

La ricerca di nuovi archivi naturali ad alta risoluzione per comprendere le variazioni climatiche nel Mediterraneo nel corso degli ultimi 500 anni

Sergio Silenzi¹, Fabrizio Antonioli², Renato Chemello³, Saverio Devoti¹,
Claudio Mazzoli⁴, Paolo Montagna¹

¹ISPRA- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.

²ENEA - Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, Roma.

³Dipartimento di Ecologia, Università di Palermo, Palermo.

⁴Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova, Padova.

Riassunto

Al fine di comprendere la variabilità climatica del passato, per capire i meccanismi climatici in atto, supportare la calibrazione dei modelli di previsione e pianificare gli eventuali adattamenti necessari al clima del futuro, è necessario disporre di serie storiche di dati paleoclimatici. Sono questi dati, infatti, che possono permettere di chiarire i meccanismi del cambio climatico in termini di variazioni naturali a carattere planetario e locale, le interazioni fra oceani, terre emerse ed atmosfera, nonché i rapporti fra aree climatiche della Terra. Inoltre, comprendere come le variazioni attuali si discostino da quelle naturali è essenziale per capire quanto l'uomo ha modificato il clima del recente passato e, quindi, quanto influirà sul futuro. Nel Mare Mediterraneo, a causa della mancanza dei reef corallini, la ricostruzione delle variazioni del livello marino e delle temperature delle acque superficiali si basa quasi esclusivamente sui dati strumentali, provenienti da mareografi, dati satellitari e da campagne oceanografiche. Questi coprono al più pochi decenni (satelliti) o l'ultimo secolo (mareografi).

Al fine di estendere i dati disponibili quanto più indietro nel passato, mantenendo però un'alta risoluzione temporale, negli ultimi anni sono stati studiati, fra gli altri, due nuovi archivi climatici marini: i) il mollusco *Dendropoma petraeum*, che registra le temperature ed il livello del mare degli ultimi 500 anni; ii) il corallo *Cladocora caespitosa*, che registra le temperature degli ultimi 100 anni.

In questo lavoro sono descritte le principali caratteristiche ecologiche di questi nuovi archivi naturali, l'approccio metodologico utilizzato per comprenderne le potenzialità e i principali risultati ottenuti in termini di ricostruzione del livello e delle temperature marine.

Parole chiave: variazioni del livello del mare, variazioni della temperatura superficiale del mare, Olocene recente, archivi naturali, Mediterraneo.

Abstract

Paleoclimate records are important tools for understanding climate modifications and describing recent anthropogenic perturbations in climate change relative to natural variability in the Earth climate system. Moreover, time-series proxy records of the main physical and chemical parameters in the marine and continental environments are increasingly used for testing climate models in order to ascertain the reliability of projections of future scenarios in our greenhouse modified Earth.

*In order to make up for the limited number of continuous instrumental measurements back in time of climatic variables such as sea surface temperature (SST), and sea-level fluctuations, a complementary approach is the examination of geochemical tracers (i.e. trace elements and stable isotopes) in well-dated natural marine archives. Recently, the Mediterranean Sea has been the focus of a number of studies where new high resolution climate archives have been investigated utilizing proxies for sea surface temperature, different to those available for tropical regions. In particular, vermetids (*Dendropoma petraeum*) and non-tropical zooxanthellate corals (*Cladocora caespitosa*) have been studied by conventional and advanced analytical techniques (e.g., laser ablation ICP-MS, MC-ICP-MS) and have been successfully used as high-resolution palaeo-environmental proxies. Vermetid reefs have the potential to yield valuable information on the past sea-level changes and SST during the last 500 years, through the combination of stable isotopes and radiocarbon dating. The trace element concentration of the skeletal aragonite of the Mediterranean zooxanthellate coral *Cladocora caespitosa* has been successfully demonstrated to be a valid high-resolution SST archive for the last 150 years. Here we present a review of the main results we have obtained during the last six years in the study of natural marine archives collected in various sites along the Mediterranean Sea, reporting our methodological approach and the most important achievements.*

Keywords: sea-level, sea surface temperature, natural archives, last centuries, Mediterranean Sea.

Il significato delle ricerche sui nuovi archivi climatici per il Mare Mediterraneo

Uno dei principali obiettivi degli studi climatici è quello di riuscire a discriminare il rapporto fra cambiamenti naturali ed antropogenici, nonché formulare scenari di previsione futura attendibili (Schneider, 2006).

Ad esempio, i modelli di circolazione generale (General Circulation Models - GCMs) forniscono un'adeguata descrizione della variabilità climatica di corto periodo e permettono di comprendere le interazioni fra atmosfera, oceano, litosfera e biosfera (Duffy et al., 2003; Govindasamy et al., 2003; Palmer et al., 2005). Nonostante ciò, per rendere funzionanti tali modelli è necessario applicare delle semplificazioni: queste fanno sì che, spesso, gli scenari che ne scaturiscono sono equivalentemente possibili ma contrastanti fra loro (Broecker, 2001; Bradley et al., 2003; Bengtsson et al., 2006; Hunt, 2006).

Vista la difficoltà dei modelli di descrivere scenari certi, molti ricercatori ancora disquisiscono se siamo all'inizio di un riscaldamento mai ravvisato sulla Terra per velocità ed intensità o, al contrario, se ci troviamo prossimi alla soglia di una nuova era glaciale. Altri quesiti che si pone la comunità scientifica riguardano la velocità della desertificazione, se il livello del mare subirà veramente un'ulteriore accelerazione nella risalita e in che tempo gli effetti si registreranno a scala globale, come si modificheranno i monsoni e l'occorrenza dei El Niño e La Niña, e cosa succederà se la circolazione oceanica globale si interromperà (vale la pena ricordare che ancora molti fra gli addetti ai lavori pensano che il riscaldamento dell'Europa occidentale sia dovuto solo all'effetto della Corrente del Golfo, che invece contribuisce in minima parte; Seager et al., 2002).

Per riuscire a ridurre i margini d'incertezza dei GCMs e tentare di comprendere sia i meccanismi di retroazione sia quelli di teleconnessione fra i vari sistemi climatici planetari, bisogna calibrare i modelli e renderli capaci di effettuare delle simulazioni di lungo periodo e ad alta risoluzione. Per effettuare tali calibrazioni si usa generalmente verificare la risposta dei modelli al clima del recente passato, esprimendo conseguentemente le variazioni future in termini di differenze con il periodo di confronto.

La ricostruzione del passato si basa sull'utilizzo dei record strumentali disponibili; questi, però, sono in grado di coprire solo poche decadi con un numero ridotto di dati, spesso acquisiti in modo discontinuo. Per sopperire a tale mancanza possono essere utilizzati dati paleoambientali e paleoclimatici dedotti dallo studio di archivi naturali quali anelli degli alberi, carote di ghiaccio,

associazioni polliniche, organismi marini e resti ossei o denti di organismi continentali, speleotemi, ecc. Ciò può consentire di estendere indietro nel tempo i periodi di verifica dei modelli ed ottenere scenari predittivi di più lungo intervallo o, quantomeno, di ricostruire le dinamiche climatiche occorse nel passato.

