

Utilizzo degli isotopi stabili nel riconoscimento di livelli di emersione in sequenze peritidali carbonatiche. Esempi dal Trias delle Alpi Liguri

ALBERTO LUALDI

Dipartimento di Scienze della Terra, Corso Strada Nuova 65, 27100 Pavia

RIASSUNTO. — Sono stati esaminati i valori isotopici di carbonio e ossigeno di quattro sequenze sedimentarie del Trias medio e superiore delle Alpi Liguri (domini Brianzonese e Prepiemontese liguri) (Dolomie di S. Pietro dei Monti, Dolomie di M. Arena, Calcari di Veravo). I caratteri sedimentologici mostrati da tutte le sequenze sedimentarie sono indicativi di deposizioni in ambiente peritidale carbonatico, con cicli sedimentari spesso culminanti con superfici di probabile emersione. La sequenza mediotriassica (Rio di Nava), a differenza delle altre, è caratterizzata da trend iperalini. L'analisi degli isotopi stabili del carbonio (^{13}C) e dell'ossigeno (^{18}O) effettuata su livelli in stretta successione, ha confermato la possibilità di utilizzare variazioni, inversioni di tendenza, arricchimenti in uno o l'altro componente nel riconoscimento di superfici d'esposizione sub-aerea, ambienti diagenetici vadosi e freatici e orizzonti di discontinuità. Principale elemento di comparazione è stato fornito dall'esame di successioni carbonatiche oloceniche e pleistoceniche dell'isola di Barbados (Caraibi) in particolare per quanto concerne la loro caratterizzazione isotopica (STEINEN e MATTHEWS, 1973; STEINEN, 1974; FAIRBANKS e MATTHEWS, 1978 e dati inediti). In breve, sono state individuate alcune variazioni di $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ ricorse durante un precoce stadio di diagenesi sub-aerea i cui caratteri registrati possono essere così sintetizzati: (a) incrementi sistematici nei valori percentuali di ^{13}C nei livelli immediatamente sopra la superficie d'emersione rispetto ai sottostanti; (b) inversioni di tendenza nei valori di $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ in livelli pre e post-emersione; (c) arricchimenti in $\delta^{18}\text{O}$ nei livelli contigui alla superficie d'esposizione; (d) ampia variabilità di $\delta^{13}\text{C}$ e omogeneità di $\delta^{18}\text{O}$ nell'ambito della stessa sequenza sedimentaria; (e) netti incrementi di $\delta^{13}\text{C}$ in corrispondenza della probabile transizione fra ambiente vadoso e freatico. Le successioni triassiche delle Alpi Liguri hanno costituito pertanto una ulteriore conferma dell'applicabilità del metodo di analisi isotopica di carbonio e ossigeno in sequenze carbonatiche peritidali. Da rimarcare, in particolare, la possibilità di riconoscere superfici di emersione, ambienti freatici e vadosi talora non facil-

mente individuabili con i dati sedimentologici tradizionali.

Parole chiave: isotopi stabili, livelli d'emersione, piattaforma carbonatica, Trias medio e superiore, Alpi Liguri.

STABLE ISOTOPE USE IN THE IDENTIFICATION OF EXPOSURE SURFACES IN PERITIDAL CARBONATE SEQUENCES. TRIASSIC EXAMPLES FROM THE LIGURIAN ALPS

ABSTRACT. — Carbon and oxygen isotopic composition of four sedimentary sequences in the Ligurian Alps have been examined (Briançonnais and Prepiemontese domains). The sequences range from the Middle to the Upper Triassic (Dolomie di S. Pietro dei Monti, Dolomie di M. Arena, Calcari di Veravo Fms.). The depositional patterns are peculiar to carbonate peritidal sedimentation with sedimentary cycles often ending with subaerial exposure surfaces. The Rio di Nava sequence (Middle Triassic) shows hypersaline trends. Carbon (^{13}C) and oxygen (^{18}O) isotopic analysis have confirmed that variations, covariances, shifts in values and single component enrichments may be used in recognition of subaerial exposure surfaces, vadose and phreatic environments and discontinuity planes. Main comparisons have been collected from the data of previous studies of Holocene and Pleistocene sediments and limestones from Barbados (West Indies). Variation in the carbon and oxygen isotopic composition, during an early meteoric diagenesis, have been briefly outlined as follows: (a) enrichment in ^{13}C on the exposure surface not shown in the underlying beds; (b) shift in the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ between pre and post-exposure sediments; (c) $\delta^{18}\text{O}$ enrichment in the sediments immediately above the subaerial surface; (d) wide variability in $\delta^{13}\text{C}$ values and narrower in $\delta^{18}\text{O}$ values occurs with every single sequence; (e) sharp increase in $\delta^{13}\text{C}$ values around the vadose/phreatic boundary. The Ligurian Triassic formations have confirmed the value of carbon and oxygen

isotopic signatures as an aid for the study of peritidal carbonate sequences. Isotopic signatures provide therefore undeniable information for the recognition of subaerial exposure surfaces, sedimentary gaps due to emersion, vadose and phreatic diagenetic environments sometimes not clearly recognizable using the traditional data.

Key words: stable isotopes, exposure surfaces, carbonate platform, Middle and Upper Triassic, Ligurian Alps.

Introduzione

L'utilizzo degli isotopi stabili, in particolare ^{13}C e ^{18}O , come integrazione ai dati petrografici nel riconoscimento degli ambienti diagenetici dei depositi di piana tidale carbonatica sta riscuotendo, in questi ultimi anni, un crescente interesse (si veda ad es. GROSS, 1964; CHOQUETTE, 1968; HUDSON, 1975; LAND et al., 1975; ALLAN e MATTHEWS, 1977; FAIRBANKS e MATTHEWS, 1978; VIDETICH e MATTHEWS, 1980; MAJOR e MATTHEWS, 1983; BELLANCA et al., 1983 a, b, 1985). Studiosi statunitensi, in particolare quelli più strettamente legati alla ricerca petrolifera, stanno affinando sempre più le tecniche ed ampliando la casistica finalizzata ad una migliore definizione dei rapporti intercorrenti fra ambiente diagenetico vadoso, freatico marino-misto, livelli di emersione e distribuzione isotopica all'interno di questi. L'équipe diretta da R.K. Matthews (Brown University, Providence, RI) in particolare, si occupa da una quindicina d'anni dei meccanismi di sedimentazione, processi diagenetici e caratteri isotopici relativi al complesso carbonatico dell'Isola di Barbados (Caraibi, Atlantico occidentale) (MATTHEWS, 1971, 1973, 1974; STEINEN, 1974; STEINEN e MATTHEWS, 1973; VIDETICH e MATTHEWS, 1980) che ben si presta, dal punto di vista fisiografico e deposizionale, ad uno studio petrografico in sequenza continua. Dati empirici ricavati dall'esame di terrazzi recifali emersi (*packstone/boundstone* ad *Acropora palmata*) del tardo Pleistocene della costa meridionale ed occidentale di Barbados (v. BENDER et al., 1978; FAIRBANKS e MATTHEWS, 1978, per ubicazione ed inquadramento generale) e sud-orientale (J.D. Humphrey, com. pers.) hanno rivelato all'interno di medesime sequenze strette re-

lazioni fra contenuto in ^{13}C e ^{18}O e ambiente di formazione, in particolare per i livelli interessati da diagenesi sub-aerea e mista. Il modello elaborato, che data agli inizi degli anni '80, si è mostrato subito particolarmente valido anche applicato a sequenze peritidali del passato (21 sequenze esaminate, dal Mississipiano al Pliocene inferiore, MAJOR e MATTHEWS, 1983, dati inediti) che rivelano, sulla base dei dati petrografici e delle strutture sedimentarie contenute, indizi di esposizione sub-aerea. Esami comparati di successioni oloceniche e tardo-pleistoceniche con altre pre-pleistoceniche suggerirebbero che i caratteri isotopici incorporati dalle sequenze sedimentarie durante la diagenesi sub-aerea precoce si mantengono — almeno come trend complessivo — inalterati nel tempo e che quindi questi ultimi possono essere utilizzati nello studio di qualsiasi intervallo cronostratigrafico.

I dati isotopici possono rivelarsi utili in un'ampia casistica, quale, ad es.:

- riconoscimento di superfici di emersione in sequenze tidali incomplete per (a) non-deposizione del membro subtidale o intertidale inferiore, o (b) per erosione di parte della sequenza;

- differenziazione di livelli di cementazione precoce formati in ambiente marino sommerso ed altri dovuti a diagenesi meteorica;

- migliore definizione di ambiente di formazione diagenetico rispetto alle evidenze macro e microscopiche tradizionali (es. difficoltà di separazione fra ambiente freatico/vadoso e marino-misto/freatico);

- riconoscimento, ove presente, di *overprints* di due o più condizioni diagenetiche, caso relativamente frequente in successioni ciclotemiche ove, all'interno di una tematica deposizionale a grande scala, si inseriscono micro-ritmi e micro-cicli con frequenti sovrapposizioni di caratteri diagenetici diversi, altrimenti non individuabili.

