

Tavola di Ernst Haeckel rappresentante diverse specie di radiolari

RELAZIONI VIVENTE-NON VIVENTE

cicli biogeochimici e uniformità della materia

di Giorgio Bavestrello*

Nella sottile linea di demarcazione tra mondo vivente e non vivente si sviluppa lo studio della composizione/costituzione delle parti mineralizzate degli organismi che popolano la terra e in particolare il mondo acquatico. Non solo una descrizione, seppure molto affascinante, della varietà di strutture biominerali, ma un'analisi delle interazioni che si stabiliscono con il substrato come ipotesi per spiegare la diversità e un modello, l'ecologia delle larve, per indicare una buona direzione di indagine. Insomma, questo contributo evidenzia diversi registri, tutti importanti, dalla storia evolutiva delle relazioni tra sistemi viventi e minerali alla evidenziazione di fenomeni e comportamenti che permettono di tracciare, pur a grandi linee, una sorprendente storia naturale. La storia di una ricerca, ben delineata nel suo punto di partenza e nei suoi obiettivi, che unisce ricercatori delle più diverse discipline.

Ebbero un eclatante inizio i primi passi della chimica biologica, alla fine dell'Ottocento, quando un gruppo di audaci fisiologi fece una scoperta basilare, largamente ispiratrice di riflessioni filosofiche. Un'attenta analisi elementare della materia vivente dimostrava, senza apparenti dubbi, che essa è composta dagli stessi elementi presenti in quella inanimata come le rocce che formano la superficie terrestre. Il mistero della vita poteva dunque essere aggredito attraverso i tradizionali metodi analitici e la scoperta fece tanto scalpore che uno dei suoi padri, il celebre Justus von Liebig, dichiarò con una punta di imprudenza che «la vita è chimica». La riduzionistica visione del grande scienziato ha determinato una straordinaria messe di scoperte anche se oggi siamo assai più prudenti sulla definizione della vita rimanendo ancora del tutto misteriosa l'origine del flusso di informazione che si interfaccia con il substrato chimico producendo quella serie di proprietà emergenti che identificano la vita come tale. Rimane comunque assodata la sostanziale uniformità della composizione elementare della materia - vivente e non vivente - e tale uniformità ha affascinato molti scienziati tra cui l'animo ispirato del padre Teilhard de Chardin che immaginò un'evoluzione cosmica dalle più semplici molecole fino

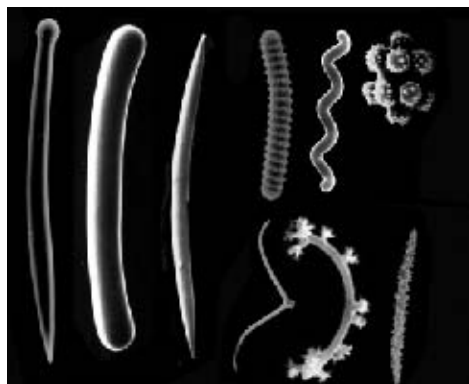
* Ordinario di Zoologia presso il Dipartimento di scienze del Mare dell'Università Politecnica delle Marche.

all'uomo come una serie di proprietà emergenti a ogni livello di crescente complessità dovuta all'aggregazione e all'organizzazione di molecole più semplici [Teilhard de Chardin, 1956].

D'altra parte le complesse molecole organiche che costituiscono la materia vivente hanno bisogno di una continua interfaccia con i livelli più semplici, inorganici, o preorganici per dirla con Teilhard: la fisiologia, la chimica biologica, la geochimica e l'ultimogenita delle scienze ad esse collegata, l'ecologia, hanno ampiamente documentato questa perenne interazione che si attua nei cicli biogeochimici dei diversi elementi che continuamente vengono ripresi nella composizione della materia vivente salvo poi, passaggio dopo passaggio lungo le catene trofiche, sfumare di nuovo nell'ambito inorganico grazie all'inflessa opera dei mineralizzatori.

Biominerali

Diverse morfologie di spicole di spugne costituite da silice opalina



Frustali silicei simili a coccinelle di diatomee bentoniche

Gli organismi viventi mantengono una straordinaria quantità di relazioni con l'ambiente minerale non solo perché nell'universale ciclo degli ele-

menti; questi partecipano in continuo alla composizione della materia vivente e di quella inanimata.

