Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
*Memorie di Scienze Fisiche e Naturali*
119° (2001), Vol. XXV, pp. 129-150

GIOVANNA PASQUARIELLO *

# Analisi dei fattori di biodeterioramento delle opere d'arte su carta**

**Abstract** – The works of art on paper, in the diversified kinds in which they have been produced (prints, drawings, watercolors, etc.) endure processes of deterioration from agents of physical, chemical and biological order. The biological agents, in particular, constitute a serious threat; therefore the study of the causes and mechanisms that determine the biodeterioration of the works of art on paper is indispensable in order to characterize methodologies of prevention of the risk of damage. It is necessary to consider all the factors, that promote the biological attack, as an integrated system, in which every factor is correlated with the others. By the analysis of such a systemic action it is possible the planning and the management of suitable control methods to reduce the risks of biodeterioration.

In this paper are explained the main factors: 1) the biological agents deteriogens (insects and fungi), 2) the ways in which the biodeteriogens are introduced indoors from outside, 3) the survey of their possible presence in the conservation environment (aerobiology), 4) the composition and the biodegradability of the materials of art works on paper – and other materials which they come in touch with, 5) the micro-environmental conditions that allow the development and the action of the biodeteriogens. The various type of biological agents concerned in relation to the kind of damage caused, are illustrated with the suggested methods for their control. In fact the prevention is the key to protecting art works on paper from biodeterioration.

## Introduzione: il biodeterioramento come sistema integrato di fattori

Le opere d'arte su carta, nelle numerose e diversificate forme in cui sono state prodotte, subiscono processi di deterioramento indotti da agenti di ordine fisico, chimico e biologico.

* Responsabile del Laboratorio di Biologia, Istituto Nazionale per la Grafica, Via della Lungara 230, 00165 Roma.

** Relazione presentata in occasione della *Giornata di studio* su «Conservazione e salvaguardia delle opere d'arte su carta: stampe e disegni», Roma, 27 giugno 2001.

Gli agenti biologici, in particolare, costituiscono per il patrimonio grafico una grave minaccia e pertanto lo studio delle cause e dei meccanismi che determinano il fenomeno del biodeterioramento (insieme dei processi di natura fisica e/o chimica di alterazione dei materiali indotti dall'attività vitale di macro e microrganismi) delle opere su carta è indispensabile per individuare metodologie di prevenzione del rischio di danneggiamento.

Le ricerche svolte finora hanno evidenziato i molti fattori coinvolti nel processo del biodeterioramento, ma tali ricerche hanno in genere carattere settoriale, cioè ciascuna ha un suo punto di vista specialistico e particolare.

Per capire a fondo il fenomeno è necessario invece considerare i vari fattori come un *sistema integrato* (il concetto di sistema tra l'altro è nato proprio in biologia), in cui ogni fattore è correlato con gli altri. Mentre il punto di vista specialistico è in genere tipico di un ricercatore, il punto di vista sistemico è l'unico idoneo al responsabile della conservazione delle opere grafiche, ad esempio di un museo o biblioteca o archivio. Avendo presente l'azione sistemica dei vari fattori è possibile la progettazione e la gestione di misure preventive idonee a ridurre i rischi di biodeterioramento. Infatti l'azione sull'uno o l'altro fattore, senza tener conto dell'intero sistema, non può garantire il risultato di prevenzione.

I fattori di tale *sistema integrato del biodeterioramento* sono:

— *Gli agenti biologici*, che possono deteriorare i materiali costitutivi le opere, i materiali estranei ad esse ma con cui sono a contatto e il legno di cui spesso sono costituiti gli arredi. Tali agenti vengono denominati biodeteriogeni e sono classificati in relazione alle loro caratteristiche, alla loro pericolosità e alla tipologia dei danni che producono;

— *Il modo in cui i biodeteriogeni vengono introdotti nell'ambiente* dall'esterno: sono stati individuati vettori (uomo, materiali o opere infette, aria, polvere), vie (porte, finestre, discontinuità delle strutture, impianti di condizionamento) e modalità di trasporto (visite, preparazione e manutenzione delle opere e dei locali, aereazione e climatizzazione, eventi accidentali, calamità naturali);

— *La rilevazione dell'eventuale presenza di biodeteriogeni nell'ambiente di conservazione*. Tale rilevazione viene svolta con apposite metodologie e tecniche; fondamentale a questo riguardo, l'analisi dell'aria (aerobiologia), che contiene normalmente molti microrganismi potenzialmente biodeteriogeni e il monitoraggio delle spore microbiche aerodisperse deposte nella polvere;

— *I materiali di cui sono composte le opere grafiche*, che sono sostanze – in prevalenza organiche – che possono costituire una fonte di alimento e substrato di sviluppo per molti micro e macro-organismi (biodegradabilità);

— *Le condizioni ambientali che consentono lo sviluppo degli agenti biodeteriogeni* e la loro azione deteriorante sulle opere: temperatura, umidità relativa, luce e ventilazione. Esse hanno un ruolo cruciale affinché si verifichi il fenomeno del biodeterioramento.

Ciascuno dei fattori descritti è condizione necessaria ma non sufficiente perché si verifichi il biodeterioramento: questo è infatti il risultato dell'interazione (sistema) tra i parametri ambientali, l'attività dei biodeteriogeni e le caratteristiche chimico-fisiche dei materiali costitutivi le opere d'arte su carta.

In questa analisi sistemica del biodeterioramento vengono di seguito approfonditi gli aspetti prioritari e le problematiche aperte, accennando più sinteticamente alle nozioni ormai note e consolidate.

## Gli agenti biologici.

### *Principali categorie e danni da essi causati al patrimonio grafico*

Gli agenti biologici che rappresentano un pericolo per il patrimonio grafico, sono principalmente microrganismi ed insetti (e occasionalmente i roditori). Nelle diverse aree geografiche i loro attacchi possono essere diversi in rapporto alle condizioni climatiche delle singole aree, alla microflora e alla entomofauna in esse presenti e alle caratteristiche degli edifici che ospitano musei, gallerie, biblioteche ecc.

Data l'ampia letteratura specialistica esistente sull'argomento, forniamo alcune informazioni di carattere generale sui microrganismi ed insetti che si rinvengono più frequentemente e i danni da essi determinati alle opere d'arte su carta.

### *Microrganismi*

I funghi sono i microrganismi che più frequentemente si sviluppano sul supporto-carta dell'opera e sui materiali estranei ad essa con cui vengono a contatto (carte, cartoni, adesivi, tessuti, legature in cuoio o pergamena ecc.). In limitata misura si rinvengono alcune specie di batteri eterotrofi e attinomiceti.

Per quanto riguarda i funghi la lista delle specie è molto lunga: vengono segnalate oltre 300 specie. Si tratta soprattutto di Deuteromiceti, seguono alcune specie di Ascomiceti e Zigomiceti. Le specie fungine più diffuse appartengono ai generi *Penicillium*, *Aspergillus, Cladosporium, Chaetomium, Fusarium, Alternaria, Stachybotrys, Sporotrichum, Trichoderma, Mucor, Rhizopus.*; nella tabella 1 vengono riportati i principali generi fungini deteriogeni dei diversi tipi di materali.

Per quanto riguarda i batteri eterotrofi le specie che vengono maggiormente rinvenute appartengono per la maggior parte ai generi *Cytophaga, Sporocytophaga, Cellfalcicula, Cellvibrio.*

Infine vi sono gli attinomiceti, batteri aerobi, Gram positivi, che crescono formando un micelio e si riproducono mediante spore unicellulari (conidi) e assomigliano ai microfunghi. Vengono segnalati i Nocardiformi, gli Attinobatteri e gli Streptomiceti.