L'elaborazione e il riscontro nel record stratigrafico dei trend isotopici individuati per modelli di sedimentazione attuali pone, ovviamente, problemi interpretativi connessi all'enucleazione dei dati originari da sovrapposizioni e «inquinamenti» successivi che possono, in prima approssimazione, aver altera-

to gli iniziali valori. Ben consapevole di tali variabili, lo scrivente ha cercato — in questa sede — di evidenziare quali strette analogie, *non tanto in senso quantitativo ma soprattutto nell'evolversi dei trend*, sussistano fra situazioni deposizionali attuali e fossili. A parziale integrazione della casistica già elaborata dalla scuola americana si inserisce infatti questa nota, nella quale vengono esaminate successioni del Triassico medio (Anisico sup.-Ladinico) e superiore (Norico, Retico) delle Alpi Liguri che presentano, a livello di strutture e tessiture sedimentarie, caratteri tipici di deposizione peritidale con frequenti esposizioni sub-aeree.

Dati dal «Barbados Isotope Model»

L'isola di Barbados si trova al limite meridionale delle Piccole Antille, circa 130 km ad oriente dell'arco insulare caraibico. L'isola è formata da rocce sedimentarie cenozoiche ripiegate e fagliate sulle quali si sono impostate terrazze carbonatiche pleistoceniche. Queste ultime sono costituite da livelli biohermali formati durante periodi di innalzamento del livello medio marino (MESOLELLA et al., 1969). Durante gli interglaciali le facies reefali si svilupparono sulla maggior parte dell'isola (MESOLELLA, 1968), mentre nei periodi di regressione quest'ultime furono soggette a diagenesi vadosa e, parzialmente, freatica. Per le particolari condizioni climatiche (relativamente scarse precipitazioni, alta evaporazione), fisiografiche (ampia estensione areale di affioramento) e caratteristiche pedologiche (alta impermeabilità del terreno) la costiera di Barbados ben si presta allo studio degli effetti della diagenesi vadosa e freatica in sedimenti carbonatici. Solo in minima parte, infatti, si sono verificate «sovrapposizioni» diagenetiche differenti in un medesimo livello nel tempo, e ciò solo in areali ove si sono avute lenti freatiche per prolungati periodi durante gli interglaciali più lunghi (STEINEN e MATTHEWS, 1973).

Studi recenti (ALLAN e MATTHEWS, 1977; ALLAN, 1978; VIDETICH e MATTHEWS, 1980) hanno mostrato il significato delle variazioni di $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ (¹) in *low-Mg* calcite e di $\delta^{13}\text{C}$ associate alla formazione di gas nel suolo e alla

presenza di contenuto organico; ancor più di recente (dati inediti) si sono individuati alcuni caratteri distintivi, relativi alle variazioni dei rapporti $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ e $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$, che si sono rivelati costanti in tutte le sequenze sedimentarie esaminate (attuali e fossili). Si ritiene opportuno in questa sede schematizzare le principali acquisizioni a cui si è pervenuti. I risultati ottenuti — sui quali si è costruito il cosiddetto «Barbados Isotope Model» — possono essere così sintetizzati: (per maggiori dettagli, v. ALLAN, 1978; ALLAN e MATTHEWS, 1977; ALLAN et al., 1978; MAJOR e MATTHEWS, 1983; POORE e MATTHEWS, 1984, *cum. bibl.*):

— i livelli immediatamente al di sopra della superficie di emersione sono caratterizzati da valori di $\delta^{13}\text{C}$ superiori per il 2-5‰ rispetto ai livelli interessati da diagenesi vadosa e freatica. Il $\delta^{13}\text{C}$ diminuisce gradualmente dal basso in alto avvicinandosi al livello di emersione. Il gradiente $\delta^{13}\text{C}$ appare condizionato dalle condizioni climatiche: in climi aridi (a), anche a causa dell'elevata impermeabilità del suolo carbonatico, solo una sottile porzione di sedimento registra l'incremento in ^{13}C al di sotto della superficie d'emersione (*basso gradiente*); in condizioni più umide (b) la maggiore permeabilità dà modo alle acque percolanti di distribuire più in profondità ed in maggior misura il contenuto in ^{13}C (*alto gradiente*);

— i sedimenti posti al di sotto di una superficie di emersione sino ad un massimo di 1-2 m, mostrano, nel 50% dei casi, un aumento di $\delta^{18}\text{O}$ rispetto ai livelli sottostanti;

— una sistematica inversione di tendenza nel contenuto in ^{18}O separa i sedimenti posti al di sopra di una superficie di emersione da quelli sottostanti ad essa;

— il limite fra ambiente vadoso e freatico può essere marcato da una brusca variazione

(¹) δ corrisponde alla differenza del rapporto isotopico (per mille) di un dato campione rispetto allo standard, secondo la relazione $\delta (\text{‰}) = \left[\frac{R_{\text{camp}}}{R_{\text{std}}} - 1 \right] \times 1000$.

Lo standard utilizzato è la Chicago CaCO PDB-1; PDB è una belemnite cretacea (*Belemnitella americana*) proveniente dalla Pee Dee Fm., South Carolina, servita per le prime calibrazioni dello spettrometro di massa dell'Università di Chicago (v. CRAIG, 1957, *cum bibl.*).

ne nei valori di $\delta^{13}\text{C}$ mentre $\delta^{18}\text{O}$ rimane costante;

— i sedimenti interessati da diagenesi meteorica ed esposizione sub-aeree mostrano ampia variabilità nei valori di $\delta^{13}\text{C}$ e buona omogeneità in quelli di $\delta^{18}\text{O}$.

È da ritenere — in accordo con i risultati ottenuti dall'esame di numerose sequenze sedimentarie (v. AA. cit.) — che la presenza di alcuni dei caratteri sopra citati (in particolare i primi tre) sia sufficiente per suggerire l'esistenza di superfici di esposizione sub-aerea anche dove queste non siano chiaramente identificabili con i criteri sedimentologici tradizionali. È opportuno comunque evidenziare il carattere possibilistico di questa affermazione, che come detto in precedenza, necessita di una casistica più ampia. È importante inoltre far notare la necessità di uno studio isotopico *in sequenza* nell'ambito di una medesima serie sedimentaria, non rivestendo infatti particolare significato l'esame puntiforme o di distribuzione casuale.

Esempi dal Trias delle Alpi Liguri

Si sono prese in considerazione tre porzioni di successioni stratigrafiche appartenenti a formazioni del Triassico medio e superiore delle Alpi Liguri (prov. di Savona e Cuneo) di pertinenza Brianzonese e Prepiemontese liguri (Fig. 1). Per un inquadramento geologico delle zone e dei domini in esame si rimanda a VANOSI et al., 1984 e CORTESOGNO e VANOSI, 1985. Tutte le successioni — già note in letteratura — mostrano caratteri di sedimentazione in ambiente di piattaforma carbonatica di bassa profondità, con livelli sub-, inter- e sopratidali a ciclicità più o meno manifesta. Le procedure d'esame e di campionamento sono state le medesime per tutte le sezioni esaminate.

Metodi

I campioni litologici sono stati prelevati perpendicolarmente alla stratificazione (Ss). Le unità carbonatiche selezionate per l'analisi di dettaglio sono state campionate in intervalli compresi fra 10 e 40 cm. Si è evitato di esaminare litotipi notevolmente alterati o ad alta porosità. La maggior parte dei campioni è

stata raccolta in roccia fresca, normalmente a ca. 10 cm all'interno della superficie d'alterazione. Le sezioni lucide per l'analisi sono state effettuate parallelamente al piano di stratificazione al fine di evitare al massimo il margine di errore temporale. In tessiture *mud-supported* la matrice carbonatica fine è stata prelevata per l'analisi. In calcareniti e tessiture *grain-supported* sono stati analizzati i campioni «in blocco», data l'impossibilità di separare granuli, matrici e cementi. Per assicurare la rappresentatività dei campioni, si sono evitati gli allochemi di maggiori dimensioni e le cavità riempite da calcite spatica. Prima dell'analisi isotopica tutti i campioni sono stati puliti in bagno ultrasonico e lavati per 2' in acqua distillata, ulteriormente polverizzati in mortaio d'agata e arrostiti a vuoto in forno a 375°C per un'ora (3 h per le dolomie) per rimuovere eventuale materiale organico. Approssimativamente 0,1 gr di peso è stato fatto reagire con acido ortofosforico puro a 50°C per produzione di CO₂ (SHACKLETON e OPDYKE, 1973). Anche nelle dolomie la reazione è stata totale e rapida. Il gas è stato esaminato «in linea» per i rapporti di massa 46/44 e 45/44 mediante uno spettrometro di massa a due collettori (VG Micromass 602 C). Dai rapporti ottenuti sono stati calcolati i valori di delta per mille contro lo standard PDB-1 Chicago (CRAIG, 1957). La deviazione standard è stata di $\pm 0,08\text{‰}$ (1σ) per l'ossigeno e $\pm 0,12\text{‰}$ (1σ) per il carbonio.

