

Il biodegrado dei monumenti in pietra: i licheni e i “segni del tempo”

Marco Del Monte

Geologo - Esperto in Scienza del Degrado e Tecnologia della Conservazione dei Monumenti in Pietra

1 – INTRODUZIONE

Con il termine biodegrado dei monumenti in pietra si indica ogni modificazione, in genere superficiale, che può essere ricondotta all'attività di organismi viventi. Tra questi un ruolo assolutamente prevalente è svolto dai vegetali “pionieri” così chiamati poiché in grado di colonizzare per primi la nuda pietra. Tra i “pionieri”, i più plastici, i più avventurosi e i più attivi sono senza alcun dubbio i **licheni** a cui si devono la maggior parte dei **bio-depositi** [patine superficiali, pseudo-*scialbature*]¹ e delle **micro-bioerosioni** [*pitting*, *alveolizzazione*, *microkarren*] osservabili sulle superfici delle pietre messe in opera. Il biodegrado è un fenomeno che esiste da sempre ed è ancor'oggi efficientissimo là dove la qualità dell'aria è buona [fig. 1], mentre è del tutto assente nelle aree ad alte concentrazioni di inquinanti aereodispersi che sono state abbandonate, per questo [e da tempo], dai licheni². In queste zone tuttavia i monumenti, se sufficientemente antichi, “ricordano” in modo inequivocabile, attraverso caratteristici “**segni del tempo**” di cui si è appena detto, i bei tempi andati, quando l'aria era ancora pulita, i licheni godevano ottima salute e il biodegrado costituiva un importante fattore di danno.

L'interazione tra “pionieri” e superfici con le loro conseguenti modificazioni chimiche e fisiche interessa, in modo simile, sia le rocce degli affioramenti naturali, sia quelle messe in opera in quanto la natura – è ovvio – non fa nessuna differenza tra i due casi: in campo aperto questo meccanismo si rivela utile e indispensabile mentre per le pietre lavorate rappresenta sempre un danno³. Poiché sia i fattori che gli effetti sono identici, per meglio comprendere quanto è possibile osservare sui monumenti in pietra, sarà utile partire dallo studio delle rocce in campo dove ogni aspetto del problema può venir analizzato con maggior facilità: qui infatti il biodegrado è presente in tutte le sue fasi, da quella embrionale, a

quelle intermedie, a quella finale; inoltre è possibile prelevare campioni di qualunque dimensione, per qualunque tipo di analisi, senza nessun problema.

Le rocce, come è noto, sono le unità costitutive del pianeta Terra e in particolare della sua crosta ma, sia in città, sia in campagna non è facile osservarle inalterate poiché subiscono, quasi sempre, una serie di trasformazioni superficiali dovute a processi fisici, chimici e biologici [*weathering*] il cui risultato finale è chiamato **regolite** dagli ingegneri, **suolo** dai pedologi e **terreno agrario** dagli agronomi. Questa metamorfosi è causata dall'interazione delle rocce con l'ambiente circostante vale a dire con l'**atmosfera** [oramai da tempo – quasi ovunque – “inquinata”], l'**idrosfera** [vale a dire l'acqua liquida di pioggia con le sue molteplici e straordinarie proprietà] e la **biosfera** [leggi organismi principalmente vegetali e in primo luogo i “pionieri” di cui si è appena detto]. Due semplici esempi, noti a tutti, serviranno a comprendere meglio la genesi del suolo. Un qualunque oggetto di ferro lasciato in campo aperto “fa la ruggine”: questo significa che a contatto con l'ossigeno dell'atmosfera si ossida e a contatto con l'acqua di pioggia si idrata. Se invece delle parole si preferisce utilizzare una espressione chimica si potrà scrivere:



Se l'oggetto è invece di rame, lasciato in campo aperto, si ricopre di un film verdastro: interagendo con l'ossigeno e l'anidride carbonica dell'atmosfera si ossida e carbonata e con l'acqua di pioggia si idrata trasformandosi, superficialmente, in un carbonato basico, vale a dire:



Questi due esempi riguardano minerali allo stato elementare, il ferro e il rame: lo stesso accade alle rocce

¹ Sono esclusi da questo lavoro i resti dell'antica policromia o di antichi trattamenti eseguiti a scopo protettivo. Cfr. *infra*, nota 78; cfr.: Del Monte M., Ausset P. and R.A. Lefevre “**Traces of ancient colours on Trajan's Column**” *Archaeometry*, **40**, 2, 403-412, 1998.

² Sin dal 1856, Grindon poté constatare che la flora lichenica stava declinando nel South Lancashire in seguito all'aumentata inquinazione atmosferica, ma fu Nylander a riconoscerne per primo, nel 1866, che i licheni potevano venire utilizzati per monitorare la qualità dell'aria, a Parigi e dintorni; cfr.: Nylander W. “**Les lichens du Jardin du Luxembourg**” *Bull. Soc. Bot. Fr.*, **13**, pp. 364-372, 1866. La comparsa dei licheni sulla terra risale all'inizio del Devoniano [circa 400 milioni di anni fa] cfr.: Taylor T.N., Hass H., Remy W. and H. Kero “**The oldest fossil lichen**” *Nature*, **278**, p. 244, 1995.

³ Seaward M.R.D. “**Major Impacts Made by Lichens in Biodeterioration Processes**” *Internat. Biodeterioration & Biodegradation*, **40**, pp. 269-273, 1997. Per molti A.A. l'azione dei licheni sarebbe fondamentale [p.e.: Schatz, 1963; Jackson and Keller, 1970; Syers and Iskander, 1973] per altri sarebbe invece sopravvalutata [Smith, 1962; Haynes, 1964; Culberson, 1970]; chi scrive propende nettamente per la prima ipotesi.

⁴ In realtà il verderame è l'acetato di rame, un sale dell'acido acetico. Tuttavia, comunemente, si indica con lo stesso termine anche la malachite, vale a dire il sale dell'acido carbonico.

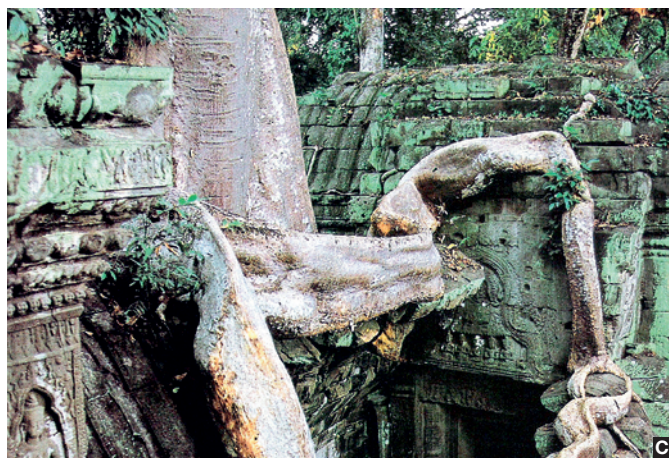


Fig. 1 - Nei siti dove i tenori di inquinanti aereo dispersi [soprattutto SO_2 , NO , e particolato carbonioso a reazione acida] sono da molto bassi a irrilevanti, e quindi la qualità dell'aria è buona, il biodegrado agisce ancor'oggi come importantissimo fattore della degradazione meteorica. Qualunque monumento in pietra abbandonato a se stesso tende col tempo a tornare preda della flora; il processo ha inizio con la colonizzazione delle superfici da parte di licheni crostosi a cui fanno seguito, soprattutto nelle zone sub orizzontali del monumento, dove in piccole conche o depressioni si sono potuti formare cuscinetti di protosuolo, muschi, felci e poi piante superiori [a e b: parco di Villa Lante, Bagnaia, "peperino delle alture": ignimbrite lattica; c e d: Angkor Wat, Cambogia, quarzoarenite].

salvo il fatto che essendo, in genere, costituite da più minerali e comunque sempre da numerosissimi elementi chimici il problema è molto più complesso. La trasformazione

$$\text{Roccia} + \text{Atmosfera} + \text{Idrosfera} + \text{Biosfera} = \text{suolo}$$

non può essere espressa attraverso una reazione chimica quantitativa: le varie tappe di questo straordinario fenomeno – a cui è indissolubilmente legata la vita superiore terrestre in ogni sua forma⁵ – possono venire solo descritte qualitativamente e venire quantificati solo limitatamente a pochi aspetti⁶. Inoltre la trasformazione roc-

cia → suolo avviene, non solo attraverso numerosissime reazioni chimiche e biochimiche, ma anche attraverso fenomeni puramente fisici che disgregano la roccia e la suddividono in piccoli frammenti. Si noti infine che il suolo è un'entità dinamica in continua evoluzione: nasce, raggiunge la maturità [climax]⁷ e infine può anche morire.

Riassumendo quanto appena detto le rocce si nascondono – di solito – al nostro sguardo perché ricoperte dal suolo o terreno agrario: sarà solo in montagna, al di sopra del limite della vegetazione, dove la gravità allontana continuamente i prodotti d'interazione che sarà possibile osservare rocce nude; oppure in pianura lungo

⁵ Il suolo permette la vita vegetale, questa è l'alimento degli erbivori che a loro volta nutrono i carnivori: quindi niente suolo, niente vita. Naturalmente si potrebbe anche dire niente vita niente suolo in quanto l'*humus* è una componente indispensabile del suolo. Il punto di partenza è in realtà l'acqua liquida. Un caso limite è rappresentato dalle zone artiche dove l'unico vegetale che riesce a sopravvivere è il "lichene delle renne" [*Cladonia rangiferina*] il solo alimento invernale per queste ultime. Da questo discorso è ovviamente esclusa la vita acquatica.

⁶ Per rocce qui s'intendono quelle delle terre emerse: sono esclusi i basalti dei fondali marini.

⁷ Vale a dire che è in equilibrio con l'ambiente esterno: fin tanto che i parametri ambientali non muteranno la sua ulteriore evoluzione sarà molto lenta, quasi impercettibile. Si può aggiungere, rimandando per una spiegazione più esauriente a un testo di pedologia, che le caratteristiche "acquisite" da un suolo in *climax* tenderanno a prevalere su quelle "ereditate" dalla roccia madre.



Fig. 2 - Dopo pochi anni dalla loro messa in posto – ma talora anche solo dopo pochi mesi – le colate laviche raffreddate ovvero i banchi di lapilli e ceneri vulcaniche si ricoprono completamente, sempreché la morfologia lo consenta, di licheni, da prima crostosi poi fogliosi e frutticosi [a, b e c] a cui fanno seguito muschi, felci e piante superiori [d] secondo una precisa “successione ecologica”. Questo processo naturale, inevitabile e irreversibile porterà col tempo alla formazione di un suolo [Terceira, Isole Azzorre, Portogallo, basalto].

il corso di un fiume, che incidendo gli strati, mette a nudo le rocce circostanti lungo le sponde, o nei deserti. Eccezionalmente anche grandi frane permettono di osservare, ai margini dei rilievi, rocce nude e le colate laviche appena raffreddate e consolidate resteranno rocce – eruttive effusive – per un breve periodo di tempo, prima di ricoprirsi inevitabilmente e completamente, come fase iniziale del processo pedogenetico, di licheni⁸ [fig. 2].

Vediamo ora più in dettaglio, come avviene la trasformazione roccia-suolo che interessa [come già osservato ma, essendo il punto chiave del discorso val la pena ripeterlo] sia le rocce degli affioramenti naturali, sia in modo assai più modesto, ma non dissimile le rocce messe in opera chiamate in questo caso **pietre**.

I fattori della pedogenesi, vale a dire del processo che partendo da una roccia porta alla nascita di un suolo,

sono cinque: 1 - natura della roccia madre; 2 - clima; 3 - morfologia; 4 - fattori biotici; 5 - tempo. Tutti e cinque i fattori sono ugualmente importanti e necessari per la formazione di un suolo: l'assenza o il “mal funzionamento” anche di uno solo di essi rende impossibile la pedogenesi. Esaminiamoli brevemente.

1 - È evidente che la natura della roccia madre condiziona prepotentemente il tipo di suolo che genererà: si dice che il suolo eredita da questa pregi e difetti⁹. Su alcuni tipi di rocce mancando in esse tutti o la maggior parte degli elementi della nutrizione [p.e.: quarziti] ovvero essendo presenti elementi tossici per le piante [p.e.: pietre verdi, gabbri, ofioliti] lo sfaticcio superficiale che si formerà col tempo potrà difficilmente sostenere la vegetazione e quindi non sarà – secondo la definizione che ne viene data – un buon suolo¹⁰. Inoltre vi sono pietre più sensibili all'interazione ambientale e altre meno;

⁸ Ford Cochran M. and R.A. Berner “Promotion of chemical weathering by higher plants: field observation on Hawaiian basalts” Chemical Geology, **8**, pp. 71-77, 1996; Berner R.A. and M. Ford Cochran “Plant-induced weathering of Hawaiian basalts” Journ. Sedimentary Research, pp. 723-726, **5**, **68**, 1998; Jones D., Wilson M.J. and J.M. Tait “Weathering of a basalt by *Pertusaria corallina*” Lichenologist, **12**, pp. 277-289, 1980.

⁹ Ciò vale soprattutto per i suoli giovani; cfr. *supra*, nota 7.

¹⁰ Il suolo è un corpo naturale in grado di sostenere ed alimentare la vegetazione.

questa sensibilità può mutare col tempo, qualora mutino le condizioni ambientali.

2 - Il clima è altrettanto importante: esso agisce a sua volta attraverso una serie di fattori fra cui fondamentali sono la temperatura¹¹ e la piovosità, vale a dire l'acqua liquida di pioggia. Un valore critico della temperatura è dato dallo zero termico: l'acqua solidifica [cristallizza], tutte le reazioni chimiche vengono in pratica bloccate e poiché, come è noto, la solidificazione avviene con aumento di volume si può avere lo sbriciolamento della roccia [crioclastia]; se viceversa la T sale molto al di sopra dello zero ed anche al di sopra dei valori medi stagionali si possono avere rotture causate dall'aumento di calore che determina sia la dilatazione termica anisotropa dei minerali¹², che tendono così a scollarsi l'uno dall'altro, sia la dilatazione dell'acqua d'impregnazione [termoclastia e conseguente arenizzazione superficiale]. Per quanto riguarda l'acqua di pioggia è noto che là dove non piove mai [aree desertiche] mancando la vita e di conseguenza la sostanza organica [*humus*], il risultato finale dell'adeguamento ambientale delle rocce sarà semplicemente sabbia [deserto tipo *erg*] o ghiaia [deserto tipo *serir*] o lastre di pietra [deserto tipo *hammada*] e non un suolo. Al contrario là dove piove troppo e fa molto caldo i processi di solvolisi, di idrolisi e di suddivisione elementare vanno molto al di là del suolo: si arriverà, in tempi geologicamente brevi, alla formazione di **lateriti** e **bauxiti** che potranno venire sfruttate per ricavare rispettivamente ferro e alluminio ad uso industriale. Le condizioni ideali, per la formazione di un suolo, saranno quindi quelle che si osservano alle medie latitudini con climi miti.

3 - La morfologia è anch'essa molto importante: lo spessore di un suolo [che può variare da qualche centimetro a oltre un metro] è inversamente proporzionale alla pendenza: quindi si formeranno suoli spessi [sussistendo s'intende tutte le altre condizioni] solo su superfici pianeggianti, mentre su superfici sub-verticali o verticali il suolo non potrà formarsi: qui infatti le particelle di roccia disgregata verranno sistematicamente allontanate dalla forza di gravità o dall'acqua ruscellante e trascinate verso il basso.

4 - I fattori biotici sono, anch'essi, indispensabili: la pedogenesi ha inizio – come già notato - con la colonizza-

zione della superficie della roccia da parte dei licheni. Sono i licheni che modificano il substrato roccioso in modo tale da permettere la vita ad altri organismi vegetali, secondo una ben precisa "**successione ecologica**" [licheni crostosi – o talora piccoli licheni fogliosi, grandi licheni fogliosi, licheni frutticosi – muschi, felci, ecc...]¹³; sono i licheni a fornire al primo livelletto di roccia arenizzata quella piccola frazione di sostanza organica parzialmente decomposta [*humus*] che fa, come già accennato, di una sabbia o di un detrito un suolo.

5 - Infine abbiamo il tempo. Il tempo è una grandezza astratta e quindi di per se non ha effetti su nulla: sono gli altri fattori che agendo nel tempo portano alla formazione del suolo. Perché su un certo tipo di roccia si possa formare un certo tipo di suolo occorre che la morfologia sia adeguata [non troppo ripida], il clima di un certo tipo e che in qualche modo lo sfaticcio superficiale acquisisca una piccola frazione di *humus* [compreso, di solito, tra l'1 e il 3 % della frazione solida del suolo]¹⁴: questo processo si compie in decine, centinaia o migliaia d'anni. Per certe pietre datate, vale a dire, ad esempio, le colate laviche storiche o quelle di cui si sa l'anno preciso di messa in opera [p.e.: il Vallo di Adriano in Britannia, il celebre *vallum* che segnava il *limes* dell'Impero a nord ovest; la città di Angkor, celeberrima capitale dell'impero Kmer in Cambogia, al confine con la Thailandia; la Grande Muraglia cinese, ecc.], sarà possibile sapere con esattezza lo spessore del suolo che si è formato in X anni. Questi dati non potranno tuttavia essere estrapolati e generalizzati: essi varranno solo per quel sito, caratterizzato da un suo clima specifico, e per quel particolare tipo di roccia. L'unico insegnamento che se ne potrà trarre è che, per la formazione di un suolo, occorrerà molto, molto tempo¹⁵.

Detto ciò quali sono le principali differenze tra l'insorgere di questo processo su una roccia in campo ovvero su una roccia messa in opera? Per quanto concerne la natura della pietra e il clima non vi sono differenze sostanziali: come appena notato ci sono pietre che si prestano di più ad essere pedogenizzate e climi più o meno favorevoli a questo processo.

La **morfologia** è invece il fattore che diversifica maggiormente i due casi: in natura prevalgono nettamente le superfici orizzontali [esclusa l'alta montagna dove,

¹¹ In realtà il calore, o meglio la quantità di calore presente in un corpo: nel nostro caso la roccia e/o l'acqua in essa contenuta. La T è semplicemente una grandezza fisica che esprime lo stato termico di un corpo e quindi la sua attitudine a scambiare [cedere o ricevere] calore con l'esterno [Il° principio della termodinamica]. Mentre il calore è una forma di energia, la T è un numero.

¹² I minerali sottoposti all'azione del calore si dilatano [se questo aumenta] e si contraggono [se questo diminuisce]: ciò avviene in modo diverso nelle due direzioni cristallografiche principali [minerali dimetrici] ovvero nelle tre [minerali trimetrici]; queste differenze sono in realtà quasi impercettibili. Cfr.: Ciabatti M. e M. Del Monte "**Elementi di Mineralogia e Geologia [per Scienze Agrarie]**" Clueb ed., p. 119, Bologna, 1980.

¹³ Questa successione è maggiormente evidente su rocce non carbonatiche come ad esempio i basalti dei *plateaux* continentali o su quelli delle isole oceaniche; v. fig. 2.

¹⁴ Semplificando si può dire che la frazione solida di un suolo è il 50% [48% minerali, 2% *humus*]; un 25% è aria [in realtà atmosfera del suolo sempre più ricca di CO₂ rispetto l'atmosfera esterna]; un 25% è acqua [in realtà soluzione circolante, vale a dire acqua più elementi della nutrizione]. Questa suddivisione è assai grezza e semplicistica: in un grammo di suolo sono presenti decine di milioni di microorganismi! L'*humus* è uno stato di fine suddivisione della materia organica [foglie, rametti, insetti, ecc.], operata dai microrganismi, che precede la completa successiva mineralizzazione. Date le dimensioni estremamente piccole, le particelle di *humus* hanno spiccate proprietà colloidali.

¹⁵ "...1000-1500 anni dei suoli podzolici e i 40 anni circa dei suoli evolvendosi su ceneri vulcaniche delle Indie occidentali britanniche e delle isole della Sonda". Cfr.: Casalicchio G. "**Chimica Agraria**" p. 32, Clueb ed., Bologna, 1978.



Fig. 3 - In assenza di superfici orizzontali è difficile che il processo di biodegrado vada oltre la colonizzazione della pietra da parte di licheni crostosi che tuttavia, tramite le ife fungine, porteranno a rilevanti modificazioni chimiche e fisiche del substrato. La colonizzazione su pietre silicee appare generalizzata con competizione tra i vari generi che si disputano tra loro gli areali [a, b e c: sarcofago etrusco, Toscana, nefro: tufo vulcanico tefritico; d: parco di Villa Lante, Bagnaia, *ignimbrite latitica*].

come si detto, mancano per l'appunto i suoli o sono presenti solo litosuoli o protosuoli], nei monumenti in pietra quelle verticali. Sui monumenti quindi il fenomeno della pedogenesi o non potrà [quasi ovunque] nemmeno partire o si fermerà [salvo casi eccezionali] alle sue fasi iniziali: le superfici si potranno tappezzare di licheni, come le pietre in campo, soprattutto nelle parti sub-orizzontali, ma poi il fenomeno non procederà oltre o procederà con estrema lentezza [fig. 3]. C'è da aggiungere poi che i licheni conferendo ai monumenti un aspetto romantico – pur essendo sempre dannosi, per i substrati su cui si insediano, come già notato e come si dirà meglio in seguito – vengono di solito ben tollerati; l'attecchimento di altre pianticelle della “successione ecologica” verrà al contrario percepito come un processo dannoso in atto e perciò queste verranno estirpate [in passato quando in città l'aggressione degli organismi vegetali ai monumenti in pietra era caratteristica di ogni primavera si parlava di “**lotta alle male**

erbe”]: in questi casi era quindi l'intervento dell'uomo – assente in campo aperto – a contrastare il progredire e l'evolversi del fenomeno]¹⁶.

Per quanto concerne l'ultimo fattore, vale a dire il tempo, mentre sugli affioramenti naturali i fattori della pedogenesi potranno agire per tempi geologici, sui monumenti i tempi saranno invece, è lapalissiano, storici: qualche centinaio o per quelli più antichi qualche migliaio di anni. Anche questo è un fattore limitante per lo sviluppo, comunque e ovunque, di veri e propri suoli o semplicemente di protosuoli.

2 – I LICHENI

I licheni derivano dalla simbiosi tra un fungo (micobionte) ed un'alga e/o un cianobatterio (fotobionte). Il fungo è di regola un eumicete, vale a dire un fungo superiore: circa il 98% dei funghi lichenizzati sono degli ascomice-

¹⁶ Più difficile rimuovere i licheni, anche con tecniche sofisticate, su monumenti in campo in quanto spesso i corpi riproduttivi sono dentro la pietra e non sopra quindi né visibili, né facilmente raggiungibili. Cfr.: Leavengood P., Twilley J. and J.F. Asmus “**Lichen removal from Chinese Spirit Path figures of marble**” Journ. Cult. Heritage, **1**, pp. 71-74, 2000.

ti¹⁷. Il partner fotoautotrofo frequentemente è un'alga verde, più raramente un cianobatterio. I generi sono circa quaranta, dei quali *Trebouxia*, *Trentepohlia*, *Nostoc* superano il 90% dei fotobionti. Più in particolare il genere *Trebouxia* è presente in più del 50% dei licheni, soprattutto nei generi crostosi *Verrucaria*, *Lecanora*, *Lecidea*, *Caloplaca* e nella maggior parte dei licheni fogliosi e fruticosi [v.o.]¹⁸. La selettività dei micobionti nei confronti del partner fotosintetico è variabile¹⁹: lo stesso micobionte può lichenizzare con diverse specie di alghe [è il caso, ad esempio di *Trebouxia*] appartenenti, però, allo stesso genere.

Nell'ambito della simbiosi lichenica l'alga, attraverso la fotosintesi è soprattutto responsabile dell'organizzazione della CO₂ atmosferica, vale a dire della formazione di carboidrati; il fungo ha invece il compito di fornire all'alga l'impalcatura del tallo [v.o.], i sali minerali [leggi: macro e microelementi della fertilità], l'acqua, la protezione dal disseccamento e dalle forti radiazioni solari e di controllarne il rinnovamento. Gli scambi tra i due partner avvengono attraverso estroflessioni delle ife fungine che si insinuano nella parete cellulare dell'alga, dette **austori**.

Morfologicamente, i licheni presentano una certa varietà di forme; le principali sono: **crostosa** quando il loro corpo, detto tallo, aderisce fortemente al substrato, **fogliosa** quando il tallo presenta ramificazioni (lobi) dorsoventrali disposte parallelamente al substrato a cui è ancorato solo in alcuni punti, **fruticosa** con ramificazioni (lacinie) tridimensionali, formanti spesso minuscoli cespugli ancorati al substrato solo nella parte basale.

I licheni possono vivere su qualsiasi tipo di substrato naturale, quale suolo (licheni **terricoli**), roccia (licheni **rupicoli** o **sassicoli**), muschi (licheni **muscicoli**) e alberi, dei quali possono colonizzare la scorza (licheni **corticicoli** o **epifiti**), il legno (licheni **lignicoli**) e le foglie (licheni **foliicoli**) nel caso delle sempreverdi²⁰. Possono, inoltre, utilizzare come substrato di crescita pietre, late-

rizi, malte, vetro, cemento, asfalto, amianto, metalli, cuoio, ossa, cartone.

I monumenti e i manufatti in pietra, in particolare dove scarseggiano le rocce affioranti, costituiscono aree vergini ambitissime: dopo breve tempo dalla loro edificazione vengono colonizzate dai licheni, sempre che la qualità dell'aria lo consenta²¹.

Nei climi freddi prevalgono nettamente i licheni sassicoli mentre in quelli caldi dominano quelli epifiti; se il caldo è notevole ed è molto umido sono spesso presenti anche i foliicoli. In questa sede interessano solo i licheni che vivono sulle rocce detti per l'appunto **rupicoli** o **sassicoli**. Fra i licheni sassicoli il gruppo nettamente prevalente [oltre il 98%] è quello dei licheni **crostosi**²²: quest'ultima categoria viene ulteriormente e schematicamente suddivisa in licheni **epilitici s.s.**, se il tallo cresce sopra la roccia aderendovi completamente, **endolitici**, se il tallo è invece completamente immerso in essa, **semiendolitici** nel caso intermedio²³ [fig. 4]. Una specie sassicola può essere solamente o epilitica, o semiendolitica o endolitica: non si osservano durante la crescita passaggi da uno dei tre tipi all'altro²⁴.

I licheni fogliosi e fruticosi, oltre ad essere sulle pietre non comuni, come appena detto, hanno con queste un contatto limitato, talora solo puntiforme, quindi per quanto concerne il biodegrado possono venire trascurati; non v'è inoltre dubbio che la dipendenza dal substrato [acqua, elementi della nutrizione, ecc...] e quindi la necessità di attaccarlo diminuisca nell'ordine dai crostosi, ai fogliosi, ai fruticosi²⁵.

La maggior parte dei licheni osservati in sezione trasversale mostra un **cortex superiore** formato da ife fungine [v.o.] molto appressate, uno **strato gonidiale** con ife lasse e cellule algali, la **medulla** a ife ancora meno serrate. Alla medulla può far seguito il **cortex inferiore** con struttura simile a quello superiore. Le ife sono filamenti cilindrici, con diametro di 2-4 mm, formati da cellule allungate uni o plurinucleate. Più ife, agglutinate l'un

¹⁷ Molto più raramente basidiomiceti (0,4%) o deuteromiceti (1,6%): da ciò la distinzione dei licheni, fatta dagli specialisti, in ascolicheni, basidiolicheni e deuterolicheni che in questa sede può venire trascurata. Cfr.: Van Haluwyn C. and M. Lerond "Guide des Lichens" Editions Lechevalier, Paris, pp. 344, 1993; in particolare, per la definizione di lichene cfr.: Ahmadjian V. "The Lichen Symbiosis" pp.1-6, Wiley, New York, 1993; Honegger R. "The lichens symbiosis. What is so spectacular about it?" Lichenologist, 30, 3, pp. 193-212, 1998.

¹⁸ Ozenda, P. et G. Clauzade "Les lichens - Étude biologique et flore illustrée" Masson ed., pp. 801, Paris, 1970.

¹⁹ Tretiach M. "Lecania Pusilla, a new bryophilous lichen from the Trieste Karst" Lichenologist, 28, 1, pp. 9-13, 1996.

²⁰ Valcuvia-Passadore M. e M. C. Bertonazzi "I licheni indicatori biologici della qualità dell'aria" Museo Civ. Storia Nat. Piacenza: Quaderni di Educazione Ambientale, 10, pp. 1-56, ivi, 2004.

²¹ Weber B. and B. Büdel "Mapping and analysis of distribution patterns of lichens on rural medieval churches in north-eastern Germany" Lichenologist, 33, 3, pp. 231-249, 2001. Per licheni e inquinamento atmosferico cfr. par. 5.

²² Da notare che circa i tre quarti dei licheni [non solo sassicoli] sono crostosi. Cfr.: Ozenda, P. et G. Clauzade, cit., p. 8.

²³ Più precisamente: i **semiendolitici** sono adagiati sulla superficie della pietra con la parte inferiore del tallo immersa in questa per qualche centinaio di µm di spessore; ne risulta che il **cortex inferiore** ovvero la parte inferiore del tallo è a strettissimo contatto con la pietra, mentre il **cortex superiore** è completamente esposto all'azione degli agenti atmosferici. Gli **endolitici** sono invece completamente immersi nella pietra che esternamente risulta apparentemente intatta, se osservata ad occhio nudo, salvo la presenza degli ostioli [v.o.]. Per ovvie ragioni gli endolitici sono caratteristici di calcari e dolomie, pietre facilmente attaccabili chimicamente; non sono facili da intercettare in sezione sottile poiché il tallo si suddivide e frammenta in profondità come, ad esempio, in *Staurothele meylanii*. Una ulteriore suddivisione degli endolitici in: criptoendolitici, casmoendolitici e euendolitici può venire qui trascurata; cfr.: Golubic S., Fiedmann E.I. and J. Schneider "The lithobiontic ecological niche, with special reference to microorganisms" Journ. Sediment. Petr., 51, pp. 475-478, 1981; Bell R.A. "Cryptoendolithic algae of hot semiarid lands and deserts" Journ. Phycol., 29, pp. 133-139, 1993.

²⁴ Ozenda et Clauzade, cit., p. 13; *contra*: Golubic et al., 1981, cit. nota 23.

²⁵ Da notare tuttavia che anche i fruticosi - in pratica legati in un solo punto al substrato - sono specifici di particolari substrati come ad esempio *Umbilicaria* che si trova solamente su rocce silicee; le ife di questi generi si addentrano pochissimo per cui saranno le alghe a provvedere in maggior parte alle necessità nutritive.

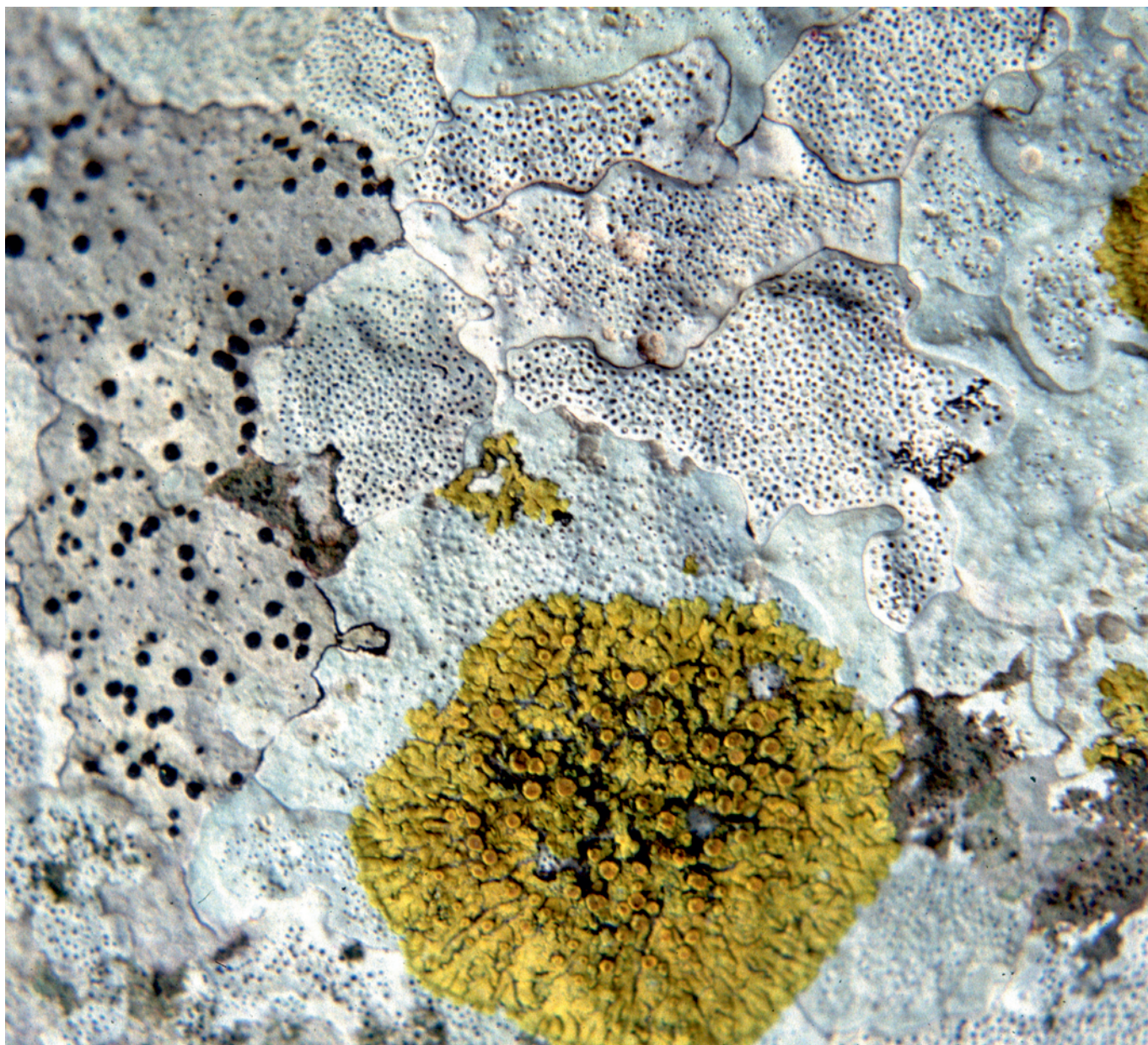


Fig. 4 - Se si osserva una qualunque superficie carbonatica in campo si può notare un tappeto ininterrotto di licheni semiendolitici, simile a un mosaico. Gli individui morti lasciano sulla pietra tipiche depressioni a contorno sinuoso alveolare già sede del tallo e, talora, un fitto insieme di forellini accostati sede dei corpi riproduttivi del lichene [ascocarp]. A questo insieme di forellini [emimicrosfere] si dà il nome di pitting. Le dimensioni degli ascocarp variano da genere a genere: quelli più grandi [Ø 3 mm] visibili sulla sinistra della foto di colore nero appaiono tuttora popolati vale a dire che contengono ancora l'imenio con le spore fungine, quelli più piccoli [Ø 1 mm], bianchi, al centro e sulla destra in alto, sono invece fossili. Pitting e depressioni alveolari [insulae] sono comuni sia sugli affioramenti naturali, sia su monumenti in campo ovvero su quelli che, dopo aver trascorso lunghi periodi all'aperto, sono oggi conservati nelle raccolte museali. Come viene spiegato nel testo, emimicrosfere e insulae possono successivamente essere allargate e rimodellate mediante un processo microcarsico dall'acqua liquida di pioggia [Isola di Brac, Croazia, calcare].

l'altra, possono formare fasci consistenti detti **rizine**. Il carattere più appariscente dell'ifa del lichene è lo spessore della parete, talora così accentuato che la cavità interna scompare quasi completamente. Questo fatto viene attribuito dai lichenologi alla funzione meccanica che le ife debbono compiere nell'ambito della simbiosi, vale a dire quella di penetrare all'interno della pietra. Oltre alle ife "normali" sono state descritte in diversi licheni crostosi, soprattutto endolitici viventi principal-

mente su rocce carbonatiche, ma anche silicee [*Le-canora*, *Opegrapha*, *Verrucaria*, *Protoblastenia*], ife **vegetative oleifere**: sono cellule speciali, di un diametro molto più grande di quello delle ife ordinarie che possono penetrare profondamente nella roccia. Le ife, come si preciserà meglio in seguito, hanno una tripla funzione: **a** - ancorare il lichene al substrato; **b** - andare alla ricerca - penetrando all'interno della roccia - degli elementi della nutrizione; **c** - trattenere l'acqua di pioggia e

cederla lentamente al partner durante prolungati periodi asciutti [fig. 5].