È una nozione acquisita che gli organismi viventi sono capaci di depositare minerali –principalmente carbonati ma anche fosfati o solfati o addirittura silice in forma opalina – che vengono utilizzati nella produzione di strutture rigide, con funzioni di sostegno o di protezione. Spicole, frustuli, scheletri, tubi, conchiglie, zocchie: il mondo della zoologia è costellato da un'incredibile profusione di biominerali assemblati nelle morfologie più fantastiche che da tempo immemorabile attirano schiere di ammirati osservatori, scienziati, collezionisti.

Le ornamentazioni di conchiglie scoperte nella tomba neolitica del cosiddetto «principe delle arene candide» danno una misura di quanto le strutture biominerali prodotte dai molluschi abbiano da sempre colpito la fantasia umana. Il fascino che un'intera, ben più smaltiziata, generazione ha ricavato dall'incontro con la grande conchiglia bivalve tropicale del genere *Tridacna* è documentato nei primi anni del Settecento dall'inserimento di questa icona, quale elemento ubiquitario, nell'arte e nell'architettura rococò. Oppure, ancor prima, la conchiglia di San Giacomo (*Pecten jacobaeus*) era universalmente assunta al rango di simbolo per i pellegrini

che percorrevano il lungo cammino di Sant'Jago e che essi usavano per bagnarsi con la purificatrice acqua marina una volta raggiunta l'agognata

spiaggia atlantica. Altre testimonianze della meraviglia determinata dalle strutture biominerali possono essere ricavate dalla quantità di acquarelli, a mezza strada tra la documentazione scientifica e l'opera d'arte, prodotti dalla mano ispirata di Ernst Haeckel che ritraggono le forme barocche dei gusci silicei dei radiolari marini raccolti durante le frequentazioni mediterranee dello scienziato tedesco (vedi pagina 6).

In questi brevi esempi non può non essere citato l'endoscheletro carbonatico del corallo rosso (*Corallium rubrum*), sostanza magica per eccellenza, che da sempre rappresenta un tratto unitario tra tutte le millenarie culture del vecchio mondo dalla sponda atlantica a quella pacifica. I biominerali e le strutture scheletriche da essi composte rappresentano uno dei campi più straordinari di interazione tra il vivente e il non vivente. Con le loro forme fantastiche le diverse strutture biominerali si situano all'intersezione tra le forze fisiche che tendono verso più basse configurazioni energetiche e l'attitudine organizzatrice della cellula vivente. Essi sono un esempio della capacità della vita che, assoggettata alle stesse leggi della materia inanimata, è capace di canalizzare i flussi energetici verso strutture complesse, termodinamicamente assai improbabili [Lima-de faria, 1988].

Le strutture biominerali rappresentano anche una sfida continua per i biologi evuzionisti: le loro forme sono così complesse e così varie che è assolutamente impossibile comprendere i vantaggi adattativi che hanno determinato l'incredibile proliferazione delle loro forme.

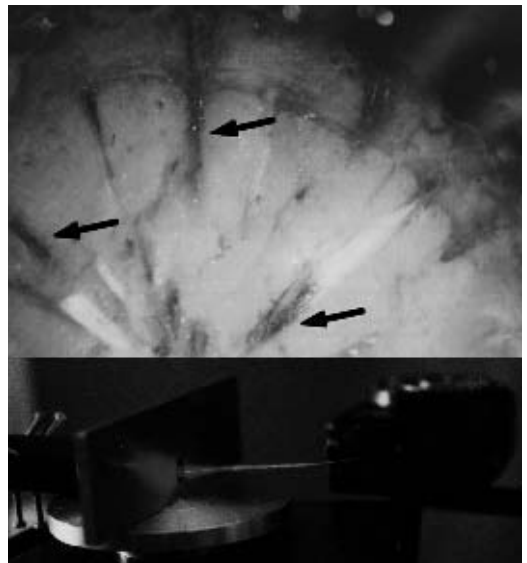
Recenti scoperte stanno suggerendo che a queste strutture non è soltanto deputata la tradizionalmente riconosciuta azione di sostegno, aprendo strade del tutto inattese per nuove, audaci ricerche. Per esempio è ormai noto che le spicole silicee di molte spugne possono funzionare come fibre ottiche canalizzando la luce ambientale all'interno del corpo del porifero e favorendo in questo modo la proliferazione di simbionti autotrofi anche all'interno dei tessuti [Cattaneo-Vietti et al., 1996].