Dolomie di S. Pietro dei Monti

Nell'ambito dell'area di affioramento di tale formazione è stata esaminata parte della classica sezione di Rio di Nava (RN), pertinente al dominio Brianzonese ligure esterno (unità di Ormea) (FIERRO e VANOSI, 1965; LUALDI e SENO, 1984, *cum. bibl.*). La formazione in esame occupa l'intervallo cronostratigrafico Anisico inf.-Ladinico superiore. All'interno della Formazione si identificano i tre maggiori cicli (CI-CIII) e sequenze deposizionali (S1-S9) presenti nelle successioni del Brianzonese classico e delle Prealpi Mediane (Fm. di St. Triphon, Fm. di Champcella) (MEGARD-GALLI e BAUD, 1977; LUALDI e SENO, 1984; LUALDI, 1985). La sequenza S6 del ciclo II, datata Anisico sup.-Ladinico (v. AA. cit.), me-

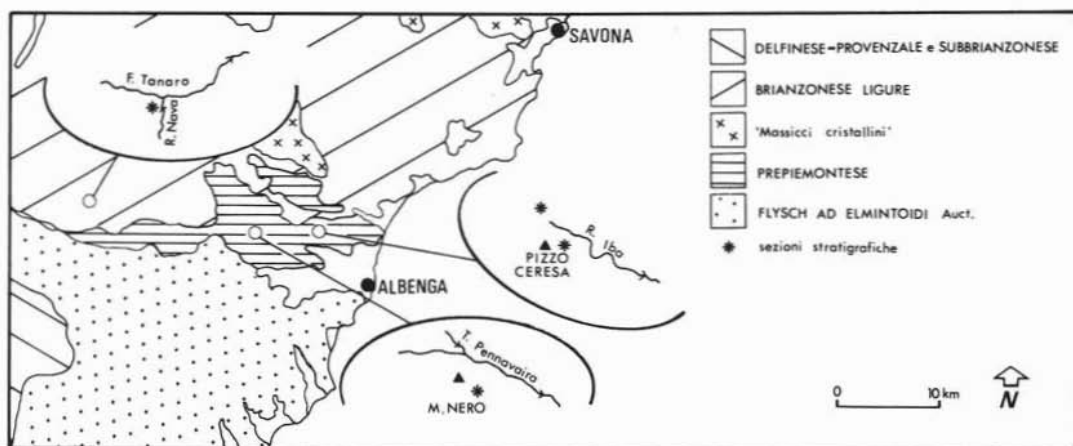


Fig. 1. — Ubicazione delle serie esaminate e carta tettonica schematica (da CORTESOGNO e VANOSI 1985, modificata). — Location map of the sections and tectonic sketch (after CORTESOGNO and VANOSI 1985, modified).

glio nota in letteratura come facies dei «calcaires rubanés», presenta una tipica ritmicità deposizionale con cicli peritidali a trend iperalino ripetuti per una cinquantina di metri di spessore. Le evidenze sedimentarie proprie di ciascuna unità tidale sono: (litotipi senza particolare indicazione si intendono, per tutte le serie esaminate, calcarei):

— *mudstones* a crinoidi e *packstones* intraclastici e ad ooidi, talora fortemente bioturbati (facies dei «calcaires vermiculés», BAUD, 1976) con rara conservazione di lamine da corrente trattiva, da *climbing-ripple* e livelli a *ripple-marks* asimmetrici (*unità subtidale*, spessore medio 50 cm);

— *grainstones* oolitici alternati a *wackestones* in arrangiamenti da *flaser-lenticular-bedding* o in lamine continue sottili; *grainstones* a stratificazione incrociata piana e *hummocky*, strutture da *scour-and-fill* (*unità intertidale*, spessore medio 30 cm);

— *mudstones* dolomitici chiari, privi di strutture, con alla sommità alternanze di livelli intraclastici ossidati, pseudomorfofosi di minerali evaporitici (gesso-anidrite, attapulgite/palygorskite) e peliti rossastre o verdine in spalmature mm-triche. Filoncelli sedimentari clastici (dm-trici) sono anche presenti (*unità sopratidale*, spessore medio 40 cm).

L'analisi isotopica è stata effettuata su 21 campioni prelevati nella parte mediana della successione, in corrispondenza di tre distinti

cicli caratterizzati da una alta frequenza di strutture sedimentarie e da una buona esposizione e continuità laterale. I caratteri litologici ed i livelli di campionamento sono indicati in Fig. 2.

Risultati dell'analisi isotopica

Il $\delta^{13}\text{C}$ è sempre positivo nel ciclo soprastante la superficie d'esposizione e negativo o prossimo allo zero in corrispondenza di quest'ultima (Fig. 2). Nel ciclo mediano il valore negativo di $\delta^{13}\text{C}$ è probabilmente da imputarsi a inclusione — sotto forma di piccoli intraclasti, non facilmente riconoscibili — di parte del livello sottostante. Nel medesimo ciclo il gradiente di $\delta^{13}\text{C}$ è relativamente basso (v. la scarsa penetrazione — meno che metrica — del valore negativo riscontrato in corrispondenza della superficie di emersione), a riflettere condizioni di limitata permeabilità e non eccessivamente lunghi periodi di esposizione sub-aerea. Un cambiamento di valore di $\delta^{18}\text{O}$ è marcato ad ogni livello di emersione ($\Delta = 1,21; 1,09; 0,72\text{‰}$) rispetto agli orizzonti intercalari. Il $\delta^{18}\text{O}$ rimane abbastanza costante con l'aumentare della distanza dal livello sub-aereo. L'incremento relativamente brusco nei cicli inferiore e superiore di $\delta^{13}\text{C}$ (2,08‰ a 70 cm dalla superficie emersa; 2,74‰ a 55 cm) unito al valore di

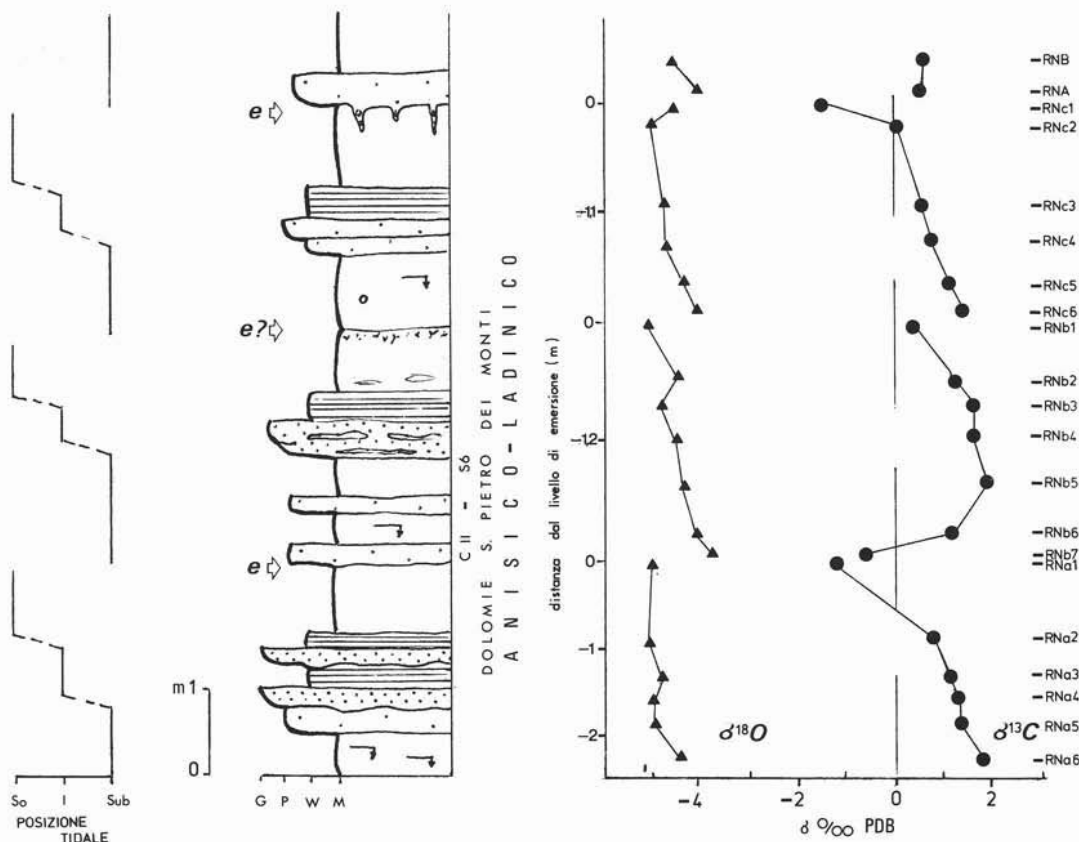


Fig. 2. — Dolomie di S. Pietro dei Monti. Log raffigurante i caratteri litologici, sedimentologici ed i valori isotopici riscontrati in una parte della sezione di Rio di Nava (Ciclo II, Sequenza 6). Vedi testo per il commento dei dati. — Dolomie di San Pietro dei Monti Fm. The log shows the lithological and sedimentological patterns and the isotopic values in a portion of the Rio di Nava section. See text for data comment.