Proprio per comprendere i meccanismi di variabilità ambientale e poter disporre di una base di dati utile a calibrare sul lungo periodo i modelli e gli scenari di previsione futura, alcuni degli autori del presente lavoro, in collaborazione con colleghi di istituzioni scientifiche straniere, negli ultimi anni hanno lavorato all'identificazione di nuovi archivi climatici adatti a descrivere tali variazioni nell'ambito dell'area mediterranea (Tab.1). Questo lavoro è stato impostato per coprire diversi archi temporali (dalle migliaia alle decine di anni) con risoluzioni adeguate alle scale di volta in volta analizzate (dalle centinaia di anni alle settimane).

L'importanza di comprendere cosa avviene nel Mediterraneo risiede nel fatto che questo mare, con le sue peculiarità di bacino semi-chiuso e la sua posizione sul pianeta alle medie latitudini, è particolarmente sensibile ai cambiamenti climatici, come testimoniato nella sua storia geologica anche recente (Taviani, 2002; Somot et al., 2006).

Tabella 1 - Gli archivi climatici presentati nei documentari T-Med e Med Archives e le relative informazioni paleoclimatiche in essi contenute.

Archivio naturale	Ambiente	Periodo di tempo ricostruibile (colonie viventi)	Risoluzione temporale	Parametri ambientali ricavabili	Principali riferimenti
Reef a vermeti (<i>Dendropoma petraeum</i>)	mesolitorale inferiore/frangia infralitorale superiore in acque calde	1400 AD - presente	30-40 anni	Livello del mare; SST	Antonioli et al., 1999 Silenzi et al., 2004
Coralli non tropicali (<i>Cladocora caespitosa</i>)	da 0 a ~ -40 m	1850 AD - presente	da mensile a settimanale	SST; chimica dell'acqua marina	Silenzi et al., 2005 Montagna et al., 2007

Così, il mare Mediterraneo rappresenta un settore ideale per provare la capacità dei GCMs, dato che esso è fortemente influenzato dall'oscillazione del Nord Atlantico (North Atlantic Oscillation - NAO) e dalla zona di convergenza intertropicale (Intertropical Convergence Zone - ITCZ) (Cramp and O'Sullivan, 1999), la cui interazione è fondamentale nel determinare l'andamento degli eventi climatici del pianeta (Parrilla e Kinder, 1987), con importanti e rapidi cambiamenti correlati alle variazioni nell'input delle acque atlantiche a minor salinità attraverso lo stretto di Gibilterra.

Al fine di ottenere archivi capaci di descrivere le variazioni del livello marino, le temperature superficiali e la salinità del mare, nonché alcune delle sue variabili chimiche, con dettaglio e qualità del dato comparabile agli archivi costituiti dai coralli tropicali, è stato intrapreso lo studio di alcuni biocostruttori carbonatici: serpulidi (non presentati in questo lavoro; ampi riferimenti sull'utilizzo dei serpulidi concresciuti su speleotemi sommersi come archivi climatici possono essere trovati in Antonioli et al., 2001; 2004), vermeti e coralli non tropicali (Fig.1).

Aspetti generali dell'approccio metodologico all'individuazione di nuovi archivi climatici

La comprovata possibilità di estrarre dallo scheletro aragonitico dei coralli zooxantellati tropicali il segnale climatico, grazie alla determinazione della concentrazione degli isotopi stabili (principalmente ossigeno e carbonio) e di elementi in traccia (Weber e Woodhead, 1972; Smith et al., 1979; Beck et al., 1992), ha costituito la base delle esperienze scientifiche presentate in questo lavoro.

È stato possibile, infatti, applicare i metodi generalmente utilizzati sui coralli tropicali a due specie mediterranee che, sulla base dei loro tassi di accrescimento e della loro longevità, nonché della loro ecologia, si presentano come potenziali archivi: il Mollusco vermetide *Dendropoma petraeum* (ultimi 500 anni; alta risoluzione temporale per le temperature ed il livello del mare) e il corallo non-tropicale *Cladocora caespitosa* (ultimi 100 anni; altissima risoluzione temporale per la temperatura). I tassi di crescita relativamente bassi di questi due organismi hanno imposto l'utilizzo di tecniche analitiche avanzate, capaci di implementare la risoluzione spaziale delle porzioni di materiale analizzate, innalzare i limiti di rilevabilità, la precisione e l'accuratezza delle determinazioni delle concentrazioni degli isotopi stabili e degli elementi in traccia.

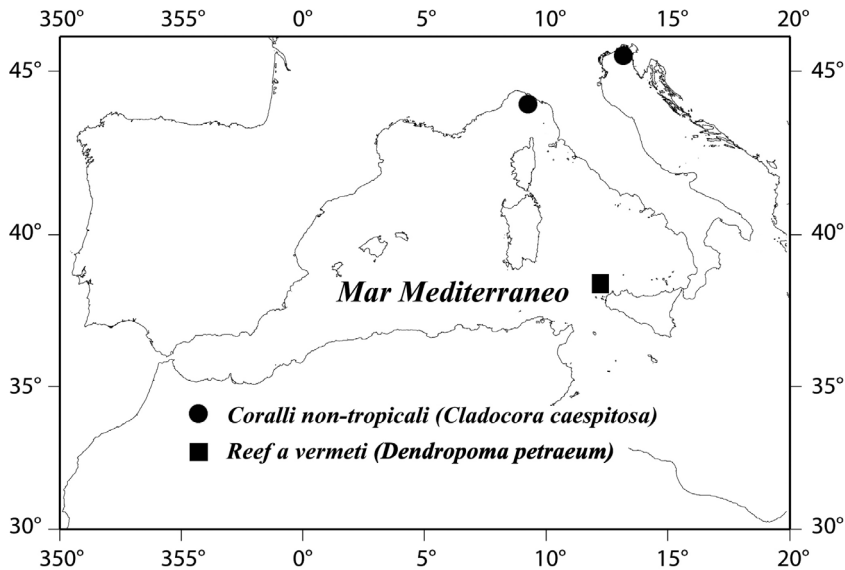


Figura 1 - Localizzazione dei dati discussi nella presente *review* relativi ai reef a vermeti ed al corallo non tropicale *Cladocora caespitosa* (rielaborata da Montagna et al., 2008a).

Per questo ci si è avvalsi dell'utilizzo di ICP-MS e/o MC-ICP-MS (*Multi Collector - Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrophotometer*) equipaggiati con un'adeguata (per lunghezza d'onda e potenza) apparecchiatura *laser-ablation* (LA).

L'approccio a questi potenziali nuovi archivi ad alta risoluzione non poteva esaurirsi, soprattutto per la mancanza assoluta di dati pregressi di carattere geochimico, nella semplice applicazione delle analisi normalmente usate sui coralli tropicali. Il percorso metodologico adottato per verificare che gli archivi biologici potessero essere utilizzati come *proxy* ambientali del Mediterraneo si è, perciò, articolato secondo il seguente schema di studi:

1) Studi preliminari:

- a) disponibilità degli archivi naturali attraverso l'individuazione dei siti di studio/campionamento;
- b) approfondimento delle caratteristiche biologiche ed ecologiche delle specie;
- c) caratterizzazione mineralogica e petrografica dei campioni;
- d) controllo della fisiologia della specie e della magnitudo dei tassi di crescita, distribuzione degli elementi nello scheletro (analogamente a quanto evinto per i coralli tropicali da Sinclair et al., 2006; Meibom et al., 2006; Gaetani e Cohen, 2006).

2) Analisi geochimiche ad alta risoluzione.

3) Correlazione fra parametri geochimici e dati ambientali per la calibrazione degli archivi naturali quali paleotermometri e paleo-misuratori ambientali.