È ugualmente noto che la conchiglia interna della seppia, il celebre osso legato ai trascorsi liguri di Eugenio Montale, non soltanto irrigidisce il corpo dell'animale sostenendone la massa dei visceri, ma serve anche come deposito di calcio metabolico che può essere prontamente mobilizzato a seconda della necessità dell'organismo.



Scultura moderna di corallo rosso

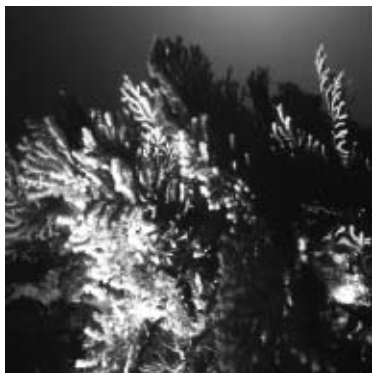
In alto, sezione di spugna che mostra gruppi di alghe verdi (freccie) che vivono lungo i fasci di spicole
In basso, lunga spicola silicea che conduce, come una fibra ottica, la luce laser



Biominerologia e comunità marine

Dopo i cicli biogeochimici e la produzione dei biominerali esiste un terzo misterioso livello di interazione, esplorato esclusivamente nell'ambito di emergenze legate a patologie umane, come la silicosi o l'asbestosi, che si sta rivelando di grande importanza in numerosi contesti ecologici. Si tratta delle interazioni da contatto che intervengono tra i sistemi viventi, osservati ai diversi livelli di cellula, organismo e comunità e substrati minerali. Procediamo a ritroso partendo dal dato ambientale.

Popolamento a gorgonie sui fondi carbonatici del Promontorio di Portofino



Ogni subacqueo con un minimo di esperienza che ha frequentato i diversi siti di immersione del Tirreno ben conosce le differenze nel paesaggio subacqueo osservabile sulle due principali tipologie di scogliere rocciose presenti nella zona: le marne calcaree e i graniti. È noto che, sul fondo del mare, il paesaggio è determinato da organismi, prevalentemente di natura animale, che si fissano sul substrato e che sono chiamati bentonici (*benthos* deriva dal greco e significa *profondo*). Per chi, come me, è abituato alle immersioni sulle scogliere calcaree, come quelle del Promontorio di Portofino in Mar Ligure, che presentano comunità bentoniche così ricche e diversificate che mai la roccia in posto risulta visibile, le immersioni su granito offrono una sensazione del tutto particolare. Ricordo distintamente il senso di sgomento accompagnato da una leggera vertigine quando, per la prima volta mi sono immerso lungo gli sconosciuti fianchi granitici dell'Isola di Monte Cristo che si perdevano bianchi e nudi in un'acqua di trasparenza inquietante. Sul granito le comunità sono molto più povere, rade e stentate e ampie aree di roccia compaiono tra i rarefatti gruppi di organismi bentonici.

La grande spugna arborescente del genere *Axinella* che sostituisce le gorgonie sui fondi quarzatici dell'Isola Gallinara



L'impressione dei subacquei è stata recentemente testata da rigorose analisi statistiche attraverso le quali sono emerse significative differenze in ambienti estremamente simili dal punto di vista dell'esposizione e della trofia e differenziabili esclusivamente in base alla composizione minerale del substrato. In alcuni casi si è osservato che il problema non riguarda soltanto la ricchezza dei popolamenti ma anche la sostituzione di alcune specie con altre. Per esempio, è impressionante constatare come le grandi gorgonie arborescenti che costituiscono il più tipico elemento del paesaggio sottomarino della maggior parte delle scogliere carbonatiche liguri scompaiono repentinamente lungo i fianchi della magnifica Isola Gallinara, singolo gigantesco monolite di quarzite che si stacca dalla costa alassina. Ma, a fronte di questa scomparsa ecco apparire misteriosamente una grande spugna gialla, ramificata, alta quasi un metro che, rara in tutto il resto della Liguria, addensa qui i suoi più ricchi popolamenti [Bavestrello et al., 2000].