$\delta^{18}\text{O}$ può riflettere la presenza di condizioni differenziate di precipitazione o di cristallizzazione, sub-aerea per i livelli sommitali ed in sepoltura per i sottostanti.

Campo di variabilità di $\delta^{13}\text{C}$: 3,06‰ (ciclo inferiore); 1,52‰ (ciclo mediano); 3,64‰ (ciclo superiore).

Campo di variabilità di $\delta^{18}\text{O}$: 0,47‰ (ciclo inferiore); 1,18‰ (ciclo mediano); 1,08‰ (ciclo superiore).

Dolomie di M. Arena

Come zona-campione di questa formazione è stato prescelto il versante meridionale del crinale Poggio Grande - Pizzo Ceresa. La sezione esaminata (PCn) è ubicata all'interno dell'unità tettonica di Arnasco-Castelbianco

(VANOSSI, 1971; ROYANT e LANTEAUME, 1973; LUALDI, 1983) pertinente al dominio prepiemontese ligure, parte interna. Il motivo sedimentario dominante è dato da una monotona successione (oltre 300 m) di depositi di piana tidale interna, con frequenza di laminita algali di tipo piano-parallelo. Particolarmente costante è il rapporto subsidenza/sedimentazione; solo nei livelli sommitali della formazione (ultimi 25-40 m) si assiste ad una maggiore articolazione deposizionale con frequenti emersioni e organizzazione sedimentaria in cicli peritidali (LUALDI, 1983). In tali livelli è presente *Worthenia contabulata* (SCHLOT.) indicativo di un'età genericamente norica. Uno di questi cicli è stato campionato per l'analisi isotopica (v. Fig. 3). Esso risulta composto da:

— mudstones e packstones bioclastici con

TABELLA 1

Litologie e composizione dei campioni
Lithologies and composition of samples

N° campione	distanza dal livello di emersione (cm)	Litologia	$\delta^{18}O_{\text{ooPDB}}$	$\delta^{13}C_{\text{ooPDB}}$
Dolomie di S. Pietro dei Monti (Anisico-Ladinico)				
RNB	+ 25	Mudstone	- 4,32	+ 0,96
RNA	+ 3	Packstone	- 3,58	+ 0,94
----- livello di emersione -----				
RNC1	- 3(+ 147)	Packstone(fil.)	- 4,30	- 1,76
RNC2	- 10(+ 140)	Mudstone	- 4,79	+ 0,07
RNC3	- 55(+ 95)	Wackestone	- 4,64	+ 0,98
RNC4	- 82(+ 68)	"	- 4,60	+ 1,03
RNC5	- 115(+ 35)	Mudstone	- 4,32	+ 1,52
RNC6	- 145(+ 5)	"	- 3,71	+ 1,88
----- livello di emersione ? -----				
RNB1	- 3(+ 222)	"	- 4,80	+ 0,71
RNB2	- 68(+ 157)	"	- 4,45	+ 1,63
RNB3	- 85(+ 140)	Wackestone	- 4,51	+ 2,06
RNB4	- 120(+ 105)	Grainstone	- 4,43	+ 2,08
RNB5	- 160(+ 65)	Mudstone	- 4,37	+ 2,23
RNB6	- 200(+ 25)	"	- 4,00	+ 1,46
RNB7	- 220(+ 5)	Packstone	- 3,62	- 0,60
----- livello di emersione -----				
RNA1	- 2	Mudstone	- 4,83	- 1,15
RNA2	- 70	Wackestone	- 4,94	+ 0,93
RNA3	- 90	"	- 4,78	+ 1,19
RNA4	- 113	Grainstone	- 4,95	+ 1,25
RNA5	- 140	Packstone	- 4,82	+ 1,44
RNA6	- 183	Mudstone	- 4,48	+ 1,91

Glomospirella friedli (KRISTAN-TOLLMANN), *Glomospira* sp., *Worthenia contabulata* (SCHLOT.), bivalvi (*unità subtidale*, spessore 80 cm);

— laminiti algali piano-paralleli, con *bird-eyes* e *shrinkage cracks* verso l'alto. È presente una diffusa pigmentazione rosata per tutto il livello (*unità inter-sopratidale*, spessore 40 cm);

— crosta pisolitica irregolare, con strutture cm-triche a festoni concentrici alternatamente micritici e spatici, ad elevata porosità intergranulare; lateralmente sono presenti spalmature mm-triche rosse (*unità sopratidale*, spessore 20 cm).

Al di sopra seguono nuovamente *packstones* bioclastici. L'analisi isotopica è stata effettuata su un totale di 12 campioni.

Risultati dell'analisi isotopica

Il $\delta^{13}C$ è risultato sempre negativo in tutta la sequenza esaminata, ad eccezione di indici prossimi allo zero nel ciclo successivo (v.

Fig. 3). I campioni risultano progressivamente impoveriti in ^{13}C sino ad una distanza di ca. 65 cm al di sotto della superficie d'esposizione. Successivamente, $\delta^{13}C$ rimane relativamente costante. Il gradiente di $\delta^{13}C$ risulta attorno a valori medi (discreta permeabilità, clima non particolarmente arido), riscontrati per il modello di Barbados (ALLAN e MATTHEWS, 1977). I caratteri isotopici dell'ossigeno mostrano un brusco spostamento fra i livelli comprendenti la superficie d'emersione, verso valori più negativi ($\Delta = 1,04$). I livelli al di sopra della superficie pisolitica (PCnA, PCnB) hanno valori di $\delta^{13}C$ e $\delta^{18}O$ più simili a quelli dei livelli immediatamente sottostanti (PCn1, PCn2) che a quelli degli orizzonti più profondi (PCn6-8). Ciò può essere spiegato con il tipo litologico — *mudstone/packstone* intraclastico — dei primi, in cui frammenti erosi dalla crosta di calcificazione sono stati incorporati durante la successiva trasgressione. Il deciso decremento di $\delta^{13}C$ a partire dal livello posto ca. a 65 cm sotto la crosta pisolitica (PCn5) potrebbe indicare una alterazione in regime vadoso-freatico prima della completa emersione.

Campo di variabilità di $\delta^{13}C$: 3,78‰/‰.

Campo di variabilità di $\delta^{18}O$: 0,85‰/‰.

Calcari di Veravo

La formazione in esame è inclusa nell'unità tettonica di Arnasco-Castelbianco (Prepie-

TABELLA 2

Litologie e composizione dei campioni
Lithologies and composition of samples

N° campione	distanza dal livello di emersione (cm)	Litologia	$\delta^{18}O_{\text{ooPDB}}$	$\delta^{13}C_{\text{ooPDB}}$
Dolomie di M. Arena (Norico)				
PCnD	+ 55	Mudstone	- 5,96	+ 0,16
PCnC	+ 20	"	- 5,68	+ 0,06
PCnB	+ 10	"	- 5,93	- 1,18
PCnA	+ 5	Wackestone	- 6,22	- 3,72
----- livello di emersione -----				
PCn1	- 2	Wack-pack.	- 5,18	- 4,38
PCn2	- 10	"	- 5,41	- 4,04
PCn3	- 25	Wackestone	- 5,54	- 2,42
PCn4	- 42	"	- 5,99	- 1,76
PCn5	- 65	"	- 5,80	- 2,31
PCn6	- 80	Packstone	- 6,01	- 0,92
PCn7	- 125	Mudstone	- 5,57	- 1,08
PCn8	- 150	Packstone	- 6,03	- 0,60