I licheni, data l'abbondanza di sostanza organica di cui sono costituiti, albergano – come ogni altro organismo vivente – batteri e, a volte, funghi saprofiti o parassiti. La possibile simbiosi tripla alga-fungo-batterio non sembra tuttavia trovare sostenitori tra i lichenologi anche se la presenza di alcuni azotobatteri – presenti nella medulla – risulta di fatto importante nella fissazione dell'azoto atmosferico. I talli possono inoltre ospitare:

a - funghi non lichenizzati talora visibili sulla superficie attraverso un insieme di puntini rossi o neri che possono essere scambiati con gli ostioli di periteci [v.o.]; **b** - alghe diverse da quelle dei gonidi; **c** - licheni parassiti. La riproduzione dei licheni avviene in due modi: riproduzione

sessuata, che coinvolge le sole spore del fungo e riproduzione vegetativa.

Quest'ultima ha luogo attraverso le **diaspore** [frammenti di tallo, soredi, isidi], vale a dire:

a – piccoli frammenti indifferenziati del tallo che si disperdono nell'ambiente alla ricerca di un substrato: questi frammenti contengono oltre alle ife anche qualche cellula algale²⁶; **b** – **soredi**: ammassi non corticati di ife e cellule algali specifiche. I soredi si formano in alcune zone del tallo chiamate **sorali** d'aspetto granuloso, pulverulento o farinoso; **c** – **isidi**: protuberanze del cortex superiore contenenti alghe e ife.

In tutti e tre questi casi la propagazione della specie avviene soprattutto al culmine dell'estate vale a dire quando il lichene è secco e può sbriciolarsi più facilmente disperdendosi così nell'ambiente circostante: le

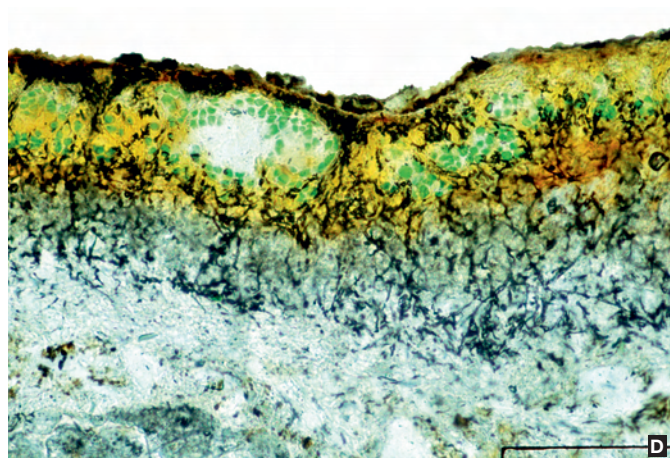
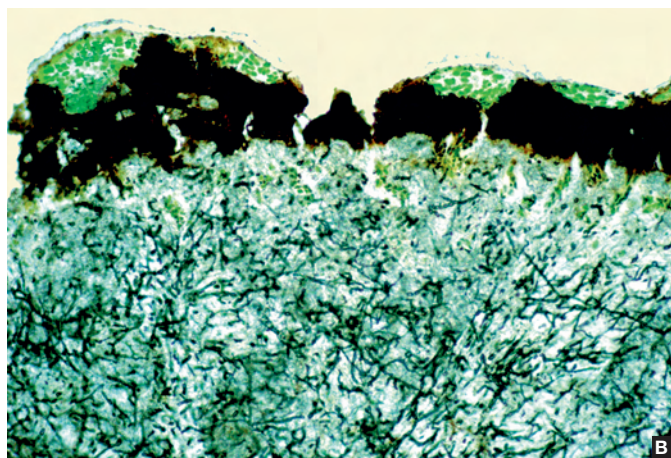
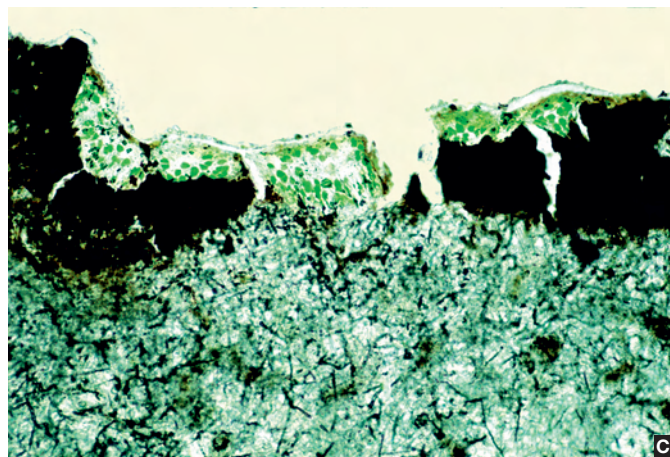
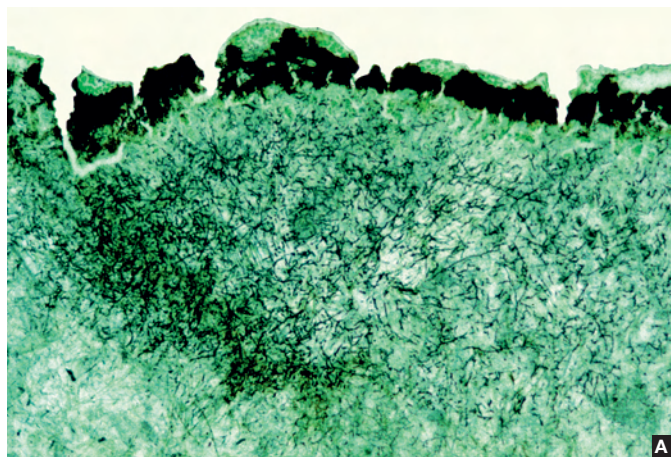


Fig. 5 - Licheni semiendolitici crostosi su calcari visti al microscopio da mineralogia in sezione sottile trasversale. Dall'esterno all'interno è possibile osservare: il tappeto algale verde, il tallo lichenico nero scuro [costituito da un intreccio di ife fungine]; la pietra sottostante appare perforata da un fitto network di ife che si protendono verso l'interno. Le ife svolgono una doppia funzione: *i* - servono ad ancorare l'individuo alla superficie della pietra carbonatica; *ii* - vanno alla ricerca degli elementi della nutrizione. Dallo studio di numerose sezioni sottili eseguite soprattutto su licheni in campo si è ricavata la profondità massima di penetrazione su calcari [10-15 mm] e su marmi [sino a 20 mm]. Questi dati sono in discreto accordo con quelli di letteratura. In tutti e quattro i casi il tallo lichenico è affogato per qualche centinaio di micron all'interno della pietra. Alla morte dell'individuo, oltre alla rete di microcanali aperti dalle ife non visibile ad occhio nudo, resterà al contrario ben visibile un'insula, vale a dire una caratteristica depressione a contorno alveolare.

²⁶ Nelle aree subdesertiche licheni interi possono staccarsi dal substrato [saranno frutticosi penso] e spostarsi: sono detti **licheni vagabondi** [Wanderflechten]. Tra questi *Lecanora esculenta*, semifrutticoso, è noto col nome biblico di "manna"; la maggior parte dei generi *Lecanora* è però crostosa.

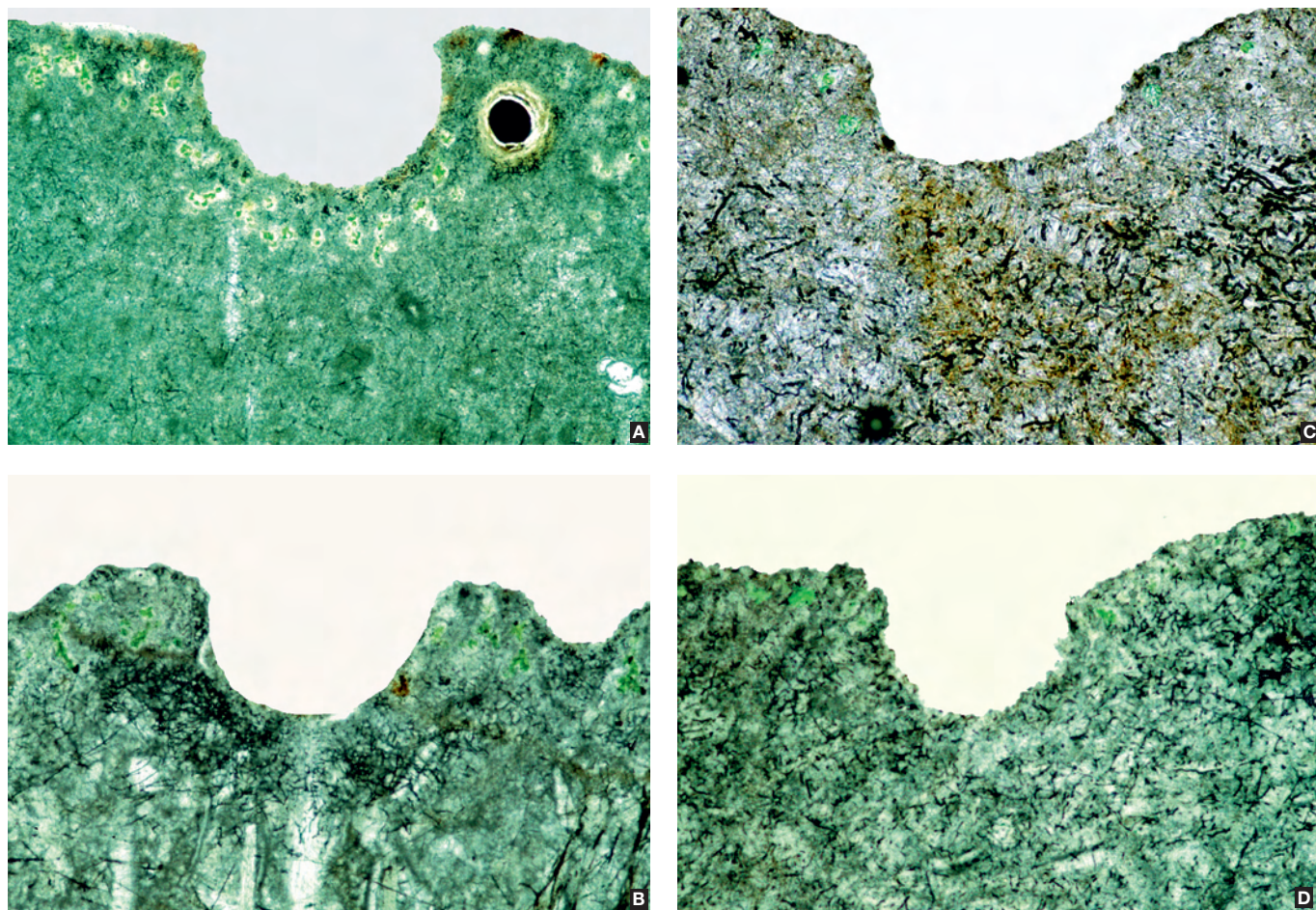


Fig. 6 - Licheni semiendolitici crostosi su calcari visti al microscopio da mineralogia in sezione sottile trasversale; particolari di corpi fruttiferi o ascocarpi tipo apotecii. Gli ascocarpi possono essere immersi nel tallo e quindi non interferire con la pietra sottostante oppure, come in questo caso, insediarsi nella pietra dando origine a una serie di emimicrosfere accostate a cui viene dato, come si è detto, il nome di pitting [cfr. fig. 4]. Anche il tappeto gonidiale verde appare insediato all'interno della pietra, ad una profondità tuttavia modesta [20-50 μm] dovendo svolgere proficuamente, raggiunto dalla radiazione solare, la fotosintesi clorofilliana.

cause possono essere il vento, l'acqua di pioggia ru-scillante o un animale che li urta.

Per quanto riguarda la riproduzione sessuata sono le spore del simbionte fungino che si disperdono nell'ambiente: queste germinando formano filamenti [le ife di cui si è detto che costituiscono il micelio] che possono catturare l'alga specifica ed entrare con essa in simbiosi formando un nuovo lichene²⁷. Queste spore sono contenute all'interno di ife vescicolari chiamate **aschi** racchiuse a loro volta in un corpo fruttifero detto **ascocarpo**. Gli **ascocarpi**, hanno due forme, quella a scodella o a tazza [**apoteci**] [fig. 6] e quella a fiaschetta [**periteci**]: i periteci possono talora essere completamente immersi nel tallo ed essere visibili esteriormente solo attraverso un poro detto **ostiolo** [fig. 7]. Nel caso di licheni crostosi endolitici presenti su pietre carbonatiche [calcari e marmi], apo-

tecii e periteci, oltre all'intero corpo lichenico [tallo] possono annidarsi all'interno della pietra formando caratteristiche cavità che dovranno comunque comunicare anch'esse con l'esterno attraverso l'ostiolo per consentire la disseminazione delle spore nell'ambiente²⁸ [fig. 8]. I periteci sono solitamente di piccola taglia, quelli di certe *Verrucaria* misurano solamente una frazione di millimetro altre specie hanno periteci più grandi.

Le caratteristiche che permettono a numerose specie di licheni di insediarsi sulla nuda roccia e di sfruttare un ambiente apparentemente così ostile sono numerose. Fra queste hanno un ruolo importante:

a - la resistenza al disseccamento e alle variazioni estreme di temperatura; **b** - la capacità non solo di aderire alle rocce, ma anche di penetrarvi e di assimilarne le sostanze minerali in esse presenti.

²⁷ *Trebouxia* è una delle alghe più diffuse della simbiosi lichenica. Essa è rara allo stato libero [a sé stante]. Ciò pone un problema: come fa la spora fungina diffusa nell'ambiente e germinata a catturarla e a dar vita al nuovo lichene? Come fa a trovarla?

²⁸ A questo aspetto del problema verranno dedicate diverse righe nelle pagine che seguono.

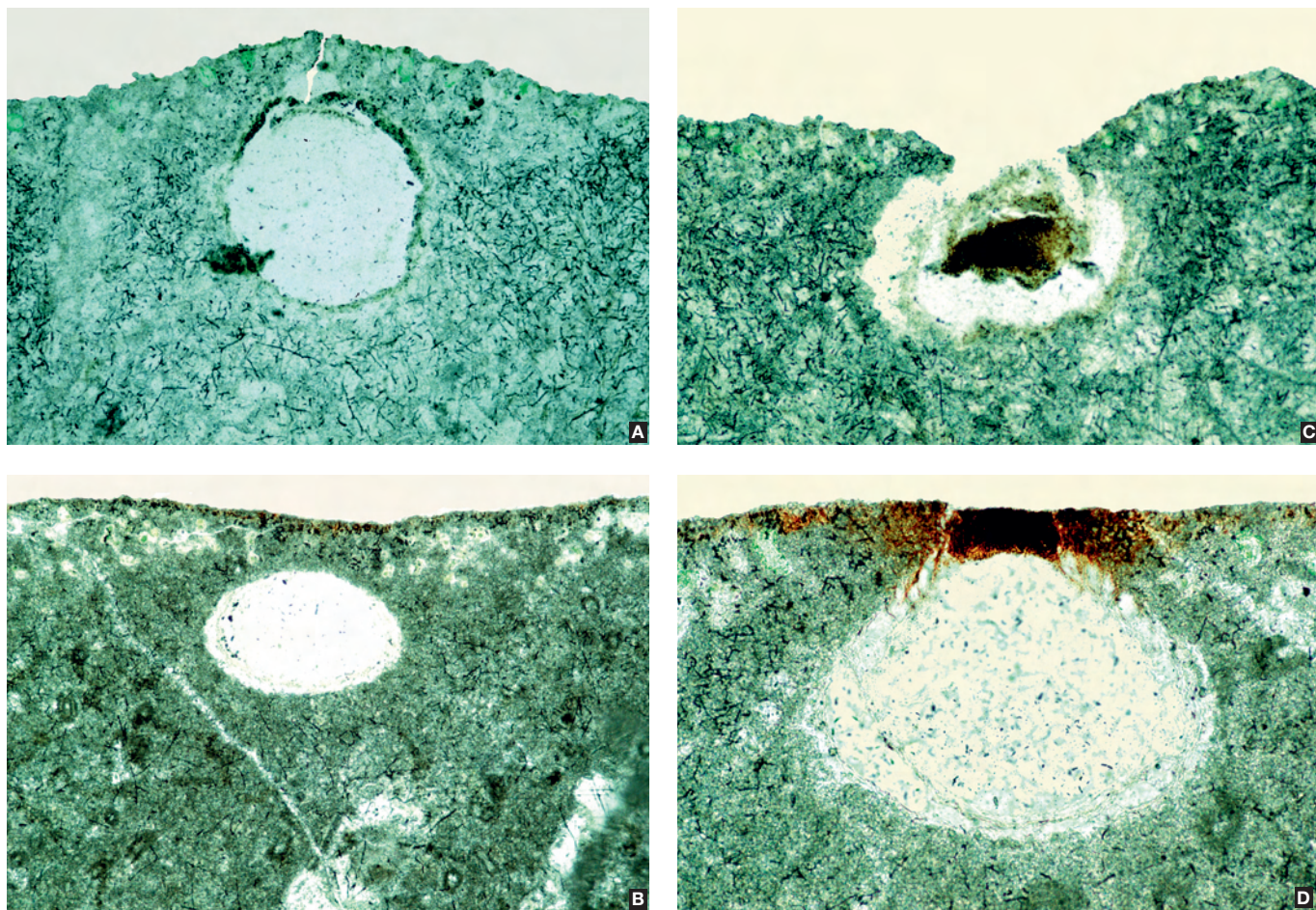


Fig. 7 - Licheni semiendolitici crostosi su calcari visti al microscopio da mineralogia in sezione sottile trasversale; particolari di corpi fruttiferi o ascocarpi tipo periteci vale a dire di corpi fruttiferi a forma di fiaschetta, interamente insediati all'interno della pietra e comunicanti con l'esterno solo attraverso una piccola apertura chiamata, come si è detto, ostiolo. Attraverso l'ostiolo le spore fungine verranno disperse, una volta giunte a maturazione, nell'ambiente. Attorno ai periteci è ben visibile il fitto network di ife e, a fianco dell'ostiolo, il tappeto algale anch'esso insediato in piccole cellette allineate all'interno della pietra.

Il biodegrado d'altronde si protrae per tempi lunghi a causa: **a** - della longevità; **b** - del lento tasso di accrescimento commisurato al lento rilascio di nutrienti da parte dei minerali delle rocce colonizzate²⁹. Occorre sottolineare che i licheni crostosi a causa della biomassa estremamente ridotta e della struttura del loro tallo, sono difficili da studiare: per questo motivo la stragrande maggioranza dei dati di letteratura, soprattutto di carattere biochimico, *ergo* la quasi totalità dei lavori qui citati, riguardano altre categorie di licheni vale a dire o fogliosi e fruticosi³⁰.

3 - LE SOSTANZE LICHENICHE

Con i termini "sostanze licheniche" o acidi lichenici si indicano una serie numerosissima di composti [ne sono stati identificati diverse centinaia] presenti all'interno dei licheni viventi [anaboliti] o che hanno origine per decomposizione dopo la loro morte [cataboliti]³¹. Queste "sostanze" non rappresentano una caratteristica specifica dei licheni: anche le piante superiori producono sostanze secondarie come la lignina, gli antociani o i terpeni che, così come nel caso dei licheni, si distinguono

²⁹ Questo accrescimento ha un massimo nella stagione primaverile e rallenta sia d'estate quando il caldo provoca un eccessivo disseccamento del tallo, sia durante l'inverno quando fa troppo freddo. La velocità di accrescimento può essere valutata, in modo indiretto, su supporti datati come ad esempio le pietre tombali: in tal caso è naturalmente il tallo più sviluppato che dà indicazioni sulla velocità di crescita. Meno utili appaiono invece le morene [depositi glaciali] in quanto i licheni potevano essere già presenti prima della loro messa in posto. Nel fare questo tipo di valutazioni si presume - e ciò è ragionevole - che la pietra nuda, una volta "messa in posto", venga immediatamente colonizzata dai licheni.

³⁰ Cfr. *infra*, nota 54.

³¹ Vi sono generi in cui è presente una sola sostanza (ad esempio: atranorina oppure acido usnico, senza altre sostanze imparentate), che viene denominata dai lichenologi "solitaria", ma nella maggior parte dei casi è presente un insieme di sostanze, imparentate tra loro, definita, sempre dai lichenologi come "chemosindrome". Cfr.: Asahina Y. and S. Shibata "Chemistry of Lichen Substances" Japan Society for the Promotion of Science, Tokyo, 1954; Cordoba V. "Fisiologia de las substancias liquenicas" Alhambra, 1975; Huneck S. and I. Yoshimura "Identification of Lichen Substances", Springer, Berlin, 1996.

da quelle primarie derivanti dalla fotosintesi e dalla respirazione. Nei licheni una piccola parte di queste sostanze restano all'interno delle cellule, altre si accumulano nella membrana, ma la maggior parte sono secrete all'esterno e possono venire osservate sotto forma di minuscoli cristalli o granulazioni disposte alla superficie delle ife. La loro concentrazione varia dal 0,15 al 10 % del peso del lichene secco³². Poiché alcune di queste sostanze sono specie-specifiche la loro presenza può essere utilizzata dagli specialisti a fini tassonomici e per una rapida identificazione dei licheni. La mag-

gior parte sono prodotte dal fungo la cui attività è condizionata sia da fattori intrinseci quali l'età del tallo, sia da fattori estrinseci, quali le caratteristiche ecologiche e microclimatiche dell'*habitat*. Non v'è dubbio tuttavia che la simbiosi con l'alga svolga un ruolo molto importante: è stato infatti dimostrato che esistono notevoli differenze tra le sostanze prodotte dal fungo isolato e "coltivato" a se stante in laboratorio e quelle prodotte quando questo è in simbiosi con l'alga nel lichene: molte poi sono state osservate in natura solo durante questi studi vale a dire che solo i licheni sono in grado di sintetizzar-

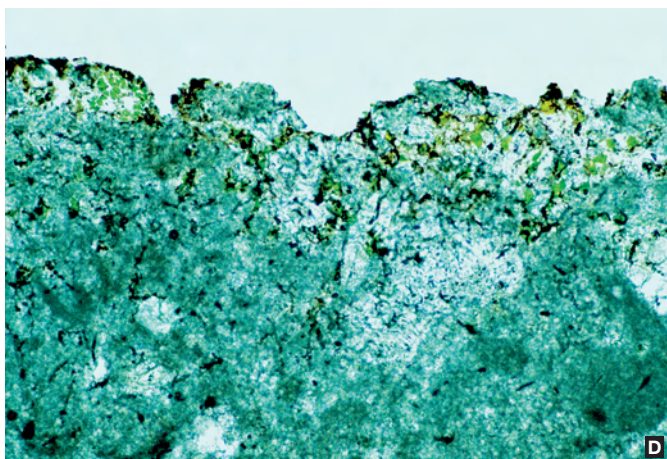
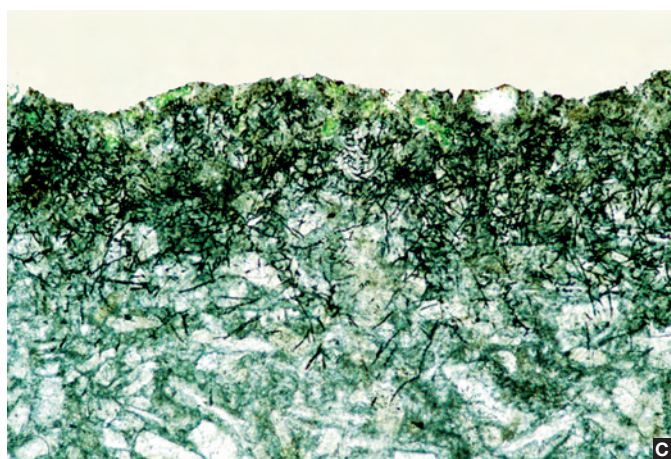
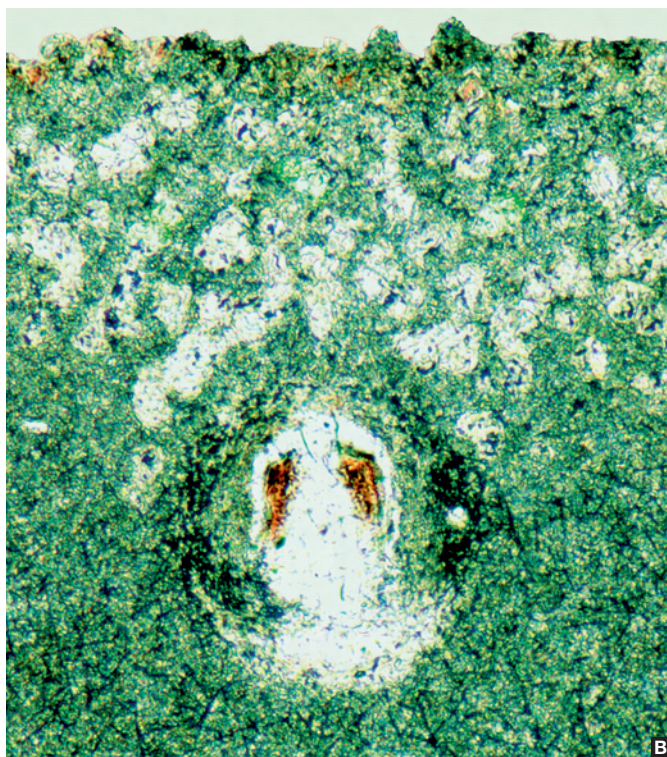
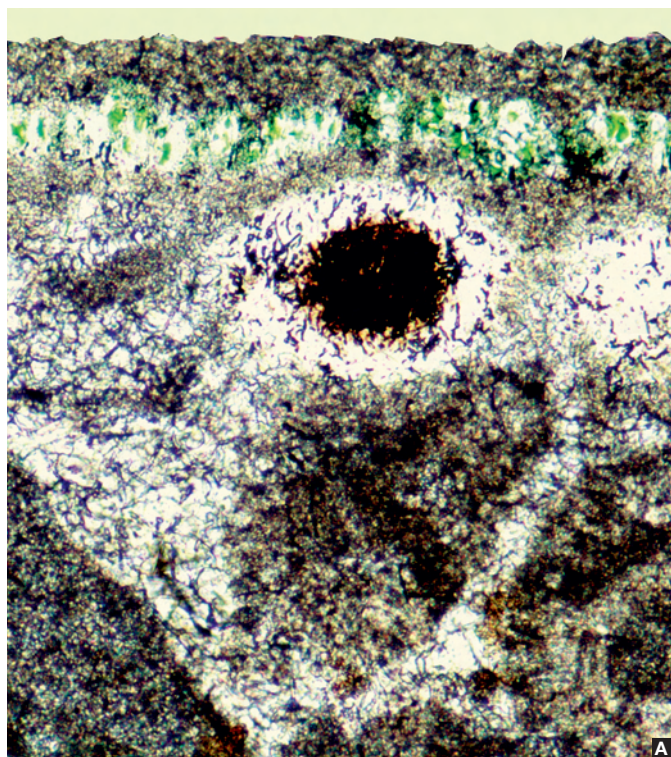


Fig. 8 – I licheni endolitici si presentano al microscopio da mineralogia in sezione sottile trasversale con aspetti diversi. Possono avere il tallo, a forma sub sferica, collocato a qualche millimetro di profondità dalla superficie della pietra col tappeto algale, anch'esso endolitico, sovrastante, in posizione ottimale per svolgere la fotosintesi [a e b]; il tallo può più comunemente apparire frammentato e quindi può essere difficilmente osservato in sezione sottile trasversale [c e d]. In ogni caso la cribratura interna della pietra costituisce un danno tanto notevole quanto difficilmente valutabile mediante osservazioni ad occhio nudo.

³² Ozenda, P. et G. Clauzade, *cit.*, p. 72. In realtà i dati riportati in letteratura a questo proposito sono estremamente discordanti.

le. La funzione della maggior parte di queste sostanze è ancora poco nota e ciò è dovuto alla difficoltà di coltivare i licheni in laboratorio monitorando i fenomeni di biosintesi durante la crescita dell'individuo: nel corso di esperimenti di questo tipo il fungo tende a separarsi [a divorziare] dall'alga. A cosa servono? *"A tutt'oggi sono state avanzate molte ipotesi sulle possibili funzioni biologiche delle sostanze licheniche. Sembra ormai assodato che alcune sostanze (es: acidi usnici, depsidi, depsidoni, derivati dell'acido pulvinico) abbiano un ruolo come agenti antimicrobici, in particolare nei confronti dei batteri gram-positivi, e di vari funghi. Alcune sostanze risultano inoltre inibire la germinazione dei semi delle piante vascolari e la crescita e la germinazione delle spore di alcune specie di briofite e di licheni. È stato inoltre sperimentalmente dimostrato che determinate sostanze licheniche rendono inappetibili i talli a lumache e artropodi, assicurando un certo vantaggio selettivo alle specie che le producono. Questa è la ragione per cui, ad esempio, i licheni si conservano molto bene negli erbari, senza richiedere opere di disinfezione anche dopo decenni. Alcune sostanze licheniche fenoliche, in particolare quelle che vengono deposte nel cortex del tallo lichenico, servono per schermare l'eccessiva intensità luminosa che danneggerebbe la popolazione di alghe presenti all'interno del lichene. Un'altra ipotesi sostiene che, grazie alle proprietà chelanti di alcune sostanze licheniche nei confronti dei cationi bivalenti, esse possano avere un ruolo chiave nei processi di bioalterazione delle rocce e nell'assunzione di nutrienti essenziali per la crescita dell'alga e del fungo. Negli ultimi anni è stato infine ipotizzato che la deposizione delle sostanze licheniche sulle pareti cellulari delle alghe giochi un ruolo fondamentale nel determinare il flusso di sostanze tra i partner della simbiosi"*³³.

Vediamo cosa aggiungere soprattutto ai fini di questa nota, vale a dire il biodegrado dei monumenti in pietra. Le sostanze licheniche sono tutte solubili in alcool, etere, acetone, cloroformio e altri composti organici³⁴, cristallizzano facilmente per evaporazione delle loro soluzioni e hanno punto di fusione compreso tra 125-250 °C; sono invece pochissimo solubili in acqua [con l'eccezione dello ione ossalato] ma nonostante ciò è

certo che svolgono un'azione importantissima sull'alterazione dei minerali. Essendo quasi tutte dei **leganti chelanti** agiscono attraverso la **chelazione** fenomeno che consiste nella formazione di complessi con i cationi metallici, estratti dai minerali con cui vengono a contatto³⁵. Secondo molti ricercatori, soprattutto russi che per primi hanno studiato la cosa, questo fattore del *weathering* è altrettanto importante se non addirittura più importante della dissoluzione-idrolisi, ossidazione, idratazione, carbonatazione. Apparentemente, come si dirà poi, tra questi leganti il più abbondante, diffuso e attivo in quanto maggiormente solubile è lo ione ossalato [C₂O₄]²⁻: in realtà sono rari gli studi sull'effetto di altre sostanze singole e, di solito, in letteratura negli studi di laboratorio sul *weathering* delle rocce operato dai licheni vengono riportati i risultati dell'effetto complessivo lichene-roccia.