Riguardo ai funghi deteriogeni questi possono essere suddivisi in due gruppi e agiscono in successione. Al primo gruppo appartengono i così detti «colonizzatori primari» cioè quelli che iniziano il processo di degradazione utilizzando la materia organica presente sulla superficie del supporto-carta senza prendere parte alla sua

Tab. 1 – *I più comuni funghi biodeteriogeni delle opere su carta.*

| Genere | Carta e cartone | Inchiostri | Adesivi di origine animale e vegetale | Tessuti | Cuoio | Pergamena |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Acremonium* | * | | | | | |
| *Alternaria* | * | | * | * | * | * |
| *Arthrinium* | * | | | | | |
| *Aspergillus* | * | * | * | * | * | * |
| *Aureobasidium* | * | * | | | * | * |
| *Cephalosporium* | * | | | * | | * |
| *Chaetomium* | * | | | * | * | * |
| *Cladosporium* | * | | | * | * | * |
| *Doratomyces* | * | | | | * | |
| *Fusarium* | * | | * | * | * | * |
| *Gymnoascus* | * | | | | * | |
| *Helminthosporium* | * | | * | | | |
| *Monilia* | * | | | * | | * |
| *Mucor* | * | | * | | * | * |
| *Paecilomyces* | * | | | * | * | * |
| *Penicillium* | * | * | * | * | * | * |
| *Phoma* | * | | | * | | |
| *Rhizopus* | * | | | * | * | * |
| *Rhodotorula* | * | | | | * | |
| *Scopulariopsis* | * | | | * | * | * |
| *Stachybotrys* | * | | * | * | * | * |
| *Stemphylium* | * | | * | * | * | |
| *Torula* | * | | | | | |
| *Trichoderma* | * | | | * | * | * |
| *Trichothecium* | * | | | | | * |
| *Ulocladium* | * | | | | | |
| *Verticillium* | * | | | * | | * |

degradazione. I «colonizzatori secondari» intervengono successivamente continuando il ciclo di degradazione e generalmente crescono e si sviluppano esclusivamente su definiti composti, come la cellulosa.

I microrganismi più pericolosi per le opere d'arte su carta sono proprio quelli che utilizzano per la loro crescita, quale fonte di carbonio organico, la cellulosa; tali microrganismi sono denominati cellulosolitici. Essi sono in grado di scindere la cellulosa in quanto possiedono il complesso enzimatico della cellulasi, costituito da glicoproteine in parte extra- e in parte intracellulari. Tra i principali funghi cellulosolitici troviamo alcune specie dei generi *Chaetomium*, *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Penicillium*.

Riguardo i batteri cellulosolitici questi vengono divisi in due gruppi: i cellulosolitici primari, che sono specializzati nella degradazione della cellulosa al punto di non essere capaci di crescere se non utilizzando questo composto (*Cytophaga*, *Sporocytophaga*), i cellulosolitici facoltativi, che invece sono in grado di utilizzare anche altre sostanze organiche (*Cellfalcicula*, *Cellvibrio*). Accanto ai funghi e batteri cellulosolitici vengono segnalati anche i batteri amilolitici, capaci cioè di degradare l'amido, e batteri e funghi proteolitici. Questi ultimi sono così denominati in quanto capaci di idrolizzare le sostanze proteiche in peptidi, e questi in amminoacidi mediante la produzione di esoenzimi (proteasi).

*Tipologie di danni causati dai microrganismi*

I tipi di danno che le diverse specie fungine e batteriche arrecano al patrimonio grafico assumono aspetto e gravità diversi e possono essere così schematizzati:

a) pigmentazione;

b) variazione delle caratteristiche meccaniche dei componenti della carta;

c) alterazione dei composti additivi essenziali della carta.

a) La carta può macchiarsi a causa di pigmenti fungini e batterici di prodotti acidi del metabolismo microbico. I funghi della classe Deuteromiceti molto spesso producono diversi tipi di colorazioni nelle differenti fasi del loro sviluppo. Le specie di *Penicillium* e *Aspergillus* costituiscono l'85% dei funghi che producono composti colorati. La produzione di metaboliti colorati è stimolata dalla presenza di metalli nel substrato: sali di zinco, rame, ferro, cobalto, molibdeno che ne intensificano la pigmentazione.

Le macchie prodotte dai pigmenti sono di differenti colori (gialle, rosse, verdi, brune, nere, violacee) e presentano caratteristiche molto varie anche dal punto di vista della forma. Esse possono essere nucleate, di forma irregolare, di dimensioni limitate o di dimensioni notevoli. In corrispondenza delle macchie causate da microfunghi, si osservano spesso anche formazioni polverulente o lanuginose che sono dovute a micelio, agglomerati di ife, corpi fruttiferi e spore fungine. I danni prodotti sono di tipo chimico, più o meno rilevanti a seconda del legame che i metaboliti prodotti stabiliscono con la carta, e di tipo estetico (fig. 1 e fig. 2).

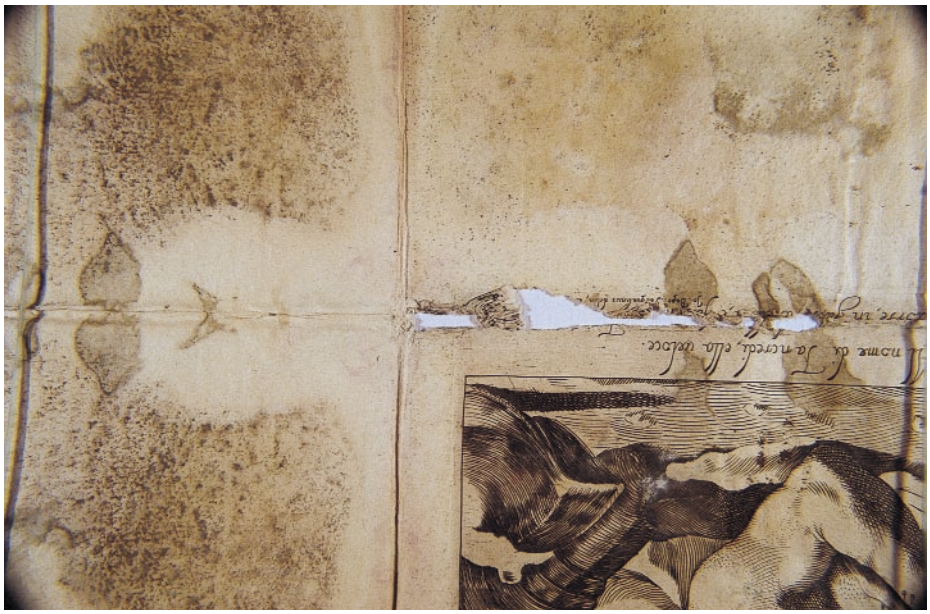


Fig. 1. Particolare di acquaforte danneggiata da microfunghi.

Fig. 2. Particolare di passe-partout con attacco microbico.

