti nell'area di indagine, interrotti solamente dalle tipiche lacune acustiche in presenza di corpi rocciosi superficiali (C-D). La presenza di riflettori acustici irregolari è determinata essenzialmente da accumuli di gas intrappolato all'interno dei sedimenti.

Sub-bottom profiler Chirp (2-7 kHz) survey. (a) 3d sketch; (b) Seafloor map (digital echosounder survey); (c) Sonar profile (and the interpretation) performed across two rock outcrops (A-B). The profile shows the typical "panettone - Christmas sweet bread" shape of these rock outcrops. In particular a good continuity between the rock outcrops is shown. It is underlined by the good penetration of the signal within the stratigraphic sequence. The rocky bodies introduce wider roots inside the superficial sedimentary blanket; (d, e) Sonar profile (and the interpretations) performed perpendicular to the direction of the rocky outcrops maximum development (C-D and E-F). The two profiles underline well the tabular geometry of the sedimentary section, locally interrupted by acoustic gaps due to surficial rocky bodies (C-D). The presence of irregular acoustic reflectors is determined by accumulations of gas within the sediments.

degli *rock outcrops* a forma tabulare presentano una limitata potenza (ca. 1 m) e un ridotto o talvolta assente sviluppo radicale, ben visibile all'interno del materasso sabbioso riconducibile al sistema **TST**. Le radici degli affioramenti quasi sempre si esauriscono al tetto dei depositi continentali del **LST** che si trovano a 30-40 cm dal fondo. Anche gli affioramenti a forma di "panettone", più radicati, sembrano prendere origine da questi depositi continentali con processi analoghi a quelli visti per gli affioramenti tabulari. Il corpo sedimentario **LST** viene contraddistinto da facies acustiche contrassegnate da riflessioni prevalentemente piano parallele, variabili in ampiezza e frequenza, in cui i riflettori principali appaiono spazati di alcuni metri e livelli decimetrici, indicanti superfici meno riflettenti. In questa coltre sedimentaria alluvionale si riconoscono orizzonti torbosi e una diffusa presenza di gas manifestata da evidenti lacune acustiche tipiche.

In estrema sintesi, i dati fino ad ora raccolti portano a ritenere che almeno per alcuni di questi litosomi sembra accertata un'origine per cementazione dei clasti per ossidazione del metano contenuto nel sottosuolo. Lo stanno a dimostrare le manifestazioni gassose che si rinvencono sulla loro verticale (bromboli), le sacche di gas individuate nel sottosuolo e la presenza di solfo batteri che si rinvencono al loro intorno (Fig. 8). Anche altri studi eseguiti nell'area (e anche in aree finitime, come il Golfo di Venezia e l'Adriatico in generale) da autori precedenti hanno evidenziato la stessa genesi per alcuni affioramenti indagati. Al momento però dall'analisi degli affioramenti del Golfo di Trieste non si arriva ad una certificazione analitica di questa genesi, in quanto le indagini sul cemento sono estremamente problematiche a causa della scarsità di materiale reperibile e da processare con i normali metodi della geochimica isotopica. Rimane, comunque, la constatazione

che non tutti gli affioramenti individuati sono connessi a sacche di gas riconosciute nel sottosuolo. A ciò si aggiunga che il gran numero di campi d'affioramenti sottomarini individuati, ognuno con diverse rocce singole, la loro diversità di forma, il loro scarso radicamento sul sottofondo marino, la coincidenza a volte con la presenza di *mattes* di *Posidonia oceanica* morta e, a complicare ancora di più la situazione, l'analogia di alcune rocce con i livelli cementati dei suoli (Pan), mentre per altre con componenti organogene, la similitudine con le attuali sabbie di piattaforma inducono a supporre una diversità di genesi di questi litosomi nell'ambito dello stesso ambiente marino e in quello continentale sottostante. Non si esclude, pertanto, che oltre alla cementazione in loco di depositi continentali legati alla fuoriuscita di gas metano, originato probabilmente da processi di decomposizione delle torbe depostesi durante l'ultima glaciazione würmiana, altri possibili processi di cementazione precoce siano intervenuti nei depositi del sottofondo e fondo marino del Golfo di Trieste. In via del tutto preliminare si ritiene che questi processi possono essere ricercati in:

- una cementazione di depositi sabbiosi marino-litorali, avvenuta all'interno dell'antico prisma sedimentario costiero e sulle antiche linee di riva;
- una venuta a giorno, per erosione della coltre sedimentaria soprastante, di depositi alluvionali cementati inclusi nel materasso sabbioso della paleopianura tardiglaciale;
- una cementazione dei depositi sottostanti le praterie di *Posidonia oceanica* una volta abbondanti in questi mari e attualmente scomparse per cause ancora dibattute.

Le indagini programmate per il prossimo futuro dovranno dare risposta a queste ipotesi.



Fig. 8 - Presenza di chiazze biancastre batteriche sul fondo marino in corrispondenza delle emanazioni gassose.

Photograph showing the presence of white bacterial mats on the seabed in an area of active gas seepage.