Ad esempio una sospensione di polvere di granito di Evora [Portogallo] e polvere di lichene (*Coloplaca* spp e *Rhizocarpon* spp, tra i più comuni generi presenti su questi graniti) ha evidenziato dopo sei mesi una maggior concentrazione di Zn [10-11], Cu [6-7], K [4-5], Na [2,5-3,5], Ca [1,5-2] rispetto ad un analogo sospensione di sola polvere di granito in identica quantità d'acqua³⁶; anche Mg, P, S, Mo, Mn, Fe e V risultarono leggermente arricchiti. Si poté inoltre osservare che l'effetto chelante avveniva oltre che sugli elementi della nutrizione anche su quelli tossici come Cr, Cd o Pb anch'essi leggermente arricchiti nella soluzione contenente oltre al granito la polvere di lichene³⁷. Esperimenti come questo non lasciano dubbi sull'azione di demolizione operato dagli acidi lichenici sugli edifici cristallini: non ci dicono nulla invece su quale [o più verosimilmente quali] sostanza lichenica ha agito da chelante. Tuttavia utilizzando acidi lichenici puri (physodico, lobarico, lecanorico e atranorinico) si poté notare, nonostante la scarsissima solubilità di queste sostanze, fenomeni d'interazione chelante-granito già dopo poche ore. Queste osservazioni, fatte da chi scrive, nel 1996, risultarono in ottimo accordo con i risultati raggiunti circa trent'anni prima da Albert Schatz un pioniere degli studi sull'azione chelante delle sostanze licheniche e uno dei massimi sostenitori dell'importanza fondamentale dei licheni nei processi di

³³ Baruffo L., Tretiach M., Zedda L. e C. Leuckert **"Sostanze licheniche: come riconoscerle e perché"** Nat. Soc. Lich. Ital., **14**, p. 9, 2001.

³⁴ Che vengono utilizzati per l'estrazione-separazione delle sostanze licheniche durante le analisi in cromatografia su strato sottile [TLC: Thin Layer Chromatography].

³⁵ Che rinserrano come tra le chele di un granchio: di qui il nome **chelazione**. Il processo di idrolisi di minerali come i feldspati, principali minerali del granito, porta in soluzione K⁺, Na⁺ e Ca⁺⁺ alzandone così il pH e bloccando ben presto l'attacco. Se questi cationi vengono chelati, vale a dire sottratti dalla soluzione, il processo di *weathering* può invece procedere. I chelati possono formarsi per contatto intimo solido-solido, anche se il chelante è pochissimo solubile, purché in presenza di un film liquido che permetta il trasporto degli ioni. Gli acidi lichenici depositati sotto forma di minuscoli cristalli sulla parete delle ife fungine che si addentrano nella roccia si trovano appunto in strettissimo contatto coi minerali, situazione ottimale perché questo processo possa aver luogo. Inoltre le ife **esploratrici** sono costantemente alimentate d'acqua attraverso le ife rinserrate del tallo con cui sono in comunicazione idraulica. Si può anche ipotizzare che l'acqua oltre a raggiungere l'apice dell'ifa esploratrice e averne favorito - attraverso processi di idrolisi, chelazione e meccanici - la penetrazione, risalga nel tallo arricchita nei macro e microelementi della nutrizione. Attraverso gli austori questi elementi vengono ceduti, in gran parte, all'alga.

³⁶ Le misure vennero corrette sottraendo le percentuali di elementi rilasciati nello stesso periodo dalla stessa quantità di sola polvere di lichene dispersa nella stessa quantità d'acqua. La polvere di granito prima di essere utilizzata venne trattata con una soluzione di HCl e acqua 0,002 N per allontanare le basi scambiabili e successivamente lavata con acqua distillata; cfr. nota seguente.

³⁷ Le condizioni sperimentali sono le stesse riportate da Schatz [cfr., *infra*, nota 38]: 5 g di polvere di granito e 0,5 g di polvere di lichene secco, ecc.. Cfr.: Del Monte M. **"Experimental weathering test on granitic rocks"** In Conservation of granitic rocks with application to the megalithic monuments. CE Research report n. 5 (J. Delgado-Rodrigues ed.), pp.192-193, 1996.

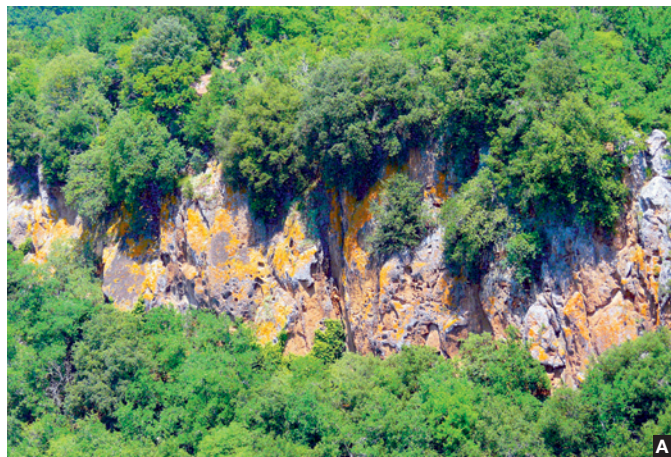


Fig. 9 – Le pareti sub verticali esposte a mezzogiorno, vale a dire ben illuminate appaiono completamente tappezzate di licheni soprattutto se, come in questo caso, la roccia è silicea. Il confronto tra il pH dell'acqua di pioggia raccolta in situ [6,8] e quella che gocciolava alla base della parete dopo aver interagito col tappeto lichenico [3,9] ha permesso di evidenziare la cessione da parte dei licheni di "sostanze licheniche" a reazione acida. L'analisi ha rilevato tracce dosabili di acido ossalico. Questa osservazione, ripetuta da chi scrive in vari siti, non ci dice nulla sulle quantità in gioco ma, serve comunque a dimostrare la capacità dei licheni di cedere acido ossalico alla soluzione circolante [dintorni di Norchia, VT, ignimbrite tefritica].

disgregazione-pedogenesi delle rocce. Schatz utilizzando gli acidi phisodico e lobarico poté dimostrare la loro rapida e marcata azione su granito e mica. Essendo le due sostanze licheniche utilizzate, come quasi tutte le altre, come si è detto, praticamente insolubili l'unico processo ragionevole invocato da Schatz per spiegare i fenomeni osservati fu la chelazione³⁸.

In letteratura parlando della chelazione dei metalli si accenna, senza però fornire alcuna spiegazione, in particolare all'acido lecanorico³⁹, un appartenente ai depsi-di, presente nel genere *Lecanora*. Sebbene questa sostanza, solida cristallina, sia poco solubile in acqua essa reagisce facilmente, come appena detto subito sopra, con polvere di granito portando dopo poche ore alla formazione di un complesso color rosso ruggine indice certo della chelazione di cationi metallici quindi di *weathering* della polvere cristallina. Sulla base dei dati appena riassunti si può dire che se fra i chelanti quello di gran lunga più citato parlando di biodegrado delle rocce è lo ione ossalato ciò è dovuto soprattutto al fatto che oltre a formare ioni tipo ferro-triossalato, o rame-triossalato o cobalto triossalato porta anche, combinandosi con cationi bivalenti – principalmente Ca^{++} – alla formazione di minerali stabili e quindi facilmente evidenziabili in qualunque fase del *weathering*⁴⁰. Come si è visto non si può però escludere, anzi è più che certo,

che altre sostanze licheniche siano altrettanto importanti nel *weathering* delle rocce.

4 – CONDIZIONI AMBIENTALI

I licheni sono praticamente tutti vegetali eliofili: per la stragrande maggioranza di essi la ricchezza di specie e di individui aumenta con la luminosità della stazione come è possibile constatare sulle rocce in campo sia calcaree, sia silicee⁴¹ [fig. 9]. La luce agisce sul tasso di fotosintesi e sull'eccesso possibile di questo sulla respirazione: i licheni hanno da 4 a 10 volte meno clorofilla, a parità di peso, delle piante superiori e quindi esigenze di luce molto più grandi⁴². La fotosintesi è naturalmente nulla quando è buio ed aumenta regolarmente con l'aumentare della luce sino a raggiungere un punto di equilibrio con la respirazione detto **punto di compensazione**. Nel bilancio positivo tra fotosintesi e respirazione, che porta alla crescita dell'individuo, avrà sicuramente un ruolo importante anche il fungo tenuto conto del fatto che costituisce la stragrande maggioranza della massa del tallo [che può arrivare sino al 90÷95% in peso]⁴³.

In generale si può dire che se la luminosità è alta, la crescita è maggiore: tuttavia occorre anche tenere presente che la forte insolazione porta al disseccamento

³⁸ Schatz A. "Chelation in nutrition: Soil Microorganism and Soil Chelation, the Pedogenic Action of Lichens and Lichen Acids" Journ. Agriculture and Food Chemistry, 11, pp. 112-118, 1963.

³⁹ I precursori dell'acido lecanorico sono – a livello puramente teorico - l'acetico e l'orsellinico. Da 4 molecole di a. acetico per perdita di 4 molecole d'acqua si forma una molecola di a. orsellinico; da due molecole di a. orsellinico con perdita di una molecola d'acqua si forma una molecola di a. lecanorico. Importante sarebbe anche l'atranorinico cfr.: Ozenda, P. et G. Clauzade "Les lichens ..." cit., p. 125, 1970.

⁴⁰ Cfr., *infra*, par. 6.

⁴¹ Solo alcuni licheni a cianofeece preferiscono le foreste ombrose, ma sembra che ciò sia soprattutto dovuto all'alto tasso di umidità. Anche i generi *Xanthoria* e *Coloplaca* possono crescere all'ombra, ma in tal caso gli individui sono, di regola, poco numerosi.

⁴² Ciò non toglie che il bilancio resti in ogni caso debolmente positivo e che la loro crescita, come già notato, sia molto lenta. Per la profondità di insediamento dei licheni endolitici risulta ovviamente fondamentale la maggiore o minore trasparenza della roccia; cfr.: Hall K., Guglielmin M. and A. Strini "Weathering of granite in Antarctica: I. Light penetration into rock and implications for rock weathering and endolithic communities" Earth Surf. Process. Landforms, 33, pp. 295-307, 2008.

⁴³ Quello che viene chiamato comunemente lichene è il fitto intreccio di ife che costituisce il tallo.

del lichene e a una conseguente forte diminuzione della trasparenza del *cortex* superiore: la trasmissione della luce può ridursi allora del 50-80% diminuendo di conseguenza, e in proporzione, la fotosintesi. Particolarmente favorevoli appaiono quindi le giornate leggermente nuvolose con cielo parzialmente velato soprattutto la mattina presto in corrispondenza del punto di rugiada.

I licheni nel loro insieme rappresentano un gruppo estremamente plastico ma ogni singola specie ha delle precise esigenze che sono determinate da tre insiemi di fattori ecologici: **a** - il substrato; **b** - le caratteristiche dell'atmosfera; **c** - l'azione degli altri esseri viventi che disputano loro gli areali.

Dato che non sono in grado di trattenere se non per breve tempo l'acqua liquida di pioggia come le piante superiori sono tutti estremamente sensibili alla piovosità della stazione. Si può dire che esiste una stretta correlazione geografica tra abbondanza di licheni e distribuzione delle piogge nell'arco dell'anno. Più queste sono numerose e ben distribuite maggiore è il numero degli individui⁴⁴.

Su rocce messe in posto da poco [ad esempio le colate laviche basaltiche delle isole oceaniche] la colonizzazione delle superfici avviene secondo una precisa successione: 1 - licheni crostosi; 2 - piccoli fogliosi; 3 - grandi fogliosi; 4 - fruticosi. Sempre in linea generale, in ambienti non estremi, prevalgono nettamente sui diversi tipi di pietre i licheni crostosi semiendolitici [e/o epilittici] il cui colore, spesso, ma non sempre, è legato alla natura del substrato e/o all'ambiente: bianco su pietre carbonatiche [*Arthopyrenia conoidea*], grigio, giallo vivo o giallo-verdastro su pietre povere di calcio [*Rhizocarpon geographicum*], nero dove l'umidità è elevata [*Placynthium* o *Collema*]⁴⁵. Esiste invece una stretta relazione tra specie di licheni nitrofilii e stazioni di deiezioni di uccelli: queste specie proliferano sulle pareti rocciose a valle di quelle nidificate⁴⁶. Come si preciserà meglio in seguito le aree colonizzate dai licheni dipendono, nelle

rocce carbonatiche, dalla geometria delle superfici: vengono colonizzate solo le parti aggettanti, mentre i sottosquadri vengono ignorati [fig. 10]; nei graniti, e in altre rocce silicatiche, invece la colonizzazione appare generalizzata [fig. 11]. Definire con esattezza le aree colonizzate in funzione della geometria, dell'esposizione o altro, risulta fondamentale per decodificare i "segni del tempo" lasciati dai licheni su antichi monumenti che un tempo colonizzavano⁴⁷ e che si trovano ancor'oggi in campo aperto, ovvero su quelli che, dopo aver trascorso periodi più o meno lunghi all'aperto sperimentando il biodegrado, sono stati poi trasferiti nelle raccolte museali.

5 - LICHENI E INQUINAMENTO ATMOSFERICO⁴⁸

I licheni sono pressoché spariti – salvo rare eccezioni – da tutte le grandi città pollutate; ciò è dovuto alla cattiva qualità dell'aria e in particolare alla presenza in atmosfera di composti dello zolfo, primo fra tutti l' SO_2 ⁴⁹. Già nel 1866 Nylander poteva scrivere: "I licheni danno a modo loro una misura della salubrità dell'aria e rappresentano degli igrometri molto sensibili"⁵⁰. In effetti l' SO_2 , causando attraverso un processo di ossidazione la distruzione della clorofilla dell'alga, diminuisce fortemente la fotosintesi e la respirazione, impedendo la vita alla maggior parte delle specie o peggiorandola notevolmente⁵¹. Mancando infatti nei licheni gli stomi e la cuticola, questi assorbono le sostanze gassose attraverso l'intera superficie del corpo – tallo – rispondendo così più velocemente di altri organismi alle mutate condizioni ambientali. Fanno eccezione, se l'inquinamento atmosferico non è esasperato, alcuni generi di *Lecanora* (*L. albescens*, *L. dispersa*, *L. conizaeoides* e *L. muralis*) e di *Caloplaca* (*C. citrina* e *C. lithophila*). Particolarmente resistente sembra essere *Lecanora dispersa* anche se il numero di individui presenti sulle superfici, secondo

⁴⁴ Kershaw K.A. "Physiological ecology of lichens" Cambridge University Press, p. 30, ivi, 1985.

⁴⁵ Poco si può dire su quelli endolitici che, essendo praticamente invisibili dall'esterno, possono essere evidenziati solo attraverso fortunate sezioni sottili trasversali. Come si dirà poi sono stati osservati con una certa frequenza solo su rocce carbonatiche, mai sui graniti. È pur vero che le sezioni eseguite su calcari e marmi, nel corso di questa ricerca, sono state di gran lunga superiori a quelle eseguite su graniti.

⁴⁶ I licheni che sono maggiormente caratteristici di questi siti, ricchissimi in composti azotati, vengono chiamati dagli specialisti *ornitocoprofili*.

⁴⁷ Prima della Rivoluzione Industriale a cui non corrisponde un periodo preciso: in Inghilterra è avvenuta, ad esempio molto prima che in Italia; in Cina, India, Corea sta avvenendo in questi ultimi decenni; in molti altri paesi del globo, come è a tutti noto, deve ancora attuarsi.

⁴⁸ È intenzione di chi scrive di dedicarsi, nei prossimi mesi, alla stesura di un lavoro dal titolo "L'inquinamento atmosferico e il degrado dei monumenti in pietra". Sarà in quella sede che verranno illustrati più diffusamente numerosi aspetti inerenti il problema "qualità dell'aria e vivibilità dell'ambiente". Sull'argomento "licheni e inquinamento atmosferico" esiste una letteratura imponente; cfr.: Henderson A. "Literature on air pollution and lichens XXX-VII" *Lichenologist*, **25**, 2, pp. 191-202, 1993; *ibidem*, XXXVIII, **25**, pp. 435-441, 1993; *ibidem*, XXXIX, **26**, 2, pp.193-203, 1994; *ibidem*, XL, **27**, pp. 383-390, 1994; *ibidem*, XLI, **27**, pp. 225-234, 1995; *ibidem*, XLII, **27**, pp. 395-404, 1995; *ibidem*, XLIII, **28**, pp. 279-285, 1996; *ibidem*, XLIV, **28**, pp. 603-612, 1996; *ibidem*, XLV, **29**, pp. 283-290, 1997; *ibidem*, XLVI, **29**, pp. 587-595, 1997; *ibidem*, XLVII, **30**, pp. 279-286, 1998; *ibidem*, XLVIII, **31**, pp. 111-119, 1999; *ibidem*, XLIX, **32**, pp. 89-102, 2000. A queste reviews vanno ovviamente aggiunti i lavori pubblicati negli ultimi anni.

⁴⁹ Del Monte M. "Trajan's Column: Lichens don't live here anymore" *Endeavour*, **15**, 2, pp. 86-93, 1991; Wadleigh, M. A. and D. M. Blake "Tracing sources of atmospheric sulphur using epiphytic Lichens" *Environ. Pollut.*, **106**, pp. 265-271, 1999. Alcune specie sono inoltre particolarmente sensibili anche all'acidificazione da acido nitrico: cfr.: van Herk C.M., Mathijssen-Spiekman E.A.M. and D. De Zwart "Long distance nitrogen air pollution effects on lichens in Europe" *Lichenologist*, **35**, 4, pp. 347-359, 2003.

⁵⁰ Cfr. *supra*, nota 2. È stato di recente dimostrato che i licheni possono essere vantaggiosamente utilizzati anche per monitorare il riscaldamento globale dell'ambiente. Cfr.: van Herk C.M., Aptroot A. and H.F. van Dobben "Long-term monitoring in the Netherlands suggests that lichens respond to global warming" *Lichenologist*, **34**, pp. 141-154, 2002.

⁵¹ Häffner E., Lomsk B., Hynek V., Hällgren J.E., Bati C.F. and H. Pfanz "Air Pollution and Lichen Physiology: physiological responses of different lichens in a transplant experiment following an SO_2 -gradient" *Water, Air, and Soil Pollution*, **131**, pp. 185-201, 2001.



Fig. 10 – Nelle regioni rurali lontane da siti industrializzati, dove la qualità dell'aria è ancor'oggi buona, i licheni tendono a colonizzare completamente le parti aggettanti [sporgenti] delle pietre carbonatiche [calcari e marmi] vale a dire le aree non solo più illuminate ma soprattutto soggette all'azione diretta dell'acqua liquida di pioggia. Quindi sia le aree sub-orizzontali, sia quelle sub-verticali che limitano verso l'esterno il motivo ornamentale; i sottosquadri e le aree sottostanti arretrate appaiono invece quasi sempre ricoperte da una patina bruno camoscio assai caratteristica costituita da ossalati di calcio. Essa ha lo spessore massimo di alcune centinaia di μm , ed è spesso rimata vale a dire è formata da numerosi film sovrapposti. Sulla genesi della patina si parla lungamente nel testo a cui qui si rimanda. Tre sono i possibili motivi per cui queste aree non sono colonizzate: a - è probabile che i licheni non gradiscano aree ricche in ossalato di Ca che per loro rappresenta, principalmente, un prodotto di rifiuto; b - è probabile che i film sovrapposti di questa "vernice" impermeabilizzino la roccia sottostante rendendo da difficile a impossibile l'attecchimento delle diaspore; c - è probabile che queste zone dove vi è meno acqua o dove l'acqua si sofferma meno a lungo e che inoltre sono meno illuminate siano poco gradite ai pionieri per una eventuale colonizzazione. Quest'ultimo motivo è senza dubbio il meno probabile perché su pietre povere in calcio, come ad esempio i graniti [cfr. figura seguente], anche queste zone appaiono, molto spesso, colonizzate [Arco di Severo Alessandro, particolare, Thugga, Tunisia, calcare].

Ozenda e Clauzade, resterebbe sempre molto piccolo⁵². Al contrario, chi scrive, ha potuto notare che se un lichene è poco sensibile alla inquinazione atmosferica il suo areale aumenta molto nelle zone inquinate poiché tende ad occupare anche le aree lasciate libere dalle specie più sensibili.

Partendo dal fatto che esistono specie più sensibili all'inquinamento e altre che lo sono meno⁵³ è stato possibile - correlando specie licheniche con tenori di SO_2 in aria - costruire carte della distribuzione delle specie che di fatto

sono anche carte della maggiore o minore severità dell'inquinamento atmosferico degli areali presi in considerazione e in particolare della loro acidificazione⁵⁴.

L'uso dei licheni come bioindicatori per il monitoraggio ambientale presenta numerosi vantaggi tra cui quello che, vivendo a lungo, danno una misura integrata nel tempo della qualità dell'aria di un sito attraverso una ampia serie di dati e poi, fatto tutt'altro che irrilevante, una ricerca che utilizzi questa metodica ha un rapporto costi/benefici estremamente basso⁵⁵. Oltre a dare preci-

⁵² Ozenda et Clauzade, *cit.*, p. 116.

⁵³ Silberstein L., Siegel B.Z., Siegel S.M., Mukhtar A. and M. Galun "Comparative Studies on *Xanthoria parietina*, a Pollution-Resistant Lichen, and *Ramalina duriaei*, a Sensitive Species. II. Evaluation of Possible Air Pollution-Protection Mechanisms" *Lichenologist*, **28**, 4, pp. 367-383, 1996; Bermudez G. M.A., Rodriguez J.H. and M.L. Pignata "Comparison of the airpollution biomonitoring ability of three *Tillandsia* species and the lichen *Ramalina celastri* in Argentina" *Environmental Research*, **109**, pp. 6-14, 2009.

⁵⁴ Per queste ricerche sono stati quasi sempre utilizzati licheni epifiti; cfr.: Yazici K. and A. Aslan "Distribution of Epiphytic Lichens and Air Pollution in the City of Trabzon, Turkey" *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **77**, pp. 838-845, 2006.

⁵⁵ Cfr.: van Dobben H.F. and C.J.F. Ter Braak "Ranking of epiphytic lichen sensitivity to air pollution using survey data: a comparison of indicator scales" *Lichenologist*, **31**, pp. 27-39, 1999; Pinho P., Augusto S., Branquinho C., Bio A., Pereira M.J., Soares A. and F. Catarino "Mapping Lichen Diversity as a First Step for Air Quality Assessment" *Journ. Atm. Chemistry*, **49**, pp. 377-389, 2004.



Fig. 11 – Le superfici dei monumenti in granito, se i tenori di inquinanti aereo dispersi sono bassi, vengono completamente colonizzate dai licheni, inclusi i sottosquadri: mancano patine da interazione e anche i biominerali, come viene spiegato nel testo, sono molto rari [Santiago de Compostela, Cattedrale di San Giacomo, particolare, Galizia, granito].

se indicazioni sui tenori di SO_2 in aria⁵⁶ i licheni, non essendo in grado di eliminare gli elementi tossici [metalli pesanti, isotopi radiattivi]⁵⁷ attraverso l'escrezione come fanno le piante superiori, e accumulandoli così all'interno del tallo, potranno fornire importanti informazioni sull'inquinamento da metalli del sito che abitano e talora anche sulla sorgente: traffico veicolare, riscalda-

mento urbano, centrale di potenza per la produzione di energia elettrica o altri produttori di metalli o di radionuclidi⁵⁸. Da tempo è invalso l'uso tra i ricercatori non solo di utilizzare per questi scopi le popolazione di licheni che abitano un certo areale ma anche di trasferirli da zone "pulite" a zone pollutate per studiarne, in condizioni controllate, il comportamento⁵⁹.

⁵⁶ L' SO_2 si ossida facilmente a SO_3 che viene catturata immediatamente dalle goccioline d'acqua di nebbia o di pioggia trasformandosi in H_2SO_4 vale a dire in acido solforico. Cfr.: Del Monte M. and O. Vittori "Impact of air pollution on stone decay: the case of Venice" *Endeavour*, **9**, pp. 117-122, 1985.

⁵⁷ Strakhovenko V. D., Khozhina E.I., and B. L. Shcherbov "Distribution of Radioactive Cs and Trace Elements in the Lichen-Substrate System and in the Lichen Body" *Geochemistry Internat.*, **46**, 2, pp. 116-124, 2008.

⁵⁸ Falla J., Laval-Gilly P., Henryon M., Morlot D. and J.F. Ferard "Biological air quality monitoring: a review" *Environmental Monitoring & Assessment*, **64**, pp. 627-644, 2000; Cuny D., van Haluwyn C. and R. Pesch "Biomonitoring of Trace Elements in Air and Soil Compartments along the Major Motorway in France" *Water, Air, and Soil Pollution*, **125**, pp. 273-289, 2001; Saiki M., Horimoto L. K., Vasconcellos M. B. A., Marcelli M. P. and D. M. B. Coccoaro "Survey of elemental concentrations in lichen samples collected from São Paulo State" *Journ. of Radioanalytical & Nuclear Chemistry*, **249**, 2, pp. 317-320, 2001.

⁵⁹ Bari A., Rosso A., Minciardi M.R., Troiani F. and R. Piervittori "Analysis of heavy metals in atmospheric particulates in relation to their bioaccumulation in explanted *Pseudevernia furfuracea thalli*" *Environmental Monitoring & Assessment*, **69**, pp. 205-220, 2001; Garty J., Tomer S., Levin T. and H. Lehra "Lichens as biomonitors around a coal-fired power station in Israel" *Environmental Research*, **91**, pp. 186-198, 2003; Bergamaschi L., Rizzio E., Profumo A. and M. Gallorini "Determination of trace elements by INAA in urban air particulate matter and transplanted lichens" *Journ. of Radioanalytical & Nuclear Chemistry*, **263**, 3, pp. 745-750, 2005; Loppi S. and L. Frati "Lichen diversity and lichen transplants as monitors of air pollution in a rural area of central Italy" *Environmental Monitoring & Assessment*, **114**, pp. 361-375, 2006.

I licheni hanno dimostrato, come appena detto, la loro scarsa adattabilità all'acidificazione dell'ambiente che ha caratterizzato vaste aree del pianeta negli ultimi decenni del secolo scorso e in particolare, come accennato all'inizio di questo paragrafo, le megalopoli; si è potuto inoltre dimostrare che, anche ambienti con valori di pH superiori alla norma [pH 7], come ad esempio le zone circostanti i cementifici, soggette al fall-out di particelle a reazione basica, non sono di loro gradimento⁶⁰. Sembra poi che i parametri che influenzano la distribuzione dei licheni nelle aree urbane e suburbane e che ne fanno, come appena detto, dei sensibili indicatori ambientali, siano diversi da quelli delle aree forestali⁶¹.

6 – BIOMINERALI

Col termine di biominerali si indicano tutte quelle sostanze sia cristalline sia amorfe la cui genesi è direttamente o indirettamente riconducibile all'attività di organismi viventi. Nel nostro caso, vale a dire parlando di licheni, i più noti e diffusi biominerali sono gli **ossalati** sia di calcio sia, anche se meno comunemente, di altri cationi metallici. Ciò è dovuto al fatto che fra tutti gli acidi prodotti dai licheni – in realtà dal solo fungo, se si esclude l'acido carbonico rilasciato invece dall'alga - il più solubile, il più abbondante e il più forte è per l'appunto l'acido ossalico. Gli ossalati possono essere osservati sia all'interno dei licheni [vale a dire del tallo: ma anche questi in realtà sono esterni, v.o.]⁶², sia all'esterno quando l'acido ossalico eliminato, veicolato dall'acqua di pioggia, interagisce con le pietre soprattutto a valle delle zone colonizzate⁶³. È evidente che, fra tutte le pietre, calcari e marmi sono quelle che si prestano di più ad essere salificate e a mostrare poi i segni di questa reazione. Ciò perché: **a** - la base a disposizione, Ca(OH)_2 , è in quantità praticamente infinita rispetto alle quantità di acido in gioco; **b** – i sali che si formano sono relativamente insolubili e quindi potranno venire evidenziati

facilmente anche dopo molto tempo con tecniche strumentali. Molto diverso è il caso di pietre come i graniti dove i cationi a disposizione sono Na^+ [$\text{Na}_2\text{O} = 3,5\%$] e K^+ [$\text{K}_2\text{O} = 4,5\%$] mentre il Ca^{++} è presente in quantità modeste [$\text{CaO} = 1\%$ circa]⁶⁴. I sali di sodio e potassio che, teoricamente, potrebbero formarsi - essendo solubili e deliquescenti - non lasceranno alcuna traccia [v.o.] mentre i sali di calcio, se presenti, potranno essere evidenziati solo con grande difficoltà date le percentuali molto basse. Nel caso invece di basalti e rocce simili, i cationi a disposizione saranno Fe bivalente e trivalente [$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} = 12\%$], Ca^{++} [$\text{CaO} = 10\%$] e Mg^{++} [$\text{MgO} = 6\%$]: sarà quindi più probabile, almeno teoricamente, osservare su queste pietre ossalati di Ca [e Mg] ma non di Fe come si dirà brevemente nelle righe che seguono. Su substrati particolari si potranno infine formare ossalati particolari: si tratta di semplici curiosità mineralogiche che non hanno nessuna importanza per quanto riguarda questa nota.

Ma procediamo con ordine.

La secrezione di acido ossalico è una caratteristica di parecchie specie di funghi, appartenenti a quasi tutte le categorie sistematiche e sin dal lontano 1825 fu possibile a Braconnot determinare la presenza di ossalati di Ca nel tallo di alcuni licheni⁶⁵. Oggi sappiamo che questi minerali sono presenti nella stragrande maggioranza dei generi e delle specie e che sono particolarmente abbondanti, come già notato in precedenza, nei licheni crostosi soprattutto quando questi ultimi colonizzano substrati ricchi in calcio, vale a dire calcari, marmi, calcareniti o arenarie a cemento carbonatico⁶⁶. Le percentuali di ossalato di calcio contenute nei licheni possono essere rilevanti: Syers e collaboratori, ad esempio, trovarono in *Caloplaca flavescens*, *Aspicilia calcarea*, e *Rhizocarpon umbilicatum*, che colonizzavano superfici calcaree, tenori in ossalato di Ca superiori al 10% del peso del lichene secco⁶⁷. È inoltre noto che in esemplari della stessa specie la quantità di ossalato è tanto più elevata quanto più il lichene è vecchio⁶⁸. Nel tallo gli ossalati si trovano in

⁶⁰ Liblik V., Pensa M. and. A. Rätsep "Air pollution zones and harmful pollution levels of alkaline dust for plants" Water, Air, and Soil Pollution, **3**, pp. 193-203, 2003.

⁶¹ Giordani P. "Is the diversity of epiphytic lichens a reliable indicator of air pollution? A case study from Italy" Environmental Pollution, **146**, pp. 317-323, 2007; Polinik H., Simoni P. and F. Bati "Monitoring air quality with lichens: a comparison between mapping in forest sites and in open areas" Environmental Pollution, **151**, pp. 395-400, 2008.

⁶² Dagli studi dei lichenologi sappiamo che sono più abbondanti nei licheni crostosi che nei macrolicheni, soprattutto quelli gelatinosi, e - ovviamente - nelle specie calciofile piuttosto che nelle altre.

⁶³ In questa sede interessano solo i secondi.

⁶⁴ Questi passando in soluzione per idrolisi, favorita in ambiente acido, dissociano l' H_2O formando basi [Na(OH) , K(OH) , Ca(OH)_2] pronte ad essere salificate. Lo stesso vale per il Mg di cui si parla subito dopo. Diverso è il caso dell'Fe [v.o.].

⁶⁵ Braconnot H. "De la présence de l'oxalate de chaux dans le regne mineral: existence du même sel en quantité enorme dans le plantes de la famille des lichens, et moyen avantageux d'en extraire l'acide oxalique" Ann. Chim. Phys., **2**, **28**, pp. 318-322, 1825; Kunze G. "Über Saureausscheidung bei Wurzeln und Pilzhyphen und ihre Bedeutung" 1906; Alexopoulos, C.J. and C.W. Mims "Introductory Mycology" 3rd ed., John Wiley, New York, pp. 63, 1979; Burnett J.H. "Fundamentals of Mycology" E. Arnold (Publishers), pp. 546, London, 1968; Graustein W.C., Cromack K. and P. Sollins "Calcium Oxalate: Occurrence in Soils and Effects on Nutrient and Geochemical Cycles" Science, **198**, pp. 1252-1254, 1977; Onions A.H.S., Allsop D. and H.O.W. Eggins "Smith's Introduction To Industrial Mycology" pp. 398, Edward Arnold, London, 1981.

⁶⁶ Il perché si evince da quanto detto subito sopra; cfr.: Braconnot, 1825, *supra* nota 65; Zopf W. "Die Flechtenstoffe" Jena, 1907; Smith, 1921 in Syers & Iskandar "Pedogenetic significance of lichens" in "The lichens", Academic Press, New York, pp. 225-248, 1973.

⁶⁷ Syers, J.K., Birnie A.C. and B.D. Mitchell "The Calcium Oxalate Content of Some Lichens Growing on Limestone" Lichenologist, **3**, pp. 409-414, 1967. L'ossalato di calcio non sarebbe solo una sostanza di rifiuto [di scarto]: favorirebbe la nutrizione minerale del lichene solubilizzando certe sostanze, soprattutto gli ossidi di ferro; con la sua presenza ridurrebbe l'evaporazione dell'acqua nei periodi estivi e sarebbe utilizzato dalle alghe come sorgente di carbonio; quindi avrebbe diverse funzioni.

⁶⁸ Ozenda et Clauzade, *cit.*, p. 72.

depositi extracellulari (nelle piante superiori sono invece compartimentati nei vacuoli): sono infatti presenti all'esterno delle ife, lungo le pareti di queste, sotto forma di minuscoli cristalli. Secondo Ozenda e Clauzade gli ossalati si localizzano principalmente nella medulla, più raramente nel cortex superiore o alla superficie del tallo. Sempre secondo questi Autori assai spesso sono presenti nell'imenio e al di sopra dell'epitecio, come in *Lecanora* del gruppo *subfusca* e *cenisia*, dove la presenza o l'assenza, le dimensioni e l'abbondanza di questi cristalli giocano un ruolo importante nella distinzione delle specie⁶⁹. Gli ossalati di calcio sono due: la **whewellite**, $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$, e la **weddellite**, $(\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$: la whewellite, essendo più stabile è più diffusa in natura della weddellite anche se, molto spesso, i due minerali coesistono⁷⁰. L'ossalato monoidrato è monoclinico, e presenta comunemente al SEM [Scanning Electron Microscope] abito tabulare; quello biidrato è invece tetragonale, e si presenta al SEM con abiti diversi⁷¹. Secondo Jones e Wilson, nei licheni, sono quasi sempre presenti entrambe le fasi sotto forma di aggregati a grana fine orientati casualmente: gli individui cristallini hanno, in genere, dimensioni comprese tra 2 e 10 μm ⁷².