Pigmentazioni caratteristiche e frequenti sulla carta, e in particolare sulle stampe, sono quelle di color ruggine, indicate con il termine di «foxing» (fig. 3), la cui origine è stata molto studiata ed è ancora oggi oggetto di ricerca. Gli studi sul foxing sono iniziati nel 1935 e sono continuati fino al 1940; dopo un periodo di stasi sono stati ripresi nell'ultimo decennio da biologi e chimici di vari paesi del mondo, inglesi, americani, australiani, giapponesi, israeliani, russi e a partire dal 1985 anche da ricercatori italiani. Dagli studi condotti sono stati acquisiti dati sulla caratterizzazione dei vari tipi di foxing, sulle tipologie dell'alterazione, su alcuni fattori di ordine chimico e biologico che ne favoriscono l'insorgenza. A tutt'oggi la genesi di questo fenomeno risulta ancora controversa per la sua complessità. Infatti alcuni ricercatori propendono per la concomitanza di più cause, altri per un'origine principalmente biologica, altri ancora per un'origine principalmente chimica.

b) Le variazioni strutturali dei componenti della carta si manifestano con la fragilità del materiale; a livello macroscopico il supporto-carta può assumere, nei casi più estremi, un aspetto feltroso. Tali alterazioni si verificano generalmente negli stadi più avanzati dell'attacco microbico e solitamente sono le più devastanti. La causa è imputabile agli enzimi prodotti da diverse specie fungine e batteriche quali cellulasi, amilasi, proteasi, lipasi, etc.

c) La vasta gamma di additivi essenziali per la preparazione delle opere su carta hanno caratteristiche chimiche diverse e frequentemente risultano essere biodegradabili. In molti casi sono proprio i componenti additivi a costituire un ottimo terreno di coltura per alcune specie di funghi e batteri, il supporto-carta può perdere di conseguenza alcune sue caratteristiche fisiche.

L'alterazione estetica per una stampa o un disegno rappresenta uno dei maggiori problemi nel caso di fenomeni di alterazione biologica (fig. 4). A volte i danni indotti sono riscontrabili solo a livello microscopico o a livello di un deterioramento delle caratteristiche meccaniche (flessibilità, resistenza) della carta.

*Microrganismi patogeni per l'uomo*

Tra le specie fungine che vengono segnalate quali biodeteriogeni dei materiali cartacei ve ne sono alcune responsabili di manifestazioni allergiche. Esse appartengono ai generi *Alternaria*, *Cladosporium*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Mucor*, *Rhizopus*. Le spore fungine sono responsabili di manifestazioni allergiche cutanee e respiratorie che possono presentarsi in modo continuo o con cadenza stagionale. Alcuni microfunghi infine possono provocare effetti tossici in quanto producono micotossine. Ad esempio il *Fusarium*, l'*Aspergillus* e il *Trichoderma* producono micotossine che sono responsabili, a basse concentrazioni, di disturbi gastrointestinali e di danni a carico dell'apparato emopoietico e genitale, nonché di sintomi aspecifici come astenia e nausea.

Fig. 3. Stampa con macchie di «foxing».

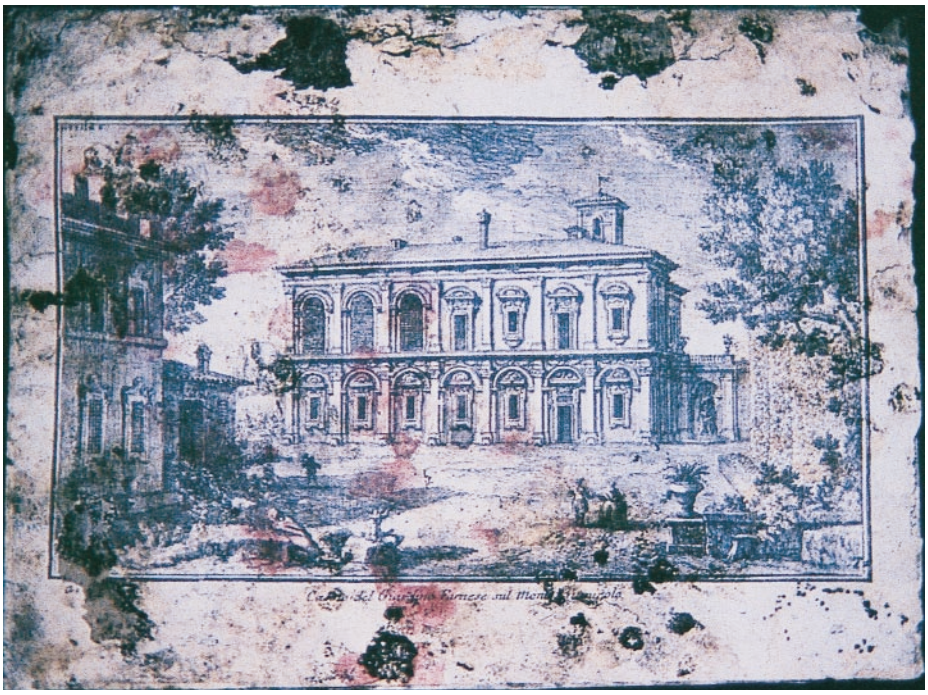


Fig. 4. Stampa danneggiata dall'attacco di microrganismi.

*Insetti*

Le specie d'insetti che rappresentano un pericolo per la conservazione del patrimonio grafico e per gli arredi in legno in cui le opere spesso sono custodite sono alcune decine. Essi appartengono a vari ordini e famiglie e si differenziano per il loro ciclo vitale.

Gli insetti possono essere suddivisi in due gruppi: ospiti abituali e ospiti occasionali. Gli ospiti abituali sono quelli che hanno il loro habitat sulla carta (carticoli) e sul legno (xilofagi), mentre quelli occasionali vivono abitualmente su altri materiali e possono infestarla occasionalmente. Gli insetti abituali utilizzano come nutrimento sia le sostanze organiche di origine vegetale (carta, cartone, legno, adesivi) che quelle di origine animale (collanti, additivi, leganti) sia nello stadio di larva che di adulto a seconda della specie interessata. Gli insetti hanno infatti differenti cicli vitali, alcuni hanno una metamorfosi incompleta, le ninfe sono simili agli adulti e in tutti gli stadi del ciclo possono causare danni (ad es. le blatte, i pesciolini d'argento), altri presentano una metamorfosi completa, nello stadio larvale sono vermiformi e hanno tegumenti molli, mentre nello stadio adulto hanno tegumenti duri. Nel caso di quest'ultima tipologia d'insetti sono proprio le larve le responsabili dei danni (ad es. i tarli).

Gli insetti che attaccano le opere grafiche, manufatti composti principalmente

da materiale cellulosico, sono in grado di digerire le fibre di cellulosa: la digestione è resa possibile dalla simbiosi con particolari microorganismi (Protozoi) ospiti dell'apparato digerente dell'insetto, i quali operano una frammentazione delle macromolecole del materiale ingerito rendendole così utilizzabili.

Tra gli insetti carticoli, quelli più frequentemente rinvenuti, appartengono alla famiglia dei Lepismatidi (ordine *Thysanura*), di cui i più comuni sono *Thermobia domestica* e *Lepisma saccharina*. Quest'ultimo è noto con il nome di pesciolino d'argento per la sua forma allungata e il colore argentato. Ambedue questi insetti prediligono la carta e la colla d'amido usata spesso per incollare le stampe. Un'altra famiglia di insetti che predilige il materiale cartaceo e le sostanze amidacee è quella dei Liposcelidi (ordine *Psocoptera*) con la specie *Liposcelis divinatorius*, detto pidocchio dei libri.

Oltre agli insetti della carta o carticoli vi sono gli insetti xilofagi o insetti del legno. Tra questi i più frequenti sono quelli appartenenti all'ordine dei *Coleoptera* in particolare gli Anobidi e i Dermestidi comunemente indicati con il termine di «tarli». In depositi di edifici antichi ubicati in prossimità dei bagni vi può essere la presenza di blatte, i così detti scarafaggi. Inoltre è stata segnalata in varie aree geografiche la presenza di alcune specie di termiti (ordine *Isoptera*) la cui azione devastatrice è particolarmente grave e subdola.