4) Comparazione con altri archivi naturali globali e/o dati climatico-ambientali conosciuti nel Mediterraneo.

Questo approccio rappresenta la base per affrontare qualsiasi ricostruzione paleoclimatica attraverso l'utilizzo di nuovi archivi naturali.

Infatti, molti organismi, attraverso la registrazione del segnale isotopico nel proprio scheletro o guscio, possono potenzialmente fornire indicazioni sulle condizioni chimico-fisiche dell'ambiente in cui vivono, sebbene l'effetto delle funzioni metaboliche, la presenza di microstrutture nello scheletro, i fenomeni di diagenesi precoce, l'alterazione connessa all'attacco di microalghe e microrganismi possono alterare il segnale rendendo il loro utilizzo incerto e difficoltoso.

I nuovi archivi naturali: aspetti generali

I reef a vermeti

I reef a vermeti sono formati dall'associazione tra alghe corallinacee incrostanti ed i vermeti, Molluschi gasteropodi gregari adattati a vivere nella fascia di transizione tra mesolitorale inferiore e la frangia infralitorale superiore, che si accrescono uno sull'altro, arrivando a formare dei veri e propri marciapiedi o reef (Fig. 2, a e b).

Scogliere a vermeti sono state rinvenute in molte località dei mari temperati del mondo, come nell'Oceano Atlantico lungo le coste del Senegal (Laborel e Delibrias, 1976), nelle Isole Bermuda (Stephenson e Stephenson, 1954), lungo la costa del Brasile (Van Andel e Laborel, 1964; Kemp e Laborel, 1968; Laborel e Delibrias, 1976; Angulo et al., 1999), a Curaçao (Focke, 1977), nelle Grand Cayman (Jones e Hunter, 1995) e nell'Oceano Pacifico nelle Isole Hawaii (Hadfield et al., 1972).

Nel Mediterraneo i vermeti sono distribuiti quasi unicamente nelle acque più calde del settore sudorientale e centrale-meridionale. Si possono osservare, infatti, lungo le coste di Israele, della Siria, del Libano, della Grecia, della Turchia, a Malta e nel sud dell'Italia e della Spagna (Safriel 1966, 1974; Delongeville et al., 1993; Pirazzoli e Montaggioni, 1989; Chemello et al. 1990, a e b; Pirazzoli et al., 1996; Azzopardi e Schembri, 1997; Antonioli et al., 1999).

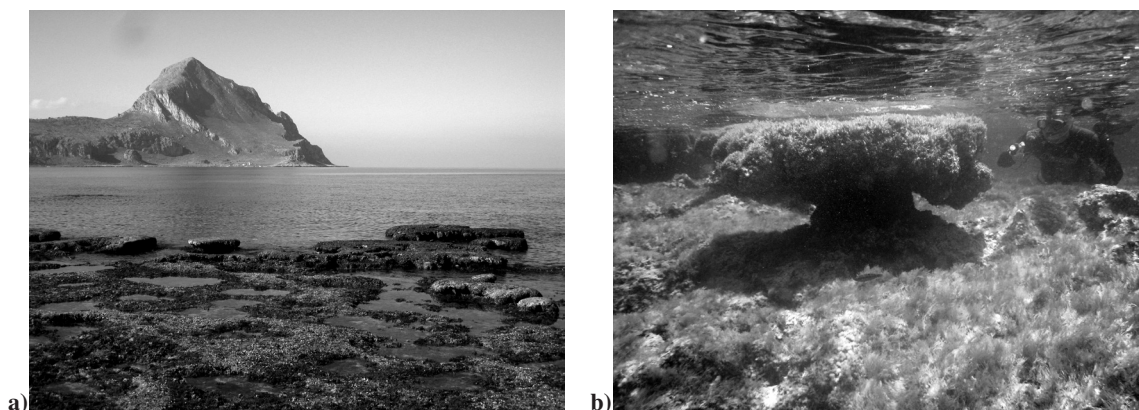


Figura 2 – A sinistra: reef a vermeti nelle caratteristiche morfologie a piattaforma (più vicini a costa) e fungo durante una fase di bassa marea (al margine esterno del reef). A destra: particolare di un fungo durante l'alta marea. Sicilia nord-occidentale.

In virtù della loro termofilia, con il progressivo riscaldamento climatico olocenico, i vermeti si sono espansi dalle aree più meridionali del Mediterraneo a quelle centrali (Antonioli et al., 1999), seppure alcune teorie correlino la cinetica di colonizzazione dei vermeti alla distribuzione degli approdi fenici (Chemello in Russo, 1999).

Delle nove specie conosciute, *Dendropoma petraeum* e *Vermetus triquetrus* sono le specie che contribuiscono maggiormente alla costruzione di reef nel Mediterraneo (Chemello et al., 2000).

In particolare *D. petraeum* rappresenta la principale specie biocostruttrice in più del 90% di tutte

le strutture presenti lungo la costa della Sicilia (Chemello et al., 1990b). Questo è un gasteropode filtratore, con una conchiglia spessa chiusa da un opercolo particolarmente spesso ed efficiente (Fig. 3), in grado di isolare il mollusco durante le ore di emersione giornaliera connesse alla bassa marea. La porzione vivente dei *reef* si sviluppa, infatti, principalmente nella fascia corrispondente all'intervallo di marea. In misura minore, tuttavia, i vermeti del genere *Dendropoma* possono adattarsi a vivere anche nei primi metri della zona subtidale (Schiaparelli et al., 2006).

I *reef* hanno diverse forme (per una descrizione vedere Antonioli et al., 1999), con dimensioni che possono estendersi dalle poche decine di centimetri sino ad oltre 10 metri di ampiezza per alcuni chilometri di lunghezza.

Le scogliere si sviluppano lungo le coste rocciose a pendenza compresa tra 0° (orizzontale) e 40°, crescendo in direzione del largo.

I *reef* sono caratterizzati da una grande continuità laterale: dove sono presenti coprono più del 90% della linea di costa, contribuendo alla protezione dall'erosione.

La struttura delle colonie è strettamente legata alla loro età ed ai processi erosivi che insistono sulle diverse litologie del substrato roccioso.

Le forme a *ledge* (davanzale) si sviluppano lungo le coste più esposte ai marosi, come lungo i promontori e alla base delle falesie. Hanno dimensioni ridotte, con un'estensione di pochi decimetri. Tali strutture rappresentano una delle prime forme di colonizzazione di una costa da parte dei vermeti.