In natura, gli ossalati di Ca sono comuni sia nel regno vegetale, sia in quello animale (cuticola degli insetti, calcoli urinari, ecc..) e inoltre sono comunissimi su affioramenti naturali in calcare e/o marmo sempre a valle delle zone colonizzate dai licheni, sotto forma di sottili patine di colore bruno-rosato⁷³ [fig. 12]. Sono infine soprattutto diffusi sui monumenti [ma anche sui manufatti] sempre in **calcare e/marmo**, sotto forma di patine – identiche a quelle di cui si è appena detto – sia che questi monumenti si trovino "all'aperto", sia che, dopo aver passato periodi più o meno lunghi all'aper-

to, si trovino oggi "al chiuso" nelle raccolte museali [fig. 13].

Fu Braconnot per primo, come appena detto, a segnalare la straordinaria diffusione degli ossalati di calcio nel mondo vegetale in generale e nei licheni in particolare⁷⁴. Nel 1853 Liebig determinava come "Thierschite" un minerale, risultato successivamente identico alla Whewellite, che formava una patina giallastra presente su di un campione di marmo del Partenone⁷⁵; poiché questo minerale era associato a residui di licheni egli attribuì a questi organismi la responsabilità della formazione della patina. Successivamente Cipriani e Franchi, nel 1958, identificarono ossalati di Ca sulla superficie del travertino del Colosseo e dei marmi [e calcari] dell'Arco di Costantino e anche loro attribuirono la formazione di questi minerali ai licheni che [allora] colonizzavano quei monumenti⁷⁶. Sebbene esistano pochi dubbi sull'origine naturale delle patine a ossalati di Ca presenti sui monumenti⁷⁷ non è mancato in passato chi ha negato questa ipotesi affermando che si sarebbero formate dall'alterazione – anche biologica – di vernici o altri trattamenti applicati sui monumenti a fini estetici o protettivi ovvero rappresenterebbero quanto resta dell'antica policromia⁷⁸. Non è escluso che l'origine antropica possa spiegare casi particolari. È però evidente che la totalità delle patine a ossalati presenti sugli affioramenti naturali e la stragrande maggioranza di quelle che "verniciano" manufatti e monumenti hanno avuto un'origine naturale. Questa origine va ricondotta all'attività di licheni che colonizzano ancor'oggi o colonizzavano in passato le superfici delle pietre: di queste "pseudoscialbature" si parlerà diffusamente nelle righe che seguono.

Dopo aver accennato ai biominerali su substrati carbonatici dedichiamo ora qualche parola a quelli che si formano

⁶⁹ *Ibidem*, p. 72.

⁷⁰ Del Monte M. and C. Sabbioni "The so-called "scialbatura" on Roman Imperial marbles" *Studies in Conservation*, **32**, pp. 114-121, 1987. Secondo Lamprecht *et al.* la weddellite rappresenterebbe per i licheni una riserva d'acqua: in condizioni di siccità avverrebbe la transizione da ossalato biidrato a monoidrato con cessione di una molecola d'acqua al sistema. Cfr. Lamprecht I., Reller A., Riesen R. and H.G. Wiedemann "Ca-oxalate films and microbiological investigation of the influence of ancient pigments on the growth of lichens" *Journ. Thermal Analysis*, **49**, pp. 1601-1607, 1997. Questa osservazione non è corretta: i - per la trasformazione a secco da biidrato a monoidrato occorre una notevole quantità di energia; ii - la weddellite è poco solubile; iii - la quantità d'acqua che si libera da fase biidrata a fase monoidrata è irrilevante. È invece il tallo lichenico, che immagazzinando [con un meccanismo simile a quello della carta assorbente] acqua in ragione di circa il 300% del suo peso secco, a rappresentare una importante riserva d'acqua per il lichene durante i periodi di siccità; cfr.: Crevelde M. "Epilithic Lichens Communities in the Alpine Zone of Southern Norway" *Ganter Verlag K.G.*, Vaduz, pp. 48-55, 1981.

⁷¹ Frequenti sono i cristalli bipiramidali, terminati da facce (101) e talvolta da facce (100) molto meno sviluppate; Wadsten T. and R. Moberg "Calcium Oxalate Hydrates on The Surfaces of Lichens" *Lichenologist*, **17**, pp. 239-245, 1985.

⁷² Wilson M.J. and D. Jones "Lichen weathering of minerals: implications for pedogenesis" *Geological Society, London, Special Publications*, **11**, pp. 5-12, 1983; cfr.: *supra*, nota 62.

⁷³ Cfr.: Del Monte M., Sabbioni C. and G. Zappia "The origin of calcium oxalates on monuments, historical buildings and natural outcrops" *The Science of The Total Environment*, **67**, pp. 17-39, 1987.

⁷⁴ Cfr. *supra*, nota 65.

⁷⁵ Liebig J. "Ueber den Thierschite" *Annalen der Chemie und Pharm.*, **LXXXVI**, pp. 113-115, 1853.

⁷⁶ Cipriani C. and L. Franchi "The presence of whewellite in alteration crust of Roman monuments" *Boll. Serv. Geol. It.*, **79**, pp. 555-556, 1958.

⁷⁷ Del Monte M. and C. Sabbioni "Weddellite on limestone in the Venice Environment" *Environmental Science & Technology*, **17**, pp. 518-522, 1983; Del Monte e Sabbioni, 1987, *cit.*; Del Monte *et al.*, 1987, *cit.*; Del Monte M. e A. Ferrari "Patine da biointerazione alla luce delle superfici dei monumenti" *Atti Conv. Int. "Le pellicole ad ossalati: origine e significato nella conservazione delle opere d'arte"*, pp. 171-182, Milano, 1989; Del Monte M. "Microbioerosions and biodeposits on stone monuments: pitting and calcium oxalate patinas" *Advanced Workshop on "Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones"*, 27 pp, Pavia, 1990; Del Monte M. "The Cultural Heritage: Causes of Damage" *Proceed. Europ. Symp. "Sci. Techn. and Europ. Cult. Heritage"* Butterworth-Heinemann Ltd, pp. 78-89, 1991.

⁷⁸ Knoll H. "Die Trajanssaule" *Rep. Inst. fur Anorganische Chemie Freie Universitat, Berlin*, 1968; Franzini M., Gratzio C. e E. Wicks "Patine ad ossalato di calcio su monumenti marmorei" *Rend. Soc. It. Miner. Petrogr.*, **39**, 1, pp. 59-70, 1984; Guidobaldi F., Tabasso M.L. e C. Meucci "Monumenti in marmo di epoca imperiale a Roma: indagini sui residui di trattamenti superficiali" *Boll. Art.*, **XXIV**, pp. 121-134, 1985; Fassina V. "Le pellicole ad ossalato: lo stato delle conoscenze attuali" *Atti Conv. Int. "Le pellicole ad ossalati: origine e significato nella conservazione delle opere d'arte"* Milano, pp. 5-22, 1989.



Fig. 12 – Anche su affioramenti naturali carbonatici in presenza di superfici sub verticali arretrate è possibile osservare le patine bruno a ossalati di calcio. Esse hanno in natura una diffusione enorme e - avendo la stessa genesi - sono simili in tutto e per tutto a quelle presenti sui monumenti in calcare o in marmo. Il motivo per cui queste patine in campo sono state segnalate raramente è dovuto al fatto che il loro spessore è modesto: da qualche decina a poche centinaia di μm . Se nel fare il prelievo si asportano mm o addirittura cm di roccia e successivamente questa, polverizzata, viene analizzata al diffrattometro a raggi-X risulterà impossibile osservare i picchi degli ossalati: il tracciato mostrerà la presenza della sola calcite. Infatti, come è noto, in una miscela di due o più minerali perché questi possano essere evidenziati con questa tecnica è necessario che la percentuale del componente meno abbondante non sia inferiore al 10-5 % del campione totale. Nel fare il prelievo sarà quindi necessario asportare solo il film bruno superficiale raschiando un'area abbastanza estesa in modo che il quantitativo di polvere sia sufficiente a eseguire la misura [circa 100-200 mg]. Eccezionalmente anche in campo è possibile osservare croste nere che ricoprono le precedenti patine bruno a ossalati: questa osservazione conferma la stretta analogia genetica tra i due tipi di patine, di cui si parla nel testo, dovute entrambe a interazione ambientale [a- rilievi a est di Spalato, Croazia; b - dintorni di Bulla Regia, regione di Jendouba, Tunisia; c - Golfo di La Spezia, isola di Palmaria: la solfatazione della superficie, vale a dire la patina nera sovrapposta a quella bruna, è indotta dai fumi emessi dai camini delle navi che bruciano nafta o carbone; d - massiccio del Gargano].



Fig. 13 – Un monumento in calcare se la qualità dell'aria è buona appare tappezzato di licheni soprattutto nelle parti aggettanti, mentre i sottosquadri risultano rivestiti da una patina bruno-rosa-camoscio [di cui si parla diffusamente nel testo; cfr. supra fig. 10]: ciò risulta particolarmente evidente nella parte interna del rosone, nell'area sopra la grande finestra protetta dalla sovrastante modanatura e nelle nicchie laterali [a]. L'ingrandimento della cimasa della finestra, in stile manuelino, mette meglio in evidenza la fittissima colonia di licheni che ricopre le parti più esterne, e la "vernice" rosa-camoscio presente nelle aree arretrate sottostanti [b]. Un secondo particolare dello stesso monumento: l'origine naturale della patina bruna a ossalati di calcio, sotto la mensola, appare in questo caso evidentissima [c] [Convento dei Templari do Cristo, Finestra del Capitolo, Tomar, Portogallo, calcare dolomitico].

sui graniti e che vengono attribuiti o con certezza o con qualche dubbio a colonie [presenti o passate] di licheni. Numerosissime analisi mediante XRD [X-ray Diffraction] eseguite, da chi scrive, su campioni di polvere di granito prelevati da zone colonizzate, soprattutto a valle di quelle più esposte, hanno raramente evidenziato minerali diversi da quelli che costituiscono questa roccia. Solo in pochi casi è stato possibile osservare tracce certe di biominera-

li: ad esempio **whewellite** su campioni prelevati sui paramenti murari della chiesa di San Estevo de Ribas de Miño e **whewellite** e **weddellite** sui paramenti murari della chiesa di San Miguel di Celanova entrambe in Galizia [Spagna] che al momento del prelievo apparivano completamente tappezzati da licheni [con una netta prevalenza di *Ochrolechia parella*]⁷⁹. Durante le analisi eseguite sul secondo di questi due monumenti fu possibile evidenziare

⁷⁹ I due ossalati, come prodotti d'interazione licheni-granito, sono stati segnalati in letteratura da diversi AA; cfr. p.e.: Halla K., Arocena J.M., Boelhouwers J., and Z. Liping "The influence of aspect on the biological weathering of granites: observations from the Kunlun Mountains, China" *Geomorphology*, 67, pp. 171–188, 2005. Da notare che in ambienti inquinati, dove i licheni non possono più vivere, il Ca è [dopo l'ammonio] il principa-

anche la presenza di tracce di **gesso** che vennero attribuite, pur essendo l'area – data la grande abbondanza di licheni – apparentemente pochissimo inquinata, a antropizzazione in atto. È stato possibile dimostrare successivamente che anche il gesso può essere considerato un biominerale e avere origine dai licheni⁸⁰. Tracce di altri due biominerali, $K_2C_2O_4 \cdot H_2O$ e probabilmente anche di $Na_2C_2O_4$ sono state osservate nella polvere di un granito, forse egiziano, prelevato da un blocco situato a Bulla Regia [Tunisia], coperto al momento del prelievo di licheni. Essendo questi due ultimi ossalati, come notato subito sopra, molto solubili [e presumibilmente anche deliquescenti] quando si trattò di fare delle verifiche entrambi non risultarono più presenti nei tracciati XRD⁸¹.

Se ora passiamo ad altri minerali si può notare, ad esempio, che la presenza di **minerali argillosi** è stata evidenziata da vari A.A., sia su campioni di granito raccolti in campo, sia mediante esperimenti di laboratorio roccia/lichene. Ad esempio le ricerche condotte da Ascaso e collaboratori sull'azione di *Parmelia conspersa*, *Rhizocarpon umbilicatum* e *Lasallia pustulata* hanno messo in evidenza la presenza di vari minerali argillosi, tra cui **caolinite**, **halloisite**, **vermiculite**, **illite** oltre ad ossidi di ferro e “gels” amorfi dovuti, secondo l'opinione di questi A.A., all'interazione tra il substrato roccioso e gli acidi secreti dai licheni⁸². Numerosi studi successivi hanno portato ad analoghi risultati sottolineando la prevalenza di caolinite su gli altri minerali argillosi⁸³. Queste osservazioni sono molto interessanti ma non del tutto convincenti: i minerali argillosi si formano facilmente dalla semplice idrolisi dei silicati per cui un'azione diretta dei licheni nella loro formazione e' tutt'altro che provata. È invece pro-

babile un'azione indiretta. I licheni trattengono acqua all'interfaccia della roccia su cui sono adagiati aumentandone il “tempo di bagnamento” e favorendo quindi l'idrolisi [pseudoidrolisi] dei feldspati [ortoclasio e plagioclasio] e della biotite, idrolisi che inoltre aumenta in ambiente acido⁸⁴: è quindi possibile, almeno teoricamente, che gli acidi ossalico e carbonico accelerino il processo di argillificazione.

Numerosi lavori riguardano biominerali [o presunti tali] osservati su **rocce basaltiche** colonizzate dai licheni⁸⁵: **whewellite**, **weddellite**, **caolinite**, **halloisite**, **ferridrite**, **goethite**. A parte i due ossalati di calcio, presenti in tracce e su cui non vi sono problemi per quanto riguarda la genesi, in letteratura vengono, da numerosi ricercatori, considerati biominerali anche gli argillosi⁸⁶ e due idrossidi di Fe. Il primo è la **ferridrite**, un minerale con formula $5Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$ che è stato rinvenuto per la prima volta, nella sottile crosta di alterazione sotto il tallo di *Stereocaulon vulcani* che cresceva su colate laviche alle Hawaii da Jackson e Keller⁸⁷ e, successivamente, studiando l'alterazione di un basalto a clinopirosseni, olivine, plagioclasio [ricchi in Ca] e magnetite, anche da Jones e collaboratori⁸⁸. In entrambi i casi le analisi misero in evidenza, da un lato la corrosione dei minerali femici costituenti la roccia [olivine, pirosseni], dall'altro la presenza appunto della ferridrite. Il secondo idrossido di cui si ha notizia a cui si e' già accennato nelle righe precedenti è la **goethite**, con formula $FeOOH$ che, secondo Jones e Wilson⁸⁹, deriverebbe come le ferridrite dalla bioalterazione di silicati di Fe; il ferro così liberato verrebbe ossidato e precipitato alla superficie della roccia o all'interno del tallo ad opera di **ferrobatteri**. Ma sia la ferridrite che la

le catione presente in aria: Del Monte M., Sabbioni C. and G. Zappia “**Calcium deposition from carbonaceous particles scavenged by snow**” The Science of The Total Environment, **50**, pp. 165-182, 1986; Del Monte M. and P. Rossi “**Fog and gypsum crystals on building materials**” Atmospheric Environment, **31**, pp.1637-1646, 1997; Del Monte M. and P. Rossi “**Calcium in the Urban Atmosphere**” In: “*Aerosol Chemical Processes in the Environment*” ed. by Kvetoslav R. Spurny, CRC Press, USA, pp. 347-364, 2000. In questi siti il Ca tenderà a reagire con l' H_2SO_4 disciolto nelle goccioline d'acqua di pioggia o di nebbia e a formare **gesso** [$CaSO_4 \cdot 2H_2O$] che verrà così evidenziato su qualunque superficie con grande facilità.

⁸⁰ Garty J., Kunin P., Delarea J. and S. Weiner “**Calcium oxalate and sulphate-containing structures on the thallial surface of the lichen *Ramalina lacera*: response to polluted air and simulated acid rain**” Plant, Cell. and Environment, **25**, pp. 1591-1604, 2002; cfr. anche: Prieto B., Seaward M.R.D., Edwards H.G.M., Rivas T. and B. Silva “**An Fourier transform-Raman spectroscopic study of gypsum neoformation by lichens growing on granitic rocks**” Spectrochimica Acta, **55**, pp. 211-217, 1999. In un precedente lavoro lo stesso team aveva considerato tra i biominerali evidenziati su rocce granitiche colonizzate anche la **calcite**; cfr.: Prieto B., Silva B., Rivas T., Wierzchos J. and C. Ascaso “**Mineralogical Transformation and Neoformation in Granite Caused by Lichens *Tephromela atra* and *Ochrolechia parella***” Internat. Biodeterioration & Biodegradation, **40**, pp. 191-199, 1997.

⁸¹ Molti dei biominerali riportati in letteratura sono stati evidenziati all'interno dei licheni mentre in questo lavoro, tenuto conto delle sue finalità, sono invece stati trascurati; sono state inoltre trascurate anche le particelle minerali dovute al *fall-out* atmosferico e quelle trascinate nel sistema dall'acqua di pioggia.

⁸² Ascaso C. and J. Galvan “**Studies on the pedogenetic action of lichen acids**” Pedobiologia, **16**, pp. 321-33, 1976.

⁸³ Jones D. and M.J. Wilson “**Chemical activity of lichens on mineral surfaces. A review**” Internat. Biodeterioration & Biodegradation, **21**, 2, pp. 99-104, 1985; Ascaso A., Wierzchos J. and A. De Los Rios “**Cytological investigation of lithobiontic microorganisms in granitic rocks**” Bot. Acta, **108**, pp. 474-481, 1995; Prieto *et al.*, 1997, *cit.*, nota 80.

⁸⁴ Per idrolisi K^+ , Na^+ e Ca^{++} passano in soluzione sostituiti nei reticoli cristallini da H^+ ; ciò porta ad un innalzamento del pH.

⁸⁵ Chi scrive ha eseguito numerose analisi su campioni di basalto lichenizzati della provincia vulcanica laziale-campana e di altri prelevati alle isole Azzorre e alle isole Galapagos. Cfr.: Colantoni P., Del Monte M. e C. Savelli “**Note sulla geologia delle isole Galapagos**” Estratto da: “Galapagos, studi e ricerche”, spedizione “L. Mares, G.R.S.T.S.”, pp. 1-32, Firenze, 1979. Le analisi XRD - dello straterello a cui aderiva il cortex inferiore attaccato dalle ife - hanno messo in evidenza solo in pochi casi tracce di **whewellite**, **weddellite** (biominerali) associate a **idrossidi di ferro** e **caolinite** (da supposto weathering abiologico). Particolarmente abbondanti risultarono i due ossalati di calcio nei campioni prelevati, sempre da chi scrive, nel sito archeologico di Um al Jamal a nord-est di Amman [Giordania].

⁸⁶ Anche per interazione tra basalti - o altre rocce eruttive effusive basiche - e licheni sono stati segnalati da numerosi ricercatori presunti biominerali argillosi. I dubbi sulla loro effettiva origine sono gli stessi avanzati subito sopra a proposito del *weathering* dei graniti. Cfr.: Jones *et al.*, “**Weathering of a basalt ...**”, 1980, *cit.*, nota 8; Adamo A. and P. Violante “**Weathering of volcanic rocks from Mt. Vesuvius associated with the lichen *Stereocaulon vesuvianum***” Pedobiologia, **35**, pp. 209-217, 1991; Adamo P. e P. Violante “**Weathering of rocks and neogenesis of minerals associated with lichen activity**” Applied Clay Science, **16**, pp. 229-256, 2000. La presenza di notevoli tenori di ferro - ad esempio in *Porphidia macrocarpa* ed in *Lecidea lapicida* che crescono su basalti - è messa in evidenza dal colore giallo-bruno-rossastro del tallo.

⁸⁷ Jackson, T.A. and W.D. Keller “**A comparative study of the role of lichens and inorganic processes in the chemical weathring of recent Hawaiian lava flows**” Amer. Journ. Sci. **269**, pp. 446-466, 1970.

⁸⁸ Jones D. *et al.* “**Weathering of a basalt...**”, 1980, *cit.*, nota 8.

⁸⁹ Jones D. and M.J. Wilson “**Biomineralisation in crustose lichens**” In: Biomineralisation in lower plants and animals. (Leadbeater B.S.C. and R. Riding eds.) The Systematic Association Spec., **30**, Clarendon press, Oxford, pp. 91-106, 1986.

goethite si formano frequentemente come prodotti d'alterazione di allumosilicati di Fe senza che i licheni abbiano apparentemente alcun ruolo, cioè per semplice "weathering" chimico anche se un'azione dei ferrobatteri è più che probabile⁹⁰. Per gli argillosi vale il discorso fatto subito sopra in relazione ai graniti. Forse possono essere biominerali ma certamente possono anche non esserlo.

Oltre alla **whewellite** e alla **weddellite** sono stati evidenziati su **altri tipi di rocce** o su **substrati particolari**, pochi altri sali dell'acido ossalico. Wilson e collaboratori effettuarono delle ricerche sull'alterazione causata dalla crescita dei licheni, ed in particolare di *Lecanora atra*, su alcune **serpentiniti** costituite quasi interamente da silicati di Mg, come il crisotilo, povere quindi in Ca⁹¹. Questo studio evidenziò all'interno del tallo dei licheni piccolissimi frammenti rocciosi associati ad abbondante materiale cristallino birfrangente, a grana fine, localizzato immediatamente a contatto con la roccia. Le analisi in XRD del tallo disseccato e polverizzato mostrarono la presenza sia dei minerali costituenti la roccia, sia di vari ossalati. Accanto a tracce di weddellite e whewellite erano presenti, soprattutto alla superficie inferiore del lichene, notevoli quantità di **ossalato di magnesio biidrato** vale a dire $Mg(C_2O_4) \cdot 2H_2O$ noto come **glushinskite**. Le analisi chimiche eseguite sotto la superficie di separazione lichene/roccia mostrarono che il crisotilo si era impoverito di Mg fino a una profondità di 100 μm e sulle facce dei cristalli erano presenti evidenti tracce di corrosione⁹². Tracce di **glushinskite** vennero evidenziate, successivamente, da chi scrive, sempre mediante XRD su alcuni affioramenti ofiolitici, con modestissima colonizzazione lichenica, nelle località di M. Gurlano e di Sasso della Mantessa sulla dorsale M. Canda-Montenzio tra le alte valli dell'Idice e del Sillaro, nel Bolognese.

In un altro vecchio studio Wilson e Jones analizzando l'interazione di *Pertusaria corallina* con una mineralizzazione di manganese evidenziarono per la prima volta, in natura, la presenza di un **ossalato biidrato di manganese** nel tallo lichenico⁹³. Come nel caso degli altri ossalati, esso si presentava sotto forma di minuscoli aggregati extracellulari. Il "pattern" di diffrazione dei raggi X risultò identico a quello del $Mn(C_2O_4) \cdot 2H_2O$ sintetico noto come **lindbergite**.

Sempre nel lontano 1984 Purvis dimostrò che in due

siti cupriferi della Scandinavia i talli di *Acarospora rugulosa* e di *Lecidea theiodes* contenevano un'alta concentrazione di rame (5% del peso secco) principalmente come **ossalato di rame** cristallino⁹⁴. I cristalli erano presenti in aggregati con dimensioni comprese tra 1 e 5 μm e il loro colore era blu intenso. Questo ossalato mostrò mediante XRD picchi identici a quelli dell'ossalato di rame sintetico $[Cu(C_2O_4) \cdot nH_2O]$ con n circa uguale ad 1]. Dato che due anni dopo venne scoperto un ossalato idrato di Cu su un affioramento di quarzite a Moolo Downs, nell'Ovest dell'Australia, con formula: $Cu(C_2O_4) \cdot 0,44H_2O$ a cui fu dato il nome di **moolootite** si ritenne che anche il minerale osservato da Purvis fosse moolootite⁹⁵.

Di pochi altri minerali evidenziati durante lo studio di licheni e/o di pietre lichenizzate non è ben chiara l'origine. Jones e Wilson studiando l'arricchimento del piombo in *Stereocaulon vesuvianum* che cresceva su calcari nelle rovine di una vecchia fonderia dove venivano trattati galena e altri minerali di piombo, trovarono negli strati medio-superiori del tallo Pb metallico. L'analisi XRD di fasci di ife mostrò un "pattern" assai simile a quello del carbonato basico di Pb, l'**idrocerussite**: $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$ ⁹⁶.

L'**idrocerussite** venne messa in evidenza, dieci anni dopo, da Del Monte e Tolomelli [in tracce] sui paramenti murari della chiesa di San Giovanni, detta del Crocifisso, nel complesso stefaniano a Bologna: si ipotizzò allora che questo minerale, in paragenesi con gesso e con cenosfere carboniose da combustione di oli, avesse origine dall'inquinamento atmosferico essendo a quei tempi il Pb presente, come anti detonante, nella benzina ad uso veicolare⁹⁷.

Un altro minerale inconsueto, la **rapidcreekite** con formula $Ca_2SO_4CO_3 \cdot 4H_2O$, mai segnalato – per quanto mi risulta in contesti come quelli qui studiati – venne ritrovato, sempre da chi scrive, sui paramenti murari della chiesa di S. Leonardo di Siponto [Foggia]. Il minerale era presente nei tracciati XRD assieme ai due ossalati di calcio di sicura origine biologica: non fu tuttavia possibile avanzare alcuna ipotesi ragionevole sulla sua origine.

Come è noto il comportamento di uno ione in soluzione acquosa è determinato dal suo potenziale ionico. Il potenziale ionico è il rapporto tra carica e raggio ionico e rappresenta l'intensità della carica positiva alla super-

⁹⁰ Si veda a questo riguardo: Drever J.I. "The chemistry of weathering" D. Reidel Publishing Company, pp. 324, 1984; Aghamiri R. and D.W. Schwartzman "Weathering rates of bedrock by lichens: a mini watershed study" Chemical Geology, **188**, pp. 249-259, 2002.

⁹¹ Le "pietre verdi" non sono in genere gradite ai vegetali, tra cui i licheni, per l'abbondanza di elementi tossici che contengono. Solo poche specie licheniche specifiche possono colonizzarle e la pedogenesi procede con estrema lentezza senza portare quasi mai alla formazione di un vero e proprio suolo. Cfr.: Wilson M.J., Jones D. and W.J. Mc Hardy "The weathering of serpentinite by *Lecanora atra*" Lichenologist, **13**, pp. 167-176, 1981.

⁹² Wilson, M.J., Jones D. and J.D. Russel "Glushinskite, a naturally occurring magnesium oxalate" Miner. Magaz., **43**, pp. 837-840, 1980.

⁹³ Wilson M.J. and D. Jones "The occurrence and significance of manganese oxalate in *Pertusaria corallina*" Pedobiologia, **26**, pp. 373-379, 1984.

⁹⁴ Purvis O.W. "The occurrence of copper oxalate in lichens growing on copper sulphide-bearing rocks in Scandinavia" Lichenologist, **16**, pp. 197-204, 1984.

⁹⁵ Chilsom J.E., Jones G.C. and O.W. Purvis "Hydrated copper oxalate, moolootite, in lichens" Mineralogical Magazine, **51**, pp. 715-718, 1987.

⁹⁶ Jones D. and M.J. Wilson, 1986, *cit.*, nota 89.

⁹⁷ Del Monte M. e M. Tolomelli "Il chiostro romano, o dei benedettini, nel complesso stefaniano a Bologna" SetteChiese, **3**, pp. 24-32, 1996. Tenuto conto delle piccolissime quantità di Pb in gioco è certamente più probabile un'origine da qualche oggetto in questo metallo il collocato o da biacca utilizzata localmente in passato per ravvivare corollari in calcare/marmo bianco.

ficie dello ione stesso: gli ioni con $\Phi < 3$ polarizzano debolmente l'acqua e restano in soluzione acquosa [K^+ , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Fe^{++} , Mn^{++} , Cu^{++} ...]; quelli con $3 < \Phi < 12$ polarizzano l'acqua, espellono un protone H^+ , e precipitano come idrossidi insolubili [Si^{4+} , Al^{3+} , Ti^{4+} , Mn^{4+} , Fe^{3+} ...]; quelli infine con $\Phi > 12$ polarizzano fortemente l'acqua espellono entrambi i protoni H^+ e restano in soluzione come radicali acidi [CO_3^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , SO_4^{2-}]. Ciò spiega chiaramente perché sono stati segnalati da diversi A.A. tra i biominerali ossalati di Ca, Cu, Mn, Mg ma non ad esempio di Fe. L'ossalato di Fe [$Fe(C_2O_4) \cdot 2H_2O$] è noto ai Mineralogisti col nome di **humboldtina** o **oxalite** ed è stato rinvenuto in ambienti fortemente riducenti come molte miniere di carbone [Boemia, Polonia, Inghilterra, Sud Africa] o associato a solfuri in miniere di ferro [Capo Arco e Capo Calamita, Isola d'Elba], dove questo elemento, restando allo stato bivalente, poteva mantenersi in soluzione acquosa. L'oxalite non è mai stata segnalata come biominerale lichenico perché al contrario l'ambiente dove avvengono i processi di cui stiamo parlando è fortemente ossidante. Viceversa, come abbiamo visto subito sopra, sono comunissimi gli idrossidi di Fe^{3+} . Inoltre ciò spiega anche perché sia invece stato segnalato [sia pure raramente e come semplice curiosità] l'ossalato di Mn bivalente, la **lindbergite**: ciò è dovuto al fatto che il potenziale di ossidoriduzione della reazione $Mn^{++} \rightarrow Mn^{4+} + 2e^-$ è molto più alto di quello $Fe^{++} \rightarrow Fe^{+++} + e^-$: vale a dire che il ferro ossidandosi con estrema facilità a trivalente non potrà formare ferroossalati, il manganese invece ha qualche *chance*; da notare tuttavia che il ferro trivalente oltre a precipitare come idrossido [come si è detto subito sopra $5Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$ e $FeOOH$] può facilmente formare in presenza di acido ossalico lo ione complesso ferriossalico [$Fe^{+++}(C_2O_4)_3$]⁹⁸. Questo complesso porta in natura alla formazione di due minerali: la **minguzzite** con formula $K_3[Fe(C_2O_4)_3] \cdot 3H_2O$ e la **stepanovite** con formula $NaMg[Fe(C_2O_4)_3] \cdot 8-9H_2O$ ⁹⁹. Entrambi questi minerali sono molto solubili in acqua e perciò la loro presenza nel micro-habitat di cui qui ci occupiamo, necessariamente soggetto all'azione dell'acqua liquida di

pioggia è molto improbabile e l'identificazione di loro eventuali minime tracce praticamente impossibile. Lo stesso si può dire per gli ossalati semplici di Na e K, di cui si è detto subito sopra, che oltre da essere solubili sono anche deliquescenti: in teoria possono formarsi, ma di fatto sarà poi molto difficile metterli in evidenza. Si può riassumere quanto scritto in questo paragrafo che l'acido ossalico secreto dal lichene [o meglio dal fungo] tende a essere eliminato dalla soluzione circolante sotto forma di sale, che se poco solubile, potrà poi essere evidenziato; la base è quasi sempre il $Ca(OH)_2$; di qui la grande diffusione in natura di **whewellite** e **wed-dellite**; tuttavia in ambienti particolari potranno formarsi, in tracce, ossalati di Mg, Mn o anche di Cu e, eccezionalmente, di altri cationi metallici. È singolare poi che non siano mai stati segnalati in letteratura, per quanto ne so io, ossalati di Zn^{++} o di Co^{++} che hanno comportamento e raggio ionico [0,74 Å] praticamente identici a quelli del rame, oppure di Sr^{++} o Ba^{++} assai simili a Ca^{++} .

11 - L'ALTERAZIONE DELLE PIETRE CAUSATA DAI LICHENI

Il biodegrado delle pietre è causato principalmente dai licheni **crostosi sassicoli**: epilittici, semiendolitici e endolitici¹⁰⁰. Su graniti e rocce simili prevalgono le specie epilittiche, rare quelle che in qualche modo possono essere considerate semiendolitiche, del tutto assenti quelle endolitiche¹⁰¹. Sulle rocce carbonatiche invece sono presenti tutti e tre i tipi di licheni sassicoli con una prevalenza dei semiendolitici sugli epilittici e [forse] anche sugli endolitici¹⁰². In ogni caso, vale a dire per ogni tipo di lichene e per qualsiasi tipo di pietra, le ife del fungo, partner dell'alga, non si limitano ad ancorare il tallo al substrato roccioso, operazione quasi superflua nel caso dei semiendolitici e del tutto superflua nel caso degli endolitici, ma penetrano poi all'interno di questo fino a notevoli profondità: 40-45 mm nei graniti, 10-20 mm, nel caso di calcari e marmi¹⁰³. Nei graniti questa operazione è compiuta da fasci di ife che, come si è detto, prendono

⁹⁸ Lo ione ferro-triossalato è un chelato dello ione ossalico.

⁹⁹ Il primo segnalato in Italia all'isola d'Elba, il secondo in Siberia all'estuario del fiume Lena.

¹⁰⁰ Cfr. *supra* nota 23. Si ritiene che alcuni generi siano più attivi di altri nei processi di degrado anche se non esistono studi generali al riguardo; vedi a questo proposito l'ottima review: Chen J., Blume H.P. and L. Beyer "Weathering of rocks induced by lichen colonization: a review" *Catena*, **39**, pp. 121-146, 2000.

¹⁰¹ Ci si riferisce qui soprattutto agli studi condotti da chi scrive sui graniti di Predazzo e Cima d'Asta in Italia e su quelli del nord del Portogallo e del nord-ovest della Spagna. Cfr., *infra*, nota 130.

¹⁰² Cfr. *supra* nota 23.