Un vero e proprio esperimento naturale è costituito dall'Isola Tavolara, non distante dalla Costa Smeralda, che presenta un lato carbonatico mentre l'altro è costituito da granito. Le comunità insediate sui due lati sono talmente differenti che un'analisi rigorosa ha messo in evidenza che le differenze si ripercuotono fino al livello dei pesci che nuotano sopra di esse [Guidetti et al., 2004].

La spiegazione di queste differenze non è affatto immediata.

L'interpretazione classica della diversa ricchezza delle comunità presenti sui due substrati fa riferimento a una diversa microtopografia dei due tipi di roccia: più tormentato, ricco di cavità, di fessure, di perforazioni il calcare; compatto e impenetrabile il granito.

Già a questo livello la fa da padrona una particolare forma di interazione organismo-substrato foriera di importanti sviluppi per la biodiversità ambientale: il fenomeno della bioperforazione. Per sottrarsi alla predazione di altri organismi o, più semplicemente, alla competizione per il substrato, un consistente gruppo di specie ha evoluto una peculiare strategia vitale che prevede la perforazione della roccia e la creazione di un alloggio all'interno di essa. I bioperforatori sono molto numerosi e biodiversificati - cianobatteri, alghe verdi, spugne, molluschi bivalvi, anellidi policheti, sipunculidi, echinodermi - ma i loro metodi di lavoro si assomigliano molto. In quasi tutti questi organismi è presente un'azione chimica determinata da alcuni enzimi come l'anidrasi carbonica o le fosfatasi acide che, riducendo il pH dell'ambiente, determinano la dissoluzione dei carbonati. In molte specie, come le spugne o i bivalvi, l'azione chimica è associata a un'efficace azione meccanica attuata da cellule specializzate nelle spugne o dal movimento del bordo delle valve nei molluschi. Addirittura in alcuni ricci di mare, l'erosione del substrato è esclusivamente fisica, dovuta al movimento degli aculei. Questa generale uniformità di azione dei bioperforatori si riflette in modo molto puntuale sul loro effetto differenziale su substrati a diversa struttura minerale.

Ovviamente i substrati carbonatici sono molto più facilmente attaccabili di quelli granitici a causa del diverso effetto delle sostanze acide su di essi - i carbonati sono disciolti dagli acidi mentre il quarzo contenuto nei graniti risulta in ambiente acido addirittura stabilizzato - e della maggiore durezza del quarzo rispetto ai carbonati. Addirittura la diversa percentuale delle argille nelle marne e la dispersione dei singoli granelli possono cambiare il livello di penetrabilità dei diversi substrati e la loro selettività verso i diversi tipi di organismi perforatori. Nella Riviera Ligure di Levante, dominata dalla formazione dei Calcari dell'Antola, la tipica marna grigia è perforata dai bivalvi (*Litophaga*) mentre risulta del tut-

Bioperforazione operata da bivalvi e spugne su rocce calcaree



to impenetrabile per le spugne (*Cliona*) a causa dell'elevata percentuale di argilla. Le spugne, d'altra parte, attaccano esclusivamente le vene bianche di calcite cristallina determinando, di fatto, una ripartizione topografica, determinata dal substrato, dei due perforatori.

È una regolarità ecologica che a una maggiore eterogeneità del substrato corrisponda una biodiversità più elevata, ma questa spiegazione a cui certamente va attribuita una parte del fenomeno non è in grado di spiegare completamente la diversità nella ricchezza e abbondanza delle comunità insediate sui carbonati o sui graniti.

Ma non sono solo i barocchi e colorati organismi che popolano i fondi rocciosi aderendovi tenacemente a essere così profondamente condizionati dalla natura mineralogica del substrato: anche i più modesti e sconosciuti esseri prevalentemente vermiformi che a migliaia vivono nelle sabbie occupandone gli interstizi tra i granelli, sono estremamente condizionati dalla natura minerale dei sedimenti tanto che prove sperimentali sui popolamenti viventi in diverse miscele di sabbie quarzose e carbonatiche lasciate per un mese in mare, presentano un'abbondanza di organismi rigorosamente proporzionale alla percentuale del carbonato [Cerrano et al., 1999].