I danni prodotti alla carta e legno, dalle varie specie di insetti citati, sono principalmente: lacune, erosioni superficiali o profonde, perforazioni e gallerie di diverso aspetto, estensione e gravità e sono caratteristiche per ciascun genere di appartenenza.

A volte gli escrementi lasciati da alcune specie di insetti oltre a determinare incrostazioni provocano anche delle macchie scure.

I principali gruppi di insetti rischiosi per la conservazione del patrimonio grafico, i tipi di danno che producono e i materiali danneggiati dai singoli gruppi, sono schematicamente riportati nella Tabella 2.

*Insetti patogeni per l'uomo*

È da segnalare che alcune specie degli insetti sopracitati che abitano nei locali di deposito delle opere grafiche possono essere fonte di allergeni. In generale gli allergeni sono contenuti nella saliva, nei secreti ghiandolari, negli escrementi, negli insetti vivi, ma anche negli insetti morti, e possono penetrare nell'organismo umano a seguito di contatto con la pelle o con le mucose o per inalazione. Un esempio è dato dal *Lepisma saccharina* (il pesciolino d'argento), un altro esempio sono le blatte, i cui escrementi sono in grado di scatenare disturbi respiratori, soprattutto asmatici, nei soggetti predisposti geneticamente. Sembra che la loro azione allergizzante sia seconda soltanto al *Dermatophagoides pteronyssinus*, meglio noto come «acaro della polvere», ed ai pollini. La pericolosità delle blatte è maggiore di quanto non si creda, infatti da blatte catturate in natura sono state isolate oltre 40 specie di batteri, dei quali non pochi di notevole rischio per la salute dell'uomo.

Tab. 2 – *Principali categorie di insetti che attaccano il patrimonio grafico.*

| Ordine | Famiglia | Specie | Materiali a cui arrecano danno | Tipo di danno |
|---|---|---|---|---|
| Thysanura | Lepisimatidae | *Lepisma saccharina*<br>*Thermobia domestica* | Carta, cartone, adesivi di origine animale e vegetale, tessuti | Minute erosioni superficiali a contorno irregolare |
| Isoptera | Rhinotermitidae | *Reticulitermes lucifugus* | Legno, carta, cartone, pergamena, tessuti | Erosioni profonde di forma irregolare, talvolta scavano voragini a forma di cratere |
| | Kalotermitidae | *Kalotermes flavicollis* | | |
| Psocoptera | Liposcelidae | *Liposcelis divinatorius* | Carta, colla d'amido, legno danneggiato con funghi microscopici | Minutissime erosioni superficiali a contorno irregolare |
| Coleoptera | Anobidae | *Anobim punctatum*<br>*Stegobium paniceum* | Carta, legno, colla d'amido | Perforazioni, gallerie a percorso irregolare con sezione circolare |
| | Dermestidae | *Attagenus piceus*<br>*Anthremus museorum* | Carta, legno, pergamena, adesivi di origine animale, tessuti | Perforazioni irregolari e a volte gallerie superficiali |
| | Lyctidae | *Lyctus brunneus* | Legno | Perforazioni e contorni irregolari, gallerie tortuose a sezione circolare |
| | Cerambycidae | *Hylotrupes bajulus* | Legno | |
| Blattodea | Blattidea | *Blatta orientalis*<br>*Periplaneta americana* | Carta, cartone, adesivi di origine animale e vegetale | Erosioni superficiali a contorno irregolare, macchie nerastre a forma di virgola |
| | Blattellidae | *Blattella germanica* | | |

*Altri agenti biologici*

Accanto a funghi ed insetti vengono segnalati *l'uomo e i roditori*. Per quanto riguarda l'uomo purtroppo bisogna constatare che egli, almeno nel passato, è stato un inconsapevole nemico del patrimonio grafico in quanto, a causa di negligenza nella conservazione, ha causato danni quali gualciture, macchie di grasso e di inchiostro. A questi danni vanno poi aggiunti quelli, meno diretti ma non per questo meno importanti, che possono derivare da una errata scelta degli ambienti di conservazione e di esposizione. Infine sono da annoverare i danni derivati da interventi di restauro con impiego di materiali e prodotti non rispondenti a criteri conservativi.

Per quanto riguarda i roditori, occasionalmente presenti negli ambienti di deposito di collezioni di stampe e disegni, essi possono provocare erosioni alla carta e danni con le loro urine.

MODO IN CUI GLI AGENTI BIODETERIOGENI ENTRANO NELL'AMBIENTE DI CONSERVAZIONE E RILEVAZIONE DELLA LORO PRESENZA

Il *veicolo di trasmissione* dei microrganismi e degli insetti biodeteriogeni dall'ambiente esterno a quello interno è:

- *l'aria* (veicolo principale, che a sua volta entra nell'ambiente attraverso porte, finestre, sistemi di condizionamento comunicanti con l'esterno);
- *l'uomo*;
- *la polvere* (portata dall'aria, dall'uomo, da materiale introdotto e depositata sull'opera grafica).

Accanto a questi devono essere annoverati anche: l'eventuale *materiale infetto* (comprese le stesse opere d'arte), *l'inadeguata costruzione o manutenzione* delle strutture dell'edificio (comunicazioni occulte con l'esterno, materiali e impianti elettrici e idraulici inadeguati), *eventi accidentali e calamità* (rottura di strutture, allagamenti).

*L'aria come veicolo di trasporto*

Negli ambienti confinati i microrganismi possono essere trasportati dall'aria attraverso porte e finestre, oppure attraverso gli impianti di condizionamento se questi aspirano aria dall'esterno e la immettono nell'ambiente interno senza un filtraggio adeguato. Anche gli impianti che ricircolano aria interna all'ambiente, tuttavia, possono favorire la proliferazione e la diffusione di agenti inquinanti. La proliferazione è favorita con la funzione di umidificazione e se i filtri non vengono sostituiti regolarmente (i sistemi di condutture, infatti, rappresentano un ottimo terreno di coltura, in quanto offrono uno spazio protetto, T e U.R. adeguate, nutrimento nella polvere). La diffusione è favorita dal flusso d'aria prodotto, che può

trasportare microrganismi da un ambiente infetto a tutti gli ambienti alimentati dallo stesso impianto.

Per capire meglio come la componente biologica dell'aria possa costituire un potenziale elemento di degrado del patrimonio grafico è necessario considerare la *composizione dell'aria*.

L'aria contiene in sospensione un gran numero di particelle di varia natura (biologica, organica, inorganica), forma e dimensione, che costituiscono il così detto «aerosol atmosferico». La concentrazione in atmosfera è variabile ed è correlata con l'ubicazione delle sorgenti (marina, industriale, rurale ecc.), le condizioni metereologiche, il clima, le stagioni.

La componente biologica dell'aria è costituita soprattutto di microrganismi, ossia virus, batteri, funghi e loro spore, queste ultime riferite ad aggregati o a singole particelle derivanti da corpi fruttiferi. Inoltre nell'aria possono essere presenti spore di briofite e pteridofite, propaguli di licheni, cellule algali, cisti di protozoi, frammenti di insetti e loro uova, residui animali e umani, granuli di polline.

Spesso i microrganismi presenti nell'aria si trovano aggregati o inclusi in particelle solide o particelle liquide che li proteggono dagli stress ambientali, permettendo la sopravvivenza per lungo tempo. I microrganismi non possono moltiplicarsi mentre sono in sospensione nell'aria a causa di fattori ambientali limitanti e a volte letali come la disidratazione, le radiazioni UV e la temperatura elevata. Questo determina la presenza in atmosfera di poche forme vegetative mentre sono più numerose le forme di resistenza rappresentate dalle spore sia di batteri che di funghi.