¹⁰³ Degelius G. "Über Verwitterung von Kalk und Dolomitgestein durch Algen und Flechte. Eine Übersicht" In "Chemie im Dienst der Archeologie Bantechnik Denkmalpflege" J.A. Hedwall Ed., Hakam Ohlssons, Lund, pp.156-162, 1962 [19 mm]; Syers J.K. "A study of soil formation on carboniferous limestone with particular reference to lichens as pedogenic agents" Ph. D. Thesis, University of Durham, England, 1964 [16 mm]; Klappa C.F. "Lichen Stromatolites: criterion for subaerial exposure and mechanism for the formation of laminar calcretes (caliche)" *Journ. of Sedimentary Petrology*, **49**, 2, pp. 387-400, 1979 [12 mm]; Del Monte M. e A. Ferrari "Patine da biointerazione alla luce delle superfici dei monumenti" *Atti Convegno Int. "Le pellicole ad ossalati: origine e significato nella conservazione delle opere d'arte"* pp. 171-183, Milano, 1989 [12 mm]; Del Monte M. and C. Sabbioni "Report on Research Projects supported by the Commission of the European Communities" *European Cultural Heritage N.L.*, **3**, 2, pp. 12-16, 1989 [12 mm]. Nelle arenarie, che in questa nota non vengono prese in considerazione, vengono riportati in letteratura i valori di 3,21 mm [arenaria di Clarens colonizzate da *Lecidea*] e di 1,12 mm [quarzite del Madagascar]. Per il primo dato cfr.: Wessels D.C.J. and B. Schoeman "Mechanisms and rate weathering of Clarens sandstone by an endolithic lichen" *S. Afr. Journ. Sci.*, **84**, pp. 274-277, 1988; per il secondo: Cooks J. and E. Otto "The weathering effects of the lichen *Lecidea* Aff. *Sarcogynoides* (Koerb.) on Magaliesberg Quartzite" *Earth Surf. Proc. Land.*, **15**, pp. 491-500, 1990.

il nome di rizine: non è escluso che questo ancoraggio più “robusto” sia legato al fatto che gli epilittici aderiscono meno alle superfici che colonizzano.

I primi studi riguardanti i meccanismi di penetrazione delle ife fungine nelle pietre hanno preso in considerazione, come ipotesi di lavoro, soprattutto processi meccanici: la penetrazione venne attribuita alla capacità delle ife di espandersi quando sono bagnate e di contrarsi quando si disseccano¹⁰⁴. Non è mancato però, fin dagli inizi dell’800, chi ha attribuito una notevole importanza anche all’azione chimica e, in particolare, a quella della CO₂ prodotta dalla respirazione dell’organismo che si tradurrebbe localmente in un abbassamento del pH: l’anidride carbonica, reagendo con l’acqua del tallo, porterebbe ad un aumento dell’acidità e ad una maggiore solubilità del substrato, soprattutto se questo è carbonatico.

Di qui a considerare i due meccanismi associati il passo fu breve. Secondo Fry (1927) da prima i licheni eserciterebbero attraverso le ife un’azione meccanica creando delle microfrazture che, aumentando la superficie specifica, favorirebbero il successivo attacco chimico¹⁰⁵. I lavori più recenti hanno ulteriormente sviluppato l’ipotesi di un attacco di tipo chimico, chiamando in causa i cosiddetti “acidi lichenici o sostanze licheniche”, di cui si è parlato subito sopra, tra cui lo ione ossalato¹⁰⁶. Questi lavori hanno potuto evidenziare ulteriormente la capacità delle ife di penetrare all’interno di qualunque tipo di pietra utilizzando, come si è detto, la **chelazione** come principale fattore chimico-fisico d’attacco.

A – Alterazione di calcari e marmi

La colonizzazione di calcari e marmi non è generalizzata: come già notato i licheni preferiscono le superfici sporgenti, ben areate e soggette all’azione diretta dell’acqua liquida di pioggia. Mancano quindi nei sottosquadri e nelle aree verticali sottostanti dove vengono trascinate dall’acqua di pioggia le sostanze di rifiuto: soprattutto corpuscoli organici, quali pollini, spore fungine o frammenti di tallo, e – in soluzione – l’acido ossalico. Quest’ultimo potrà reagire con la pietra salificando-

la: di ciò si parlerà diffusamente nelle righe che seguono. Se si osservano queste superfici, il tappeto lichenico appare spesso ininterrotto senza soluzione di continuità e comunemente si può anche notare la sovrapposizione di talli lichenici più giovani su talli più vecchi, quindi morti¹⁰⁷.

Sia nel caso di licheni epilittici [come appena notato poco diffusi su rocce carbonatiche], sia in quello di licheni semiendolitici le ife fungine si addentrano nella roccia [pietra nel caso di monumenti o manufatti] con la doppia funzione di ancorare gli individui al substrato e di andare alla ricerca degli elementi della nutrizione. La differenza, non di poco conto, tra le due specie di licheni consiste nel fatto che nel primo caso il tallo è semplicemente adagiato sulla superficie della pietra e quindi una volta morto non lascerà alcun segno “fossile” di sé, salvo la fitta canalizzazione interna, non visibile ad occhio nudo. Nel secondo caso il tallo è invece inglobato nella roccia e questa, una volta decolonizzata, mostrerà tipiche depressioni a contorno sinusoidale alveolare dette *insulae*. Queste depressioni hanno una profondità dell’ordine delle centinaia di µm o al massimo del mm e sono – nei casi più marcati – perfettamente visibili anche ad occhio nudo. Un altro aspetto importante che riguarda i licheni crostosi semiendolitici consiste nella localizzazione degli ascocarpi¹⁰⁸. Essi possono essere o immersi nel tallo, o alloggiati nella pietra sottostante: nel primo caso la pietra una volta decolonizzata, risulterà [apparentemente] intatta [**semiendolitici a**], nel secondo mostrerà una serie di forellini accostati più o meno numerosi il cui diametro è in genere dell’ordine del mm [**semiendolitici b**]¹⁰⁹; il singolo forellino viene qui indicato, con riferimento alla forma e alle dimensioni, col nome di **emimicrosfera**, mentre a un insieme di emimicrosfere accostate viene dato il nome di **pitting**¹¹⁰. Col tempo queste piccole cavità potranno venire allargate dall’acqua di pioggia [le zone sono quelle, lo ricordiamo, soggette per l’appunto all’azione diretta dell’acqua liquida di pioggia]. Inoltre questo fenomeno di **microcarsismo** può portare sia alla coalescenza di alcune emimicrosfere adiacenti che daranno così luogo a una **emisfera** a diametro maggiore [talora dell’ordine del cm] o nel caso di emimicrosfere allineate a strie allungate dette

¹⁰⁴ Mellor E. “**Les lichenes vitricoles et la deterioration des vitraux d’église**” Paris, 1921; Fry E.J. “**Some types of endolithic lichens**” Ann. Bot., **36**, pp. 541-562, 1922; Fry E.J. “**A suggested explanation of the mechanical action of lithophytic lichens on rocks**” Ann. Bot., **38**, pp. 175-196, 1924; Fry E.J. “**The mechanical action of crustaceous lichens on substrata of shale, schist, gneiss, limestone and obsidian**” Ann. Bot., London, **40**, pp. 437-460, 1927; Topham P.B. “**Colonization, growth, succession and competition**” In: “**Lichen Ecology**”, London Academic Press, pp. 31-68, 1977. È stato anche notato, da Fry, che il lichene così ancorato alla roccia in seguito ai cicli termici giorno-notte, dilatandosi e contraendosi, esercita un’azione fisico-meccanica sul substrato sbriciolandolo.

¹⁰⁵ L’azione chimica è esercitata anche nei confronti di minerali praticamente inattaccabili come il quarzo: Hallbauer e Jahns notarono ad esempio - mediante osservazioni al **SEM** - tracce di corrosione simili a perforazioni su cristalli di questo minerale, all’interfaccia tra *Dimelaena oreina* e la superficie di rocce quarzitiche e attribuirono questo fenomeno ad attacco chimico ad opera delle ife fungine. Cfr.: Hallbauer D.K. and H.M. Jahns “**Attack of lichens on quartzitic rock surfaces**” Lichenologist, **9**, pp. 119-122, 1977; cfr. *supra*, fig. 25.

¹⁰⁶ Cfr. ad esempio: Chen *et al.*, *cit.* nota 100.

¹⁰⁷ In letteratura, più geologica che lichenologica, si parla in questi casi di stromatoliti licheniche. Cfr.: Klappa C.F. “**Lichen Stromatolites....**”, 1979, *cit.*, nota 103.

¹⁰⁸ Cfr. *supra*, nota 23.

¹⁰⁹ Cfr. *supra*, nota 77: Del Monte M., 1990.

¹¹⁰ O *biopitting*. Cfr.: Mohammadi P. and W.E. Krumbein “**Biodeterioration of ancient stone materials from the Persepolis monuments (Iran)**” Aerobiologia, **24**, pp. 27-33, 2008.



Fig. 14 – La patina bruna a ossalati di calcio presente su moltissimi monumenti antichi [in marmo o in calcare] situati all’aperto in aree urbane oggi molto inquinate, aggredita dalle deposizioni acide [solide, liquide e occulte] appare oggi in via di dissoluzione. La patina è spesso, come nel caso qui presentato, associata a numerose piccole cavità [cfr. fig. 6 e 7]. Queste piccole cavità a sezione circolare e a forma emisferica visibili in più punti del rilievo [nel testo emimicrosfere] sono ciò che resta delle sedi degli ascocarpi, vale a dire dei corpi fruttiferi, di licheni semiendolitici che colonizzavano la superficie del monumento in passato, quando i livelli di inquinanti aereodispersi erano molto inferiori a quelli odierni e i licheni godevano ottima salute anche nel cuore delle città. Queste piccole cavità una volta abbandonate possono col tempo venire allargate dall’acqua di pioggia, mediante un fenomeno di microcarsismo. La coalescenza di due o più emimicrosfere vicine può dar luogo a: i - emisfere più grandi [ben visibili sulle teste dei due soldati in alto a destra e in basso a destra]; ii - ad avvallamenti a bordi zigrinati semicircolari [come quello osservabile in alto nella foto, ovvero in modo ancora più evidente in corrispondenza della spalla destra del soldato con l’ampio mantello in basso, quasi al centro della foto]; iii - quando le emimicrosfere sono allineate si possono formare microkarren [caratteristici dei bordi del bassorilievo dove le microfratture lasciate dallo scalpello dell’Artista risultarono siti più idonei di altri ad ospitare le diaspore. Si noti, ad esempio, quello in corrispondenza della criniera del cavallo in alto a sinistra]: osservando questi solchi con attenzione si può notare che hanno origine da numerosissime emimicrosfere allineate. Questo insieme di motivi superficiali è presente sia su molti monumenti conservati nelle raccolte museali [che hanno trascorso nelle epoche passate periodi sufficientemente lunghi all’aperto], sia su calcari e marmi in campo, vale a dire su affioramenti naturali [Colonna Traiana, particolare, Roma, marmo di Lun].

microkarren. Nel caso infine che nel fenomeno microcarsico vengano coinvolte numerose emisfere contigue si potranno formare tipiche **depressioni a contorno alveolare** non dissimili per forma da quelle che un tempo alloggiavano il tallo lichenico [*insulae*] ma più profonde. Lo spessore dell’avvallamento potrà essere in questo caso di alcuni mm [fig. 14]. Tutti questi motivi sono osservabili sia su manufatti e monumenti, sia su affioramenti naturali [fig. 15].

Che le emimicrosfere – presenti sia in campo sia su un gran numero di monumenti antichi – altro non siano che resti di ascocarpi [vale a dire delle loro tane] può essere dimostrato al di là di ogni ragionevole dubbio mediante la tecnica della contro impronta. In pratica si tratta di prelevare un piccolo frammento di marmo o di calcare

che presenti uno di questi forellini [fig. 16]. Il frammento [di forma all’incirca cubica e con dimensioni inferiori a quelle di un dado da gioco] verrà trattato a lungo con H_2O_2 concentrata in modo da distruggere ogni eventuale traccia di sostanza organica ancora presente. Successivamente si procederà a impregnare il campione sotto vuoto con una resina [*lakeside*] che andrà così a riempire tutte le cavità presenti nel campione. Come ultima operazione il campione verrà trattato con HCl diluito in modo da sciogliere ogni traccia di calcite. Sarà possibile a questo punto studiare e fotografare la contro-impronta in resina così ottenuta al SEM. Tutta l’area circostante la emimicrosfere appare canalizzata da un fitto *network* di filamenti che si addentrano nella pietra. Questi filamenti, il cui diametro è di circa 2-3 μm , si

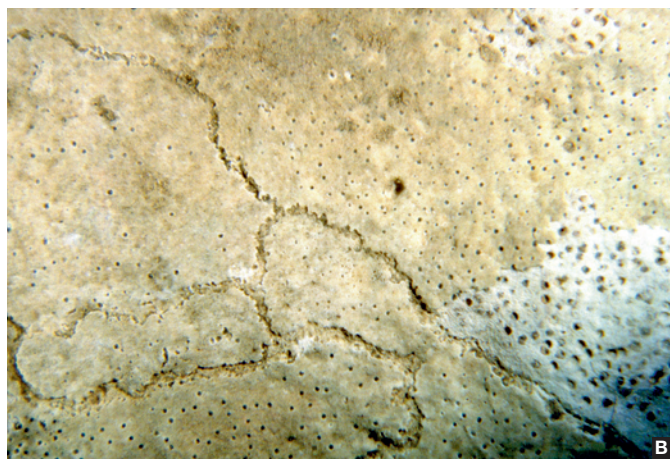


Fig. 15 – Pitting, insulae e ascocarpi anastomizzati su affioramenti calcarei in campo [a e b]. Questi motivi dovuti all'insediamento sulla pietra di licheni semiendolitici, ai fori praticati dai corpi fruttiferi [ascocarpi, spesso apotecii], al congiungimento di più fori a formare strie [microkarren] o avvallamenti alveolari [insulae] sono osservabili, come si è visto [cfr. fig. 14] anche su molti monumenti antichi un tempo anch'essi colonizzati dai licheni [c: podio del monumento alle Nereidi proveniente da Xantos in Licia, Museo Britannico, particolare, Londra, marmo; d: rilievo del Partenone, Museo Britannico, particolare, Londra, marmo].

biforcano senza mutare di spessore¹¹¹ e scendono all'interno della pietra sino a una profondità massima di 10-20 mm circa. Inoltre il *network* diviene sempre meno fitto con la profondità; *ergo* la microemisfera altro non è, come supposto, che un ascocarpo fossile; e i filamenti altro non sono che i cunicoli occupati un tempo dalle ife fungine che si addentravano nella pietra alla ricerca degli elementi della nutrizione. Non esiste, mi pare, altra possibile spiegazione [fig. 17].

Accanto ai licheni semiendolitici esistono anche generi endolitici¹¹². La differenza tra questi due tipi di licheni consiste – come già notato – nel fatto che i secondi hanno il tallo completamente immerso nella pietra e gli individui comunicano con l'esterno solo attraverso gli ostioli. Individuando questo piccolo forellino, cosa non sempre facile, sarà possibile eseguire la sezione sottile trasversale a ragion veduta: molto più spesso questo tipo di lichene viene messo in evidenza per puro caso a sezione fatta. Non è quindi possibile avanzare alcuna

ipotesi sulla loro abbondanza in rapporto ai semiendolitici che sempre li accompagnano **apparentemente** di gran lunga più diffusi. Si può solo notare come alcune delle sezioni sottili trasversali, eseguite su numerosi tipi di calcari e marmi, mostrassero con una certa frequenza licheni endolitici, i quali quindi non potevano che essere abbastanza comuni. In questo caso le ife che si dipartono dal tallo si allontanano da questo in ogni direzione, anche verso l'alto. Il danno causato da questo tipo di licheni è certamente severo ma, come appena detto, è difficilmente quantificabile. Una fitta colonizzazione ad opera di licheni endolitici può portare col tempo al distacco di placche di pietra di notevole spessore [dell'ordine del cm] e con superfici rilevanti [dell'ordine del dm²].

Quasi sempre associati a queste forme di microbioerosione [canalizzazione del substrato, **pitting**, **microkarren**, **depressioni alveolari** e piccole **cavità emisferiche interne**] sono presenti sulle pietre, sia in campo

¹¹¹ È questa, come è noto, una caratteristica tipica delle ife fungine.

¹¹² In letteratura vengono riportate profondità di insediamento di 10 mm [*Verrucaria hiascens*, *Opegrapha calcarea*]; nel corso di questa ricerca la profondità massima riscontrata è stata di 4-5 mm.

sia messe in opera, anche sali biodepositati, sotto forma di **patine brune a ossalati di calcio** a cui si è già accennato in precedenza. L'acqua liquida di pioggia interagendo col tappeto lichenico si arricchisce in acido ossalico a monte e, scendendo, reagisce col carbonato di calcio a valle, trasformandolo in ossalato di calcio¹¹³. Dato che il Ca⁺⁺ è parte integrante della pietra, queste patine saranno **dentro** e non sopra la pietra stessa. Ciò può essere messo chiaramente in evidenza attraverso lo studio in sezione sottile trasversale al microscopio ottico da mineralogia. Ne consegue che se in sede di pulizia di un'opera si asporterà la patina [scambiandola per una scialbatura, vale a dire con una "vernice" applicata sopra a scopo protettivo] si rimodellerà necessariamente la superficie come voluta a suo tempo dall'Artista. Certo il danno sarà di poco conto – lo spessore dello straterello a ossalati di Ca supera difficilmente i 100-300 µm – ma comunque avrà luogo e sarà irreversibile. Che dire di queste patine che hanno destato in passato un grandissimo interesse da parte della comunità scien-

tifica?¹¹⁴ Innanzi tutto che hanno diffusione enorme sia su affioramenti naturali, sia su manufatti e monumenti e poi che presentano una serie numerosa di caratteristiche specifiche che possono essere così riassunte:

- a** – Il colore varia dal rosato, al bruno camoscio sino al bruno scuro ed è in generale abbastanza monotono;
- b** – lo spessore varia, come appena detto, da alcune decine a qualche centinaio di µm; arealmente possono avere l'estensione di pochi mm² o di cm² sino, soprattutto sugli affioramenti naturali, di dm² o addirittura di m²;
- c** – sono in genere massive, meno comunemente rimate e mostrano sempre una notevole scabrosità [*roughness*] superficiale; inoltre il loro aspetto varia notevolmente, in senso areale, anche a distanza di pochi mm;
- d** – non si trovano mai a monte delle zone colonizzate dai licheni ma sempre o in corrispondenza delle stesse o molto più comunemente a valle;
- e** – i rapporti tra lo straterello a ossalati e il substrato non è mai netto, al contrario gli ossalati si addentrano all'interno della pietra, talora circondando interamente i cri-

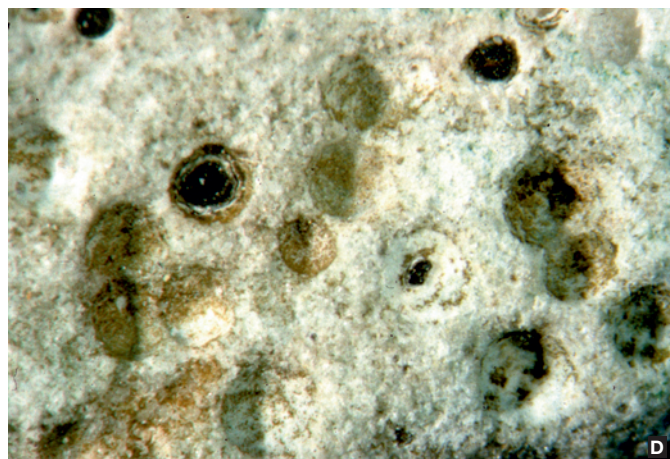
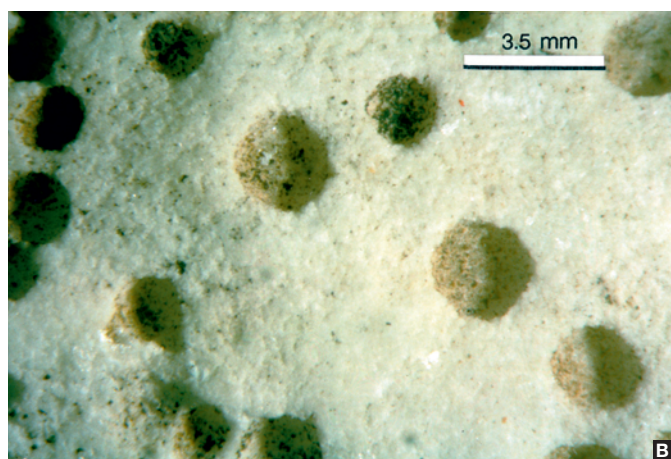
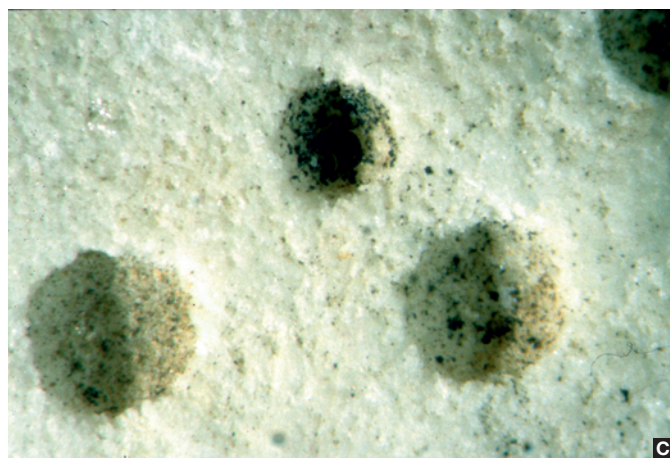
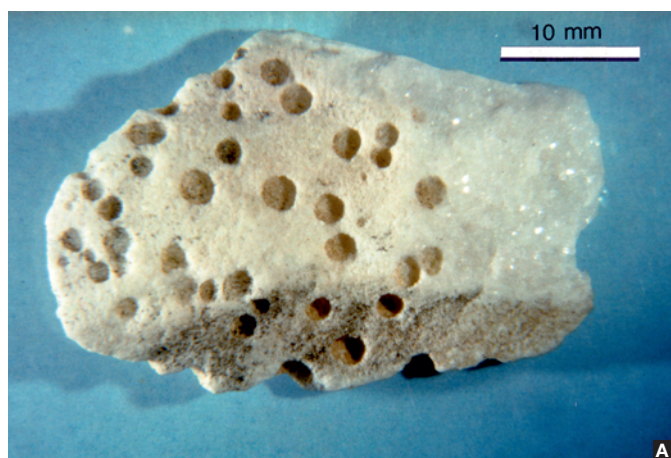


Fig. 16 – Piccolo frammento di marmo di Luni, visto a diversi ingrandimenti [a, b, c: Colonna Traiana, Roma, marmo di Luni]. Questo frammento è stato utilizzato per la realizzazione di contro impronte in resina che sono state poi studiate al SEM [microscopio elettronico a scansione] [cfr. infra, fig. 17]. In basso a destra ascocarpi [apotecij] abbandonati su un affioramento naturale [d: Carrara, marmo].

¹¹³ Questo fatto essendo stato osservato da chi scrive su centinaia di monumenti in diverse parti del mondo può venire generalizzato.

¹¹⁴ Cfr.: Atti del Convegno "Le pellicole ad ossalato: origine e significato nella conservazione delle opere d'arte" pp. 381, Milano, 25-26 Ottobre, 1989; II° Internat. Symp. "The oxalate films in the conservation of works of art" pp. 69-80, Milan, March 25-27, 1996

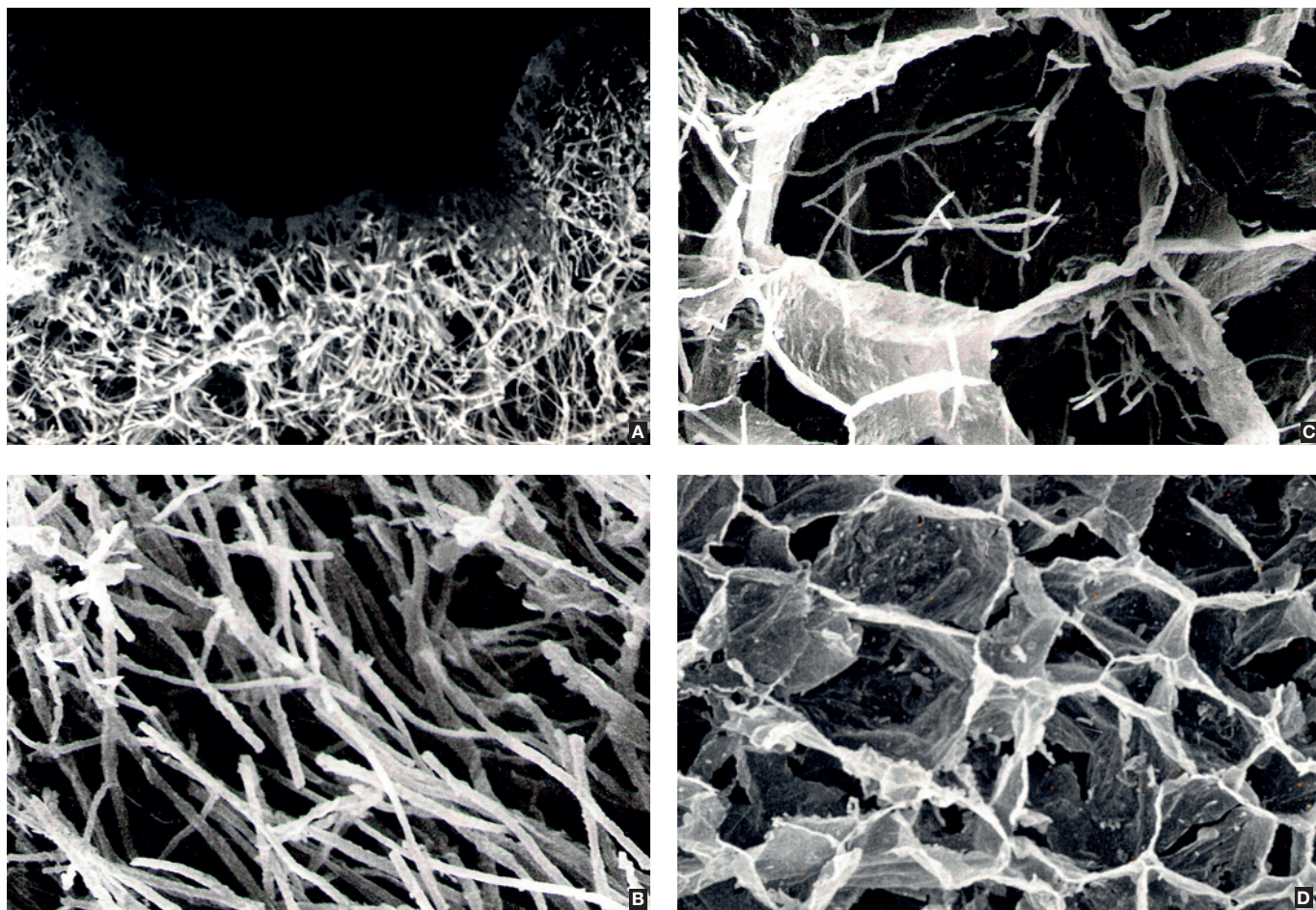


Fig. 17 – Controimpronta di una emimicrosfera [$\varnothing = 1,6 \text{ mm}$] osservata al SEM. Un minuscolo frammento di marmo su cui era presente una emimicrosfera [cfr. supra, fig. 16] è stato trattato a lungo con H_2O_2 concentrata in modo da distruggere ogni traccia di sostanza organica. Successivamente il campione è stato impregnato sotto vuoto con una resina [lakeside] che è andata così a riempire tutti i vuoti presenti. Il campione è stato infine trattato con HCl in modo da sciogliere la calcite. La controimpronta in resina così ottenuta è stata studiata e fotografata al SEM. Tutta l'area circostante la emimicrosfera appare canalizzata da un fitto network di filamenti che si addentrano nella pietra stessa [a]. Questi filamenti il cui diametro è di circa $2-3 \mu\text{m}$ si biforcano senza mutare di spessore e scendono all'interno della pietra sino a una profondità massima di $10-15 \text{ mm}$ [b]. Inoltre il network diviene sempre meno fitto con la profondità [c]. Oltre i 20 mm di profondità sono visibili solo le pareti dei cristalli di calcite mentre mancano completamente tracce di filamenti [d]. Ne consegue che la emimicrosfera altro non è che la tana abbandonata che conteneva un tempo il corpo fruttifero di un lichene [ascocarpo] e i filamenti altro non sono che i cunicoli occupati un tempo dalle ife fungine che si addentravano nella pietra alla ricerca degli elementi della nutrizione. Analisi di questo tipo su ascocarpi presenti su altri monumenti e su affioramenti naturali in calcare e/o marmo hanno dato identici risultati [Colonna Traiana, Roma, marmo di Lunj].

stalli di calcite, e mostrando nei confronti del substrato un'azione aggressivo-metasomatica¹¹⁵ [fig. 18];

f – lo straterello a ossalati ingloba numerosi tipi di particelle tra cui: frustoli carboniosi, spore fungine, pollini, ecc.. [fig. 19].

Da notare inoltre che non sono in alcun modo caratteristiche:

a – di un particolare tipo di marmo o calcare;

b – di una particolare area geografica [sono state osservate da chi scrive su monumenti in Europa, Asia Minore, Est Asiatico, Sud America, Nord Africa];

c – di una particolare cultura;

d – di una particolare epoca anche se a questo proposito occorre precisare che non si formano più sui monumenti situati nelle aree più industrializzate e ciò a partire

dalla Rivoluzione Industriale ovvero da quando i valori degli inquinanti aereodispersi [e in particolare dei composti dello zolfo] hanno superato determinate concentrazioni; anzi su questi monumenti le patine appaiono oggi palesemente in via di dissoluzione;

e – nel caso particolare di monumenti non esiste alcuna correlazione tra l'eventuale motivo artistico del rilievo e la distribuzione della patina;

f – esiste invece una correlazione molto marcata tra distribuzione delle patine e geometria delle superfici, geometria che determina il modo con cui il monumento viene bagnato dall'acqua di pioggia; questa correlazione è osservabile anche sugli affioramenti naturali;

g – sono inoltre comuni sui monumenti "antichi" delle raccolte museali – purché non pesantemente "restauro-

¹¹⁵ Metasomatosi: sostituzione lenta e progressiva di un minerale – nel nostro caso la calcite – con un altro – la whewellite e/o la weddellite – in genere senza variazione di volume.

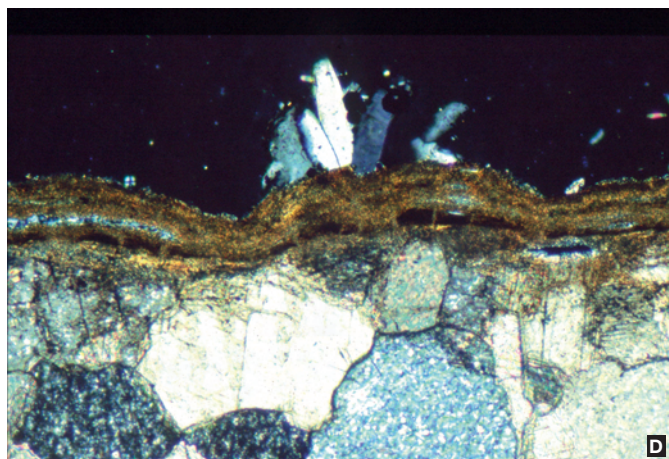
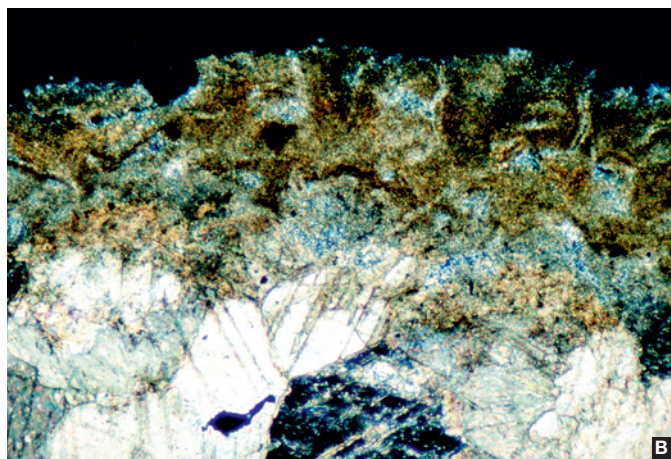
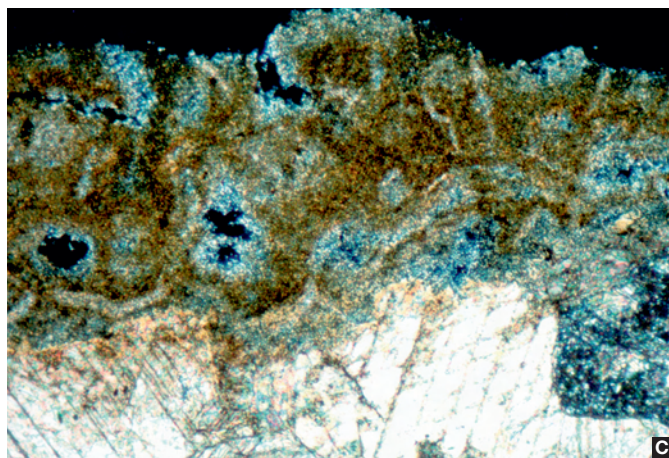
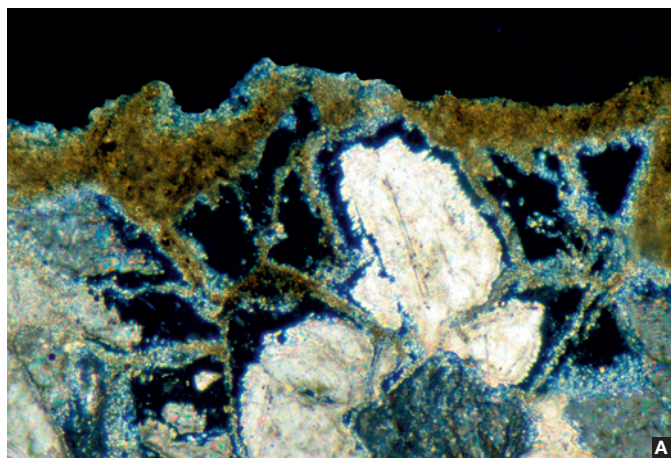


Fig. 18 – La patina bruna a ossalati vista al microscopio da mineralogia in sezione sottile trasversale; la patina si insinua tra cristallo e cristallo del marmo isolando interi cristalli di calcite: ciò parla a favore di un lento processo di trasformazione [metasomatosi] della calcite in weddellite-whewellite [a]; anche nei due casi seguenti la patina sembra insinuarsi tra granulo e granulo dando luogo a una lenta sostituzione metasomatica con vaghi cenni di struttura stromatolitica [?] [b e c]; la patina, talora rimata, mostra nella parte esterna che vede l'atmosfera odierna, cristalli grigi di gesso formati successivamente e di recente [d; cfr. infra fig. 20]. [120 X, nicols X; a, b, d: Colonna Traiana, Roma, marmo; c: Arco di Traiano, Ancona, marmo].

ti¹¹⁶ - che hanno verosimilmente trascorso in passato lunghi periodi all'aperto; al contrario, non sono mai presenti su opere in pietra conservate da sempre "all'interno".