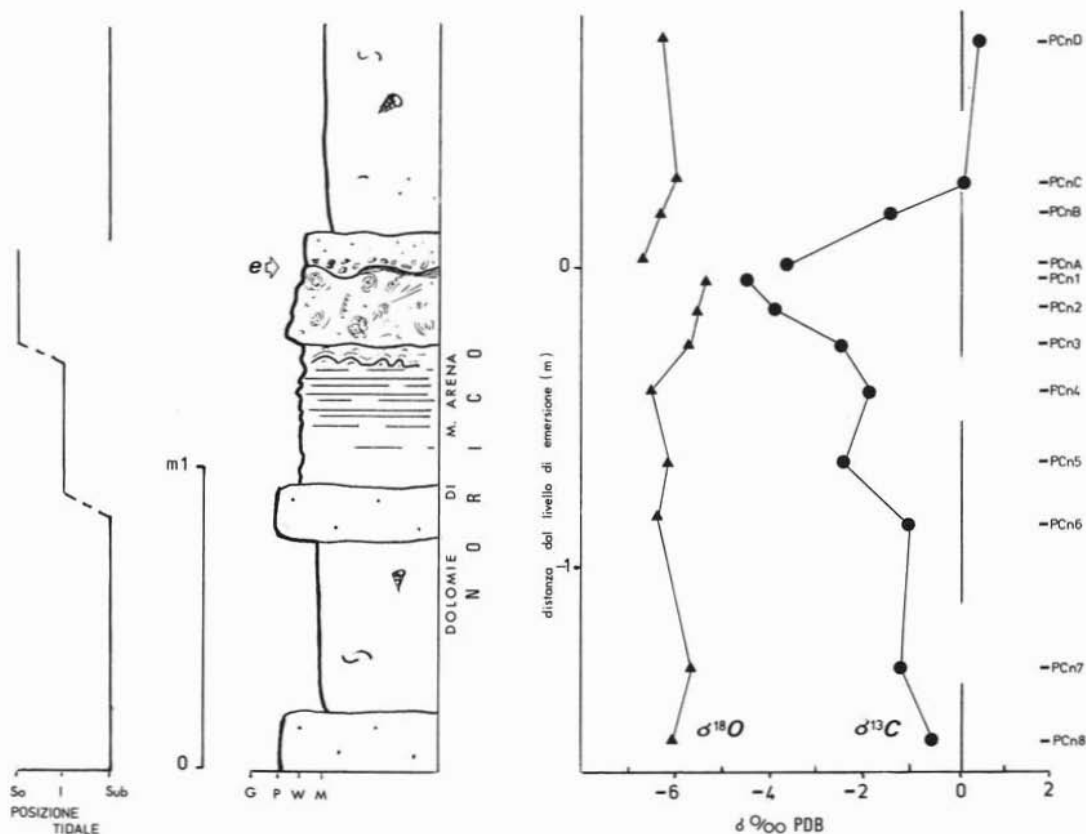


Fig. 3. — *Dolomie di M. Arena*. Log raffigurante i caratteri litologici, sedimentologici ed i valori isotopici riscontrati in una parte della sezione di Pizzo Ceresa. Vedi testo per il commento dei dati. — *Dolomie di M. Arena Fm.* The log shows the lithological and sedimentological patterns and the isotopic values in a portion of the Pizzo Ceresa section. See text for data comment.

montese figure). Sono state studiate la sezione stratigrafica del versante meridionale di M. Nero, poco ad occidente del thalweg di Rio Leonsin (MN) e la sezione posta poco a meridione del crinale Pizzo Ceresa-M. Pesalto (PCr). Nei Calcari di Veravo (potenza 40-75 m) sono state distinte due litozone (LUALDI, 1983): (a) una inferiore, calcareo-argillitica e (b) una superiore, calcareo-dolomitica. Il limite è in pratica contrassegnato, in tutte le successioni esaminate, da un banco biohermale a *Retiophyllia clathrata* (EMM.). Il contenuto paleontologico è abbondante; in particolare la presenza di *Triasina hantkeni* (MAJZ.) a poca distanza dal limite superiore formazionale assegna a tale livello un'età triassica superiore («Retico» *Auct.*). La litozona superiore mostra caratteri tipici di una sedimentazione

peritidale con trend lievemente trasgressivo; la serie di M. Nero, più ridotta, è interessata da depositi di medio-alta energia mentre quella di P.zo Ceresa-M. Pesalto riflette una tematica deposizionale a tendenza ciclica, con caratteri di piana carbonatica esterna, ma di ambiente a limitato idrodinamismo. Sono state campionate entrambe le sezioni in corrispondenza a presunte unità inter-sopratidali; a M. Nero si è esaminata la porzione inferiore della litozona superiore, a P.za Ceresa la sua parte sommitale (v. Figg. 4 e 5). Esse risultano composte da:

- *mudstones* e *packstones* bioclastici, talora bioturbati, a componente marnosa, con frequenti *ripple-marks* asimmetrici (*unità subtidale*, spessore medio qualche metro);
- *wackestones* e *grainstones* alternati in

TABELLA 3

Litologie e composizione dei campioni
Lithologies and composition of samples

N° campione	distanza dal livello di emersione (cm)	Litologia	$\delta^{18}O^{\circ}/\text{ooPDB}$	$\delta^{13}C^{\circ}/\text{ooPDB}$
Calcari di Verava (Retico) - serie di M. Nero				
MNC	+ 50	Mudstone	- 3,65	+ 0,25
MNB	+ 37	"	- 3,87	+ 0,63
MNA	+ 2	Wackestone	- 3,83	+ 0,65
----- livello di emersione -----				
MN1	- 3	Mudstone	- 5,44	- 4,09
MN2	- 20	"	- 5,03	- 2,96
MN3	- 45	Wackestone	- 5,70	- 2,40
MN4	- 77	Grainstone	- 5,66	- 2,13
MN5	- 110	Mudstone	- 5,42	- 0,68
MN6	- 158	Packstone	- 4,53	+ 0,21
MN7	- 200	Mudstone	- 4,91	+ 0,28

lamine da *flaser a wavy bedding* e canalizzazioni dm-triche; laminiti algali piano-parallele e LLH (verso l'alto) con *birdseyes*, *fenestrae* e *dessication cracks*; *mudstones a ripple-marks* simmetrici d'onda e d'oscillazione (*unità* per lo più *intertidale*, spessore medio 20-70 cm);

— *mudstones* dolomitici, talora con *mud-cracks* e filoncelli sedimentari a matrice pelitica rossastra; carniolate e breccie carbonatiche, croste di calcificazione e aggregati intraclastici; spalmature pelitiche ad ossidi ferrosi (*unità sopratidale*, spessore medio 30 cm).

Per l'analisi isotopica si sono prelevati rispettivamente 10 (MN) e 14 (PCr) campioni in totale.

Risultati dell'analisi isotopica

Serie di M. Nero

Il $\delta^{13}C$ è risultato positivo nei livelli francamente subtidali e negativo in quelli intertidali e di emersione (Fig. 4). L'impoverimento in ^{13}C è abbastanza continuo a partire da una distanza dal livello emerso di ca. 1,5 m. Il gradiente di $\delta^{13}C$ è relativamente elevato, a testimoniare una buona permeabilità del suolo. I valori di $\delta^{13}C$ al di sopra della superficie d'esposizione indicano uno spostamento netto verso indici positivi con una differenza rispetto ai sottostanti livelli pari a $4,74^{\circ}/\text{oo}$. Anche per l'ossigeno, la tendenza per i livelli del ciclo soprastante la superficie d'emersione è decisamente verso valori me-

no negativi ($\delta^{18}O = -3,65, -3,87^{\circ}/\text{oo}$) rispetto a quelli pre-emersione ($\delta^{18}O = -5,03, -5,70^{\circ}/\text{oo}$). La differenza fra i valori prima e post-evento è pari a $1,61^{\circ}/\text{oo}$.

Campo di variabilità di $\delta^{13}C$: $4,37^{\circ}/\text{oo}$.

Campo di variabilità di $\delta^{18}O$: $1,17^{\circ}/\text{oo}$.

Serie di Pizzo Ceresa

I valori calcolati per il carbonio e per l'ossigeno sono, nel trend complessivo, analoghi a quelli ricavati per la serie di M. Nero. Il $\delta^{13}C$ ha valori positivi nelle unità subtidali del ciclo inferiore (PCra5-6) e superiore (PCrA-B) mentre i rimanenti campioni sono sempre negativi (Fig. 5). Al di sopra della superficie d'emersione $\delta^{13}C$ e $\delta^{18}O$ mostrano uno spostamento netto verso indici meno negativi o persino positivi (per $\delta^{13}C$: $2,64$ (ciclo inf.), $2,96$ (ciclo sup.) $^{\circ}/\text{oo}$; per $\delta^{18}O$: $0,56$ (ciclo inf.), $0,89$ (ciclo sup.) $^{\circ}/\text{oo}$). Il decremento progressivo di $\delta^{13}C$ dei livelli sottostanti la superficie d'esposizione — in particolare nel ciclo superiore — escluderebbe fasi prolungate in ambiente diagenetico vadoso e/o parzialmente freatico. Il contenuto in ^{18}O è abbastanza costante in tutti i livelli, con uno scarto verso valori meno negativi ($\Delta = 0,89-1,12^{\circ}/\text{oo}$) per il liv. PCra4 (*grainstone* oolitico-intraclastico) probabilmente dovuto