Negli ambienti confinati in cui sono conservate le opere grafiche, quali musei, gallerie, ecc., è sempre presente una piccola frazione di atmosfera esterna; in essa vi è una vasta gamma di particelle aerobiologiche, tra cui le aerospore di funghi e batteri (quelle che ci interessano maggiormente). Le particelle di origine biologica hanno un esteso spettro dimensionale (0.01-100 μm) e vengono diversamente disperse nell'aria. La dispersione delle aerospore dipende da una serie di fattori endogeni ed esogeni, tra i primi i fondamentali sono: dimensioni, forma, rugosità, densità e carica elettrica. I fattori esogeni sono rappresentati dai parametri ambientali quali temperatura, umidità e circolazione dell'aria nell'ambiente.

La *deposizione* rappresenta la fine del processo di dispersione. La deposizione delle particelle aerobiologiche su una superficie è un meccanismo complesso e può avvenire con diverse modalità (per impatto, per diffusione molecolare, per effetto gravitazionale).

Le aerospore in condizioni di scarsi movimenti dell'aria si depositano e si accumulano nella polvere.

*Un prerequisito del biodeterioramento è la vitalità delle spore microbiche*. Una volta depositatesi sulle opere grafiche, parte di esse muoiono, parte restano vitali e rimangono inattive fino a quando non vi sono una serie di condizioni, soprattutto ambientali, tra cui le principali sono: temperatura, umidità, composizione dell'aria

e pH del substrato, che ne determinano la germinazione e lo sviluppo. La conoscenza del tempo massimo di conservazione della vitalità delle spore microbiche e dei fattori che influiscono sulla stessa è di fondamentale importanza per valutare il ruolo che può avere l'aeromicroflora come potenziale biodeteriogeno delle opere su carta. A tale riguardo le ricerche svolte sulla vitalità di alcune specie di spore fungine depositate su materiali igroscopici (carta, legno) in relazione a differenti microclimi-tipo di ambienti di conservazione, hanno evidenziato che i tempi di sopravvivenza variano da specie a specie e in rapporto ai diversi valori di umidità relativa. Tali ricerche devono ancora essere completate per ampliare le specie analizzate, approfondire l'effetto incrociato della presenza simultanea di specie diverse (inibizione/rafforzamento) e sviluppare metodiche e tecniche di analisi più adatte a simulare le situazioni reali. L'obiettivo è quello di realizzare un repertorio delle specie biodeteriogene, con l'individuazione dei tempi di vitalità delle relative spore e delle condizioni di germinazione.

Proprio perché l'aria è il mezzo principale in cui sono dispersi e trasportati gl'inquinanti biologici, ha recentemente assunto una particolare importanza *l'aerobiologia*, scienza che studia la composizione, la genesi e la dispersione in atmosfera delle particelle d'origine biologica e degli effetti che esse generano sulle superfici d'impatto. Queste possono essere rappresentate da organismi viventi, con insorgenza di patologie, ma anche da superfici non biologiche, come le opere d'arte. Tale disciplina è stata applicata ai beni culturali, per contribuire a valutare il rischio di biodeterioramento presente in un determinato ambiente confinato, nonché ad individuare opportuni interventi correttivi.

Le ricerche aerobiologiche condotte fino ad oggi in musei, biblioteche ed archivi in vari paesi del mondo (Italia, Polonia, Spagna, Francia e Cuba) evidenziano due elementi comuni che sono degni di nota:

- c'è un'omogeneità fra l'aeromicroflora e i biodeteriogeni riscontrati sulle opere d'arte;
- c'è una prevalenza sia quantitativa che qualitativa di determinate specie di microrganismi.

Da tali ricerche risulta l'importanza del *monitoraggio della componente biologica dell'aria* negli ambienti di conservazione, la quale può costituire un potenziale elemento di degrado dei beni culturali.

*Polvere*

La polvere ha una composizione eterogenea e variabile: contiene uova di insetti, spore di microrganismi (batteri e microfunghi), particelle chimiche di diversa origine e natura. In ambienti visitati da molte persone, la polvere contiene anche cellule epiteliali di pelle. La *composizione della polvere* varia in rapporto all'ubicazione dell'ambiente, al tipo di manutenzione e conservazione dei manufatti e alle attività che si svolgono nei locali.

La polvere favorisce il trattenimento delle spore di microrganismi ed essendo composta per l'82% di materia organica costituisce una sorgente di sostanze nutrienti per alcuni insetti e microfunghi. Inoltre può formare un microambiente sulla superficie delle opere d'arte su carta in quanto le particelle di polvere possono assorbire l'umidità, fattore che crea un favorevole microclima per lo sviluppo di insetti e microrganismi.

Monitoraggi delle spore microbiche deposte nella polvere, condotti in ambienti di conservazione, hanno evidenziato la presenza di spore fungine vitali, molte delle quali presenti nell'aria e appartenenti a specie deteriogene per le opere d'arte su carta. Pertanto la polvere rappresenta un potenziale rischio di biodeterioramento per il patrimonio grafico.

*L'uomo*

L'uomo è uno dei più efficaci vettori dei microrganismi, attraverso il sollevamento della polvere con il calpestio, per mezzo della desquamazione della pelle e con le emissioni respiratorie. La concentrazione delle particelle biologiche aerodisperse negli ambienti interni tende ad essere, pertanto, più elevata che all'esterno, sia per i vettori di trasporto attivo (uomo) sia per la carenza dei meccanismi naturali di dispersione che si verificano negli ambienti aperti.

## Composizione e biodegradabilità delle opere d'arte su carta

Il secondo ordine di fattori che determinano il biodeterioramento delle opere d'arte su carta, dopo la presenza di biodeteriogeni, è costituito dalla *biodegradabilità dei materiali* che compongono l'opera stessa. Le opere d'arte su carta, infatti, sono state realizzate, nel corso delle varie epoche, con differenti tipi di carta, con diverse tecniche di esecuzione e con diverse pratiche nella preparazione e colorazione del supporto. Inoltre gli artisti nei secoli hanno impiegato vari tipi di «media» ed hanno sperimentato anche il loro uso combinato su carte preparate e colorate. Tale patrimonio pertanto è costituito da una diversificata tipologia di manufatti (stampe, disegni, acquarelli, dipinti, ecc.), e di conseguenza di materiali impiegati e di loro biodegradabilità.

Accanto ai materiali costituenti l'opera grafica, vanno considerati inoltre quelli estranei all'opera, quasi la totalità di natura organica, che vengono a contatto con essa dopo la sua realizzazione: carte, cartoni, collanti, ecc. impiegati nelle operazioni di conservazione, restauro e/o di esposizione (album, volumi, scatole, cartelle, passe-partout, velature, rincollaggi, ecc.).

Il componente principale, sia delle opere sia del materiale accessorio, è rappresentato dalla *cellulosa*, che da un punto di vista chimico è un polimero lineare del glucosio, e da *altre categorie di sostanze*, di natura vegetale e animale, quali gli adesivi, i colori, gli inchiostri, i pigmenti, usati nella preparazione e/o nel restauro.