Gli storici dell'Arte [ma talora anche gli archeologi] sono portati a considerare il monumento in modo astratto vale a dire dando scarsa importanza sia alla natura del materiale che da forma all'opera, sia all'ambiente in cui questa si trova. Ancora più difficile realizzare che, soprattutto per i monumenti più antichi, l'ambiente con cui il monumento ha dovuto fare i conti è mutato più volte lasciando spesso segni d'interazione superficiali caratteristici.

Se si osservano le superfici di monumenti in campo in una qualunque città di un'area industrializzata queste appaiono annerite [è il *soiling* degli anglosassoni] mostrando anche talora localmente vistose patine-croste nere. Tutti sanno [o

credono di sapere] che ciò è dovuto allo "smog" [sic!] come scrivono i giornali: i monumenti si anneriscono perché l'aria è inquinata. Allora come non chiedersi cosa succedeva in passato quando l'inquinamento era causato da sorgenti diverse da quelle odierne? Oppure quando era modesto o non c'era affatto?

Le **croste nere** hanno incominciato a formarsi da quando la qualità dell'aria è peggiorata, soprattutto nelle grandi città dei paesi industrializzati sostituendo le patine brune a ossalati che si formavano in precedenza, sulle stesse superfici, quando l'aria era buona¹¹⁷; dato che il passaggio da aria pulita ad aria inquinata è stato quasi ovunque progressivo, dopo le patine a ossalati e prima delle croste nere si saranno potute formare, localmente, **patine grigio cenere** dovute alla combustione della

¹¹⁶ I rilievi del Partenone conservati oggi al Museo Britannico furono "puliti" più volte [ad esempio nel 1816 e nel 1836, in occasione di calcature]; inoltre: "Nel settembre del 1938 Forsdyke scoprì un operaio mentre puliva uno dei marmi di Lord Elgin [i.e. i rilievi in questione acquistati da Elgin dalle forze d'occupazione turche] con uno strumento di rame e una spazzola dura e polvere di carborundum [carburo di silicio: potente abrasivo] strumenti e sostanze assolutamente vietate nel campo del restauro" Prof. F. S. Jenkins, c. p. Questo puntiglioso elenco nasce dal fatto che è stato difficile in passato, e lo è forse ancora oggi, accettare da parte degli Storici dell'Arte un'intrusione dei licheni o come si dirà poi delle cicogne o dei pipistrelli [sic!] nel loro universo.

¹¹⁷ Cfr. *infra* nota 47. Le croste nere sono una delle caratteristiche salienti dei monumenti situati nelle città molto inquinate ma, eccezionalmente, possono essere osservate – come le patine a ossalati – anche su affioramenti naturali. Ciò conferma e sottolinea la stretta analogia genetica tra patine a ossalati e croste nere [di cui nessuno oggi metterebbe in discussione l'origine naturale] e dovrebbe far riflettere chi ancora sostiene l'origine antropica delle prime.

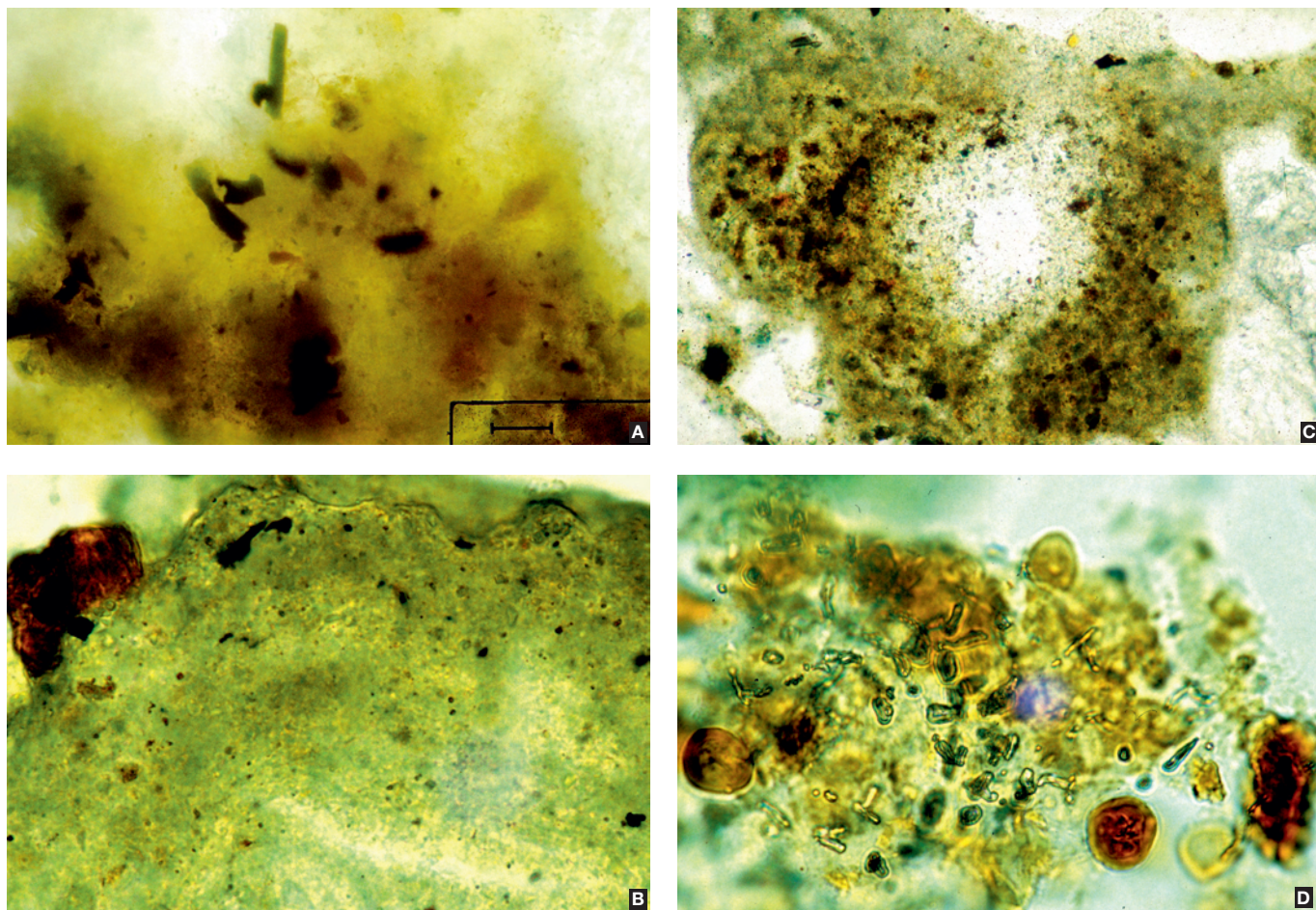


Fig. 19 – Patine brune a ossalati di calcio osservate in sezione sottile a forti ingrandimenti. Le patine includono una miriade di particelle, organiche e non, trasferite nel sistema al momento della genesi o dall'acqua di pioggia o dalla vicina atmosfera. Fra queste particelle è possibile riconoscere frustuli prismatici carboniosi dovuti alla combustione della legna [a]; particelle che potranno essere identificate solamente, dopo avere sciolta la matrice a ossalati, mediante osservazioni al SEM o al TEM [b e c: cfr.: Lefevre et al., nota 123]; pollini e spore fungine [d].

legna che oltre a immettere in atmosfera caratteristiche particelle carboniose prismatiche produce anche discrete quantità di SO₂. Tutte queste patine sono caratteristiche dei sottosquadri e di ogni altra parte rientrante: plissettature e panneggi delle statue, volute dei capitelli corinzi, abachi, intradossi, aggetti, archi sottostanti gli estradossi, sottomensole, sottomodanature e così via, vale a dire ancora una volta delle parti bagnate dall'acqua di pioggia ma non soggette a ruscellamento [il *rain-out* o *wash-out* degli anglosassoni]. Ne consegue che le croste-patine più recenti, tenderanno a ricoprire e a mascherare le più antiche e che sarà possibile osservare durante operazioni di restauro e pulitura di monumenti in calcare o marmo – andando dall'esterno all'interno – la successione: **crosta nera** [costituita da gesso e da particelle carboniose]; **patina color grigio cenere** [costituita da calcite, gesso e da particelle carboniose prismati-

che da combustione di legna]¹¹⁸; **patina bruna** [costituita da weddellite e/o whewellite e particelle v.o.] e infine **marmo o calcare** intatto [fig. 20]. In altre parole le patine sui monumenti memorizzano le variazioni della qualità dell'aria o più in generale dell'ambiente nel tempo. Assieme [in paragenesi con] agli ossalati di Ca sono state segnalate talora in letteratura tracce più o meno consistenti di fosfati di calcio in genere sotto forma di patine di colore variabile dal giallo-ocra al rosso-ruggine. L'analisi XRD ha sempre mostrato picchi simili se non identici a quelli della **idrossiapatite** [Ca₅(PO₄)₃(OH)], esagonale. A questo minerale sono talora associate tracce di **brushite** [CaHPO₄·2H₂O], monoclina di **dahllite** [Ca₅(PO₄,CO₃)₃(OH)] esagonale e talora anche tracce di **gesso** [CaSO₄·2H₂O], monoclini¹¹⁹. Anche queste patine sono presenti [come le precedenti] nelle parti bagnate dall'acqua di pioggia ma non soggette a *rain-out*. Inoltre

¹¹⁸ Ausset P., Bannery F., Del Monte M. and R.A. Lefèvre "Recording of pre-industrial atmospheric environment by studying ancient crusts on stone monuments" Atmospheric Environment, **32**, 16, pp. 2859-2863, 1998; Del Monte M., Ausset P., Lefèvre R. A. and S. Thiébaud "Evidence of pre-industrial air pollution from the Heads of the Kings of Juda statues from Notre-Dame Cathedral in Paris" The Science of the Total Environment, **273**, pp. 101-109, 2001; Del Monte M., Ausset P., Forti P., Lefevre R.A. and M. Tolomelli "Air pollution records on selenite in the urban environment" Atmospheric Environment, **35**, pp. 3885-3896, 2001.

¹¹⁹ Tutti questi minerali sono noti da tempo come prodotti d'interazione tra il guano e superfici calcaree, soprattutto in grotta; cfr.: Moravansky D. "Guanové Minerály" Mineralia Slovaca, **28**, pp. 231-236, 1996.

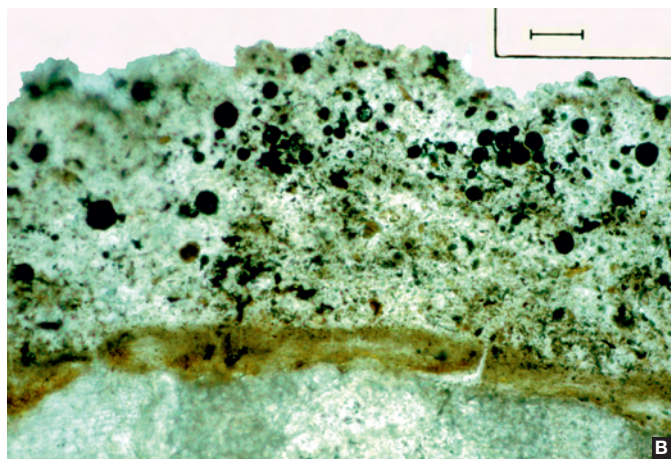
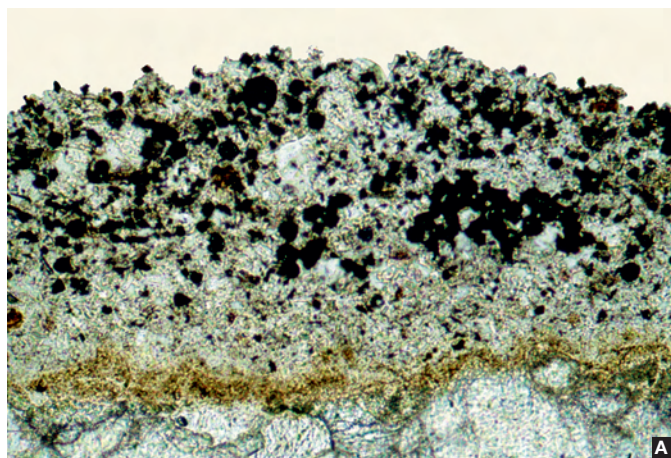


Fig. 20 – Microfotografie [a e b] di croste nere presenti su monumenti in marmo e calcare osservate in sezione sottile trasversale al microscopio ottico da mineralogia a 100. Le croste nere, come è noto, sono costituite da un fitto intreccio di cristalli di gesso che include una miriade di particelle sferiche carboniose dovute sia alla combustione di oli, sia a quella del carbone. Sono caratteristiche dei monumenti situati nelle città dove la qualità dell'aria è pessima [a far tempo dalla così detta Rivoluzione Industriale sino ai nostri giorni]. Alla base della crosta nera è talora possibile osservare [non sempre, ma abbastanza frequentemente] uno straterello bruno a ossalati di calcio: ergo questo straterello - a contatto con la pietra - si è formato prima della crosta nera. La patina a ossalati ricorda i bei tempi andati, quando gli inquinanti aereodispersi erano praticamente assenti e sui monumenti [anche nelle città] vivevano felicemente i licheni. Il peggioramento della qualità dell'aria, la fuga dei licheni, la fine della formazione delle patine a ossalati, l'inizio della formazione delle croste nere sono fenomeni tra loro strettamente correlati che si sono succeduti nel tempo. Il motivo per cui le patine a ossalati e le croste nere si trovano negli stessi siti del monumento è dovuto al fatto che entrambe sono caratteristiche dei sottosquadri o comunque di quei siti del monumento che per la loro geometria sono bagnati dall'acqua di pioggia ma non soggetti a ruscellamento [il rain-out o wash-out degli anglosassoni]. Lo stesso motivo - patine nere a solfati di calcio che ricoprono le sottostanti patine brune a ossalati di calcio - è spesso osservabile, anche a livello macroscopico vale a dire ad occhio nudo, durante il restauro di monumenti antichi [c e d]. [a: Basilica di Santo Stefano, Bologna; b: Arco di Traiano, Ancona; c: Arco di Augusto, prova di pulizia, particolare, Rimini; d: Colonna Traiana, particolare, Roma].

mai nelle parti sommitali dei monumenti ma sempre, diciamo così, a valle. Per spiegarne l'origine sono state avanzate numerose ipotesi, spesso stravaganti, e tutte riferibili all'azione diretta o indiretta dell'uomo. Non è escluso anzi è probabile che casi particolari possano essere ricondotti all'azione antropica messa in atto a scopo protettivo e/o consolidante¹²⁰. Tuttavia la stragran-

de maggioranza di queste patine hanno anch'esse, come le croste nere e come quelle a ossalati, un'origine naturale e sono riconducibili alle **deiezioni degli uccelli** o a quelle dei **chiotteri** che vivevano a milioni [oggi la cosa è difficilmente immaginabile] in tutte le città antiche [in realtà sino ai primi del '900 in Italia] e in particolare in strutture come i templi, le cattedrali, le pievi¹²¹ [fig. 21].

¹²⁰ Jenkins J.D. and A.P. Middleton "Paint on the Parthenon sculptures" Annual British School of Archaeology at Athens, 83, pp. 183-2007, 1988; Kouzeli K. and C. Tolis "Structure and composition of superficial orange-brown layers from different Classical, Hellenistic, Roman and Byzantine monuments of Greece" Il Internat. Symp. "The oxalate films in the conservation of works of art" pp. 69-80, Milan, March 25-27, 1996; Kouzeli K., Lazari C., Economopoulos A. and C. Pavelis "Phosphatic patinas on Greek monuments [Acropolis of Athens and Byzantine monuments]: general discussion and further documentation on the presence of oxalates" Il Internat. Symp. "The oxalate films in the conservation of works of art" pp. 83-93, Milan, March 25-27, 1996.

¹²¹ La relazione tra fosfati e guano dei chiotteri è nota da tempo; cfr. p.e.: Uchida E., Ogawa Y., Maeda N. and T. Nakagawa "Deterioration of stone materials in the Angkor monuments, Cambodia" Engineering Geology, 55, pp. 101-112, 1999. Solo 150 anni fa - è questo un modesto esempio - nel sottotetto della Basilica di San Petronio a Bologna i pipistrelli vivevano in gran numero: "Non esagero dicendo che dovevan essere migliaia que' mammiferi dalla mano alata che vivevano in comune lassù"...."Il suolo, le travi, le arcate erano ricoperte di uno strato di guano che scricchiolava sotto i piedi, e di cui si asportavano in capo all'anno parecchi quintali" Rubbiani A., L'Aurora, Bologna, 12 Maggio 1878. L'uso massiccio del DDT ha debellato quasi ovunque la malaria ma, eliminando il 90% degli insetti, ha anche drasticamente ridotto le colonie di pipistrelli che, per il 70% circa, sono insettivori. I pipistrelli prediligevano, nella stagione invernale, luoghi caldi come i sottotetti, ma si accontentavano in mancanza d'altro di qualunque anfratto più o meno riparato.



Fig. 21 – La foto mostra un pipistrello appeso a una parete calcarea patinata in giallo da fosfati [soprattutto idrossiapatite]. E' noto da tempo che fra i numerosi acidi prodotti dalla mineralizzazione del guano dei chiroterri spiccano l' HNO_3 , l' H_3PO_4 e l' H_2SO_4 . Sono una sessantina i minerali segnalati in letteratura, soprattutto in grotta, dovuti all'interazione tra questi acidi e rocce calcaree. Tra questi una decina sono nitrati e solfati e una quarantina sono fosfati. Non rari inoltre minerali organici come la guanina, l'oxamite, l'uricite, l'urea e la weddellite. Tra i fosfati il più comune è l'idrossiapatite. L'origine di patine simili a questa [il colore può passare al giallo scuro al rosso ruggine] presenti su molti monumenti antichi è confermata dalle particelle che queste inglobano: cuticole di coleotteri e frammenti chitinosi di altri insetti osservabili sia al microscopio da mineralogia in sezione sottile trasversale, sia dopo opportuno trattamento al microscopio elettronico a scansione [SEM]. [Fonte: D. Scaramella "Chiroterri Italiani" Edagricole, p.17, Bologna, 1984, c.a. A.]

La decomposizione del guano porta alla formazione di numerosi acidi tra cui il nitrico e il fosforico: poiché i nitrati sono molto solubili – e perciò raramente segnalati in contesti come quelli qui studiati [superfici dei monumenti in pietra]¹²² – resteranno i soli sali dell'acido fosforico ed essendo su calcari e marmi l'unico catione disponibile il Ca non potranno che essere fosfati di cal-

cio. La presenza di frammenti di cuticole chitinosi di coleotteri e di frammenti organici riferibili ad altri insetti presenti all'interno di queste patine osservate – da chi scrive – in diversi siti tra cui l'arco di Augusto a Rimini permettono di ricollegarle senza ombra di dubbio a colonie di pipistrelli e/o a cicogne che un tempo abitavano le parti alte del monumento¹²³ [fig. 22].

In breve la maggior parte delle patine presenti sui monumenti derivano da fenomeni d'interazione ambiente-superfici. Poiché l'ambiente ha subito profonde modificazioni nel tempo le patine hanno mutato d'aspetto e di composizione seguendo necessariamente queste variazioni. La successione completa è: patine a ossalati e/o a fosfati [licheni, uccelli, chiroterri], croste grigie [combustione di legna], croste nere [combustione di carbone e oli] sino agli odierni film neri [combustione di metano e benzina verde]. Questa successione non è osservabile né sempre, né completa, né simile in ogni sito; la presenza di record più o meno completi dipenderà dalla storia del singolo monumento, inclusi i possibili e ripetuti brutali restauri, e soprattutto dal grado di industrializzazione che ha caratterizzato e caratterizza l'area in cui ancor'oggi si trova.

B – L'alterazione dei graniti

Sulle superfici dei monumenti realizzati utilizzando graniti [o pietre simili quali dioriti, sieniti, monzoniti] non è facile osservare patine da biointerazione o anche solo biominerali in tracce [esterni al tallo]. Il motivo è ovvio: l'acido ossalico, il più potente fra gli acidi organici e l'unico apparentemente in gioco nel nostro contesto, può spostare facilmente l'acido carbonico dai suoi sali $[CaCO_3, CaMg(CO_3)_2]$, ma al contrario non può spostare l'acido silicico da "sali" quali ortoclasio [o il microclino], plagioclasii [albite o oligoclasio], biotite [o muscovite], né tantomeno attaccare, se non con estrema difficoltà, ossidi come il quarzo.

Nei graniti e rocce analoghe appaiono colonizzati da licheni epilittici crostosi¹²⁴ anche i sottosquadri sebbene meno illuminati [cfr. *supra* fig. 11]. Tutto lascia pensare che non essendo queste zone – in questi tipi di pietra – né avvelenate [da prodotti di scarto], né impermeabilizzate [dalle patine a ossalati] le diaspore possono attecchire e dar luogo facilmente a nuovi individui.

Su questo tipo di pietre non solo mancano le patine che caratterizzano calcari e marmi ma, come si è detto,

¹²² Cfr.: Del Monte M., Sabbioni C., Camuffo D. e A. Bernardi "Inquinamento atmosferico e degrado dei monumenti in pietra: ruolo dell'Azoto nei processi di deterioramento" Atti SEP/Pollution "Città e Ambiente", pp. 365-384, Padova, 1988. In questo caso l'acido nitrico era prodotto da processi di combustione, vale a dire dall'ossidazione dell' N_2 atmosferico alle alte temperature. In questa breve nota veniva per l'appunto sottolineata la difficoltà di evidenziare nitrati nei processi d'interazione data la loro notevole solubilità.

¹²³ Cfr. R.A. Lefevre et al.: "Archeometric Study to reconstruct the pollution and the climate of the past and their effect on cultural heritage", Commission of the European Union, DGXII, Final Report, 2000; Del Monte M. "L'Arco di Augusto e la qualità dell'aria a Rimini: le patine superficiali" In: "L'Arco di Augusto: significati e vicende di un grande segno urbano" a cura di Foschi P. L. e P. G. Pasini, Musei Comunali Rimini, pp. 114-119, 1998. Queste patine furono studiate, sempre da chi scrive, anche sull'Arco di Traiano in Ancona in un lavoro ancor'oggi nel cassetto.

¹²⁴ Molto meno comuni, limitatamente ai casi studiati, i fogliosi e i frutticosi. Rarissimi i semiendolitici, del tutto assenti gli endolitici. Cfr.: Romão P.M.S. and A. Rattazzi "Biodegradation on Megalithic Monuments. Study of Lichens' Colonization on Tapadão and Zambujeiro Dolmens (Southern Portugal)" Internat. Biodegradation & Biodegradation, 37, pp. 23-35, 1996.



VUE D'UNE PORTE DE MYLASA

A



RUINES DE STRATONICÉE.

B

Fig. 22 – Nidi di cicogne su monumenti antichi. Non solo i chiroterri ma anche gli uccelli possono essere il fattore che ha portato alla formazione di patine a fosfati di calcio su monumenti antichi in calcare o marmo. Fra questi è probabile che abbiano avuto un ruolo importante le cicogne che nidificano [nidificavano] sempre alla sommità di manufatti e monumenti. Il meccanismo è molto simile a quello che porta alla formazione delle patine a ossalati: l'acqua di pioggia inzuppa il nido e rivola a valle arricchita soprattutto in acido nitrico e acido fosforico formando per interazione con la pietra, nitrati e fosfati di calcio. Mentre i nitrati, come già notato, sono solubili i fosfati potranno restare in situ sotto forma di caratteristiche patine colore giallo, rosso-ruggine. [Fonte: M.G. Choiseul-Gouffier "Voyage pittoresque", Paris, 1782].

anche tracce isolate di biominerali [vale a dire ossalati] sono molto rare: sono invece comuni i minerali argillosi sulla cui genesi però, come si è visto, non è facile dire quale ruolo preciso abbiano avuto i licheni.

Se sui graniti i fenomeni di biodeposito sono quasi del tutto assenti, quelli chimico-meccanici appaiono invece rilevanti. Lo studio sia di affioramenti naturali, sia di monumenti, situati in aree dove la qualità dell'aria è ancor'oggi buona, mostra come questo fenomeno sia tuttora attivissimo: anzi si può dire che in questi siti è – come lo era nei secoli passati – il principale fattore di danno ovvero quello che da lì ad ogni ulteriore fattore. Le rizine insinuandosi tra granulo e granulo sino come si è detto a 40-45 mm di profondità, scollano i minerali, arenizzando superficialmente la roccia¹²⁵ [fig. 23]. Ma non è tutto: le singole ife sono in grado di addentrarsi nei minerali aprendosi strade nuove che nulla hanno a che fare né con piani di sfaldatura, né con i piani di clivaggio, né con preesistenti microfrazture¹²⁶ [fig. 24]. Le specie minerali appaiono "perforate" secondo un ordine ben preciso: 1 – biotite; 2 – ortoclasio; 3 – Na[Ca] plagioclasio¹²⁷. Il quarzo appare raramente canalizzato [fig. 25]: quando le rizine nella loro discesa incontrano un cristallo di quarzo, di regola, lo aggirano e proseguono poi la loro ricerca oltre [fig. 26]. Questo fatto è senza alcun dubbio dovuto a due moti-

vi: **a** – le ife riescono con estrema difficoltà ad attaccare il quarzo; **b** – il quarzo è totalmente privo degli elementi della nutrizione quindi non avrebbe alcun senso darsi da fare per perforarlo. Questa seconda considerazione è avvalorata dal fatto che, viceversa, tra i minerali del granito quello di gran lunga più aggredito è la biotite che – contenendo K, Mg, Fe e i relativi elementi vicarianti¹²⁸ – costituisce una buona riserva alimentare per il lichene.

Da notare che la canalizzazione della biotite [fig. 27], dell'ortoclasio e del plagioclasio [oligoclasio] non appare accompagnata da fenomeni di argillificazione [incluse le cloriti, anch'esse minerali argillosi]: questi ultimi sono limitati alla zona superficiale dove il contenuto in acqua è maggiore. È possibile, come già accennato, che l'azione dei licheni nella genesi degli argillosi non sia diretta – come supposto da numerosi Autori – ma indiretta: non v'è dubbio infatti che il lichene aumenti il tempo di bagnamento della roccia¹²⁹; inoltre acidificando la vicina soluzione, soprattutto attraverso l'acido ossalico [ma anche il carbonico], favorisca la pseudo-idrolisi sia dei feldspati, sia della biotite. Il processo sarà favorito da chelanti, come lo stesso ione ossalato, e numerosi altri a cui si è accennato in precedenza.

La profondità del danno coincide con quella a cui giungono le rizine: su queste pietre la profondità massima

¹²⁵ Il presunto effetto protettivo o consolidante del tappeto lichenico è solo apparente: quando la colonia muore questo svanisce.

¹²⁶ Questa affermazione si basa su misure eseguite al microscopio da mineralogia in sezione sottile utilizzando la piattaforma di Fedorow [o tavolino universale] e il reticolo di Wulff, strumenti che oramai nessuno più usa.

¹²⁷ In una precedente nota chi scrive aveva considerato i plagioclasii più canalizzati dell'ortoclasio. Numerose osservazioni fatte successivamente hanno permesso di posporli all'ortoclasio. *Contra*: Silva B., Rivas T. and B. Prieto "Effect of lichens on the geochemical weathering of granitic rocks" *Chemosphere*, **39**, 2, pp. 379-388, 1999.

¹²⁸ Si dicono vicarianti quegli elementi chimici che sostituiscono nel reticolo cristallino di un minerale l'elemento principale esplicando funzioni simili. Appartengono, ad esempio, al gruppo del Mg⁺⁺, che è un macroelemento della fertilità, oltre al Fe⁺⁺: Mn, Co, Ni, Cu, Zn tutti microelementi della fertilità. Esperimenti di laboratorio condotti da chi scrive, e da altri ricercatori, hanno dimostrato che la biotite è tra i minerali del granito la più sensibile all'azione di acidi organici [soprattutto dell'acido ossalico]; cfr.: Song S.K. and P.M. Huang "Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids" *Soil Sci. Soc. Am. Journ.*, **52**, pp. 383-390, 1988.

¹²⁹ Bjelland T. and I.H. Thorseth "Comparative studies of the lichen-rock interface of four lichens in Vingen, western Norway" *Chemical Geology*, **192**, pp. 81-98, 2002.

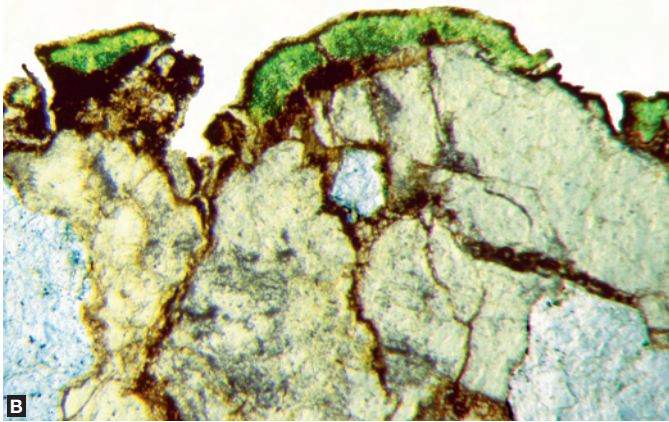
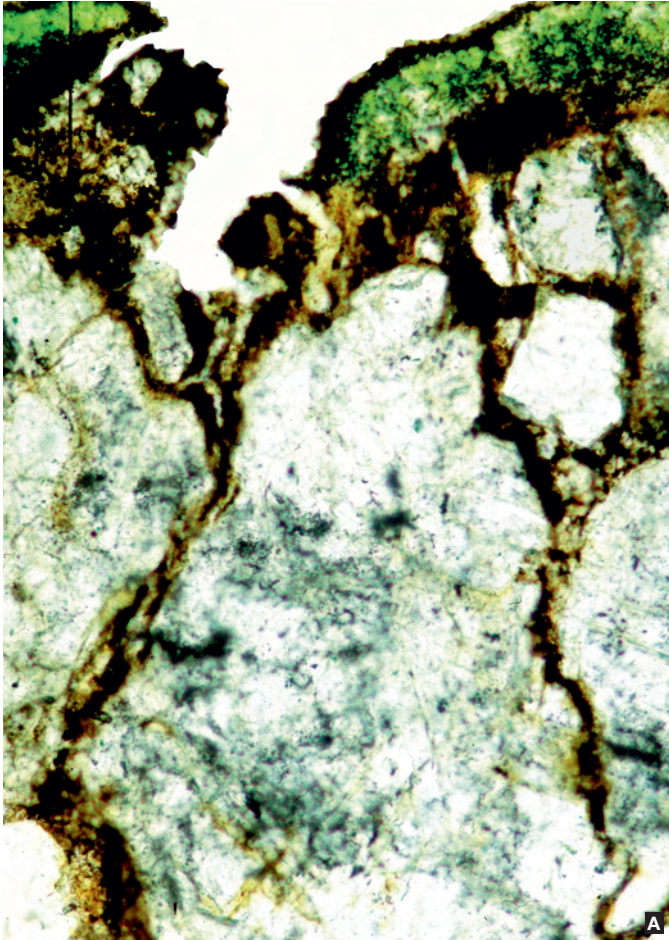


Fig. 23 – Licheni epilittici su un granito osservati al microscopio in sezione sottile trasversale. Si possono notare dall'alto in basso [dall'esterno all'interno] il cortex superiore, il tappeto algale verde, il cortex inferiore, i fasci di ife [rizine] che si addentrano nella pietra in posizione [apparentemente] intragranulare [a: Dolmen di Zambujero, dintorni di Evora, Portogallo; b: Santiago de Compostela, Cattedrale, Spagna; c: chiesa di San Estevo de Ribas de Miño, Galizia, Spagna].

osservata è dell'ordine del cm [sino a 45 mm]¹³⁰. Sarebbe però deviante a questo proposito generalizzare fornendo statistiche o diagrammi: è più che probabile che la profondità di penetrazione dipenda dal tipo di granito e dalle sue caratteristiche petrografiche [chimismo, mineralogia, struttura, tessitura, granulometria], dal clima e dai suoi fattori, dal microclima, dalla geome-

tria delle superfici, dal genere e specie del lichene pioniere. Quindi è più corretto fornire un dato qualitativo, che riguarda le osservazioni fatte con molti limiti da parte di chi scrive [ad esempio la scarsa conoscenza della sistematica lichenica] e che non può in alcun modo essere generalizzato¹³¹.

Esperimenti di laboratorio hanno mostrato che i liche-

¹³⁰ Sino a 4,5 cm; cfr.: Del Monte M., Rattazzi A., Romao P. and P. Rossi "The role of lichens in the weathering of granitic buildings" in : "Degradation and conservation of granitic rocks in monuments", Proceedings of EC Workshop held in Santiago de Compostela, (J. Delgado-Rodrigues ed.), pp. 301-306, 1996.

¹³¹ Alcuni A.A. hanno addirittura determinato la velocità di penetrazione delle ife nel tempo [mm/anno]; cfr.: Lee M.R. and I. Parsons "Biomechanical and biochemical weathering of lichen-encrusted granite: textural controls on organic-mineral interactions and deposition of silica-rich layers" Chemical Geology, 161, pp. 385-397, 1999.