Ecologia larvale

Anche se certamente non offre una spiegazione di questo strano fenomeno, l'ecologia delle larve può indicare una buona direzione di indagine. Gli organismi bentonici vivono tenacemente adesi al substrato o sprofondati in esso e affidano la dispersione dei propri geni a fasi larvali mobili in grado di spostarsi, grazie a movimenti propri e/o alla turbolenza generata dalle correnti marine, in luoghi lontani dagli individui parentali. Queste larve presentano delle caratteristiche estremamente importanti per quel che riguarda il nostro racconto: innanzitutto sono molto spesso nude, prive di rivestimenti, e le loro cellule epiteliali, generalmente monostratificate, sono a contatto diretto con il substrato. La seconda caratteristica deriva dalla prima. Anche se non ne sappiamo praticamente nulla è evidente che le larve intrattengono intimi rapporti con il substrato «scegliendo» il punto in cui fissarsi e determinando così le fortune dell'organismo adulto.

Le larve degli idrozoi - si chiamano planule - sono semplicissimi organismi vermiformi che strisciano sul substrato grazie a un epitelio ricoperto di ciglia. Se raccolte e immesse in un contenitore con il fondo ricoperto per metà da sabbia di quarzo e per metà da sabbia carbonatica le si vedrà aggirarsi sul fondale per circa una giornata salvo poi fissarsi esclusivamente nella parte carbonatica per metamorfosare e dare origine a un nuovo polipo adulto [Bavestrello et al 2000].

Un fenomeno di segno opposto è stato messo in evidenza durante l'insediamento delle larve delle ascidie, i più umili esponenti del *phylum* dei

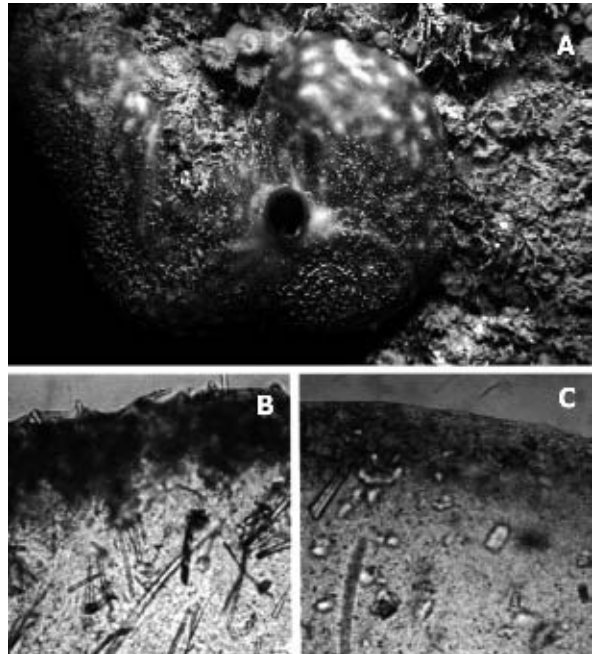
Cordati che comprende pure la nostra specie. Questi organismi non sono in grado di scegliere come i primitivi idrozoi, ma l'insediamento sulle rocce quarzatiche determina un perfetto sviluppo della base delle giovani ascidie che saldamente si attaccano al substrato mentre l'insediamento sui carbonati non permette una buona adesione e la porzione basale dell'ascidia, che non riesce ad attaccarsi, rimane piccola e stentata e il giovane organismo si stacca facilmente dal substrato. [Groppelli et al., 2003]

Interazioni a livello di organismo

Le più straordinarie interazioni tra mondo vivente e minerali sono state scoperte nelle spugne marine, i più primitivi metazoi, che popolano i mari da oltre 700 milioni di anni. Questi arcaici organismi presentano uno scheletro composto da spicole carbonatiche o silicee dalle forme complesse e improbabili ma molte specie irrobustiscono i loro tessuti con l'aggiunta di materiali estranei - granelli di sabbia, spicole di altre spugne - provenienti dall'ambiente. Le diverse specie sono in grado di selezionare i materiali che incorporano dal punto di vista dimensionale, ma raggiungono livelli di inattesi virtuosismi quando selezionano i materiali dal punto di vista della composizione mineralogica.