Tutti questi componenti variano nell'opera in quantità e qualità, sia in funzione delle materie prime utilizzate, sia in base ai processi di lavorazione adottati. Pertanto la *vulnerabilità* agli agenti biologici varia da materiale a materiale e nell'ambito della stessa tipologia di materiale. I motivi di tali differenze vanno ricercati principalmente nelle caratteristiche chimico-fisiche dei loro componenti di base (tipo di cellulosa, presenza di lignina, tracce di metalli, ecc.), dei componenti additivi essenziali (sostanze di carica e collanti) e delle altre sostanze presenti (inchiostri, colori). Fra tali caratteristiche – che determinano la biodegradabilità o bioresistenza dei materiali di cui è composta l'opera – giocano un ruolo importante: il pH, l'igroscopicità e il grado di polimerizzazione.

Riguardo al pH questo parametro influisce sulla crescita dei microrganismi sia indirettamente modificando la disponibilità dei nutrienti, sia direttamente, modificando i meccanismi di assorbimento. I microrganismi si adattano a pH compresi tra 3 e 9, tuttavia la loro attività metabolica è più intensa in un «range» ristretto che varia da specie a specie.

Per la maggior parte dei batteri il pH è compreso tra 7 e 8 e per la maggior parte dei funghi tra 4 e 7. Se il pH si discosta dai valori ottimali lo sviluppo dei microrganismi è più limitato e conseguentemente i danni che essi arrecano sono meno gravi. Tuttavia, ai fini preventivi, non è facile agire sul pH; siamo qui di fronte ad un esempio concreto del concetto di *sistema* illustrato nell'introduzione: infatti se un pH fortemente acido o alcalino sarebbe in grado d'inibire lo sviluppo della maggior parte dei microrganismi, esso determinerebbe altre tipologie di danni, influendo sulle caratteristiche meccaniche dell'opera. La tendenza attuale è quella di produrre carte con una riserva di alcalinità, tra le sostanze utilizzate vi è il carbonato di calcio particolarmente adatto alla fabbricazione di carte per cui è richiesta permanenza e durabilità. La presenza della riserva alcalina permette di tamponare un eventuale abbassamento di pH della carta. L'industria cartaria è maggiormente sensibile alla salvaguardia delle proprietà meccaniche (apprezzabili oggettivamente, e quindi con un valore di mercato) della carta, piuttosto che alla sua bioresistenza. È comunque in atto un processo di ricerca per approfondire l'argomento e pervenire ad una soluzione praticabile, che tenga conto di ambedue gli obiettivi.

Per quanto riguarda *l'igroscopicità* questa è la proprietà che hanno alcuni materiali, quali la carta , il cartone, il legno, di entrare in equilibrio idrico con l'ambiente: ossia assorbire o cedere acqua quando l'umidità relativa dell'aria rispettivamente aumenta o diminuisce.

Quindi le diverse tipologie di carta di cui sono costituite le stampe e i disegni, hanno ad ogni valore termoigrometrico dell'aria un determinato contenuto percentuale di acqua che può variare da opera ad opera (in funzione della diversa igroscopicità dei materiali di cui sono composte). Inoltre il grado di igroscopicità dei vari componenti delle opere grafiche può subire modificazioni a seguito di interventi di restauro come la velatura, la ricollatura, ecc.

Ai fini della prevenzione risulta evidente che in ambienti destinati alla conser-

vazione del materiale grafico il monitoraggio del microclima e il rilevamento del contenuto d'acqua delle opere sono di fondamentale importanza in quanto permettono di controllare l'esistenza di condizioni favorevoli all'insorgenza e allo sviluppo di processi di biodeterioramento.

Il *grado di polimerizzazione* è un altro importante parametro di conservazione, poiché la maggior parte dei componenti delle opere su carta sono polimeri (composti chimici costituiti da catene di molecole formate dalla ripetizione di una molecola semplice, detta monomero).

Maggiore è il grado di polimerizzazione, cioè il numero dei monomeri della catena molecolare, maggiore è la bioresistenza del polimero. Vari fattori di ordine chimico e fisico possono ridurre il grado di polimerizzazione, e pertanto rendere tali componenti più vulnerabili agli agenti biologici. Pertanto costituisce un fattore di prevenzione la scelta di componenti altamente polimerizzati (tipo di cellulosa, di collanti), nonché la difesa dai fattori che possono ridurre il grado di polimerizzazione (calore, luce, agenti ossidanti, altre sostanze chimiche depolimerizzanti).

Vari studi hanno messo in evidenza che esiste uno *stretto rapporto tra tipo di carta e suscettibilità all'attacco dei microrganismi*; ad esempio carte di pasta meccanica e carte di pasta chimica sono particolarmente soggette all'attacco fungino, quelle di straccio sono molto più resistenti. Alcuni studi hanno evidenziato che carte aventi un contenuto di «cellulosa al solfato» del 95% e pH compresi tra 5.5 e 6 difficilmente vengono danneggiate dai microrganismi. Da alcune ricerche è emerso che a pH alcalini lo sviluppo di funghi cellulosolitici viene ostacolato. Inoltre risulta che le carte collate sono più resistenti di quelle non collate probabilmente perchè sono meno igroscopiche. Naturalmente dipende dal tipo di collante, ad esempio la colofonia e la resina inibiscono l'attacco microbico, i collanti di natura animale come la gelatina o di natura vegetale come l'amido possono costituire invece un ottimo terreno di crescita per numerose specie microbiche. Alcuni ricercatori hanno osservato che alcune specie di funghi come l'*Aspergillus terreus* si sviluppano su carte che sono state sbiancate con cloro. Il motivo va ricercato nel fatto che questo fungo è in grado di assimilare il cloro e di sintetizzare i suoi prodotti.

### Condizioni ambientali che favoriscono lo sviluppo degli insetti e dei microrganismi

La presenza di insetti e microrganismi vitali e la biodegradabilità dei materiali di cui è composta l'opera, sono condizioni necessarie ma non sufficienti affinché si verifichi il biodeterioramento; il fattore cruciale è costituito quindi dal verificarsi di determinate *condizioni ambientali che consentono lo sviluppo degli agenti biodeteriogeni*.

I parametri ambientali più importanti per lo sviluppo biologico sono quelli di tipo fisico e sono:

— *la temperatura*;
— *l'umidità*;
— *la ventilazione*.

Il mantenimento di questi parametri entro precisi margini di escursione è il metodo più sicuro per evitare la germinazione delle spore microbiche e lo sviluppo dei microrganismi ed insetti.

*La temperatura*

La maggior parte delle specie entomologiche e microbiche biodeteriogene delle opere d'arte su carta hanno la più intensa attività metabolica nel «range» compreso tra 20°C e 30°C. Tra esse alcune sopravvivono a temperature superiori ai 30°C e inferiori a 0°C. Da alcune indagini condotte riguardo la sopravvivenza delle spore di alcuni microfunghi carticoli è emerso che restano vitali anche a – 75°C. Ai fini della conservazione è importante che negli ambienti di deposito e di esposizione delle opere d'arte su carta la temperatura *non superi i 18-20°C* e sia mantenuta costante nel tempo.

*L'umidità*

Il fattore umidità, cioè la presenza di acqua in tutti i suoi stati di aggregazione, gioca un ruolo determinante: gli agenti biologici infatti non potrebbero crescere e svilupparsi senza un tenore minimo di acqua, indispensabile affinchè abbiano luogo i processi metabolici.

Per quanto riguarda l'umidità atmosferica si fa in genere riferimento all'umidità relativa, la quale è una variabile dipendente della temperatura ambientale.

Dall'umidità relativa dipende a sua volta il contenuto di umidità nelle opere grafiche, ossia il loro contenuto d'acqua che si esprime come percento in peso. La carta, come il legno essendo, come già detto, materiali igroscopici sono fortemente influenzati dalle condizioni microclimatiche ambientali e sono continuamente alla ricerca di un equilibrio con l'aria dell'ambiente circostante.