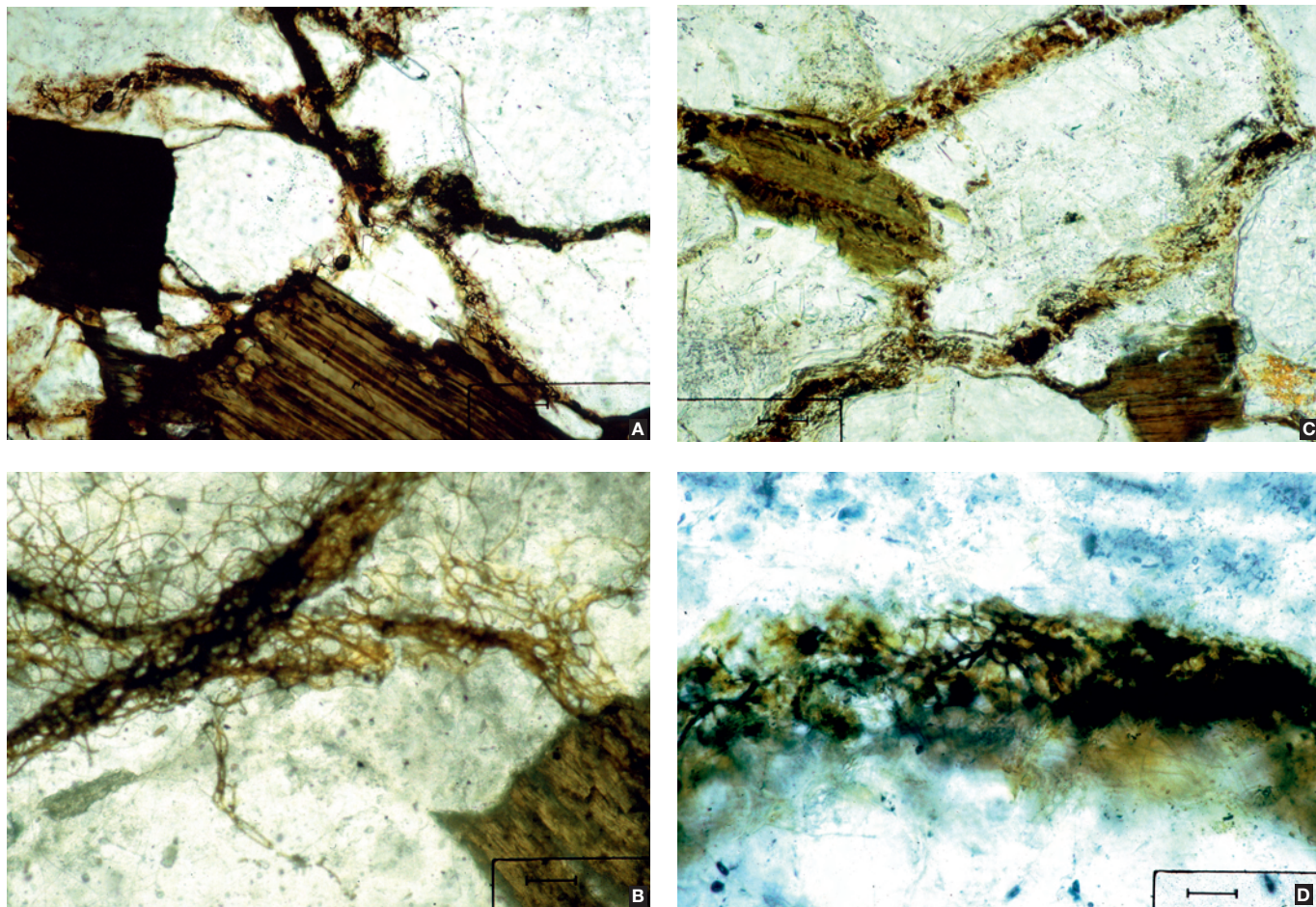


Fig. 24 **a e c** - Granito attaccato da licheni epilittici osservato al microscopio in sezione sottile trasversale [particolare]. Le rizine si addentrano nella pietra in posizione, presumibilmente, intragranulare: in questo caso è possibile intravedere come dal fascio che scende in profondità [sino a 2,5 – 3,0] cm singole ife si allontanano per addentrarsi nei minerali con cui vengono a contatto; **b e d** - Se da prima i fasci di ife possono penetrare nella pietra sfruttando eventuali scollamenti tra granulo e granulo sono poi anche in grado di aprirsi percorsi del tutto indipendenti all'interno del cristallo. Questo comportamento è più che logico se si tiene conto che le ife sono alla ricerca degli elementi della nutrizione che si trovano all'interno dei cristalli e non tra cristallo e cristallo [a e b: Santiago de Compostela, Spagna, Cattedrale, granito; c e d: Dolmen di Evora, Portogallo, granito].

ni riescono a portare in soluzione numerosi cationi metallici¹³²: è certo che ciò avviene principalmente attraverso la chelazione indotta anche da sostanze licheniche praticamente insolubili. Tra i chelanti – forse perché poi è possibile osservarne gli effetti – un ruolo preminente viene assegnato da molti A.A. all'acido ossalico¹³³.

Chi scrive ha confrontato la composizione del livelletto di granito interessato dal reticolo [network] delle rizine-ife [A] con quella del granito inalterato [B] e con

quella del tallo disseccato del lichene pioniere [C]: Zn, Cu, Mn, B, S, P risultarono impoveriti in A rispetto a B e concentrati in C¹³⁴. Tenendo conto di questi risultati sperimentali [ma anche di quelli di numerosi altri ricercatori] è dimostrato che i licheni sono in grado di estrarre dai minerali del granito gli elementi della nutrizione portandoli in soluzione in modo tale da poter venire poi assimilati.

Se osserviamo un monumento in granito tappezzato di licheni, apparentemente il tappeto lichenico sem-

¹³² Numerosi A.A. – tra cui lo scrivente - hanno confrontato soluzioni di polvere di granito+polvere di lichene con identiche soluzioni di sola polvere di granito. Dopo un periodo di alcuni mesi [ma in alcuni casi la reazione avveniva in poche ore] la prima soluzione appariva più ricca in Cu, Ca, K, Na rispetto alla seconda [risultarono leggermente arricchiti, durante questi esperimenti, anche Mg, P, S, Mo, Fe e V]. Nel confronto si tenne conto, sottraendoli, dei tenori rilasciati dalla sola polvere di lichene. L'esperimento è molto grossolano ma dimostra inequivocabilmente il potere chelante-solvente-idrolitico delle sostanze rilasciate dal lichene sui minerali del granito. I risultati ottenuti dai diversi A.A. non sono facilmente confrontabili [licheni diversi, substrati diversi, tecniche differenti, ecc..]. Cfr. a questo proposito: Djingova R., Kuleff I. and B. Markert "Chemical fingerprinting of plants" Ecological Research, **19**, pp. 3-11, 2004.

¹³³ Per Ozenda e Clauzade, cit., p. 13, grande importanza avrebbe l'acido lecanorico.

¹³⁴ Del Monte M. "Experimental weathering test on granitic rocks" In "Conservation of granitic rocks with application to the megalithic monuments" EC Research report n. 5 (J. Delgado-Rodrigues ed.), pp. 192-193, 1996; cfr. anche: Wierchos J. and C. Ascaso "Morphological and chemical features of bioweathered granitic biotite induced by lichen activity" Clays Clay Miner., **44**, pp. 652-657, 1996.

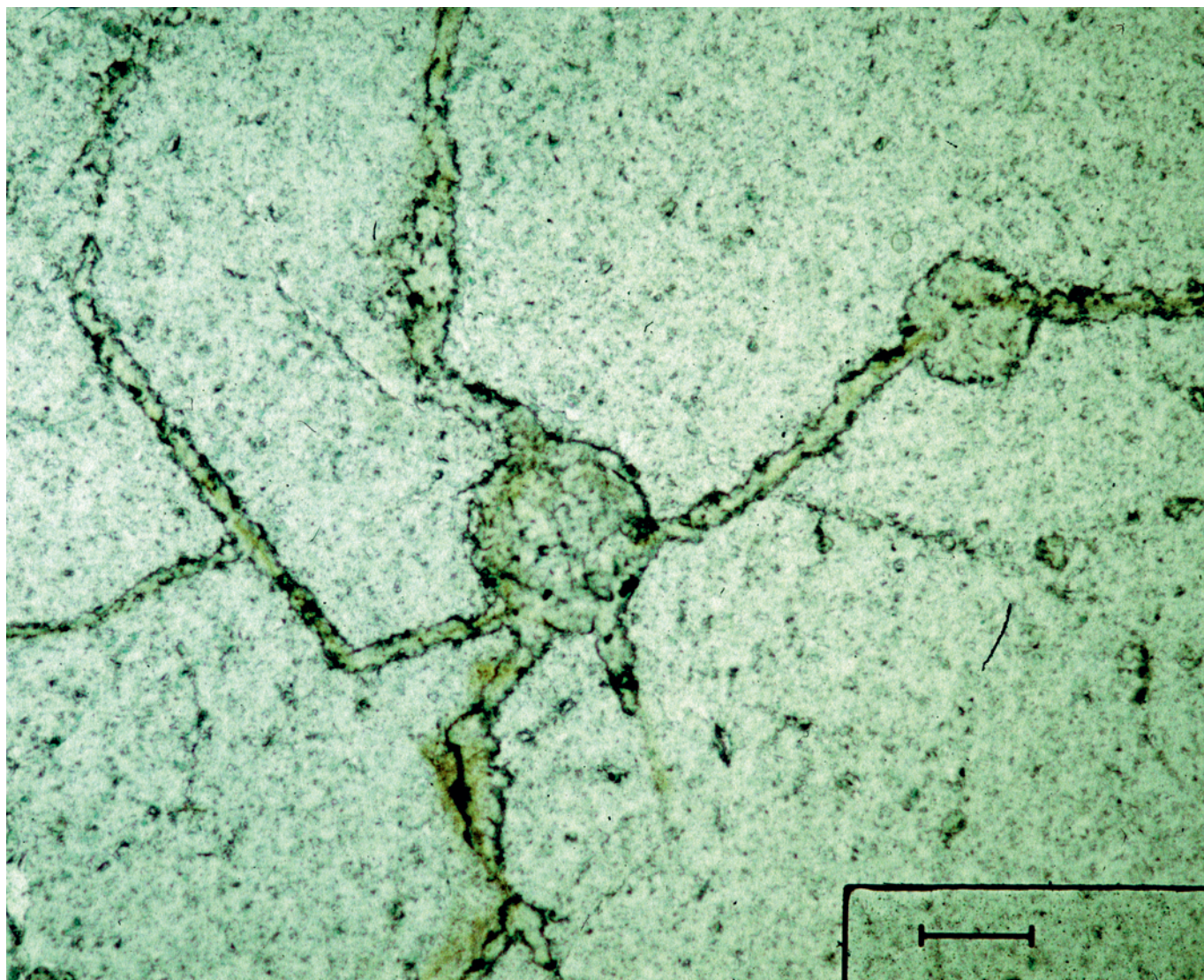


Fig. 25 – Cristallo di quarzo di un granito canalizzato da ife fungine [*Lecanora gangaleoides*], il cui diametro è di circa 2-3 μm , situato a circa 40 mm di profondità dalla superficie esterna colonizzata dai licheni. Le due piccole cavità sferiche, il cui diametro è di circa 9-13 μm , contengono – presumibilmente – lipidi e/o glucidi vale a dire una riserva alimentare che le ife utilizzeranno per poter proseguire l'esplorazione all'interno della roccia: gli specialisti le indicano come ife vegetative oleifere. Le ife fungine sono quindi in grado, sebbene non sempre e con estrema difficoltà, di perforare anche un ossido estremamente refrattario come il quarzo. La profondità a cui il fenomeno è stato osservato è rilevante ai fini del biodegrado delle pietre granitiche. Da notare che cavità simili sono state osservate con maggior frequenza nei plagioclasti e nell'ortoclasio, mai invece nella biotite [Dolmen di Tapadão, dintorni di Evora, Portogallo, granito].

bra svolgere un'azione protettiva: difatti finché i licheni vivono, le rizine e il fitto *network* delle ife tengono assieme i granuli sottostanti. Quando però inevitabilmente la superficie verrà decolonizzata sia per motivi naturali, sia perché la qualità dell'aria è peggiorata, sia infine perché trattata con biocidi il danno avverrà tutto in una volta in brevissimo tempo e sarà severo,

con perdita di materiali superficiali dell'ordine di uno o più centimetri¹³⁵.

RISULTATI E CONCLUSIONI

Il biodegrado – sia delle rocce in campo, sia delle pietre messe in opera – è un processo naturale, inevita-

¹³⁵ Bjelland T. and I.H. Thorseth "Comparative studies of the lichen-rock interface...", 2002, *cit.*, nota 130. Per il biodegrado dei monumenti in granito cfr.: Lee C.H., Choi S.W. and M Shu "Natural deterioration and conservation treatment of the granite standing Buddha of Daejosa Temple, Republic of Korea" Geotechnical & Geological Engineering, 21, pp. 63-77, 2003.

¹³⁶ O biosfera terrestre caratterizzata da basse temperature, basse pressioni, notevoli quantità d'acqua liquida di pioggia, valori di O_2 e CO_2 atmosferici. In questa sede non interessa la *vita o biosfera marina* anche se i monumenti mobili ripescati in mare ovvero quelli fissi costieri soggetti a fenomeni di bradisismo mostrano spesso fenomeni di bioerosione dovuti ai litodomi, alle spugne perforanti e ad altri organismi marini. Questi tipi di bioerosione sono estremamente caratteristici e quindi facilmente identificabili.

bile e irreversibile. L'ambiente superficiale, vale a dire quello in cui è possibile osservare, cavare e poi utilizzare le rocce è anche la sede della **vita**¹³⁶ che tende ad occupare ogni spazio possibile e che, attraverso un'intensa, ininterrotta attività che si perpetua nel tempo da centinaia di milioni di anni, ha contribuito in modo determinante a dar forma al paesaggio¹³⁷. In queste condizioni le pietre messe a nudo vengono colonizzate immediatamente da una miriade di batteri poi, subito dopo, da organismi vegetali inferiori: alghe, funghi e soprattutto licheni¹³⁸. Tralasciando i batteri, il cui ruolo nei processi di degrado delle pie-

tre, certamente importante, non è stato ancora messo bene a fuoco, la simbiosi alga fungo appare vincente. Gli studi condotti durante questa ricerca hanno evidenziato sulla superficie delle pietre soprattutto licheni, meno comunemente alghe, quasi mai funghi isolati che al contrario apparivano in via di lichenizzazione, vale a dire sempre associati a cianofitiche o a cianobatteri¹³⁹.

Contrariamente a quanto asserito da molti Autori i licheni **si nutrono soprattutto a spese della roccia su cui si insediano**¹⁴⁰. Lo stupefacente lavoro svolto dalle ife che si addentrano nella roccia contrasta nettamente con

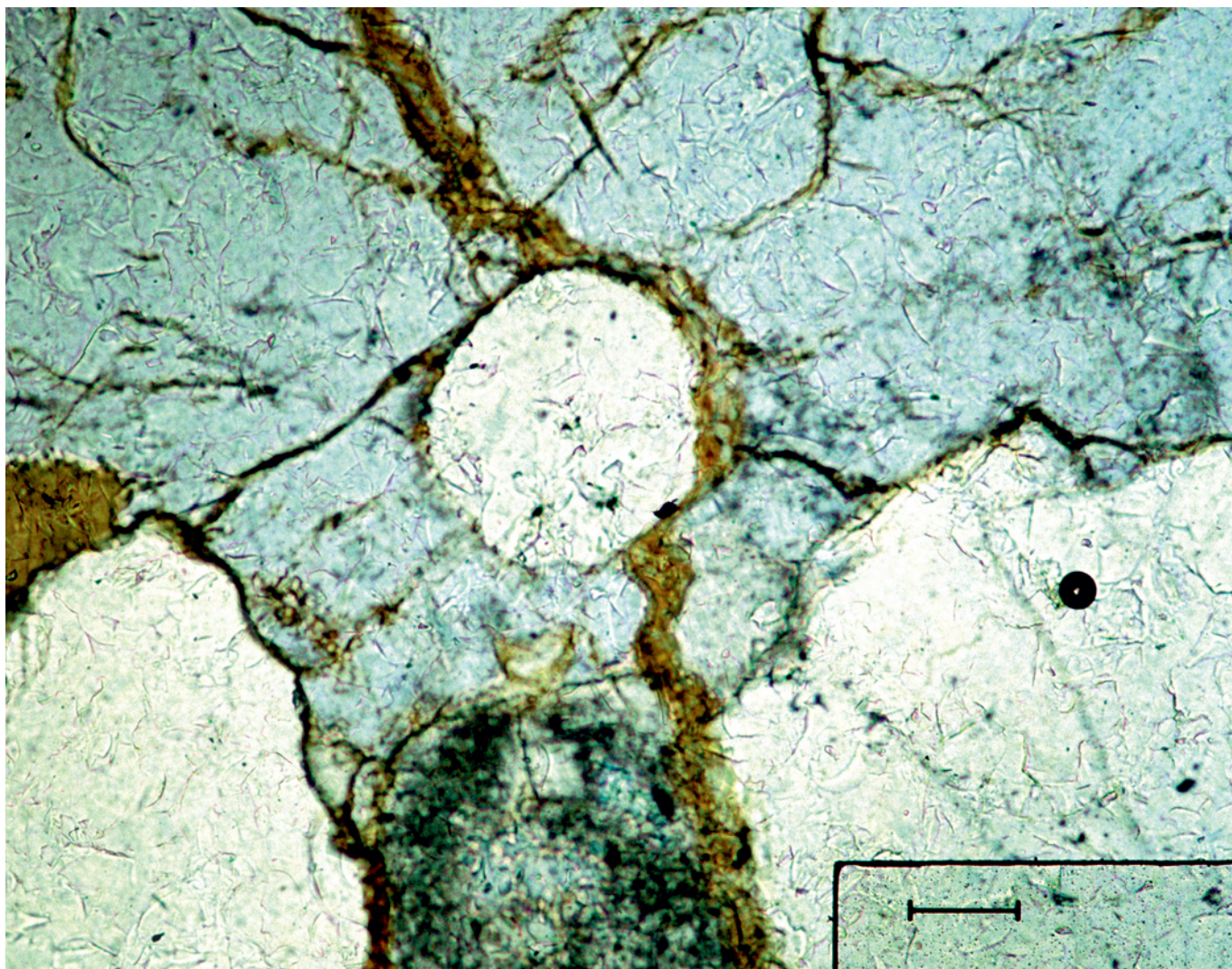


Fig. 26 – Granito osservato in sezione sottile al microscopio da mineralogia a circa 1,5-2 cm dalla superficie. Le ife fungine si addentrano nel feldspato potassico [grigio] mentre lambiscono, senza canalizzarlo, il cristallo di quarzo al centro [bianco, sub circolare] e non sembrano nemmeno canalizzare i due cristalli di quarzo [bianchi] in basso a destra e a sinistra.

¹³⁷ Secondo un'articolo pubblicato in questi giorni sulla prestigiosa rivista inglese Nature la vita [pluricellulare] avrebbe avuto inizio sulla Terra 2,4 miliardi di anni fa.

¹³⁸ Tralasciamo qui, perché non interessano, numerosi altri fattori di danno quali: crioclastia, termoclastia, ecc..

¹³⁹ Si ritiene che oltre il 20% di quelli che vengono chiamati funghi siano in realtà licheni; cfr.: Barianaga M. "Origins of Lichen Fungi Explored" Science, **268**, p. 1437, 1995.

¹⁴⁰ Fatta salva l'organizzazione della CO₂ da parte dell'alga. Se si ammette che i licheni sono un fattore di danno per le pietre [e ciò è innegabile] occorre anche porsi la domanda: perché? La risposta non può essere certamente: per semplice divertimento. Già Aristotele diceva: "La natura non fa niente di inutile".

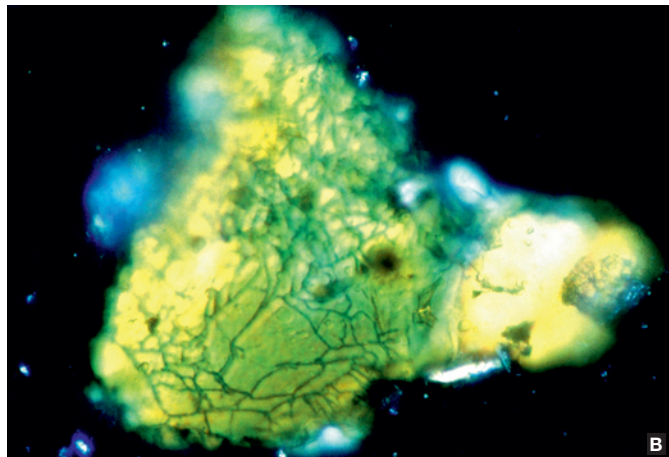
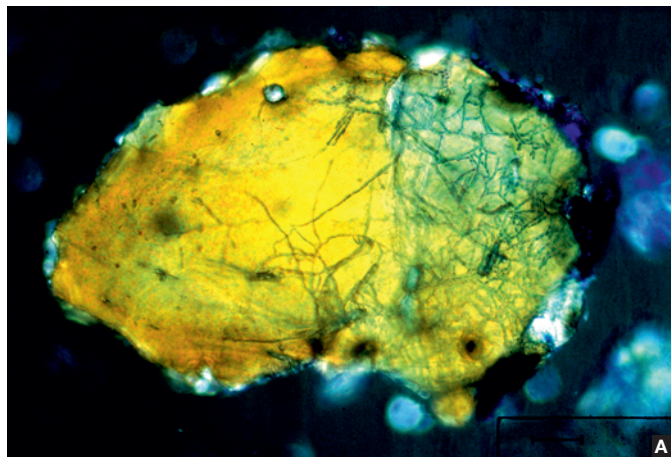


Fig. 27 – Cristalli di biotite - separati da un granito dei dintorni di Evora, Portogallo – osservati al microscopio da mineralogia a nicols incrociati. Il minerale appare “invaso” dalle ife fungine che penetrano sia lungo i piani di sfaldatura (001), sia trasversalmente a questi ultimi. Le ife sono in grado di aprirsi percorsi del tutto indipendenti da piani di sfaldatura, di clivaggio e dalle microfratture all’interno del cristallo. Come la biotite anche l’ortoclasio e il plagioclasio albitico vengono attaccati e canalizzati mentre il quarzo, al contrario, privo di elementi utili alla nutrizione e praticamente inattaccabile, viene quasi sempre ignorato.

la tesi di una approvvigionamento alimentare attraverso il *fall-out* atmosferico: questa attività estremamente faticosa e “intelligente” non può essere semplicemente spiegata con la necessità di ancorare l’individuo al substrato [per questo scopo, come già notato, un insediamento limitato a un millimetro o due sarebbe più che sufficiente] ma da esigenze di tipo nutrizionale. Inoltre i licheni **endolitici** non hanno bisogno di alcun ancoraggio. Le osservazioni fatte sui graniti [e marginalmente su altre rocce eruttive intrusive quali monzoniti, dioriti, sieniti] dove è possibile osservare la netta preferenza delle ife per certi minerali ricchi in macro e microelementi della nutrizione, anziché per altri che al contrario ne sono poveri, corrobora questa tesi. Si noti inoltre che:

a - se si osserva su un’isola oceanica vulcanica – dove gli apporti “dal cielo” sono limitatissimi – una serie di colate basaltiche antiche, storiche e recenti è possibile osservare piante ad alto fusto sulle prime, pianticelle, muschi e licheni frondosi sulle seconde, solo licheni, soprattutto crostosi, sulle ultime, vale a dire su quelle insediatesi da meno tempo¹⁴¹. Un’attenta osservazione **in situ** permette di verificare che i licheni¹⁴² portano col loro lavoro – che ovviamente non può essere fine a se stesso e il cui motore non potrà che essere la ricerca degli elementi della nutrizione – alla formazione di piccoli cuscinetti di protosuolo [leggi: piccoli frammenti della roccia sottostante sbriciolata] a cui sono in grado di fornire, alla loro morte, la minuscola frazione di *humus*

necessaria per il successivo attecchimento di muschi, felci e altre pianticelle vale a dire per l’evoluzione del processo pedogenetico¹⁴³;

b - La stessa specie copre areali vastissimi dove presumibilmente l’apporto da *fall-out* è dissimile mentre è certamente identico il contenuto in macro e microelementi ricavabili dal substrato;

c - esiste una buona correlazione positiva tra specie licheniche e natura della pietra su cui si insediano: alcuni preferiscono i substrati carbonatici, altri quelli silicatici, altri infine [rari e poco diffusi] le inospitali “pietre verdi”¹⁴⁴. Per tutte queste ragioni non v’è dubbio che le particelle da *fall-out* atmosferico con il loro contenuto elementare o i sali disciolti nelle idrometeorie siano poco importanti per quanto concerne l’alimentazione dei licheni.

Contrariamente a quanto asserito da alcuni A.A. i licheni **danneggiano sempre** i substrati su cui si insediano, vivono, crescono e infine muoiono: questo secondo *step* è strettamente legato al precedente vale a dire alle modalità con cui i licheni si alimentano¹⁴⁵. Il danno è talora evidente anche ad occhio nudo [pitting, depressioni alveolari, *microkarren* in calcari o marmi; arenizzazione superficiale nei graniti e altre rocce eruttive intrusive]. In altri casi è invece evidenziabile solo con tecniche strumentali [porosimetria; sezione sottile trasversale e successive osservazioni al microscopio da mineralogia; confronto del chimismo della roccia sana con

¹⁴¹ Berner R.A. and M.F. Cochran “Plant-induced weathering of Hawaiian basalts” Journ. Sediment. Res., **68**, pp. 723-726, 1998.

¹⁴² Non per niente definiti dai pedologi, come si è detto nell’introduzione, organismi **pionieri** ovvero organismi **precursori della pedogenesi** in quanto danno il via al degrado della roccia su cui si insediano. Cfr.: Adamo P. and P. Violante “Weathering of volcanic rocks from Mt. Vesuvio associated with the lichen *Stereocaulon vesuvianum*” Pedobiologia, **35**, pp. 209-217, 1991.

¹⁴³ Nonostante le riconosciute proprietà antibiotiche di numerose sostanze licheniche i microorganismi decompongono con grande facilità i licheni una volta morti.

¹⁴⁴ Ozenda et Clauzade, cit., p. 109.

¹⁴⁵ Cfr. ad esempio: Hoppert M., Flies C., Pohl W., Günzl B. and J. Schneider “Colonization strategies of lithobiontic microorganisms on carbonate rocks” Environmental Geology, **46**, pp. 421-428, 2004. Per i graniti cfr. *supra* nota 132.

quello dello straterello sottostante all'area colonizzata, sede del *network* di ife, ecc.]: ciò accade soprattutto quando l'insediamento avviene ad opera di licheni endolitici.

Risultano invece **esiziali** per i licheni le sostanze, sia gas che particelle, caratteristiche delle zone industrializzate emesse in atmosfera soprattutto dai processi di combustione. Condizione indispensabile perché i licheni possano vivere e prosperare sulle pietre, è che la qualità dell'aria sia buona: il biodegrado – che in passato operava praticamente ovunque – ha interrotto la sua azione nella maggior parte delle aree industrializzate e soprattutto nelle città dove gas inquinanti [SO₂, NO_x, O₃] e particolato carbonioso aereodisperso [in passato da combustione di legna, ieri soprattutto da combustione di carbone e oli; oggi, in Italia, soprattutto da metano] hanno superato da tempo la soglia di vivibilità della maggior parte delle specie licheniche¹⁴⁶. I “deserti lichenici”, vale a dire le grandi metropoli e le grandi aree industrializzate come ad esempio la piana di St. Louis in California o la Po-valley in Italia, sono causati soprattutto dagli alti tenori di SO₂ in aria¹⁴⁷. L'anidrite solforosa esercita un effetto deleterio sui cloroplasti dell'alga portando così il lichene a una rapida morte¹⁴⁸. Occorre però notare che esistono specie più resistenti ed altre che lo sono molto meno *ergo* esiste una buona correlazione tra singole specie e tenori di SO₂ in aria [in ragione comunque di qualche decina di ppb o µg/m³ d'aria]¹⁴⁹: le più tolleranti vivono tuttora in prossimità della città, le meno tolleranti solo a grande distanza. Carte della distribuzione delle specie licheni sono quindi di fatto, come si è detto, anche carte della “qualità dell'aria”. Inoltre i licheni più resistenti agli inquinanti aereodispersi concentrano nel tallo metalli pesanti “tossici” e radionuclidi¹⁵⁰ e poiché vivono a lungo sono in grado di dare una misura integrata nel

tempo della qualità dell'aria del sito in cui ancor'oggi, con difficoltà, sopravvivono¹⁵¹.

Le pietre sia in campo sia messe in opera hanno da sempre – è ovvio – interagito con l'ambiente che di volta in volta col passare del tempo vedevano. Semplificando si può dire che:

a - in passato l'acido in gioco era l'ossalico¹⁵² e le atmosfere contenevano soprattutto particelle sollevate dal suolo [*soil-dust*], pollini, spore fungine e rare particelle carboniose prismatiche da combustione di legna: le patine brune ricordano tutto ciò sia mediante la loro natura materiale, sia attraverso la natura delle particelle che inglobano;

b - sino alla Rivoluzione Industriale l'accresciuta presenza di particelle da combustione di legna in aria portava alla formazione di caratteristiche croste grigio cenere costituite da un fitto intreccio di cristalli di calcite e gesso e rese grigie da frustuli vegetali carboniosi¹⁵³;

c - oggi [ma forse occorrerebbe già dire ieri] il principale acido ambientale è diventato il solforico [in minor misura il nitrico] e tra le particelle areodisperse prevalgono nettamente le *fly-ash* e le *soot particles*: le patine/croste che si formano sui monumenti saranno a solfati, resi neri dalla miriade di particelle carboniose inglobate, generate – come è noto – dalla combustione di combustibili fossili;

d - oggi [solo da pochi anni] il principale acido ambientale è rimasto il nitrico e le *fly-ash* da combustione di oli e carbone sono state sostituite [nelle città italiane]¹⁵⁴ da particelle carboniose submicroniche [*soot particles*] dovute alla combustione del metano [ma anche della benzina verde]. L'interazione dell'acido nitrico con le superfici [su pietre carbonatiche] porta alla formazione di nitrati di Ca che essendo molto solubili non restano *in situ* ed è quindi praticamente impossibile metterli in evidenza, come già notato, attraverso la diffrazione X o altri metodi¹⁵⁵; le nano particelle, che viaggiano in catene o

¹⁴⁶ In un recente lavoro [Novo A. e N. Belgiovine “**Analisi delle deposizioni umide in Italia nel periodo 1987-2003**” *Acqua&Aria*, **8**, pp. 26-31, 2004] è stato possibile evidenziare come nell'Italia settentrionale le cose siano decisamente migliorate negli ultimi 15-20 anni: ciò è da mettere in relazione con la metanizzazione degli impianti di riscaldamento urbani e con l'uso di gasoli relativamente poveri in S. I licheni sembrano rispondere con notevole rapidità alle migliorate condizioni ambientali: Cfr.: Loppi S., Frati L., Paoli L., Bigagli V., Rossetti C., Bruscoli C. and A. Corsini “**Biodiversity of epiphytic lichens and heavy metal contents of *Flavoparmelia caperata* thalli as indicators of temporal variations of air pollution in the town of Montecatini Terme (central Italy)**” *The Science of the Total Environment*, **326**, pp. 113-122, 2004.

¹⁴⁷ Ma anche CO e NO_x e particolato carbonioso a reazione acida; cfr.: Munzi S., Ravera S. and G. Caneva “**Epiphytic lichens as indicators of environmental quality in Rome**” *Environmental Pollution*, **146**, pp. 350-358, 2007.

¹⁴⁸ Pukett K.J., Nieboer E., Flora W.P. and D.H.S. Richardson “**Sulfur dioxide: its effect on photosynthetic ¹⁴C fixation in lichens and suggested mechanisms of phytotoxicity**” *New Phytol.*, **72**, pp. 141-154, 1973.

¹⁴⁹ Le concentrazioni decrescono man mano che ci si allontana dalle sorgenti, ad esempio dalla città che è una sorgente areale di inquinanti areodispersi.

¹⁵⁰ Cfr.: Golubev A.V., Golubeva V.N., Krylov N.G., Kuznetsova V.F., Mavrin S.V., Aleinikov A.Y., Hoppes W.G. and K.A. Surano “**On monitoring anthropogenic airborne uranium concentrations and ²³⁵U/²³⁸U isotopic ratio by Lichen e bio-indicator technique**” *Journ. Environmental Radioactivity*, **84**, pp. 333-342, 2005. La radioattività di molti licheni crostosi è mediamente molto superiore a quella delle angiosperme, gimnosperme, pteridofite [felci] e briofite. L'alto contenuto in ⁹⁰Sr nello scheletro degli eschimesi d'Alasca viene messo in relazione col fatto che questa popolazione si ciba di caribù, animali che hanno nei licheni la loro principale sorgente alimentare.

¹⁵¹ Alcune specie sembrano più indicate di altre. Cfr.: Pandey V., Upreti D.K., Pathak R. and A. Pal “**Heavy metal Accumulation in Lichens From the Hetauda Industrial Area Narayani Zone Makwanpur District, Nepal**” *Environ. Monitor. & Assess.*, **73**, pp. 221-228, 2002; Aprile G.G., Di Salvatore M., Carratù G., Mingo A. and A.M. Carafa “**Comparison of the suitability of two lichen species and one higher plant for monitoring airborne heavy metals**” *Environ. Monit. Assess.*, 2009 [in press].

¹⁵² Ma anche come si è detto, localmente, l'acido fosforico.

¹⁵³ Cfr. *supra* nota 118.

¹⁵⁴ Come già notato, tutti i processi di cui si parla sono sfalsati nel tempo a seconda del grado di industrializzazione. In Cina, in India e in Corea si bruciano ancor'oggi enormi quantità di carbone cosa che in Europa non avviene più da tempo o avviene con notevoli precauzioni.

¹⁵⁵ Cfr. *supra*, nota 122.

grappoli e che possono venire studiate solo al TEM (Transmission Electron Microscope), verniciano la pietra con caratteristiche strie che seguono l'andamento dell'acqua di pioggia che scivola gravitativamente sul monumento.