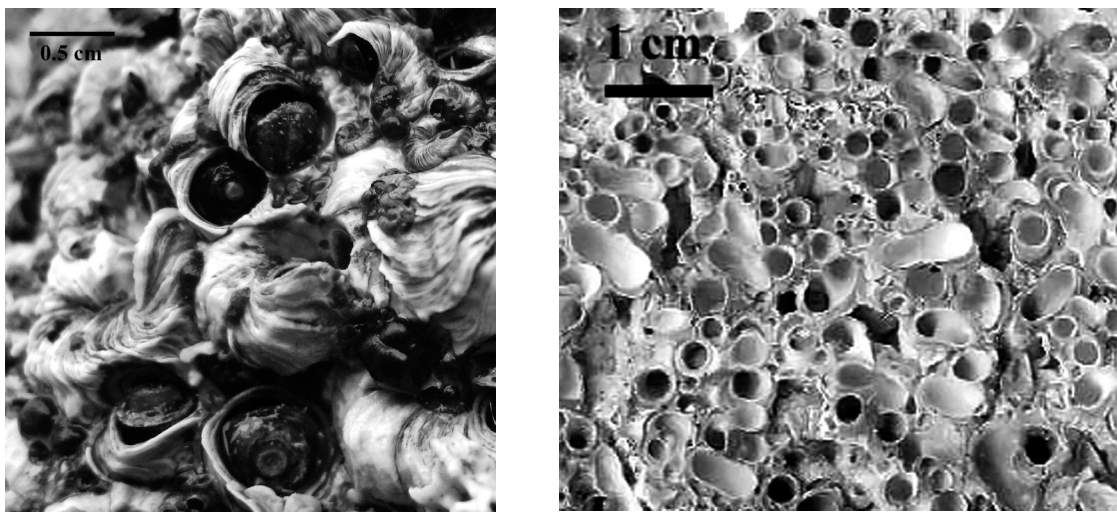


Figura 3 - Immagini macro di esemplari viventi di *Dendropoma petraeum* (a sinistra) e della relativa sezione (a destra); da quest'ultima si può comprendere la complessa sovrapposizione degli individui nei *reef*.

L'evoluzione delle colonie porta alla formazione delle piattaforme (Fig. 2a), veri e propri *reef* estesi anche per decine di metri e con spessori consistenti, anche di oltre 40 centimetri; sono le strutture più comuni.

La base di queste forme si presenta generalmente erosa, formando una sorta di piccola falesia sommersa mentre il profilo pianeggiante è correlabile all'azione del moto ondoso.

Lo sviluppo accelerato dell'erosione alla base di una piattaforma porta quest'ultima ad acquisire una struttura prominente verso il largo. Il proseguimento dei processi erosivi isola dei blocchi di substrato, con la conseguente formazione di microatolli. Così si sviluppano i *reef* a fungo (Fig. 2b).

Alla fine di questo processo i vermeti avranno colonizzato il pilastro di roccia in ogni sua direzione.

Il notevole sviluppo delle scogliere a vermeti, unitamente alla possibilità di datare con precisione col metodo del radiocarbonio ogni specifica porzione, permette di valutare con dettaglio l'evoluzione climatica nell'intervallo cronologico del loro accrescimento. Inoltre, grazie alla possibilità di correlare ad un errore definito (circa ± 0.1 m in Sicilia) una porzione dei *reef* al livello del mare è possibile, datando le porzioni fossili, ricostruire un modello di crescita descrittivo delle variazioni relative locali del livello marino.

Così, risulta essere di particolare rilievo l'utilizzo di questo archivio naturale nelle determinazioni paleoeustatiche. Infatti, carotaggi effettuati su barriere coralline (per es. Bard et al., 1996) hanno permesso di ricostruire a scala globale le variazioni del livello del mare dall'ultimo glaciale, cui si aggiungono, anche nel Mediterraneo, dati da sondaggi, *beachrock* e speleotemi sommersi, resti archeologici come le piscine romane di età imperiale (Lambeck et al., 2004a; b e bibliografia citata). Le osservazioni oloceniche sono perciò ben dettagliate sino a c.a 2000 anni fa anche nel Mediterraneo. I dati paleoeustatici disponibili riacquistano un'alta risoluzione temporale con l'inizio delle misure mareografiche (raramente oltre i 100 anni fa).

Tuttavia, l'intervallo di tempo circa corrispondente al periodo fra il XV e XIX secolo, che include la fine del Periodo Caldo Medioevale e la Piccola Età Glaciale (*Little Ice Age*, LIA), è cruciale per comprendere la risalita del livello del mare in una fase in cui alle oscillazioni naturali si sono sovrapposte quelle indotte dall'uomo. In tal senso, l'utilizzo dei *reef* a vermeti è di fondamentale importanza per coprire, con informazioni attendibili, questi secoli di storia.

Va tuttavia sottolineato che, sebbene la presenza di *reef* a vermeti fossili sia documentata per l'intero Olocene (Laborel e Laborel, 1996; Laborel et al., 2000), colonie attualmente viventi non sono più antiche di 500-600 anni (Antonioli et al., 1999; Silenzi et al., 2004): questo è dovuto all'instabilità strutturale dei *reef* che, raggiunte dimensioni critiche, vengono distrutti da eventi meteomarinari estremi o tsunami (Antonioli et al., 1999). Tale evidenza è ben testimoniata dall'attuale presenza di interi *reef* in depositi di tempesta, spiaggiati nell'entroterra anche a diverse decine di metri dalla linea di riva.

Il corallo non-tropicale *Cladocora caespitosa*

Cladocora caespitosa L., 1758 è un corallo scleractinide zooxantellato (Fig. 4). Esso è uno dei più importanti organismi biocostruttori del Mediterraneo (Laborel, 1987) dove è largamente diffuso (Peirano et al., 2004). Fuori da questo mare, dove è endemico, il corallo può essere rinvenuto lungo coste atlantiche del Portogallo meridionale e del Marocco (Zibrowius, 1980).

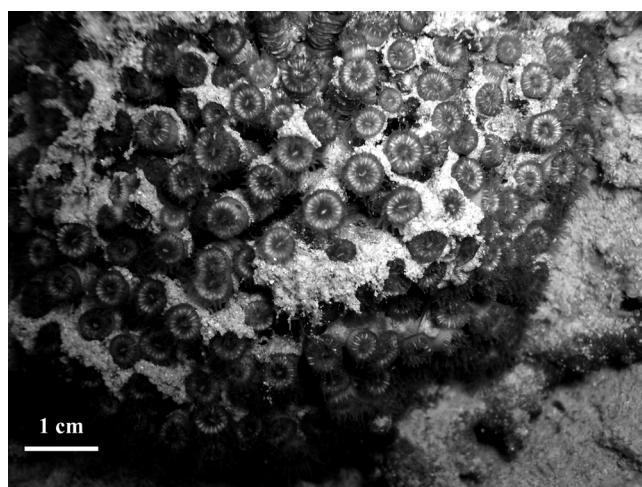


Figura 4 - Una colonia di *Cladocora caespitosa* proveniente dal Mar Ionio.

Cladocora caespitosa si sviluppa generalmente su fondali rocciosi all'interno della zona eufotica, fra pochi decimetri e -40 m. Essa si presenta in colonie subsferiche (dai 10 ai 30 cm di diametro massimo) o in banchi, formazioni massive alte alcune decimetri e sviluppate per diversi metri quadri (Peirano et al., 1998; Morri et al., 1994; Kühlmann, 1996; Schiller, 1993; Kružić e Požar-Domac, 2003; Kružić e Benković, 2008).

Le colonie sono caratterizzate dalla presenza di diversi coralliti disposti a raggiera, ognuno dei quali possiede pareti indipendenti dagli altri (Fig. 5) e si accresce circa-linearmente, con tassi variabili da 1.30 mm/anno (Peirano et al., 1999) a 6.2 mm/anno (Kružić e Požar-Domac, 2003).



Figura 5 - Esemplare di corallite di *Cladocora caespitosa*: intero (a sinistra) e in sezione (a destra).

Questa specie generalmente deposita due bande di accrescimento per anno, una ad alta densità (HD) durante il periodo invernale ed una a bassa densità (LD) durante quello estivo.