TABELLA 4

Litologie e composizione dei campioni
Lithologies and composition of samples

N° campione	distanza dal livello di emersione (cm)	Litologia	$\delta^{18}O^{\circ}/\text{ooPDB}$	$\delta^{13}C^{\circ}/\text{ooPDB}$
Calcari di Verava (Retico) - serie di Pizzo Ceresa				
PCrB	+ 75	Mudstone	- 1,88	+ 0,91
PCrA	+ 5	"	- 2,18	+ 1,07
----- livello di emersione -----				
PCrB1	- 3(+257)	Wackestone	- 3,07	- 1,89
PCrB2	- 25(+235)	Mudstone	- 3,54	- 1,67
PCrB3	- 70(+190)	Packstone	- 3,33	- 1,18
PCrB4	- 115(+145)	Mudstone	- 3,62	- 0,96
PCrB5	- 163(+ 97)	"	- 3,34	+ 0,06
PCrB6	- 250(+ 10)	"	- 3,25	+ 0,33
----- livello di emersione -----				
PCrA1	- 2	Wackestone	- 3,81	- 2,31
PCrA2	- 20	"	- 4,03	- 1,80
PCrA3	- 78	Mud-wack.	- 4,00	- 1,45
PCrA4	- 115	Grainstone	- 2,88	+ 0,28
PCrA5	- 160	Mudstone	- 3,77	+ 0,85
PCrA6	- 200	"	- 3,90	+ 0,97

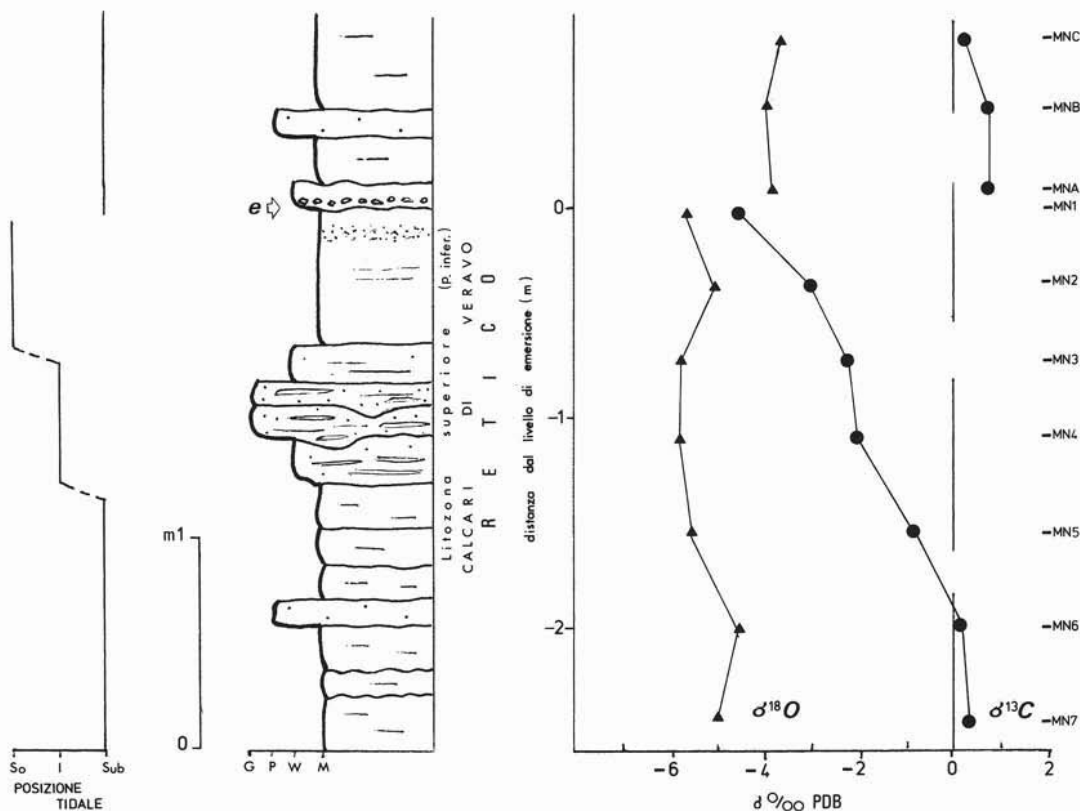


Fig. 4. — *Calcari di Veravo*. Log raffigurante i caratteri litologici, sedimentologici ed i valori isotopici riscontrati in una parte della sezione di M. Nero (litozona superiore, parte inferiore). Vedi testo per il commento dei dati. — *Calcari di Veravo Fm.* The log shows the lithological and sedimentological patterns and the isotopic values in a portion of the M. Nero section (upper lithozone, lower part). See text for data comment.

ad inquinamento da parte di materiale sub-aereo.

Campo di variabilità di $\delta^{13}\text{C}$: 3,28‰ (ciclo inferiore); 2,22‰ (ciclo superiore).

Campo di variabilità di $\delta^{18}\text{O}$: 1,15‰ (ciclo inferiore); 0,55‰ (ciclo superiore).

Significatività dei dati

Le analisi isotopiche effettuate hanno confermato, per tutte le sequenze sedimentarie esaminate, la presenza di superfici di esposizione sub-aerea e di ambienti diagenetici vadosi e/o freatici. Tale risultato riveste una certa rilevanza soprattutto ove preesistevano dubbi sull'interpretazione ambientale (in particolare delle sequenze dei *Calcari di Veravo* ed in minor misura delle *Dolomie di S. Pie-*

tro dei Monti) di certi livelli, ove la collocazione in una unità tidale piuttosto che in un'altra era dovuta, più che ad evidenze sedimentarie, a considerazioni sulla completezza del ciclo stesso. In particolare nelle serie dei *Calcari di Veravo*, la litofacies nota come «dolomie a patina oliva» (VANOSSI, 1971) era stata interpretata — ove priva di particolare strutture — come unità inter-sopratidale a chiusura di cicli sedimentari di piana carbonatico-argillitica di bassa profondità (LUALDI, 1983). Per le caratteristiche presentate da tale litofacies, in accordo con il modello di Barbados — quali l'arricchimento in ^{13}C e ^{18}O al passaggio fra ciclo e ciclo, le brusche variazioni di $\delta^{18}\text{O}$ fra livelli contigui, la decrescita di $\delta^{13}\text{C}$ con il diminuire della distanza dal livello di presunta alterazione meteorica — la col-

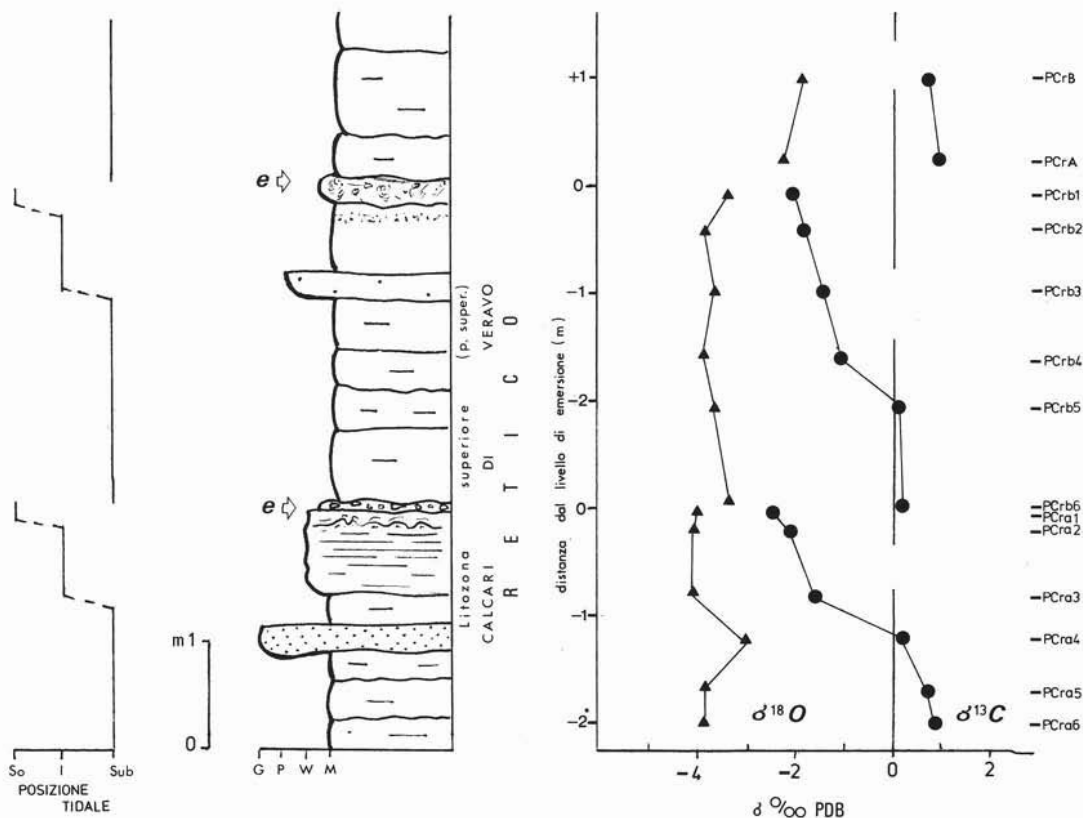


Fig. 5. — *Calcari di Veravo*. Log raffigurante i caratteri litologici, sedimentologici ed i valori isotopici riscontrati in una parte della sezione di Pizzo Ceresa (litozona superiore, parte superiore). Vedi testo per il commento dei dati. — *Calcari di Veravo Fm*. The log shows the lithological and sedimentological patterns and the isotopic values in a portion of the Pizzo Ceresa section (upper lithozone, upper part). See text for data comment.

locazione in ambiente inter-sopratidale può essere confermata, almeno per le unità pertinenti ai cicli esaminati. Il gradiente di $\delta^{13}\text{C}$ è abbastanza penetrativo e graduale, indicativo di una buona permeabilità e pertanto ampia circolazione delle acque interstiziali.