Gli insetti e i microrganismi hanno differenti esigenze idriche. Per quanto riguarda gli insetti alcuni (blattidi, termiti, lepismatidi, psocidi) vivono in ambienti umidi e necessitano di umidità relativa dell'aria superiore al 65%, altri insetti (anobidi, dermestidi, lictidi, cerambicidi) vivono in ambienti asciutti e richiedono umidità relative comprese tra 40 e 60%. Per quanto riguarda i microrganismi questi si sviluppano quando l'umidità relativa è maggiore del 65% e rimane su tali livelli per un certo periodo di tempo; il materiale di cui è costituita l'opera entra in equilibrio con l'umidità dell'aria e si determina in questo modo quel contenuto d'acqua indispensabile alle spore batteriche e fungine per germinare.

Da quanto detto finora, risulta evidente che in un ambiente destinato alla conservazione ed esposizione di opere su carta, la conoscenza e il monitoraggio dei parametri termoigrometrici sia di fondamentale importanza in quanto permette di controllare condizioni favorevoli all'insorgenza di processi di degrado biologico. Ai fini della prevenzione *l'umidità relativa non deve superare il 60-65%* e si deve man-

tenere costante nel tempo ed *il contenuto percentuale d'acqua della carta non deve superare la soglia dell'8-10%*.

Oltre questi fattori da qualche tempo è stato considerato, nel settore beni culturali, un altro parametro che risulta avere un ruolo importante nello sviluppo dei microrganismi: il parametro denominato *attività dell'acqua* (Aw), ossia la quantità di acqua, sul totale, realmente disponibile per le attività metaboliche dei microrganismi.

Ogni specie di microrganismo ha i propri valori minimi di Aw, oltre i quali la crescita non è possibile, il «range» tipico di crescita dei microrganismi, in funzione dell'attività dell'acqua è compreso tra 0.99 e 0.65. Pertanto valori di attività dell'acqua delle opere d'arte su carta maggiori dello 0.65 favoriscono lo sviluppo dei microrganismi.

Nell'industria alimentare, dove il ruolo dell'attività dell'acqua è particolarmente studiato, per ridurre l'attività dell'acqua sotto 0.60 nei cibi, si utilizza il sorbitolo. Nel settore dei beni culturali, allo stato attuale della ricerca, non è stato ancora possibile pervenire ad indicazioni operative per l'uso di prodotti, sostanze, additivi, che abbassino l'attività dell'acqua e che per questa via riducano la biodegradabilità del materiale; è auspicabile uno sviluppo della ricerca su questo argomento che sembra essere molto promettente.

*Ventilazione*

La *ventilazione* ha un ruolo complesso in quanto influenzando i fenomeni di dispersione e di deposito delle spore dei microrganismi, indirettamente può anche avere una certa incidenza nel prevenire fenomeni di biodeterioramento, in quanto riduce l'eccessivo deposito del materiale aerodisperso. Viceversa uno scarso ricambio d'aria favorisce lo sviluppo di microrganismi ed insetti. Inoltre il fattore aereazione è in stretta relazione con i valori termoigrometrici: la ventilazione dell'aria infatti può attenuare eventuali eccessi di temperatura ed umidità. È stato dimostrato che la vitalità delle spore microbiche è sensibilmente ridotta quando si trovano su materiali esposti ad una corrente d'aria. Nello stesso tempo vengono impediti processi di condensazione, quando l'umidità è elevata, che si possono verificare sulle superfici fredde, quali scaffali, cassettiere o armadi di metallo.

Ai fini preventivi e conservativi un altro fattore ambientale da tenere sotto controllo è *la luce*. È noto che la radiazione luminosa proveniente da sorgenti naturali e/o artificiali danneggia i composti organici di cui sono costituite le opere grafiche accelerando il processo di deterioramento. Naturalmente il danno che può essere provocato dalla luce è proporzionale alla durata e all'intensità dell'illuminazione. Tale deterioramento fotochimico, che incide sulle proprietà fisico-chimiche delle opere grafiche, aumenta la suscettibilità all'attacco biologico. In genere la luce sia essa naturale che artificiale sfavorisce lo sviluppo di microrganismi ed insetti. Tuttavia non si deve considerarlo un fattore inibente, sia perché su alcune specie non ha effetto elevato, sia perché microrganismi ed insetti trovano in genere sui materiali grafici anfrattuosità in cui possono trovare protezione.

Ai fini della prevenzione una razionale illuminazione dunque contribuisce alla corretta conservazione delle opere d'arte su carta per le quali è consigliabile *non superare i 50 lux*.

Riassumendo, il biodeterioramento è il risultato dell'interazione tra molteplici fattori, i più importanti dei quali sono riconducibili a tre ordini di condizioni:

- la presenza di biodeteriogeni nell'ambiente di conservazione delle opere;
- il verificarsi di determinate condizioni microclimatiche e ambientali;
- la biodegradabilità dei materiali di cui sono composte le opere e il loro scambio termodinamico con l'ambiente.

PROCEDURE PER IL CONTROLLO DEL RISCHIO DI BIODETERIORAMENTO

Nel corso della presente relazione, analizzando le cause e i meccanismi del biodeterioramento, sono stati analizzati di conseguenza anche i principali presupposti per la prevenzione, che vengono di seguito così sintetizzati:

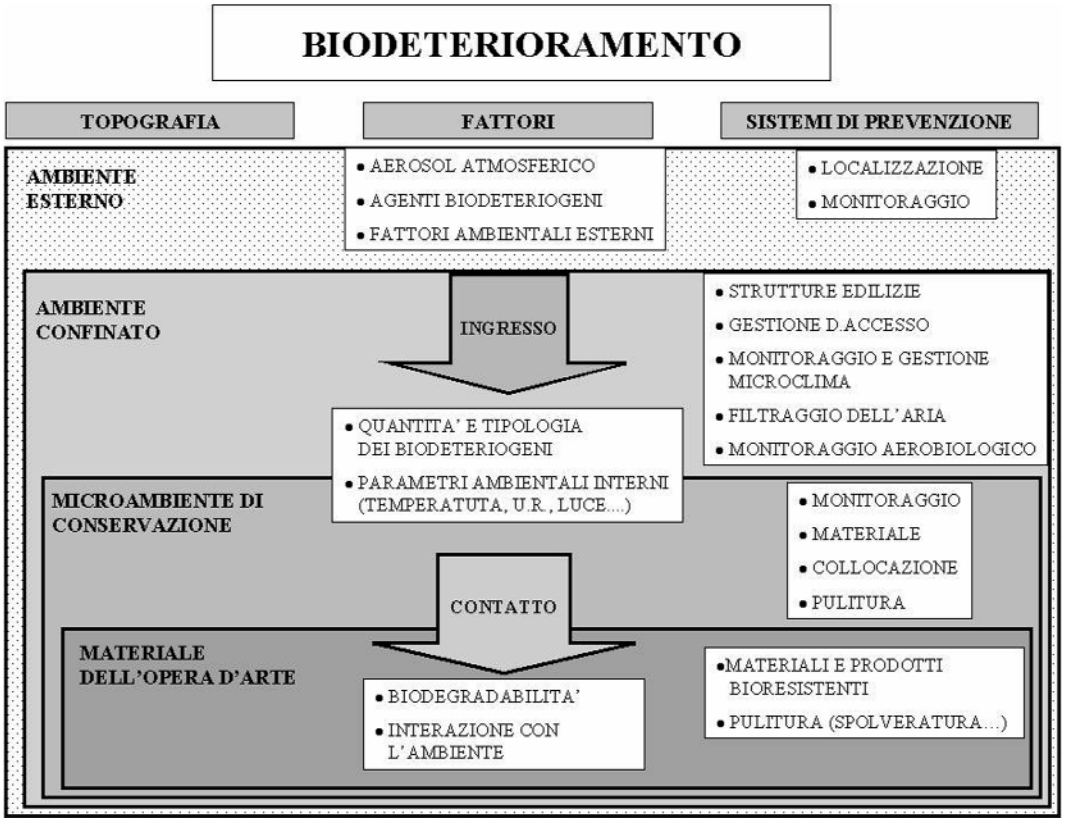
— Individuazione delle aree più idonee per le nuove localizzazioni di ambienti di conservazione ed esposizione (per quelli già esistenti si può intervenire sulle strutture e sui sistemi di climatizzazione);
— Progettazione di strutture rispondenti alle norme che riguardano la conservazione dei beni culturali;
— Modifica di strutture edilizie esistenti per adeguarle alle norme di cui sopra;
— Ispezione periodica ed eventuali interventi di manutenzione delle strutture edilizie;
— Monitoraggio biologico dell'aria;
— Monitoraggio entomologico;
— Installazione e/o controllo dell'impianto di climatizzazione e filtraggio;
— Monitoraggio e gestione dei parametri microclimatici degli ambienti di conservazione ed esposizione;
— Monitoraggio del contenuto percentuale di acqua del supporto-carta delle opere e dei materiali a contatto con esse;
— Procedure di controllo dei flussi umani;
— Pulitura degli ambienti e delle opere (spolveratura periodica con tecniche specifiche);
— Materiali e prodotti bioresistenti per manifattura e restauro delle opere;
— Ispezione periodica degli ambienti, degli arredi, dei contenitori e delle opere.