Campioni di *Cladocora caespitosa* provenienti dal Mar Ligure e studiati da Peirano et al. (1999), hanno mostrato che in novembre i singoli coralliti iniziano la deposizione della banda HD; questa entro marzo risulta completamente formata. La banda LD è depositata fra aprile e novembre.

Il lavoro di Montagna et al. (2007) mostra come il corallo termini ogni processo di deposizione del proprio scheletro carbonatico al di sotto della temperatura di 13.8°. *C. caespitosa* ha processi di accrescimento e calcificazione molto simili a quelli dei coralli tropicali, costruendo il proprio scheletro aragonitico in un'alternanza di centri di calcificazione e fibre aragonitiche.

Tutti questi aspetti hanno permesso di selezionare questa specie come un candidato ideale e colmare l'assenza, nel Mediterraneo, di un archivio naturale ad alta risoluzione capace di descrivere le variazioni dei principali fattori ambientali occorsi nell'ultimo secolo. Studi recenti (Silenzi et al., 2005; Montagna et al., 2007), presentati di seguito, hanno confermato questa potenzialità.

I nuovi archivi naturali: principali risultati

I reef a Vermeti

Antonioli et al. (1999), attraverso la datazione di porzioni fossili di reef a vermeti viventi, hanno ricostruito una curva di variazione del livello del mare in aree tettonicamente stabili della Sicilia nord-occidentale. Mediante la comparazione del livello medio del mare attuale con la profondità assoluta dei campioni fossili prelevati, gli Autori hanno determinato come 430 ± 30 anni BP il livello relativo del mare si trovasse a -40 ± 8 cm rispetto ad oggi (Fig. 6).

Tali dati hanno contribuito a calibrare i modelli glacio-idro-isostatici elaborati per questa regione del Mediterraneo (Lambeck et al., 2004b).

Ulteriori analisi, effettuate sulle stesse colonie, hanno permesso di dimostrare la potenzialità del

D. petraeum di essere un archivio delle variazioni della temperatura superficiale del mare attraverso l'analisi degli isotopi stabili dell'ossigeno (Silenzi et al., 2004).

E' stato così possibile identificare, nel settore del Mare Tirreno Meridionale, la registrazione della LIA, occorsa fra il XVII e XIX secolo: in questo periodo la temperatura marina è risultata essere di $1.99 \pm 0.37^\circ$ più bassa dell'attuale con valori che trovano riscontro in letteratura (Keigwin, 1996). Ulteriori elaborazioni (Montagna et al., 2008a) mostrano che, se si considera la mineralogia aragonitica del *D. petraeum*, così come riportato in Triolo et al. (2003), applicando l'equazione di frazionamento fra aragonite e temperatura superficiale del mare (SST; *Sea Surface Temperature*):

$$SST(^{\circ}) = 20.6 - 4.34 * (\delta^{18}O_{\text{carbonato}} - \delta^{18}O_{\text{acquamarina}}) \quad (1)$$

con un $\delta^{18}O_{\text{acquamarina}} = +1.3 \text{ ‰}$ V-SMOW (Pierre, 1999; SMOW, Standard Mean Ocean Water, rappresenta lo standard di riferimento delle acque marine), la temperatura media annuale durante la LIA era variabile fra 17.6 and 21.1 °C. Considerando che ogni campione analizzato in Silenzi et al. (2004) rappresenta un intervallo di 30-50 anni, ogni temperatura calcolata rappresenta la media su tale intervallo temporale.

Il trend di riscaldamento, successivo alla LIA, che ha caratterizzato il XX secolo si è interrotto intorno agli anni 1930-1940 quando, nei vermeti, si ha evidenza di una fase relativamente più fredda sino a metà degli anni '90 (Fig. 6).

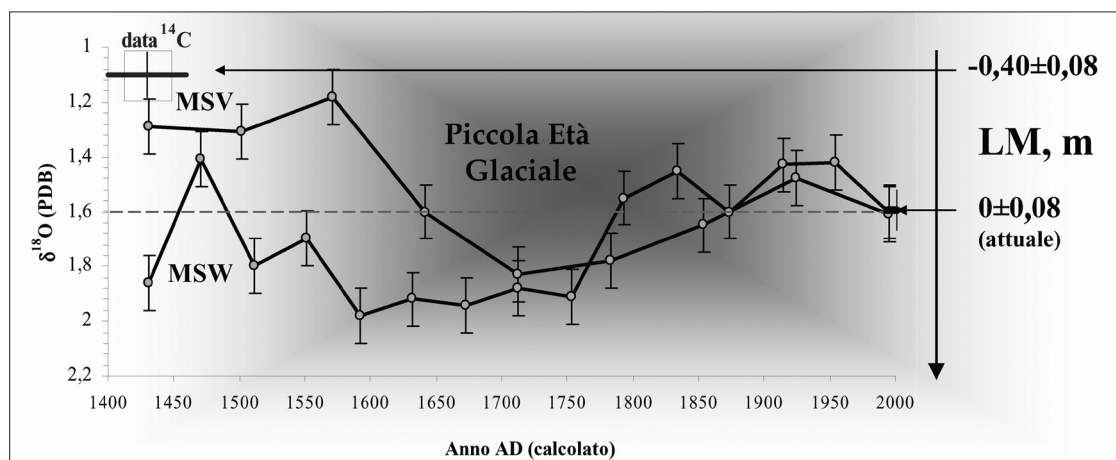


Figura 6 - L'immagine mostra i principali risultati ottenuti dall'analisi di un reef a vermeti: le datazioni con il ^{14}C hanno permesso di determinare il livello del mare di circa 550 anni fa, mentre le analisi del $\delta^{18}\text{O}$ mostrano l'andamento delle SST nel tempo, evidenziando l'oscillazione climatica relativa alla Piccola Età Glaciale (dati rielaborati da Silenzi et al., 2004; gli acronimi MSV e MSW rappresentano le sigle dei due transesti analizzati all'interno di un singolo reef).

Il corallo non-tropicale *Cladocora caespitosa*

Il corallo *Cladocora caespitosa* è stato testato come potenziale archivio climatico ad alta risoluzione per la prima volta da Silenzi et al. (2005), attraverso la determinazione, in *bulk-analysis*, dell'andamento di elementi in traccia (principalmente Sr/Ca e Mg/Ca) ed isotopi stabili ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$). In un corallite vivente e particolarmente longevo, lungo 18 cm e collezionato a -28 m nel Mar Ligure, gli autori hanno campionato le bande di crescita HD succedutesi con continuità dal 1906 al 2000. Lo studio ha permesso di stabilire una significativa correlazione fra Sr/Ca e le SST derivate dall'*Integrated Global Ocean Service System* (IGOSS) per gli ultimi 20 anni (periodo di sovrapposizione fra il corallo e dati strumentali affidabili) da cui è stato possibile ricavare la seguente equazione:

$$\text{Sr/Ca (mmol/mol)} = 11.25 (\pm 0.38) - 0.079 (\pm 0.026) \text{ SST } (^{\circ}\text{C}) \quad (2)$$

Questa equazione mostra un coefficiente angolare (-0.079) comparabile con equazioni di calibrazione SST vs. Sr/Ca ottenute sui principali coralli tropicali. Ciò suggerisce un meccanismo analogo di inglobamento dello Sr da parte delle specie tropicali di coralli quanto da parte di quelle temperate.