I dati isotopici ottenuti per i cicli anisocladinici delle *Dolomie di San Pietro dei Monti* permettono di riconoscere, nei cicli inferiore e superiore esaminati, l'esistenza di condizioni di alterazione diagenetica, una presso l'interfaccia aria/sedimento e l'altra all'interno di quest'ultimo. A tale risultato non si era potuti pervenire attraverso l'analisi sedimentologica tradizionale. Le condizioni di aridità climatica e limitata permeabilità del suolo sono state confermate dal basso gradiente di $\delta^{13}\text{C}$ all'interno della sequenza, a riflettere scarsa

penetrazione del carbonio (d'arricchimento sub-aereo) ad opera delle acque circolanti.

Particolarmente evidente risulta, in quest'ultima formazione e nelle *Dolomie di M. Arena*, l'«inquinamento isotopico» (soprattutto di ^{13}C) negli orizzonti sovrapposti al livello d'emersione, ad opera di intraclasti e materiale micritico diffuso di provenienza locale. Tale inquinamento appare evidente, a scala macroscopica, soprattutto per quei livelli che, pur non mostrando caratteri da emersione, sono pervasi da diffuse pigmentazioni rosacee (*Dolomie di M. Arena*). Il valore di $\delta^{13}\text{C}$ si stabilizza verso indici più positivi allo scomparire della colorazione rosata nel banco dolomitico. È opportuno inoltre evidenziare i seguenti risultati:

— la presenza di cristalli di gesso-anidrite

(ora presenti come pseudomorfi dolomitici) a chiusura dei cicli non implica *necessariamente* la presenza di alternate esposizioni sub-aeree: il trend isotopico riscontrato nel ciclo medio della serie di Rio di Nava per la sequenza RNb7-RNb1 (v. Fig. 2) non mostra infatti valori simili a quelli dei cicli contigui — in cui si è sicuramente in presenza di emersioni — sebbene $\delta^{13}\text{C}$ muti notevolmente valore a contatto con il ciclo successivo. Sembra verosimile che l'ambiente diagenetico più superficiale possa essere stato il freatico più che il francamente sub-aereo (cfr. Borehole 17 di STEINEN, 1974; MATTHEWS e HUMPHREY, com. pers.). I cristalli di gesso anidrite possono essersi pertanto formati per circolazione interna di acque solfatiche sovrassature e non per diretta precipitazione; la loro crescita può essere avvenuta in ambiente freatico o marino-misto;

— i dati isotopici permettono di riconoscere e di distinguere ambienti freatici e vadosi, ove questi si siano sovrapposti a livelli marini o marini-misti pertinenti ad unità sub-ed intertidali. I valori ricavati nella sequenza PCn2-6 delle Dolomie di M. Arena, ad esempio, indicano che nel ciclo esaminato, a partire dagli ultimi *packstones* bioclastici a laminati algali piano-parallele, i sedimenti siano stati interessati da una diagenesi freatica e parzialmente vadosa indipendente da quella della crosta pisolitica posta a tetto del ciclo. Il trend dei valori di $\delta^{13}\text{C}$ è infatti interrotto dal segnale anomalo del liv. PCn5 ($\Delta = 0,55-1,39\text{‰}$ dai livelli contigui) ad indicare momenti e modalità diversi d'alterazione diagenetica. Tale caratterizzazione non appare evidente all'esame macroscopico e tessiturale. L'*imprint* diagenetico deve essere stato verosimilmente breve e non di particolare intensità: non si notano infatti modificazioni tessiturali (creazione di nuovi cementi, dissoluzioni, porosità secondarie, ecc.) nei livelli esaminati;

— la durata di un'emersione può essere meglio stimata attraverso la differenza dei valori isotopici di ^{13}C e subordinatamente di ^{18}O fra ciclo e ciclo di quanto non lo consentano i caratteri sedimentologici. Una prolungata emersione infatti non è necessariamente registrata da una maggiore intensità o quan-

tità dei prodotti d'alterazione, in quanto la loro conservazione è in funzione del potere erosivo del ciclo successivo. Così ad esempio, nel ciclo inferiore della sequenza del Rio di Nava (liv. RNA6-1) la differenza fra i valori riscontrati per la superficie d'esposizione posta sopra il liv. RNA1 (*mudstone*) e il ciclo sovrastante ($\Delta = 2,61\text{‰}$) è simile alla differenza relativa al ciclo superiore (liv. RNC6-1) in cui si trovano filoni sedimentari ossidati e spalmature pelitiche rosse ($\Delta = 2,70\text{‰}$). L'assenza di evidenti alterazioni e strutture da diagenesi sub-aerea non implica quindi che il livello in questione non sia stato interessato da tale condizione ambientale.

L'*imprint* isotopico è in grado pertanto di registrare eventi sedimentari *non altrimenti* individuabili con sicurezza.

Osservazioni conclusive

L'esame isotopico condotto su 56 campioni relativi a quattro differenti sequenze sedimentarie — dal Trias medio al Trias superiore — ha confermato la validità, con le riserve dovute all'utilizzo di un modello attualistico in sequenze del record geologico, del «Barbados Isotope Model» anche alle successioni delle Alpi Liguri. L'esame qui condotto costituisce una «prova di applicabilità» nell'uso degli isotopi stabili a spezzoni di serie mesozoiche pertinenti ad unità alloctone, le cui vicende tardo-diagenetiche e geologiche possono — in prima analisi — aver modificato composizioni e caratteri sedimentari originari. In particolare, i risultati ottenuti sono maggiormente significativi ove preesistevano dubbi sull'interpretazione ambientale di alcuni livelli. Caratteri isotopici che più di altri si sono mostrati costanti nei cicli peritidali esaminati sono: (a) sistematico incremento nei valori di ^{13}C nel livello posto *immediatamente sopra* la superficie d'emersione rispetto al sottostante; (b) netta inversione di tendenza nei valori di $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ osservati in livelli pre- e post-emersione; (c) arricchimento in ^{18}O nei livelli posti in corrispondenza o immediatamente al di sopra della superficie d'esposizione (carattere tuttavia non sempre presente). In subordine si può notare (d) l'ampia variabilità dei valori di $\delta^{13}\text{C}$ e l'omogeneità di $\delta^{18}\text{O}$ nell'ambito del medesimo ciclo ed (e) le

brusche variazioni degli indici di $\delta^{13}\text{C}$ in corrispondenza della probabile transizione fra ambiente vadoso e freatico.

Anche alla luce di questi risultati acquisiti si ritiene che la presenza, in una successione peritidale, dei primi tre caratteri riscontrati possa essere sufficiente per suggerire l'esistenza di una superficie di esposizione sub-aerea.

In definitiva, i dati degli isotopi stabili — pur con le dovute cautele derivanti dall'esame di materiale non attuale — possono costituire un valido elemento di comparazione con i dati sedimentologici e permettere una migliore definizione o addirittura il riconoscimento di superfici d'emersione, di lacune sedimentarie, di modificazioni diagenetiche relative ad ambienti di sedimentazione carbonatica di bassissima profondità e di distribuzione di queste nella compagine rocciosa. Ulteriori studi devono essere compiuti per tradurre i dati empirici in un modello applicabile ad ogni sequenza carbonatica peritidale; è indubbio, comunque, che l'esame dei caratteri isotopici di carbonio e ossigeno, *effettuato in successione*, può costituire un valido aiuto all'analisi sedimentologica tradizionale e fornire informazioni sull'ambiente deposizionale e diagenetico non altrimenti ottenibili.

Ringraziamenti. — Il presente studio è stato condotto interamente durante il godimento di un soggiorno semestrale di studio (fondi CNR) presso la Brown University, Providence RI, USA (Sett. '85-Febr. '86). Desidero ringraziare R.K. Matthews, coordinatore della ricerca, J.D. Humphrey e T. Quinn per l'attenzione posta alle problematiche sedimentologiche delle Alpi Liguri, oltre che per gli insegnamenti ricevuti e le proficue discussioni per mezzo delle quali si è potuto concretizzare questo lavoro. Ringrazio il Personale del Bendum Stable Isotope Laboratory (Brown University) per l'assistenza tecnica e le analisi isotopiche così cortesemente fornite. Sono grato inoltre a G. Cantaluppi, G. Cassinis, R. Vannucci e M. Vanossi (Università di Pavia) e A. Bosellini (Università di Ferrara) per la lettura critica del manoscritto. Le indicazioni di un *referee* anonimo hanno contribuito ad una più sintetica stesura del testo.