Una delle più comuni spugne del Mediterraneo è stata chiamata, grazie alla discutibile fantasia dei sistematici, *Chondrosia reniformis* per la consistenza cartilaginea e per la vaga forma renale. Questo umile organismo è sostenuto da uno spesso scheletro collagenoso che irrobustisce incorporando al suo interno materiali estranei esclusivamente di natura silicea e in particolare granelli di quarzo cristallino e spicole di silice opalina prodotte da altre specie di spugne.

Da un punto di vista prettamente chimico i due materiali sono del tutto simili essendo entrambi composti da biossido di silicio ma la disposizione spaziale delle singole molecole è del tutto diversa essendo assemblate su un rigoroso reticolo cristallino nel caso del quarzo o disposte disordinatamente nel caso delle spicole che quindi assumono una struttura vetrosa. L'incorporazione dei due materiali avviene a livello delle cellule dell'epitelio di *Chondrosia*, ricoperte da uno strato di muco che appiccica i sedimenti trasportati dalla corrente. Le cellule riconoscono tramite il semplice contatto la diversa composizione dei gra-



A, esemplare della spugna *Chondrosia reniformis*
B-C, sezione di due esemplari che mostrano i corpi estranei incorporati

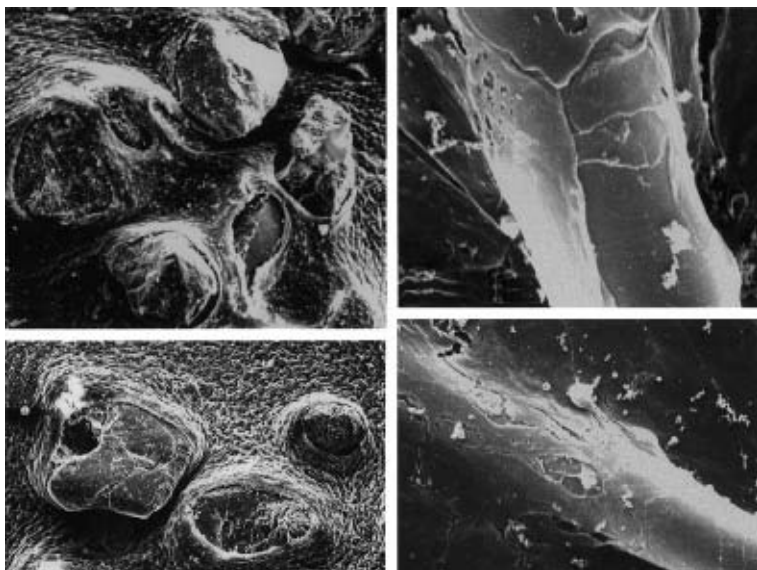
nelli con cui interagiscono. Quelli carbonatici vengono traslati lungo l'epitelio finché non cadono dal bordo della spugna, le particelle silicee al contrario vengono incorporate.

La storia però non è finita perché il comportamento delle cellule epite-

liali nei confronti dei due tipi di particelle silicee è assai diverso.

I granelli di quarzo cristallino sprofondano all'interno dei tessuti della spugna mentre le cellule si spostano attorno a essi dando l'impressione di una goccia di metallo fuso che entra in uno strato di cera.

Le spicole opaline, al contrario stimolano il movimento delle cellule dell'epitelio che rapidamente prendono contatto con esse e le avvolgono in un voluttuoso abbraccio.



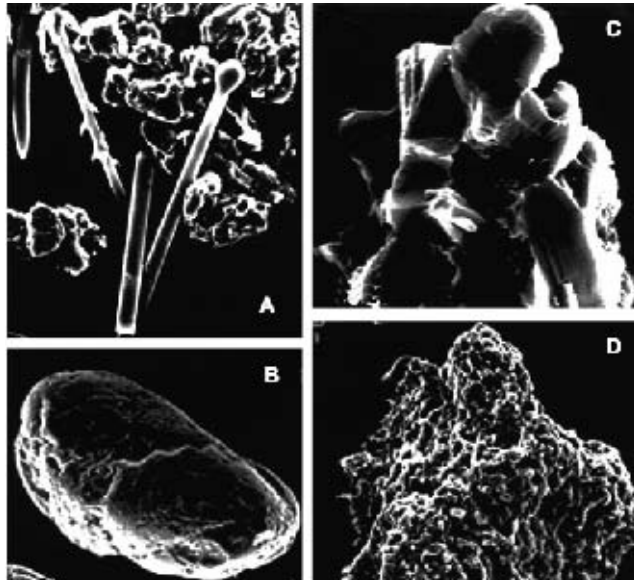
A sinistra fasi di incorporazione di granelli di quarzo attraverso l'epitelio di *Chondrosia*; a destra, incorporazione di spicole: si notino le cellule dell'epitelio che ricoprono le spicole durante l'incorporazione