Il raffronto fra dati strumentali e coevi dati geochimici, ricavati dai rapporti $\delta^{18}\text{O}$ e Mg/Ca, ha mostrato una correlazione meno significativa con le temperature marine, suggerendo come il segnale del $\delta^{18}\text{O}$ possa essere in parte controllato dalla concentrazione degli isotopi nell'acqua marina, dalla presenza di materia organica inglobata nel corallo e dalla presenza di microstrutture di calcificazione secondaria.

I risultati preliminari di Silenzi et al. (2005) hanno permesso di stabilire come *C. caespitosa* possa essere un archivio climatico importante per ricostruire le SST. La successiva ricerca, illustrata in Montagna et al. (2007), ha approfondito le potenzialità degli elementi in traccia come paleotermometri grazie all'impiego di tecniche analitiche innovative.

In quest'ultimo lavoro, gli autori hanno applicato su un corallite di circa 4 cm, proveniente dalla Riserva Marina di Miramare (Golfo di Trieste, Mare Adriatico settentrionale), la tecnica che accoppia un ICP-MS alla *laser ablation*. Le analisi sono state condotte alla Research School of Earth Sciences di Canberra, presso l'Australian National University (ANU). Questa tecnica, che permette di analizzare porzioni attigue di scheletro dalla larghezza di circa 20 micron, consente di ovviare al problema di risoluzione connesso al sub-campionamento insito nell'analisi tradizionale, dove i campioni sono rappresentativi di porzioni più larghe di scheletro (per es. le intere bande HD), e quindi rappresentano intervalli temporali meno definiti; inoltre, tali campioni possono inglobare substrutture, depositi o parti diagenizzate che l'analisi laser permette di discriminare.

I rapporti fra Sr/Ca, B/Ca, Mg/Ca, U/Ca e Ba/Ca hanno evidenziato una significativa covarianza. Questa volta gli autori hanno confrontato i dati geochimici (in particolare B/Ca e Sr/Ca) con serie temporali delle SST misurate per 6 anni da una boa Mambo a pochi metri di distanza dal campione analizzato (Fig. 7).

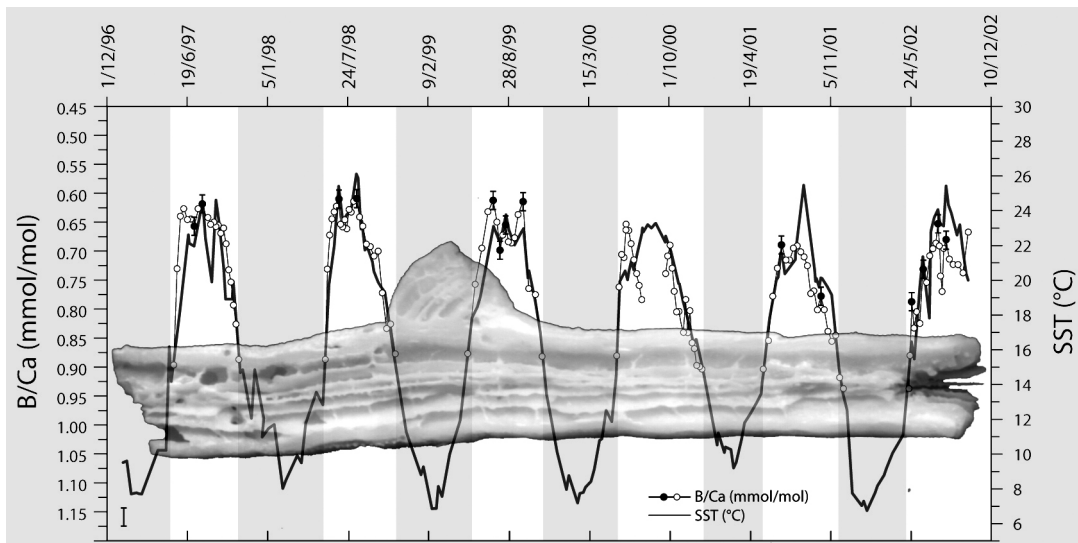


Figura 7 - La Figura mostra come i rapporti B/Ca, derivati dalle analisi della *Cladocoracaespitosadi* Diramare (Mare Adriatico settentrionale) si sovrappongono alla curva delle temperature (SST) misurate con una sonda multi-parametrica posizionata a pochi metri dal corallo; i dati invernali non sono registrati dal campione in quanto questa specie smette di accrescersi quando la temperatura scende sotto i 13.8° (dati rielaborati da Montagna et al., 2007). La fotografia del corallite è solo di esempio, non essendoci nella realtà l'esatta corrispondenza fra le date del grafico e le diverse porzioni del campione mostrato.

Questo ha permesso di calcolare le seguenti equazioni di correlazione:

$$\text{Sr/Ca (mmol/mol)} = 10.50 (\pm 0.13) - 0.073 (\pm 0.006) \text{ SST } (^{\circ}\text{C}) \quad (3)$$

$$\text{B/Ca (mmol/mol)} = 1.24 (\pm 0.03) - 0.024 (\pm 0.001) \text{ SST } (^{\circ}\text{C}) \quad (4)$$

In particolare, il rapporto B/Ca ha evidenziato una correlazione con le temperature marine caratterizzata da un indice particolarmente alto (coefficiente di Pearson=-0.856, numero dei dati elaborati=136). Ciò ha permesso, inoltre, d'identificare il minimo di temperatura per la quale si blocca il processo di accrescimento del corallo, pari a circa 13,8°.

Attualmente i dati provenienti da decine di campioni raccolti in diverse parti del Mediterraneo, ed analizzati con la tecnica LA, sono in corso di calibrazione con misure registrate da sonde posizionate localmente.

Ciò consentirà di discriminare gli effetti delle variazioni ambientali sul segnale geochimico, arrivando a definire curve di calibrazione valide per i diversi contesti mediterranei. Inoltre, un'approfondita ricerca, svolta in collaborazione con l'Acquario ed il Centro Scientifico di Monaco, dove quattro acquari sono stati così mantenuti alle temperature rispettive di 15°, 18°, 21° e 23°, ha permesso di calibrare il segnale geochimico registrato da coralli mantenuti a diverse e costanti temperature in microcosmi appositamente creati (Montagna et al., 2008b).

Conclusioni

In questa breve *review* sono stati riassunti i metodi ed i principali risultati applicati e conseguiti nella ricerca di nuovi archivi climatici naturali per il mare Mediterraneo.

I dati presentati costituiscono gli elementi di base per ricostruire l'andamento decadale delle variazioni climatiche registrate nelle acque superficiali, nonché delle variazioni del livello del mare del Mediterraneo.

Il vermeto *D. petraeum* si è dimostrato un affidabile indicatore delle variazioni del livello marino e della temperatura delle acque nel corso degli ultimi 500 anni, permettendo così di indagare un periodo di tempo in cui si è assistito al passaggio da condizioni naturali a condizioni fortemente controllate dall'uomo, anche per l'immissione di gas serra nell'atmosfera.

La determinazione in *Cladocora caespitosa* dei principali segnali isotopici e geochimici che sono applicati nei coralli tropicali ($\delta^{18}\text{O}$, Sr/Ca, B/Ca, ecc.), ha permesso di stabilire come questa rappresenti un innovativo, affidabile nuovo archivio climatico ad alta risoluzione (circa bi-settimanale) per il Mediterraneo. In particolare, l'andamento dei rapporti B/Ca e Sr/Ca mostra un'alta correlazione con le SST.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Giuseppe Mastronuzzi e Gigliola Valleri per la revisione del manoscritto e Rossella Baldaconi per la foto di Figura 4.