Per le numerose ragioni sin qui esposte è tutt'altro che singolare che su moltissimi monumenti antichi da sempre all'aperto siano presenti patine a ossalati dovute ai licheni¹⁵⁶: sul Partenone ad Atene [Liebig, 1853]; sul Colosseo e l'Arco di Costantino a Roma [Cipriani e Franchi, 1958]; sull'Arco di Settimio Severo e sulla Colonna Traiana a Roma, sull'Arco di Augusto a Rimini, sull'Arco di Traiano in Ancona, sull'Arco di Severo Alessandro, sul Mausoleo libico-punico a Thugga, oggi Dougga e sull'anfiteatro di El Jem [Tunisia], sui templi di Zeus e Apollo a Cirene, nella sala delle Fontane a Hammat Gader [Palestina], sulla Porta dello Stadio e Tempio di Adriano ad Efeso, sulle rovine della casa del Console Attalo a Pergamo, sull'Arco di Galerio a Salonico, sulla base dell'obelisco di Teodosio a Istanbul e in decine e decine di altri siti [Del Monte, dati solo in parte pubblicati] [fig. 28]. Anche sulle pietre conservate oggi all'interno nelle raccolte museali - che nella stragrande maggioranza hanno passato lunghi periodi all'aperto prima di venire decontestualizzate - si può notare la grande diffusione delle patine brune a ossalati e talora anche del *pitting*.

Al contrario: le pietre, considerate "antiche", bianchissime e apparentemente intatte lasciano perplessi: tutto ciò che è antico è anche vecchio e la vecchiaia non perdona. Dov'è finita su questi monumenti quella che gli storici

dell'Arte chiamano, con espressione poetica [e certamente non soddisfacente per un fisico-naturalista] "**patina del tempo**"? Dove i "**segni del tempo**"? In questi casi, assai frequenti, si possono fare le seguenti ipotesi: **a** - questi monumenti sono stati sempre all'interno e quindi lontani dall'acqua liquida di pioggia che permette assieme alla luce molti fenomeni d'interazione superficiale tra cui - primo fra tutti - il biodegrado: ciò è tanto più improbabile quanto più questi monumenti sono antichi; **b** - sono stati per un breve periodo all'esterno, poi interrati e ritrovati dopo secoli: ciò è certamente possibile, ma in tal caso dovrebbero mostrare segni d'interazione con gli acidi umici presenti nella soluzione circolante del suolo¹⁵⁷; **c** - avevano al momento del passaggio nelle raccolte museali patine e *pitting*. Le prime sono state abrase [ma nelle parti più protette, dovrebbero restarne piccole tracce]; per il *pitting* c'è poco da fare salvo compromettere irrimediabilmente l'opera, *ergo* se era presente dovrebbe vedersi anche dopo il più severo restauro [fig. 29]; **d** - si tratta di **falsi**, vale a dire di opere, in genere rinascimentali o addirittura ottocentesche, contrabbandate per monumenti greci o romani. I falsi conservati con cura nei musei, anche celebri, sono più numerosi di quanto in genere si creda¹⁵⁸.

I falsari sono sempre stati abilissimi nello spacciare opere recenti per pezzi antichi e questo a fini di lucro o per soddisfare le brame di accaniti collezionisti che è poi la stessa cosa¹⁵⁹. Tuttavia per quanto bravo sia stato un falsario: **a** - è molto difficile che potesse sapere in che aree di una statua [o altro monumento in pietra] si possono formare le patine superficiali da interazione ambientale e le micro-

¹⁵⁶ Sarebbe singolare, a parere di chi scrive, se non ci fossero.

¹⁵⁷ Il suolo tende a digerire le pietre calcaree che ingloba. Il *liming* è una tecnica di correzione del pH di suoli acidi [podzoli] che si ottiene spargendo polvere di CaCO₃; la stessa tecnica può venire utilizzata per alzare il pH delle acque di un lago rese invivibili dalle così dette "piogge acide" [ad esempio in Scandinavia]. Una statua in calcare e/o in marmo sepolta per centinaia d'anni in un suolo anche solo leggermente acido non può conservarsi intatta: dovrà mostrare segni **evidenti** d'interazione superficiale con la soluzione circolante.

¹⁵⁸ Le opere su questo argomento sono numerosissime. Fondamentale: Kurz O. "**Falsi e Falsari**" del 1948 nella traduzione con correzioni e aggiunte in Venezia, 1961; si veda inoltre la voce "**Falsificazione**" in: "Enciclopedia Universale dell'Arte" C. Brandi, L. Vlad Borelli e G. Urbani, **V**, Venezia-Roma, coll. 313-30, 1958; "Enciclopedia dell'Arte Classica" D. Mustilli, **III**, pp. 376-389, Roma, 1960; A. Paolucci "**Falsi, Copie e riproduzioni**" in: Enciclopedia Feltrinelli Fischer, **Arte/2**, pp. 171-84 e 123-25, Milano, 1971. Per un approccio maggiormente scientifico al problema cfr.: S.J. Fleming "**Authenticity in Art: the Scientific Detection of Forgery**" New York, 1976.

¹⁵⁹ Si può dire che i falsari siano sempre esistiti. Sappiamo che Fidia firmò diverse statue scolpite dall'amato discepolo Agoracrito di Paro perché questi vendendole ne potesse ricavare un prezzo maggiore [Plinio, *N.H.*, XXXVI, 17]. Ai tempi di Claudio Nerone il celebre scultore Zenodoro realizzò diverse opere firmandole col nome del più celebre artista greco Calamide [in questo caso si trattava però di bronzi; Plinio, *N.H.*, XXXIV, 47]. Era inoltre prassi comune a Roma replicare originali greci, opere di celebri scultori [si pensi, ad esempio, all'Afrodite di Cnido opera di Prassitele oggi ai Musei Vaticani; il "Satiro che riposa" anch'esso attribuito a Prassitele ai Musei Capitolini; l'"Afrodite Capitolina" ai Musei Capitolini; "Afrodite di Doidalsas" al Museo Nazionale Romano; il "Galata suicida" al Museo Nazionale Romano; l'"Apollo del Belvedere" nei giardini del Belvedere in Vaticano, di cui si dirà poi; la "testa di Alessandro" di Lisippo al Louvre e via dicendo: tutte copie romane di opere più antiche]. Botteghe di falsari, sempre a Roma, vengono ricordate da Seneca. Essendo imperatore Tiberio, sappiamo da Fedro, che si falsificavano opere d'arte per soddisfare la brama dei collezionisti per i pezzi antichi. Ma fu soprattutto nel Rinascimento con la nascita delle grandi collezioni moderne, che la spasmodica ricerca di opere greco-romane spinse numerosi falsari a spacciare per pezzi antichi statue e rilievi da loro realizzati. "Giacomo dalla Porta (1539-1604) imitava antiche statue in marmo, e le sue imitazioni furono accolte come originali in importantissime collezioni" [F. Arnau "**Arte della falsificazione, falsificazione dell'arte**" Feltrinelli, p. 345-347, Milano, 1960]. È probabile che in realtà l'Arnau si riferisca a Giovan Giacomo di Bartolomeo della Porta, o più probabilmente al nipote di questi Guglielmo noto, per l'Ufficio che ebbe, come fra' Guglielmo del Piombo, abile "restauratore". Sappiamo infatti dal Vasari che: "...Michelagnolo vedendo Guglielmo fiero e molto assiduo alle fatiche, cominciò a porgli affezione, et innanzi a ogni altra cosa gli fece restaurare alcune cose antiche in casa Farnese, nelle quali si portò di maniera, che Michelagnolo lo mise al servizio del papa..." ["**Vita di Leone Leoni e altri Scultori**"]. O anche: "...s'era trovato in quell'anno alle terme Antoniane un marmo di braccia sette per ogni verso, nel quale era stato dagli antichi intagliato Ercole che sopra un monte teneva il toro per le corna con un'altra figura in aiuto suo, et intorno a quel monte varie figure di pastori, ninfe et altri animali, opera certo di straordinaria bellezza...e disegnato Papa Paulo [Alessandro Franese, Paolo III] che quelle statue antiche per il suo palazzo si restaurassino, Michelagnolo favorì volentieri Guglielmo della Porta milanese [sic]...che piaciutoli il far suo, lo mise innanzi a Papa Paulo per acconciare dette statue..." ["**Vita di Michelagnolo Buonarroti fiorentino pittore, scultore et architetto**"]. L'opera di cui parla il Vasari è il celeberrimo Toro Farnese oggi al museo Nazionale di Napoli. Il monumento venne ritrovato nel gennaio del 1546 e doveva essere collocato, secondo il parere di Michelangelo, nel palazzo Farnese, progetto che non venne mai attuato. Guglielmo rifecce le gambe mancanti e quando vennero ritrovate le originali Michelangelo rifiutava la sostituzione "...mostrando che le opere di scultura moderne poteano stare a paragone dei lavori antichi". Cfr.: G. Baglione "**Le vite de' pittori, scultori ed architetti**" (1642) a cura di V. Mariani, p. 151, Roma, 1935.



Fig. 28 – **a**: Il monumento è nelle parti aggettanti tappezzato di licheni viventi, mentre nelle le parti sottostanti è patinato a ossalati di calcio [Monumento Libico-Punico, dintorni di Dugga, Tunisia]; **b**: particolare del monumento precedente. Nell’area sotto la quadriga, protetta dal rain-out è presente la patina a ossalati; **c**: le aree verticali, arretrate e superficialmente protette, sono patinate dagli ossalati mentre quelle orizzontali appaiono martoriare dagli apoteci di licheni oggi non più presenti [Arco di Severo Alessandro, Thugga, Tunisia, calcare]; questo fenomeno ci parla di un cambiamento di clima avvenuto tra la edificazione del monumento e i nostri giorni; **d**: in alto licheni viventi, in basso patine a ossalati: è interessante notare che in corrispondenza della frattura dove l’acqua di pioggia può ruscellare è presente una colonia lichenica [Efeso, via dei Cureti, Turchia, marmo].

bioerosioni; **b** – è ancora più difficile che potesse sapere qual è la natura materiale vale a dire la composizione chimica e mineralogica delle patine; **c** – è **impossibile** che nel contraffare patine superficiali abbia potuto inserirvi particelle degli antichi aerosoli atmosferici [o trascinate nel sistema dall’acqua di pioggia] come, ad esempio i pollini, le spore fungine o le micro particelle carboniose prismatiche da combustione di legna, la cui presenza è stata accertata solo di recente e la cui natura può essere evidenziata solo attraverso strumenti sofisticati come il SEM o il TEM in uso da pochi decenni. L’argomento dei falsi è affascinante ma talmente complesso che occorrerebbero pagine e pagine per affrontarlo anche solo di sfuggita. Ci limiteremo qui a scrivere

solo qualche riga notando che nel tentativo di stabilire se una pietra è antica o “antichizzata” uno dei criteri più importanti e uno dei pochi che possa considerarsi **oggettivo** è la **lettura delle superfici**. Facciamo ora tre esempi partendo dal così detto **Trono Ludovisi**, una recinzione su tre lati in marmo di un’apertura rituale scolpita a bassorilievi proveniente dal tempio ionico di Marasà [Locri: Magna Grecia, 460-450 a.C.] oggi esposto a palazzo Altemps, una delle sedi del Museo Nazionale Romano. Di quest’opera esiste una replica [i rilievi sono però diversi] nota come **Trono di Boston** conservato nel Museum of Fine Arts nei pressi della città americana. In una famosa mostra tenuta a palazzo Grassi [Venezia 24 III-8XII, 1996] di cui esiste un bellissi-

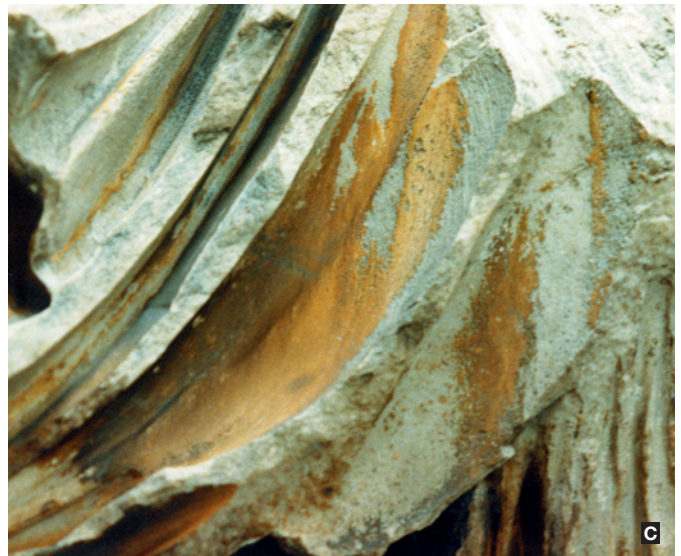


Fig. 29 a – Particolare del fregio del Partenone ancora in opera fotografato in situ. Il marmo bianco appare ricoperto da croste nere [costituita da particelle carboniose da combustione di oli e carbone in una matrice di solfato di calcio biidrato [gesso] da odierna inquinazione atmosferica] che ricoprono a loro volta precedenti patine bruno camoscio-rosso ruggine [costituite da ossalati e fosfati di calcio da precedente e oggi cessata biointerazione]. I celebri rilievi attribuiti a Fidia oggi conservati in gran parte al Museo Britannico a Londra, ma anche in piccola parte a Parigi e a Vienna dovevano presentarsi simili al particolare qui riprodotto prima di venire pesantemente ripuliti: tracce evidenti di queste patine restano sia sulle molte frazioni del British, sia sulle due del Louvre, mancano invece quasi completamente sul frammento conservato a Vienna. Dato che ossalati [e fosfati] sono **dentro**, e non sopra la pietra, il restauro ha portato a rimodellare le superfici come volute a suo tempo dall'Artista. Durante le operazioni di pulitura tese a rendere meglio leggibili i rilievi sarà sempre possibile eliminare completamente queste patine, quasi impossibile invece azzerare pitting e insulæ; **b** - Frammento dei rilievi del Partenone conservato a Vienna. Insulæ e pitting non lasciano dubbi sul fattore di danno – vale a dire biodegrado da antica colonizzazione lichenica - che ha martoriato le superfici del bassorilievo quand'era ancora in opera. Il marmo, privo delle caratteristiche patine brune, appare oggi bianchissimo: ciò contrasta in modo stridente con l'aspetto dei rilievi ancora in situ. Non v'è dubbio quindi che quest'opera sia stata pesantemente "restaurata" prima di venire esposta [Kunsthistorisches Museum, Vienna]; **c** - Lo stesso si può dire per i rilievi conservati al Museo Britannico [figura proveniente dal frontone Ovest del Partenone rappresentante il Dio fluviale Cefiso o Iliaso, particolare]; **d** - Anche il rilievo conservato al Louvre mostra esigue tracce di patine che un tempo, prima del restauro, dovevano certamente essere molto più estese [metopa con lotta tra un centauro e una lapitessa, particolare, marmo].

mo catalogo le due opere vennero esposte una accanto all'altra¹⁶⁰. Durante una indimenticabile performance televisiva, qualche anno fa, il celebre critico d'Arte Federico Zeri dichiarò che a suo parere il Trono Ludovisi era un falso ottocentesco¹⁶¹. L'autore-falsario avrebbe addirittura un nome: si tratterebbe del genovese Santo Varni. Anche la replica di Boston è, a parere degli Storici d'Arte, un falso ottocentesco¹⁶². Nonostante ciò entrambe le opere continuano ad essere esposte come massimi capolavori greci classici. Chi scrive, pur conoscendo le due opere, non le ha mai potute osservare da vicino quindi non potrà dare una risposta – come geologo – alla domanda: “Veri o falsi?”. Potrà invece fare alcune ipotesi: se all'esame ravvicinato i due troni non presentassero né patine, né altri segni d'interazione superficiale si potrebbe dire o che sono opere antiche brutalmente restaurate ovvero che si tratta di falsi: tuttavia l'assenza totale di patine e il mancato viraggio di colore del marmo a bruno chiaro – da bianco latte o bianco azzurrognolo che era in origine – farebbe propendere per la seconda ipotesi. Nel caso invece in cui fossero presenti, anche solo in piccole tracce, patine d'interazione, la loro localizzazione, la loro composizione materiale e il loro eventuale contenuto in particelle fornirebbe, come si è detto nelle righe precedenti, un contributo **oggettivo** alla storia materiale di questi due monumenti.

Facciamo ora un secondo esempio: prendiamo in considerazione il **Torso del Belvedere** su cui è possibile dire qualche cosa in più [fig. 30]. La statua si trova oggi nella sala delle Muse nel Museo Pio-Clementino in Vaticano e porta l'annotazione: “Atene, metà del 1° secolo a.C., marmo pario”. In basso sullo zoccolo si legge l'iscrizione: “Apollonio, figlio di Nestore, creò [quest'opera]”. Si tratterebbe quindi di una scultura neoattica realizzata 2000 anni fa. La provenienza del Torso, che rappresenterebbe Ercole, è sconosciuta¹⁶³. Sappiamo che verso il 1430-1435 faceva parte della collezione del cardinale Prospero Colonna. Uno schizzo dell'opera eseguito verso il 1500 porta a margine l'annotazione che la statua era dello scultore Andrea Bregno. Non si può che concordare con The Vatican Collection [poi TVC]¹⁶⁴ dove si legge che: “The Torso remained unrestored in post-Classic times”; “Virtually none of the antique surface of the marble remain”; “The Torso probably was never buried”; “Among other areas, the two upper thighs were damaged”. A queste osservazioni si può aggiungere che: **a** – la superficie di rottura in alto e il marmo lavorato sottostante hanno identico colore: ergo hanno identica storia materiale vale a dire che la rottura è coeva alla scultura; **b** – la statua non mostra alcun segno che possa far pen-



Fig. 30 – Il “Torso del Belvedere” conservato nel Museo Pio-Clementino, Città del Vaticano. L'opera viene attribuita dagli Storici dell'Arte alla metà del I a.C ed è firmata da Apollonio ateniese. Di questo artista non sappiamo nulla: nemmeno Plinio, in genere così puntiglioso nell'elenicare gli artisti del passato, ne fa alcun cenno.

sare a una sua passata collocazione all'aperto: mancano patine [o anche solo fantasmi di rivoli d'acqua piovana] se si esclude quella a fianco e subito sotto lo scroto che prosegue nel basamento. Questa [di cui non è stato possibile accertare la natura materiale] ha un andamento che non segue la verticale, vale a dire la direzione secondo cui scende l'acqua di pioggia; inoltre, prima che qui, una patina naturale avrebbe dovuto formarsi nelle parti sovrastanti rientranti protette al *rain-out* [l'area sotto i pettorali e la piega tra busto e addome che al contrario appaiono bianchissime] e

¹⁶⁰ Carratelli Pugliese G. [a cura di] “**I Greci in Occidente**” pp. 799, Bompiani, Milano, 1996.

¹⁶¹ A proposito di Afrodite che emerge dalle onde marine accolta da due ninfe, Zeri esclamò: “Ma non vedete che ha un petto da popolana?”.

¹⁶² “Da Roma uscirono falsi di qualità elevata come il Trono di Boston” Ferretti M. “**Falsi e tradizione artistica**” p. 190, in: Storia dell'arte italiana, v. 10, parte 3, Situazioni momenti indagini. Volume 3, Conservazione, falso, restauro; a cura di F. Zeri, Torino, Einaudi, 1981; sempre a proposito del Trono di Boston, cfr.: Cellini P. “**Ne sutor ultra crepidam**” in “Paragone, VI, 65, p.47, 1955.

¹⁶³ Ercole, in quanto si sarebbe riconosciuta nella pelle, che cinge il fianco destro della statua, quella di un leone; la pelle di un leopardo, come è noto, farebbe invece propendere per Dioniso. Per altri rappresenterebbe Filottete morente. Venne da prima considerato un originale greco poi una copia del II o I a.C.. Si dice che sia stata rinvenuta a Campo de' Fiori o, per altri, alle Terme di Caracalla ai tempi di Giulio II. Sembra però che fosse già nota prima. Michelangelo aveva per questa statua una grandissima ammirazione e ne studiò a lungo la posa e la muscolatura per disegnare le sue figure della Capella Sistina.

¹⁶⁴ “**The Vatican Collections: the Papacy and Art**” published by The Metropolitan Museum of Art, pp. 255, New York, 1982.

in quelle sottostanti sul piedistallo subito sotto il gradino creato dalla pelle di leone mentre anche qui, sia a destra che a sinistra, il marmo appare intatto¹⁶⁵; **c** – come notato in TVC entrambe le cosce sono danneggiate superiormente vale a dire macchiate e segnate da numerose piccole escorizzazioni. L'intero busto [nell'insieme bianchissimo] e le due cosce sembrano quindi avere storie materiali diverse. Come è possibile spiegare questa marcata differenza? La statua era forse collocata in una nicchia in modo che la parte superiore restava protetta dall'acqua di pioggia mentre le gambe sporgenti venivano bagnate? Se così fosse – e non mi pare che si possano fare altre ipotesi ragionevoli – la parte superiore delle cosce tenuta pulita dal continuo *rain-out* dovrebbe apparire assottigliata e bianchissima ovvero, se colonizzata, mostrare il *pitting* ovvero, nella parte interna ed esterna, essere brunita dal film a ossalati. Ma quello che si osserva contrasta con quanto ci si aspetterebbe. La prima ipotesi va scartata dato che le cosce, superiormente, sono tutt'altro che bianche, ma anche la seconda dato che mancano i film e le abrasioni presenti nulla hanno a che fare con le bioerosioni di cui abbiamo parlato¹⁶⁶. Si può anche aggiungere che alcune di queste picchiettature presenti sulla coscia sinistra in corrispondenza della piega del ginocchio [ma anche quelle puntiformi in corrispondenza del busto in alto a destra di chi guarda la statua subito sotto la rottura] hanno l'aspetto di forellini fatti artificialmente con un punteruolo. Concludendo tutto lascia pensare che: **a** - non essendo mai stato sottoterra; **b** - non essendo mai stato all'aperto [in quanto non mostra né patine né abrasioni attendibili legate a interazione ambientale nel tempo, il ché equivale all'asserzione fatta in TVC, vale a dire che non mostra alcuna superficie antica]; **c** – mostrando viceversa numerose incongruenze non si può escludere che il *Torso* invece che un'opera neoattica del I secolo a.C. sia un lavoro rinascimentale [peraltro bellissimo] malamente invecchiato ad arte per accrescerne il valore commerciale, passato pressoché direttamente dalla bottega dello scultore-falsario alla collezione del Belvedere¹⁶⁷.

Il terzo e ultimo esempio riguarda una delle statue più famo-

se al mondo: l'**Apollo del Belvedere** del Museo Pio-Clementino in Vaticano [fig. 31]. Il monumento in marmo pario sarebbe una replica romana [130-40 d.C. circa] di un bronzo greco del 330 a.C. attribuito a Leocare¹⁶⁸. Il celebre archeologo J. J. Winckelmann scrisse di quest'opera: "*La statua di Apollo rappresenta, tra tutte le opere antiche sopravvissute alla distruzione, il più alto ideale dell'Arte*". La provenienza della statua è sconosciuta e si può certamente concordare con gli storici dell'Arte quando scrivono – facendo riferimento allo straordinario stato di conservazione – che non è mai stata sepolta vale a dire che non proviene da uno scavo¹⁶⁹. La statua venne più volte restaurata, una prima volta subito dopo la sua comparsa ad opera di fra' Giovan'Angelo Montorsoli. "*Giunto dunque il frate a Roma, nelle stanze del Belvedere che dal papa gli furono date per abitare e lavorare, rifece il braccio sinistro che mancava all'Apollo et il destro del Laocoon che sono in quel luogo, e diede ordine [il papa] di racconciare l'Ercole similmente*"¹⁷⁰. Sotto Napoleone, nel 1798, l'Apollo finì addirittura a Parigi per poi ritornare a Roma nel 1816.

Il tronco con foglie d'alloro su cui si avvolge il serpente e che fa da sostegno alla statua sarebbe – secondo gli Storici dell'Arte – un'integrazione rinascimentale. Di questa straordinaria opera si può dire che compare quando Giulio II cercava per l'appunto una statua di Apollo¹⁷¹, che è priva di un passato e che è un'opera letteraria vale a dire che è proprio come Apollo veniva immaginato in quel periodo [tenuto conto dell'integrazione di cui si è appena detto: l'alloro e il serpentello, a quanto si dice, rinascimentali]. Si può anche aggiungere che non è mai stata all'aperto [ovvero che ogni traccia d'interazione è stata cancellata dai numerosissimi restauri subiti: questa asserzione dovrebbe però essere verificata attraverso un attento esame ravvicinato delle superfici] e che l'integrazione – sempre ammesso che di un'integrazione si tratti – è stata brunita-antichizzata in modo tale da sembrare a prima vista coeva alla statua. Da ciò si evince, cosa peraltro ben nota, che al momento del ritrovamento si era in grado di contraffare pezzi recenti per pezzi antichi ma anche di realizzare opere complete di tale perfezione¹⁷². Dove è

¹⁶⁵ Cfr.: Camuffo D., Del Monte M., Sabbioni C. and O. Vittori "Wetting, deterioration and visual features of stone surfaces in an urban area" Atmospheric Environment, 16, pp. 2253-2259, 1982.

¹⁶⁶ Cfr. *supra*, fig. 14.

¹⁶⁷ Anche in questo caso l'analisi della patina – che ad occhio e croce sembra applicata ad arte – potrebbe dare una risposta **oggettiva** al problema della storia materiale dell'opera.

¹⁶⁸ Si tratterebbe della statua che si trovava nell'Agorà di Atene di fronte al tempio del dio [Pausania, I, 3, 4].

¹⁶⁹ Le prime notizie certe dell'Apollo sono di Francesco Albertini che parla in un opuscolo pubblicato nel 1510 dell'apparizione [miracolosa?] di questa statua ai tempi di Giulio II [*Opusculum de mirabilibus novae et veteris Urbis Romae*]. Un codice di poco precedente riporta il disegno della statua [però non perfettamente somigliante] dicendo che si trovava nei giardini di s. Pietro in Vincoli basilica di cui era titolare Giuliano della Rovere [dal 1471], nipote di Sisto IV, cardinal legato di Bologna e futuro papa col nome di Giulio II. Cfr. TVC, cit. p. 58. *Contra*: secondo il Taylor l'Apollo faceva parte della collezione del cardinale Prospero Colonna nel suo palazzo ai Santi Apostoli e sarebbe stato acquistato dagli eredi del porporato, alla sua morte, da Giulio II [F. H. Taylor "Artisti, principi e mercanti" p. 111. Einaudi, Torino, 1954].

¹⁷⁰ Vasari "**Vita di fra' Giovanni'Angelo Montorsoli scultore**". Attorno a queste statue lavorò anche Guglielmo della Porta detto del Piombo [Cfr. *supra*, nota 159].

¹⁷¹ Giulio II aveva infatti in animo di ricostruire sulla collina del Belvedere una replica ideale del Parnaso. Questo in quanto si sapeva dal *Liber Pontificalis* di Anastasio Bibliotecario che l'appostolo Pietro era stato sepolto nel santuario di Apollo in Vaticano e che, essendo imperatore Costantino, era stata costruita una basilica proprio sulla collina del Belvedere nel sito esatto dove in precedenza esisteva questo santuario. Secondo alcuni il termine Vaticano deriverebbe da *vaticinia* vale a dire profezie con riferimento ai responsi dei sacerdoti del tempio di Apollo. Sia come sia, Giulio diede l'incarico a Raffaello di affrescare la Stanza della Segnatura negli appartamenti del papa con l'immagine del Parnaso: Apollo al centro circondato dalle nove muse e ai piedi grandi poeti del passato [l'affresco si può ammirare ancor'oggi]. Ai tempi di Giulio aprendo una finestra sotto l'affresco si spaziava sul Belvedere dove era stata collocata la statua dell'Apollo. Tutto ciò rispondeva al gusto dell'epoca, tracciava una continuità ideale tra la Roma antica degli Imperatori e quella dei Papi, ed aveva in definitiva – nelle intenzioni di Giulio – una funzione propagandistico-ideologica di notevole importanza.

¹⁷² Notissimo è l'episodio riportato da Vasari sul Cupido di Michelangelo "antichizzato" su consiglio di Lorenzo di Pierfrancesco de' Medici. "Dicesi che Michelagnolo l'acconciò [presumibilmente mettendolo per un certo periodo sotto terra come suggerito da Pierfrancesco] di maniera che pareva antico, né è da meravigliarsene perché aveva ingegno di far questo e meglio". Vasari "**Vita di Michelagnolo Buonarruoti fiorentino pittore, scultore et architetto**". Finito a Mantova di lui scris-



Fig. 31 – Il celeberrimo “Apollo del Belvedere” conservato nel Museo Pio-Clementino, Città del Vaticano. La statua venne ritrovata, sembra, verso il 1489 vicino a Roma [?]. Si dibatte a lungo sul fatto che si trattasse di un originale greco o di una replica romana. Analisi condotte sul marmo, che risultò toscano, permisero di scartare la prima ipotesi [?]. Da notare tuttavia che uno dei più accreditati cataloghi scientifici, quello del Metropolitan Museum di New York, la dice di marmo pario, quindi greco. Viene considerata una replica romana eseguita tra il I e il II secolo dell'era moderna da un originale greco, forse in bronzo. Si sa per certo che il tronco d'albero venne prolungato dal Montorsoli quando rifece alla statua il braccio e la mano. Le integrazioni vennero poi, in parte, eliminate. Non è ben chiaro se tutto il tronco, con l'alloro e il serpente, debba essere considerata un'integrazione rinascimentale.

stata le statua nei 1300 anni che precedono la sua invenzione? Per molti versi ciò ricorda l'invenzione di molte sante reliquie trovate in posti poco verosimili da chi aveva interesse a ritrovarle e che sono poi risultate in gran parte false. Chi scrive ritiene improbabile [non impossibile] che se quest'opera venne realizzata all'incirca 2000 anni fa, nonostante le ripetute e documentate manipolazioni subite negli ultimi 500 anni [vale a dire dal momento del suo ritrovamento ad oggi: ci si

riferisce a integrazioni e restauri] non mostri, ad esempio nelle parti più intime delle numerose plissettature del mantello o tra le pieghe-riccioli dei capelli, tracce anche minime di patine d'interazione ambientale. La decodificazione di questi eventuali piccolissimi lacerti potrebbero servire a dare un passato **oggettivo** a un'opera che ne è di fatto completamente priva.

Ma torniamo, per concludere, brevemente a noi. È **impossibile** che un monumento all'aperto vecchio di centinaia o addirittura di migliaia di anni non risulti tappezzato di licheni ovvero [se la qualità dell'aria del sito in cui si trova è peggiorata] non mostri segni dell'antica colonizzazione. Anche i monumenti mobili oggi nelle raccolte museali avendo passato – in gran parte – periodi più o meno lunghi all'aperto dovrebbero mostrare questi segni. È possibile che inconsulti restauri li abbiano completamente cancellati ma se ciò non fosse [e spesso è così] questi, se decodificati, oltre a dare importanti informazioni sulla storia materiale del monumento saranno l'unica prova **oggettiva** della sua antichità.

Non v'è dubbio che i licheni danneggino sempre i monumenti in pietra su cui si insediano ma nello stesso tempo la loro presenza è un indice sicuro di aria pulita vale a dire di ambiente salubre. Un lavoro pubblicato da chi scrive molti anni fa portava il titolo: “E se tornassero i licheni?”. Era un auspicio, una utopica speranza. Oggi però questo traguardo appare meno fantascientifico¹⁷³. Se l'uomo vorrà sopravvivere nelle megalopoli del futuro dovrà necessariamente abbattere le emissioni di gas e di particolato carbonioso in atmosfera e allora i licheni, che non hanno bisogno di consultare i dati delle centraline SARA per sapere che fare, torneranno tra noi. Io non ci sarò, ma sarà ugualmente un gran bel giorno.

RINGRAZIAMENTI

Durante la stesura di questo lavoro ho accumulato debiti di gratitudine, piccoli e grandi, nei confronti di numerosi Colleghi ed amici. Desidero ringraziare, in particolare, i Prof. Giambattista Vai, Mario Ciabatti, Rita Zanotto, Maria Grazia Valcuvia, Elena Corradini e i Dott. Marco Tolomelli, Ubaldo Ferri, Annalisa Parisi, Pier Francesco Sciuto ed i compianti Maestri ed indimenticabili amici Prof. Paolo Baiesi [grequista, latinista ed epigrafista], Ottavio Vittori Antisari [fisico dell'atmosfera] e Giuseppe Gardenghi [zoologo]. Un ringraziamento particolare al mio caro amico Dott. Maurizio Zaghini che con la consueta gentilezza, competenza e liberalità ha accettato, sulla Rivista da lui diretta, questo non breve testo.

se Isabella d'Este “il Cupido per cosa moderna non ha pari”. Venduto dai Gonzaga a Carlo I d'Inghilterra nel 1627 andò probabilmente perduto nell'incendio della reggia di Whitehall nel 1698 [Taylor, *cit.*, p. 98]. Sempre secondo il Vasari Michelangelo giovanissimo e ancora sconosciuto contraffaceva le opere di Donatello: tutto ciò allora, come ora e come sempre a fini di lucro. Da notare che, ad esempio, il “Bacco” di Michelangelo, conservato al Museo del Bargello, definita *cultissima falsificazione*, appare come un'opera più archeologica – o archeologizzante – dello stesso Apollo del Belvedere. Cft.: Ragghianti C.L. “**Miscelanea minore di critica d'arte**” Bari, p. 154, 1946. Sempre il Vasari ci ha lasciato di Tommaso dalla Porta questo ritratto: “...ha lavorato di marmo eccellentemente, e particolarmente ha contraffatto teste antiche di marmo che sono state vendute per antiche....Nessuno di questi imitatori delle cose antiche valse più di costui...” in “**Vita di Lione Lioni Aretino e di Altri Scultori et Architetti**”, p. 427.

¹⁷³ Alcuni lavori recentemente comparsi in letteratura sembrano dimostrare proprio questo. Cfr.: Henderson-Sellers A. “**Monitoring lichen reinvasion of ameliorating environments**” *Environmental Pollution*, **19**, pp. 207-213, 1979; Gilbert O.L. “**Lichen Reinvasion with Declining Air Pollution**” in: J. W. Bates and A.M. Farmer (eds), *Bryophytes and Lichens in a Changing Environment*, Clarendon Press, pp. 159-177, Oxford, 1992; Hultengren S., Gralén H. and H. Pleijel “**Recovery of the epiphytic lichen flora following air quality improvement in south-west Sweden**” *Water, Air, and Soil Pollution*, **154**, pp. 203-211, 2004.