Queste osservazioni mettono in evidenza un'affinità cellulare del tutto diversa di fronte alla stessa molecola organizzata in diversi tipi di strutture spaziali. L'ultima straordinaria sorpresa avviene nell'interno dei tessuti della spugna: a questo livello, mentre le spicole opaline rimangono intatte, il quarzo viene rapidamente attaccato e disciolto.

Il caso è notevole perché il quarzo è molto più difficile da dissolvere della silice amorfa e questo processo avviene grazie alla consistente presenza di acido ascorbico che è in grado di attaccare il quarzo mentre non discioglie la silice vetrosa. [Bavestrello et al., 19995]. Guarda caso, l'unico altro gruppo di organismi viventi in grado di dissolvere il quarzo sono i licheni, anch'essi grandi produttori di acido ascorbico. La loro abilità dissolutiva può essere evidenziata dall'erosione dei cristalli di quarzo presenti nei graniti sui quali essi sono insediati. Una conferma di questo fenomeno viene dagli esemplari di *Chondrosia* che vivono nelle acque di Stromboli, nell'arcipelago delle Eolie.

In quest'area, caratterizzata da un'intensa attività vulcanica, il quarzo è estremamente raro mentre è molto comune l'ossidiana, di diretta origine effusiva. Anche in questo caso le spugne selezionano con infallibile fiuto i materiali silicei incorporando l'ossidiana che però, per la sua natura vetrosa non viene poi disciolta e perdura intatta nei tessuti dei poriferi. Per quel che riguarda le nostre spugne rimane aperto un interrogativo sul perché: perché incorporare quarzo per poi dissolverlo? Pare accertato

che alte concentrazioni di ione ortosilicato, che si ottiene dalla dissoluzione del quarzo, siano in grado di attivare il gene del collagene, la sostanza proteica principale componente dei tessuti delle spugne. D'altra parte, le spicole estranee incorporate da *Chondrosia* restano intatte e ne irrobustiscono lo spesso strato collagenoso che serve da sostegno e protezione.



A, materiale estraneo incorporato da *Chondrosia*. Si notino le spicole di altre spugne intatte mentre i granelli di quarzo sono ampiamente erosi. B, morfologia originale di un granello di sabbia di quarzo prima dell'incorporazione. C-D, fasi della dissoluzione del granello dopo l'incorporazione nei tessuti della spugna

Interazioni a livello di cellula

I rapporti tra *Chondrosia* e i vari tipi di minerali ci introducono a un livello di interazione nel quale le cellule hanno un comportamento del tutto diverso quando entrano in contatto con silice cristallina o amorfa. Qualcosa di simile si può osservare anche nelle cellule polmonari dei vertebrati dove l'esposizione a polveri minerali di diverso tipo come silice amorfa o cristallina e amianto (silicato di alluminio) può determinare, per esempio, l'insorgere della silicosi e, in casi più gravi, del carcinoma polmonare quando le cellule entrano in contatto con il quarzo, dell'asbestosi e del mesotelioma, quando nel polmone è presente polvere di amianto, o di semplici risposte infiammatorie a esito benigno nel caso della silice amorfa (Fubini, 1998a). Anche in questo caso non sono ancora del tutto chiari i meccanismi molecolari iniziali dei processi infiammatori sopra descritti, sembra comunque evidente un ruolo chiave da parte dei macrofagi che rispondono in maniera differente all'esposizione dei vari tipi di polveri. Da notare che la silicosi si configura come una degenerazione del tessuto polmonare dovuto all'inglobamento delle particelle di quarzo da parte di tessuto connettivo cosicché il parenchima polmonare perde elasticità. Il parallelismo mantenuto di un'attivazione del gene del collagene dalle spugne ai vertebrati è suggestivo di come un medesimo *pattern* metabolico può essere conservato lungo l'intera evoluzione dei metazoi pur con esiti assai differenti sull'organismo.