Il lavoro è parte del progetto «Evoluzione strutturale comparata di settori delle Alpi Meridionali ed Occidentali e dell'Appennino di NW» (M.P.I., 40%) e degli studi del «Gruppo Alpi» del CNR (Unità di Pavia). I campioni analizzati sono conservati presso il Dept. of Geological Sciences della Brown University.

BIBLIOGRAFIA

- ALLAN J.R. (1978) - *Petrographic, stable isotopic, and electron microprobe studies of diagenesis in limestones*. Ph.D. Thesis, Brown University, Providence, 252 pp.
- ALLAN J.R., MATTHEWS R.K. (1977) - *Carbon and oxygen isotopes as diagenetic and stratigraphic tools: data from surface and subsurface of Barbados, West Indies*. *Geology*, 5, 16-20.
- ALLAN J.R., ACHAUER C.W., MATTHEWS R.K. (1978) - *Carbon and oxygen isotopes as indicators of meteoric and mixing zone diagenesis in limestones*. *Bull. Am. Ass. Petr. Geol.*, 62, 489 (abs.).
- BAUD A. (1976) - *Les terriers de Crustacés décapodes et l'origine de certains faciès du Trias carbonaté*. *Eclogae geol. Helv.*, 69 (2), 415-424.
- BELLANCA A., CALDERONE S., NERI R. (1983a) - *Oxygen isotope composition and Sr/Ca ratio: geochemical evidences for the origin of dolomite in Messinian diatomaceous sequences from central Sicily*. *Rend. S.I.M.P.*, 38, 1263-1268.
- BELLANCA A., CENSI P., NERI R. (1983b) - *Studio isotopico, chimico e tessiturale su materiali carbonatici associati a mineralizzazioni di fluorite e barite nell'area di Termini Imerese (Sicilia)*. *Rend. S.I.M.P.*, 38, 1251-1261.
- BELLANCA A., NERI R., DULSKI P., MÖLLER P. (1985) - *Rare-earth elements and stable isotopes in carbonate associated with fluorite-barite mineralizations in north-western Sicily*. *Rend. S.I.M.P.*, 40, 377-384.
- BENDER M.L., FAIRBANKS R.G., TAYLOR F.T., MATTHEWS R.K., GODDARD J., BROECKER W.S. (1978) - *Uranium series dating of the Pleistocene reef tracts of Barbados, West Indies*. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 90, 577-594.
- CHOQUETTE P.W. (1968) - *Marine diagenesis of shallow water lime-mud sediments: insights from $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ data*. *Science*, 161, 1130-1132.
- CORTESOGNO L., VANOSI M. (1985) - *Introduzione alla geologia delle Alpi Liguri*. *Lav. Soc. It. Biogeogr.*, 9 (1982), 48 pp.
- CRAIG H. (1957) - *Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 12, 133-149.
- FAIRBANKS R.G., MATTHEWS R.K. (1978) - *The marine oxygen isotope record in Pleistocene Coral, Barbados, West Indies*. *Quat. Res.*, 10, 181-196.
- FIERRO G., VANOSI M. (1965) - *Nuovi elementi per la stratigrafia del «Brianzonese ligure» tra il T. Corsaglia ed il T. Pennavaira*. *Atti Ist. Geol. Univ. Pavia*, 16, 17-35.
- GROSS M.G. (1964) - *Variations in the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of diagenetically altered limestones in the Bermuda Islands*. *Journ. Geol.*, 72, 170-194.
- HUDSON J.D. (1975) - *Carbon isotopes and limestone cement*. *Geology*, 3, 19-22.
- HUMPHREY J.D. (1986) - *Barbados mixing zone dolomite: a paleohydrologic control on dolomite distribution*. *Am. Ass. Petr. Geol. Bull.*, abs., (in stampa).
- LAND L.S. (1970) - *Phreatic versus vadose meteoric diagenesis of limestones: evidence from a fossil water table*. *Sedimentology*, 14, 175-185.
- LAND L.S., SALEM M.R.I., MORROW D.W. (1975) - *Pa-*

- leohydrology of ancient dolomites: geochemical evidence. *Am. Ass. Petr. Geol. Bull.*, 59, 1602-1625.
- LUALDI A. (1983) - *Ricerche stratigrafico-sedimentologiche nel Prepiemontese ligure. I. - Il Trias dell'unità di Arnasco-Castelbianco*. *Atti Ist. Geol. Univ. Pavia*, 30, 197-214.
- LUALDI A. (1984) - *Lacune sedimentarie al passaggio Trias-Lias nell'unità di Arnasco-Castelbianco (Prepiemontese ligure)*. *Rend. Soc. Geol. It.*, 7, 15-17.
- LUALDI A. (1985) - *Elementi di correlazione in serie medio-triassiche del Brianzonese s.s., Brianzonese ligure e Prepiemontese*. *Rend. Soc. Geol. It.*, 8, 43-46.
- LUALDI A., SENO S. (1984) - *Osservazioni stratigrafiche e tettoniche nella zona del Rio di Nava (Brianzonese ligure esterno, unità di Ormea)*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 28, 493-503.
- MAJOR R.P., MATTHEWS R.K. (1983) - *Isotopic composition of bank margin carbonates on Midway Atoll: amplitude constraint on post-early Miocene eustasy*. *Geology*, 11, 335-338.
- MATTHEWS R.K. (1971) - *Diagenetic environments of possible importance to the explanation of cementation fabrics in subaerially exposed carbonate sediments*. In: BRICKER O.P. (ed.) «Carbonate cements». *Studies in Geology* 19, Johns Hopkins Univ. Press, 127-132.
- MATTHEWS R.K. (1973) - *Relative elevation of late Pleistocene high sea level stands: Barbados uplift rates and their implications*. *Quat. Res.*, 3, 147-153.
- MATTHEWS R.K. (1974) - *A process approach to diagenesis of reefs and reef associated limestones*. In: LAPORTE L.F. (ed.) «Reefs in time and space». *Soc. Econ. Pal. Min.*, 18, 234-256.
- MEGARD-GALLI J., BAUD A. (1977) - *Le Trias moyen et supérieur des Alpes nord-occidentales et occidentales: données nouvelles et corrélations stratigraphiques*. *Bull. B.R.G.M.*, 3, 233-250.
- MESOLELLA K.J. (1968) - *The uplifted reefs of Barbados (West Indies). Physical stratigraphy, facies relationships, and absolute chronology*. PhD. Thesis, Brown Univ., Providence, 736 pp.
- MESOLELLA K.J., MATTHEWS R.K., BROECKER W.S., THURBER D.L. (1969) - *Astronomical theory of climatic change: Barbados data*. *Journ. Geol.*, 77, 250-274.
- PIERRE C., ORTLIEB L., PERSON A. (1984) - *Supratidal evaporitic dolomite at Ojo de Liebre lagoon: mineralogical and isotopic arguments for primary crystallization*. *Journ. Sed. Petr.*, 54, 1049-1061.
- ROYANT G., LANTEAUME M. (1973) - *Définition de la série pennique interne d'Arnasco-Castelbianco (Alpes ligures). Mise en évidence, dans cette série, de phénomènes tectogénétiques jurassiques*. *C.R. Acad. Sc.*, 276, 3093-3096.
- SHACKLETON N.J., OPDYKE N.D. (1973) - *Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 10⁵ and 10⁶ year scale*. *Quat. Res.*, 3, 39-55.
- STEINEN R.P. (1974) - *Phreatic and vadose diagenetic modification of Pleistocene limestones: petrographic observations from subsurface of Barbados, West Indies*. *Am. Ass. Petr. Geol. Bull.*, 58, 1008-1024.
- STEINEN R.P., MATTHEWS R.K. (1973) - *Phreatic vs. vadose diagenesis: stratigraphy and mineralogy of a cored borehole on Barbados, West Indies*. *Journ. Sed. Petr.*, 43, 1012-1021.
- VANOSSI M. (1971) - *Contributi alla conoscenza delle unità stratigrafico-strutturali del Brianzonese ligure s.l. - III. L'unità del Castellermo*. *Atti Ist. Geol. Univ. Pavia*, 21, 89-108.
- VANOSSI M., BONI A., CORTESOGNO L., GALBIATI B., LORENZ C., MESSIGA B., PICCARDO G.B., VANNUCCI R. (1984) - *Geologia delle Alpi Liguri*. Fasc. Introduttivo *Convegno S.G.I.*, 158 pp.
- VIDETICH P.E., MATTHEWS R.K. (1980) - *Origin of discontinuity surfaces in limestones: isotopic and petrographic data, Pleistocene of Barbados, West Indies*. *Journ. Sed. Petr.*, 50, 971-980.
- ZENGER D.H., DUNHAM R.J., ETHINGTON R.L. (1980) - *Concepts and models of dolomitization*. *Soc. Econ. Pal. Min.*, 28, 320 pp.