Bibliografia:

- Angulo R.J., Giannini P.C.F., Suguio K. e Pessenda L.C.R. (1999) - *Relative sea-level changes in the last 5500 years in southern Brazil (Laguna-Imbituba region, Santa Catarina State) based on vermetid ^{14}C ages*. Marine Geology, 159: 323-339.
- Antonioli F., Chemello R., Improta S. e Riggio S. (1999) - *Dendropoma lower intertidal reef formations and their palaeoclimatological significance, NW Sicily*. Marine Geology, 161: 155-170.
- Antonioli F., Silenzi S. e Frisia S. (2001) - *Tyrrhenian Holocene palaeoclimate trends from spelean serpulids*. Quaternary Science Reviews, 20: 1661-1670.

- Antonioli F., Bard E., Potter E.K., Silenzi S., Imbrota S. (2004) - *215-ka history of sea-level oscillations from marine and continental layers in Argentarola Cave speleothems (Italy)*. *Global and Planetary Change* 43: 57-78.
- Azzopardi L., Schembri P. J., (1997) - *Vermetid crusts from the Maltese Islands (Central Mediterranean)*. *Marine Life*, 7 (1-2): 7-16.
- Bard E., Hamelin B., Arnold M., Montaggioni L., Cabioch G., Faure G. e Rougerie F. (1996) - *Deglacial sea-level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge*. *Nature*, 382: 241-244.
- Beck, J.W., Edwards R.L., Ito E., Taylor F.W., Récy J., Rougerie F., Joannot P. e Henin C. (1992)- *Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios*. *Science*, 257: 644-647.
- Bengtsson L., Hodges K.I., Roeckner E. e Brokopf R. (2006) - *On the natural variability of the pre-industrial European climate*. *Climate Dynamics*, 27: 743-760.
- Bradley R.S., Hughes M.K. e Diaz, H.F. (2003) - *Climate in medieval time*. *Science*, 302: 404-405.
- Broecker W.S. (2001) - *Was the medieval warm period global?* *Science*, 291: 1497-1499.
- Chemello R., Dieli T., Antonioli F. (2000) - *Il ruolo dei "Reef" a Molluschi Vermetidi nella valutazione della biodiversità*. "Mare e Cambiamenti Globali", ICRAM, Roma, pp. 105-118.
- Chemello R., Gristina M., Toccaceli M., Badalamenti F., Riggio S. (1990a) - *Distribuzione delle formazioni a Molluschi Vermetidi lungo le coste siciliane*. Atti 53° Congresso UZI, Palermo, 60 pp.
- Chemello R., Pandolfo A. e Riggio, S. (1990b) - *Le biocostruzioni a Molluschi Vermetidi nella Sicilia Nord-Occidentale*. Atti 53° Congresso UZI, Palermo, 88 pp.
- Chemello R. in Russo G.F., (1999) - *Cambiamenti faunistici nel Mar Mediterraneo: un approccio zooarcheologico*. Accademia Internazionale di Scienze e Tecniche Subacquee di Ustica, Quaderno 22: "Mediterraneo: condizioni e sviluppi di cambiamento", pp. 63-73.
- Cramp A. e O'Sullivan G. (1999) - *Neogene sapropels in the Mediterranean: a review*. *Marine Geology*, 153: 11-28.
- Delongeville R., Laborel J., Pirazzoli P., Sanlaville P., Arnold M., Bernier P., Evin J. e Montaggioni, L. (1993) - *Les variations récentes de la ligne de rivage sur le littoral Syrien*. *Quaternaire*, 4: 45-53.
- Duffy P.B., Govindasamy B., Iorio J.P., Milovich J., Sperber K.R., Taylor K.E., Wehner M.F. e Thompson S.L. (2003) - *High-resolution simulations of global climate, part 1: present climate*. *Climate Dynamics*, 21: 371-390.
- Focke J.W. (1977) - *The effect of a potentially reef-building vermetid community on an eroding limestone coast, Curacao, Netherland Antilles*. *Proceedings of the 3rd International Coral Reef Symposium*, Miami, Vol. 1: 239-245.
- Gaetani G.A. e Cohen A.L. (2006) - *Element partitioning during precipitation of aragonite from seawater: a framework for understanding paleoproxies*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 4617-4634.
- Govindasamy B., Duffy P.B. e Coquard J. (2003) - *High-resolution simulations of global climate, part 2: effects of increasing greenhouse cases*. *Climate Dynamics*, 21: 391-404.
- Hadfield M.G., Kay E.A., Gillette M.U. e Lloyd M.C. (1972) - *The Vermetidae (Mollusca Gastropoda) of the Hawaiian Islands*. *Marine Biology*, 12: 81-98.
- Hunt B.G. (2006) - *The Medieval Warm Period, the Little Ice Age and simulated climatic variability*. *Climate Dynamics*, 27: 677-694; doi:10.1007/s00382-006-0153-5.
- Jones B. e Hunter I. (1995) - *Vermetid buildups from Grand Cayman, British West Indies*. *Journal of Coastal Research*, 4: 973-983.
- Keigwin L.D. (1996) - *The Little Ice Age and medieval warm period in the Sargasso Sea*. *Science*, 274: 1504-1508.
- Kemp M. e Laborel J. (1968) - *Formations de vermetes et d'algues calcaires sur les cotes du Bresil*. *Rec. Trav. Stat. Mar. Endoume*, 43, 59: 9-23.