Su questi fronti opera la corretta gestione di un museo, biblioteca, archivio che conserva le opere d'arte su carta.

Il successo delle procedure di prevenzione dipende dalla loro gestione *sistemica,* a poco servirebbe un presidio perfetto su uno dei fattori di biodeterioramento, se gli altri fattori vengono lasciati agire più o meno liberamente. Ad esempio a poco servirebbe un perfetto e costoso sistema di condizionamento o climatizzazione se

esistono varchi nella struttura ambientale e/o vettori d'infezione e/o le opere sono esposte al contatto della polvere o dell'uomo, o il condizionamento stesso è usato o mantenuto in modo scorretto. Così come monitoraggi dei parametri ambientali e monitoraggi biologici dell'aria in un ambiente di conservazione, potrebbero solo servire ad intervenire tardivamente se non sono svolti regolarmente o se le condizioni microclimatiche favoriscono lo sviluppo dei biodeteriogeni.

Una corretta prevenzione, condotta con approccio sistemico, costituisce lo strumento indispensabile di salvaguardia del patrimonio delle opere d'arte su carta, poiché è impossibile isolare completamente un ambiente di conservazione da qualsiasi rischio di deterioramento e gl'interventi di restauro costituiscono un'ultima spiaggia a cui ricorrere quando il danno si è ormai verificato. Infine la sempre maggiore collaborazione tra le diverse figure professionali che operano nel settore beni culturali (conservatori, restauratori, chimici, fisici, biologici e operatori) permetterà di conservare nel miglior modo possibile il patrimonio grafico.



## BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE


AA.VV. (1981). *Restauro e Conservazione delle opere su carta*, Gabinetto disegni e stampe degli Uffizi, catologo mostra.

AA.VV. (1986). *Il biodeterioramento dei beni culturali: libri, documenti, opere grafiche, SCRIPTA VOLANT*, Istituto per i Beni Artistici Culturali e Naturali della Regione Emilia Romagna, Soprintendenza per i beni librari e documentari, Analisi.

Allsopp D. & Seal K.J. (1986). *Introduction to Biodeterioration*, Edward Arnold, London.

Biermann C.J. (1993). *The essential of pulping and papermaking*, Academic Press, New York.

Caneva G., Nugari M.P. & Salvadori O. (1994). *La biologia nel restauro*, Nardini, Firenze.

Dhawan S. & Agrawal O.P. (1986). Fungal flora of miniature painting and lithographs. *International Biodeterioration Bulletin*, *22* (2), 95-99.

Dix N.J. & Webster (1995). *Fungal Ecology*, Chapman and Hall.

Florian M.L. (1997). *Heritage Eaters. Insects and Fungi in Heritage Collections*, James and James Science Publishers Ltd, London.

Gallo F., Maggi O., Pasquariello G., Persiani A.M., Sclocchi M.C., Scorrano M. & Valenti P. (1999). Aerobiological researches in book and archival heritage and graphic arts, *An international conference on microbiology and conservation (IMC '99), of microbes and art.* Florence, Italy, 16-19 June 1999, pp. 169-173.

Gallo F. (1992). *Il biodeterioramento di libri e documenti*, Centro Studi per la Conservazione della Carta, ICCROM.

Gallo F. & Pasquariello G. (1989). Foxing: ipotesi sull'origine biologia. *Bollettino dell'Istituto Centrale per la Patologia del Libro*, *43*, 139-176.

Gallo F., Pasquariello G. & Rocchetti F. (1998). Biological investigation on sizings for permanent papers. *Restaurator*, *19*, 61-84.

Gallo F., Pasquariello G. & Valenti P. (1998). Biblioteche e archivi. In: *Aerobiologia e Beni Culturali: metodologie e tecniche di misura*, a cura di P. Mandrioli e G. Caneva, Nardini, Firenze.

Gallo F., Valenti P., Colaizzi P., Pasquariello G., Sclocchi M.C., Scorrano M., Maggi O. & Persiani A.M. (1996). Research on the viability of fungal spores in relation to different microclimates and different materials. *Iternational Conference on Conservation and Restoration of Archives and Library Materials*, vol. I, Erice 22-29 April 1996, Palumbo, Roma, pp. 177-193.

James C., Corrigan C., Enshaian M.C. & Greca M.R. (1991). *Manuale per la conservazione e il restauro di disegni e stampe antiche*, Olschki, Firenze.

Kowalik R. (1980). Microbiodeterioration of library materials. *Restaurator*, *4*, 99-114.

Maggi O., Persiani A.M., Gallo F., Valenti P., Pasquariello G., Sclocchi M.C. & Scorrano M. (1998). Airborne fungal spores in dusts present in archives: proposal for a new detection method. *6th International congress on aerobiology*, Perugia, Italy, 31 August - 5 September, p. 270.

Mandrioli P. & Caneva G. (a cura di) (1998). *Aerobiologia e Beni Culturali - Metodologie e Tecniche di misura*, Associazione Italiana di Aerobiologia-Consiglio Nazionale delle Ricerche, Nardini, Firenze.

Marconi C., Pasquariello G. & Valenti P. (1986). Lo sviluppo di miceti cellulosolitici in relazione al pH: indagini su due tipi di carta. *Bollettino dell'Istituto Centrale per la Patologia del Libro*, *40*, 125-144.

Pinniger D. (1994). *Insects pests in museums*, London, Archetype Pubblications.

Szczepanowska H. (1986). Biodeteriotation of art objiects on paper. *The Paper Conservation*, *10*, 31-39.

UNI 10322 (1994). Documentazione e informazione – Carta per documenti – Requisiti per la massima permanenza e durabilità.

UNI 10586 (1996). Documentazione e informazione – Condizioni climatiche per ambienti di conservazione di documenti grafici e caratteristiche degli alloggiamenti.

Ziska B. (1997). Fungi isolated from library materials: a review of the literature. *International Biodeterioration and Biodegradation*, *40*, 45-51.