BIBLIOGRAFIA

- Boldrin A. (1979) - *Aspetti ecologici delle formazioni rocciose dell'Alto Adriatico*. Atti del Conv. Sc. Naz. P.F. Ocean. e Fondi Mar., **3**, 1197-1207.
- Braga G. & Stefanon A. (1969) - *Beachrock ed alto Adriatico: Aspetti paleogeografici, climatici, morfologici ed ecologici del problema*. Atti Ist. Ven. Sc. Lett. Art. **CXXVII**, 351-359.
- Caressa S., Gordini E., Marocco R. & Tunis G. (2001) - *Caratteri geomorfologici degli affioramenti rocciosi del Golfo di Trieste (Adriatico Settentrionale)*. Gortania, **23**, 5-29.
- Colantoni P., Fanzutti G.P. & Marocco R. (1985) - *Geologia della piattaforma adriatica*. P.F. Oceanografia e Fondi Marini, 49-85.
- Colantoni P., Gabbianelli G., Ceffa L. & Ceccolini C. (1998) - *Bottom features and gas seepages in the Adriatic Sea*. Estratto da: V International Conference on Gas in Marine sediments, 28-31.
- Conti A., Stefanon A. & Zuppi G.M. (2002) - *Gas seeps and rock formation in the northern Adriatic Sea*. Cont. Shelf Res., **22**, 2333-2344.
- Galassi P. & Marocco R. (1999) - *Relative sea-level rise, sediment accumulation and subsidence in the Caorle Lagoon (northern Adriatic Sea, Italy) during the Holocene*. Il Quaternario, **12 (2)**, 249-256.
- Gordini E., Marocco R. & Vio E. (2002) - *Stratigrafia del sottosuolo della "Trezza Grande" (Golfo di Trieste, Adriatico Settentrionale)*. Gortania, **24**, 31-63.
- Gordini E., Caressa S. & Marocco R. (2003) - *Nuova carta morfo-sedimentologica del Golfo di Trieste (da Punta Tagliamento alla foce dell'Isonzo)*. Gortania, **25**, 5-29.
- Gordini E., Ramella R., Romeo R., Deponte M. & Marocco R., (in stampa) - *Indagini acustiche sugli affioramenti rocciosi del Golfo di Trieste (Adriatico Settentrionale)*. Gortania.
- Jensen P., Aagaard I., Burke Jr R. A., Dando P. R., Jorgensen N. O., Kuijpers A., Laier T., O'Hara S. C. M. & Schmaljohann R. (1992) - *Bubbling reefs in the Kattegat: submarine landscapes of carbonate-cemented rocks support a diverse ecosystem at methane seeps*. Mar. Ecol. Prog. Ser., **83**, 103-112.
- Marocco R. (1991) - *Evoluzione tardopleistocenica-olocenica del delta del F. Tagliamento e delle lagune di Marano e Grado, (Golfo di Trieste)*. Il Quaternario, **4(1b)**, 223-232.
- Marocco R., Melis R., Montenegro M.E., Pugliese N., Vio E. & Lenardon G. (1996) - *Holocene evolution of the Caorle barrier-lagoon (northern Adriatic Sea, Italy)*. Riv. Ital. Pal. Strat., **102 (3)**, 385-396.
- Mizzan L. (1999) - *Localizzazione e caratterizzazione di affioramenti rocciosi delle coste veneziane. Primi risultati di un progetto di indagine*. Boll. Mus. Civ. St. Nat. Ven., **50**, 195-212.
- Newton R. & Stefanon A. (1975) - *The "Tenue de Ciosa" area: patch reefs in the Northern Adriatic Sea*. Mar. Geol., **8**, 27-33.
- Newton R. & Stefanon A. (1976) - *Primi risultati dell'uso simultaneo in Alto Adriatico di Side Scan Sonar, Subbottom Profiler ed Ecografo*. Mem. Biogeogr. Adriat., **9**, Suppl., 33-60.
- Stefanon A. (1967) - *Formazioni rocciose del bacino dell'Alto Adriatico*. Atti Ist. Ven. Sc. Lett. Arti, **125**, 79-85.
- Stefanon A. (1979) - *Gli affioramenti rocciosi dell'Alto Adriatico: considerazioni sulla loro distribuzione, struttura ed evoluzione, nel contesto della problematica del bacino*. Conv. PF Oceanografia e Fondi Mar., Roma, 1233-1242.
- Stefanon A. (1984) - *Sedimentologia del mare Adriatico: Rapporti tra erosione e sedimentazione olocenica*. Boll. Ocean. Teor. Appl., II, **4**, 281-324.
- Stefanon A. (1985) - *Marine sedimentology through modern acoustical methods: I. Side Scan Sonar*. Boll. Ocean. Teor. Appl., III, **1**, 3-38.
- Stefanon A. (1980) - *The acoustic response of some gas-charged sediments in the Northern Adriatic Sea*. Bottom Interacting ocean Acoustics Conference, SACLANT ASW Centre, La Spezia, 73-84.
- Stefanon A. & Mozzi C. (1972) - *Esistenza di rocce organogene nell'Alto Adriatico al largo di Chioggia*. Atti Ist. Ven. Sc. Lett. Arti, **130**, 495-499.
- Stefanon A. & Mozzi C. (1973) - *Rock outcrops in the Northern Adriatic Sea*. Scien. Div. Inter, 203-206.
- Stefanon A. & Zuppi G.M. (2000) - *Recent carbonate rock formation in the northern Adriatic Sea*. Hydrogéologie, **4**, 3-10.

Ms. ricevuto l'8 giugno 2004
 Testo definitivo ricevuto il 23 novembre 2004

Ms. received: June 8, 2004
 Final text received: November 23, 2004