Possiamo solo speculare sulle proprietà che rendono così differente la reattività cellulare verso le diverse forme di silice ma è probabile che alla

base di questa selettività siano comunque coinvolte le diverse caratteristiche superficiali dei diversi materiali quali la presenza di radicali di superficie ed il rilascio di radicali liberi.

Conclusioni

La storia delle relazioni tra sistemi viventi e minerali è una delle mie preferite perché, pur essendo stata assai trascurata dalla ricerca fisiologica ed ecologica, attraversa tutta l'evoluzione, dal livello cellulare a quello ecosistemico, dagli organismi unicellulari ai vertebrati. Comprende un gran numero di fenomeni probabilmente non tutti direttamente correlati tra loro. Rappresenta uno dei più promettenti sviluppi nella comprensione di comportamenti quali l'onnipresente fenomeno dell'infiammazione del quale è ora possibile cominciare a tracciare, pur a grandi linee, una sorprendente storia naturale. Mi piace soprattutto perché riunisce in una grande ricerca, ben delineata nel suo punto di partenza e nei suoi obiettivi, ricercatori delle più diverse discipline. Mi affascina perché dimostra che una buona ricerca zoologica di base, quella sulle bestie che non interessa a nessuno, men che meno al Ministero della Ricerca (MIUR) che da sempre, con un'azione che trova d'accordo - caso più unico che raro nella storia italiana - ogni parte politica, le lesina i fondi per la sua stessa sussistenza, può trovare spunti di interesse per i biochimici, per i biologi cellulari, per i chimici dei materiali, per i patologi che si occupano di grande ricerca di base o di ricerca applicata e che da soli si portano via per intero il pur striminzito ammontare del finanziamento pubblico. ❖

INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE

- Bavestrello, G., A. Arillo, U. Benatti, C. Cerrano, R. Cattaneo-Vietti, L. Cortesogno, L. Gaggero, M. Giovine, M. Tonetti & M. Sarà, 1995. *Quartz dissolution by the sponge Chondrosia reniformis (Porifera, Demospongiae)*, Nature, 378: 374-376.
- Bavestrello G., C. Cerrano, S. Puce, CN Bianchi, B. Calcinai, R. Cattaneo-Vietti, C. Morri, M. Sarà, 2000. *Bio-mineralogy as a structuring factor for marine epibenthic communities*, Mar. Ecol. Prog. Ser. 193: 241-249.
- Cattaneo-Vietti, R., G. Bavestrello, C. Cerrano, M. Sarà, U. Benatti, M. Giovine, E. Gaino, 1996. *Optical fibers in Antarctic sponge*, Nature, 383: 397-398.
- Cerrano C., G. Bavestrello, A. Arillo, U. Benatti, B. Calcinai, R. Cattaneo-Vietti, L. Cortesogno, L. Gaggero, M. Giovine, S. Puce, M. Sarà, 1999. *Organism-quartz interactions in structuring benthic communities: towards a marine bio-mineralogy?*, Ecology Letters 2: 1-3.
- Fubini, B., 1998. *Health effect of silica*, in *The surface properties of silicas* (Legrand J.P. ed) pp. 415-464, J. Wiley and Sons, Chichester.
- Groppelli S., Pennati R., Scari G., Sotgia C., De Bernardi F., 2003. *Observations on the settlement of Phallusia mammillata larvae: effects of different lithological substrata*, Ital. J. Zool. 70: 321-326.
- Guidetti P., Bianchi C. N., Chiantore M., Schiaparelli S., Morri C., Cattaneo-Vietti R. 2004. *Living on the rocks: substrate mineralogy and the structure of subtidal rocky substrate communities in the Mediterranean Sea*, Mar. Ecol. Prog. Ser. 274: 57-68.
- Lima-de-Faria A., 1988. *Evolution without Selection. Form and Function by Autoevolution*. Elsevier.
- Teilhard de Chardin P. 1956. *Le phénomène humain*, Paris: Les Éditions du Seuil.