- Kružić, P. e Požar-Domac, A. (2003) - *Banks of the coral Cladocora caespitosa* (Anthozoa, Scleractinia) in the Adriatic Sea. Coral Reefs, 22, 536 pp.
- Kružić P. e Benković L. (2008) - *Bioconstructional features of the coral Cladocora caespitosa* (Anthozoa, Scleractinia) in the Adriatic Sea (Croatia). Marine Ecology, 29: 125–139.
- Kühlmann D.H.H. (1996) - *Preliminary report on Holocene submarine accumulation of Cladocora caespitosa* (L., 1767) in the Mediterranean. Göttinger Arb Geol. Pälont., Sb2, pp. 65-69.
- Laborel J. (1987) - *Marine biogenic constructions in the Mediterranean, a review*. Rep. Sci. Par natl. Port-Cros, 13: 97-126.
- Laborel J. e Delibrias, G. (1976) - *Niveaux marins récents à vermetidae du littoral ouest Africain*. Assoc. Senegal. Etude Quat. Afr. Bull., 47: 97-110.
- Laborel J. e Laborel-Deguen F. (1996) - *Biological indicators of Holocene sea level and climatic variations on rocky coasts of tropical and subtropical regions*. Quaternary International, 31: 53-60.
- Laborel J., Laborel-Deguen F., Papageorgiou S., Evin J., Pirazzoli P.A. e Stiros S.C., (2000) - *Seismic coastal uplift in a region of subsidence: Holocene raised shorelines of Samos Island, Aegean Sea, Greece*. Marine Geology, 170: 41-58.
- Lambeck K., Anzidei M., Antonioli F., Benini A, Esposito E. (2004a) - *Sea level in Roman time in the Central Mediterranean and implications for modern sea level rise*. Earth and Planetary Science Letter, 224: 563-575.
- Lambeck K., Antonioli F., Purcell A. e Silenzi S., (2004b) - *Sea level change along the Italian coast for the past 10,000 yrs*. Quaternary Science Review, 23: 1567-1598.
- Meibom A., Yurimoto H., Cuif J.-P., Domart-Coulon I., Houlbrequé F., Constantz B., Dauphin Y., Tambutté E., Tambutté S., Allemand D., Wooden J. e Dunbar R. (2006) - *Vital effects in coral skeletal composition display strict three-dimensional control*. Geophysical Research Letters, 33, L11608, doi:10.1029/2006GL025968.
- Montagna P., McCulloch M., Mazzoli C., Silenzi S. e Odorico, R. (2007) - *The non-tropical coral Cladocora caespitosa as the new climate archive for the Mediterranean Sea: high-resolution (-weekly) trace element systematics*. Quaternary Science Review, 26: 441-462.
- Montagna, P., Silenzi, S., Devoti S., Mazzoli C., McCulloch M., Scicchitano G. e Taviani M. (2008a) - *Climate reconstructions and monitoring in the Mediterranean Sea: a review on some recently discovered high-resolution marine archives*. Rendiconti Lincei, 19: 121-140.
- Montagna P., López Correa M., Rüggeberg A., McCulloch M., Rodolfo-Metalpa R., Dullo W.C., Ferrier-Pagès C., Freiwald A., Henderson G., Mazzoli C., Russo S., Silenzi S. e Taviani M. (2008b) - *Coral Li/Ca in micro-structural domains as a temperature proxy*. Goldschmidt 2008, July 13-18 2008, Geochimica et Cosmochimica Acta, Goldschmidt Conference Abstracts, 69 pp.
- Morri C., Peirano A., Bianchi C.N. e Sassarini M. (1994) - *Present-day bioconstructions of the hard coral, Cladocora caespitosa* (L.) (Anthozoa, Scleractinia), in the Eastern Ligurian Sea (NW Mediterranean). Biologia Marina Mediterranea, 1: 371-372.
- Palmer T.N., Shutts G.J., Hagedorn R., Doblas-Reyes F.J., Jung T. e Leutbecher, M. (2005) - *Representing model uncertainty in weather and climate prediction*. Annual Review of Earth and Planetary Science, 33: 163-193.
- Parrilla G. e Kinder T.H. (1987) - *Oceanografía física del mar de Alboran*. Boletín del Instituto Español de Oceanografía, 4: 133-165.
- Peirano, A., Morri, C., Mastronuzzi, G. and Bianchi, C.N. (1998) - *The coral Cladocora caespitosa* (Anthozoa, Scleractinian) as a bioherm builder in the Mediterranean Sea. Memorie Descrittive Carta Geologica d'Italia, 52: 59-74.
- Peirano, A., Morri, C. e Bianchi, C.N. (1999) - *Skeleton growth and density pattern of the temperate, zooxanthellate scleractinian Cladocora caespitosa from the Ligurian Sea (NW Mediterranean)*. Marine Ecology Progress Series, 185: 195-201.

- Peirano A., Morri C., Bianchi C.N., Aguirre J., Antonioli F., Calzetta G., Carobene L., Mastronuzzi G. e Orrù P. (2004) - *The Mediterranean coral Cladocora caespitosa: a proxy for past climate fluctuations?* Global and Planetary Change, 40 (1-2): 195-200.
- Pierre C. (1999) - *The oxygen and carbon isotope distribution in the Mediterranean water masses.* Marine Geology 153: 41– 55.
- Pirazzoli P.A. e Montaggioni, L.F. (1989) - *Crustal block movements from Holocene shorelines: Rhodes Island, Greece.* Tectonophysics, 170 (1-2): 89-114.
- Pirazzoli P.A., Laborel J. e Stiros S.C. (1996) - *Earthquake clustering in the eastern Mediterranean during historical times.* Journal of Geophysical Research, 101 (B3), pp. 6083-6098.
- Safriel U. (1966) - *Recent vermetid formation on the Mediterranean shore of Israel.* Proceedings of the Malacological Society of London, 37: 27-34.
- Safriel U. (1974) - *Vermetid gastropods and intertidal reefs in Israel and Bermuda.* Science, 186: 1113-1115.
- Schiaparelli S., Alberelli G. e Cattaneo-Vietti R. (2006) - *Phenotypic plasticity of Vermetidae suspension feeding: a potential bias in their use as Biological Sea-Level Indicators.* Marine Ecology, 27: 44-53.
- Schiller C. (1993) - *Ecology of the symbiotic coral Cladocora caespitosa (L.) (Faviidae, Scleractinian) in the Bay of Piran (Adriatic Sea): I. Distribution and biometry.* Marine Ecology, 14: 205-219.
- Schneider T. (2006) - *The general circulation of the atmosphere.* Annual Review of Earth and Planetary Science, 34, 655-688.
- Seager R., Battisti D.S., Yin J., Gordon N., Naik N., Clement A.C., Cane M.A. (2002) - *Is the Gulf Stream responsible for Europe's mild winters?* Journal of the Royal Meteorological Society, 128: 2563-2586.
- Silenzi S., Antonioli F. e Chemello R. (2004) - *A new marker for sea surface temperature trend during the last centuries in temperate areas: vermetid reef.* Global and Planetary Change, 40/1-2: 105-114.
- Silenzi S., Bard E., Montagna P. e Antonioli F. (2005) - *Isotopic and elemental records in a non-tropical coral (Cladocora caespitosa): Discovery of a new high-resolution climate archive for the Mediterranean Sea.* Global and Planetary Change, 49 (1-2), 94-120.
- Sinclair D.J., Williams B. e Risk M. (2006) - *A biological origin for climate signals in corals – trace element “vital effects” are ubiquitous in scleractinian coral skeletons.* Geophysical Research Letters, 33, L17707, doi:10.1029/2006GL027183.
- Smith S.V., Buddemeier R.V., Redalje R.C. e Houck J.E. (1979) - *Strontium-calcium thermometry in coral skeletons.* Science, 204: 404-407.
- Somot S., Sevault F. e Déqué M. (2006) - *Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the twenty-first century using a high-resolution ocean circulation model,* Climate Dynamics, 27: 851-879.
- Stephenson T.A. e Stephenson A. (1954) - *The Bermuda Islands.* Endeavour, 50: 72-80.
- Taviani M. (2002) - *The Mediterranean benthos from Late Miocene up to Present: ten million years of dramatic climatic and geological vicissitudes.* Biologia Marina Mediterranea, 9 (1): 445-463.
- Triolo R., Gorgoni C., Lo Celso F., Baron M., Pallante P., Schwahn D., Kentzinger E., Riso A. e Ruffo L. (2003) - *Application of the USANS Technique in Natural Sciences and Archaeometry.* Abstracts of Scientific Presentations of the first workshop of the International Consortium on Ultra-Small-Angle Scattering (IconUSAS), Oak Ridge, pp. 27.
- Van Andel T. e Laborel J. (1964) - *Recent high relative sea level stand near Recife, Brazil.* Science, 145: 580-581.
- Weber J.N. e Woodhead P.M.J. (1972) - *Temperature dependence of oxygen-18 concentration in reef coral carbonates.* Journal of Geophysical Research, 77: 463-473.
- Zibrowius H. (1980) - *Les Scléractiniaires de la Méditerranée et de l'Atlantique nord-oriental.* Mém. Inst. Océanogr., 11: 1-284.

Manoscritto ricevuto il 16/09/2008, accettato il 03/11/2008.