
DEPURAZIONE



LA RIMOZIONE BIOLOGICA DEGLI INQUINANTI GASSOSI

Rassegna bibliografica a cura di **Rossella Azzoni**¹

L'idea di sfruttare i processi di biodegradazione operati dai microrganismi per rimuovere i composti indesiderati dispersi nell'ambiente si è sviluppata originariamente nel campo del trattamento delle acque usate ed in tale settore è ormai ben consolidata; anche per il trattamento di suoli ed acque sotterranee contaminate da composti organici sono applicate con successo da parecchi anni le tecniche di *bioremediation* mentre negli ultimi anni si stanno imponendo esperienze che utilizzano sistemi biologici per il controllo dei contaminanti aerodispersi.

Lo sviluppo delle tecniche di biofiltrazione dell'aria si è realizzato in Germania occidentale dalla fine degli anni '70: queste esperienze hanno dimostrato che la biofiltrazione risulta economica e presenta una serie di vantaggi rispetto alle altre tecnologie di controllo dell'inquinamento dell'aria, soprattutto se viene applicata all'abbattimento di gas di scarico che contengono basse concentrazioni di contaminanti fa-

cilmente biodegradabili.

La biofiltrazione è infatti una tecnica utilizzata tipicamente per la rimozione delle sostanze osmogene al fine di deodorizzare l'aria emessa da una sorgente puntiforme (tab. I).

Gli odori e le sostanze odorogene

Si può definire come "odore" qualunque emanazione percepibile attraverso il senso dell'olfatto e una sostanza, per essere percepita dall'olfatto, deve giungere nella zona olfattoria della mucosa nasale in concentrazione sufficientemente elevata per poterla stimolare.

Le principali caratteristiche di un odore sono: percettibilità, intensità, diffusibilità, natura chimica e tono edonico.

Una sostanza odorigena può essere percepita soltanto quando raggiunge una concentrazione minima detta "soglia di percettibilità" definita, su base statistica, come la concentrazione minima percepibile dal 50% del gruppo di persone preposte all'analisi olfattiva.

¹ PMIP, Via Juvara 22, Milano

Tab. I. Tipi di aziende che impiegano biofiltri e rispettivi composti odorosi da trattare. (da I.P.S., 1990).

Tipo di attività	Composti odorosi da rimuovere
Depuratori	idrogeno solforato, ammoniacca, metilmercaptano, biossido di zolfo, metano
Compostaggio	etanolo, diacetile, limonene, acetoina, cadaverina, putrescina, ammoniacca, idrogeno solforato, metilmercaptano
Demolizioni	ammoniacca, ammine, mercaptani, idrogeno solforato, acidi grassi saturi e insaturi, chetoni, aldeidi, solfuri organici, bisolfuri, idrocarburi
Riempimento bombole	propano, n-butano, isobutano
Industrie alimentari	alcoli, aldeidi, chetoni, acidi organici, esteri
Essiccamento letame	ammoniacca, ammine, ammidi, idrogeno solforato, solfiti organici, mercaptani
Allevamento bestiame	ammoniacca, ammine, mercaptani, idrogeno solforato, acidi grassi
Altre	toluene, terpene, benzene, etilacetato, butilacetato, butanolo, NO _x , ossido di carbonio, dimetilsolfuro, paraffine

Il livello di concentrazione cui corrisponde la soglia di percettibilità varia enormemente da una sostanza all'altra in funzione delle caratteristiche chimiche, ma può anche variare in misura notevole da un soggetto all'altro in funzione dell'età, dello stato di salute, ecc.; la soglia di percettibilità, inoltre, può ridursi durante l'esposizione prolungata alle sostanze odorigene in seguito a fenomeni di fatica, adattamento o assuefazione.

Nonostante vi siano parecchie eccezioni, le relazioni fra soglia di percettibilità e proprietà chimico-fisiche delle sostanze odorigene sono di norma attribuite alla tensione di vapore, alla idro- e liposolubilità, alla adsorbibilità.

La concentrazione di una sostanza odorigena deve essere posta in relazione anche con l'intensità della sensazione provocata: la soglia di discriminabilità degli odori corrisponde al minimo incremento di concentrazione di una sostanza in corrispondenza del quale il 50% dei rilevatori percepisce una differenza di odore.

Un parametro indicativo della capacità di diffusione dell'odore di una determinata sostanza è il cosiddetto "Odor Index", definito come il rapporto fra la tensione di vapore della sostanza e la concentrazione minima percepita dal 100% del gruppo di persone preposte all'analisi olfattiva; questo parametro combina quindi la diffusibilità della sostanza con la capacità odorigena.

La caratterizzazione degli odori può essere effettuata sulla base della natura chimica delle sostanze odorigene (composti sulfurei, aldeidi e chetoni, composti azotati ecc.) mentre il tono edonico indica la gradevolezza dell'odore (tab. II).

La misura degli odori costituisce un problema non ancora completamente risolto; esistono comunque due classi di metodi di misura: i metodi analitici ed i metodi olfattometrici.

I metodi analitici sono basati sull'analisi strumentale dell'aria contaminata mentre quelli olfattometrici si basano sul rilevamento degli odori da parte di apposite giurie composte da diverse persone; certamente solo i metodi analitici sono in grado di fornire dati precisi, ma solo i metodi olfattometrici rispecchiano in modo reale quello che può essere il disturbo provocato da un determinato composto, o da un miscuglio di sostanze, sulle persone.

La molestia provocata dagli odori è un campo nel quale giocano un ruolo significativo anche fattori psicologici; ne deriva che lo studio della nocività di una sostanza aerodispersa deve essere tenuto ben distinto dallo studio del disagio derivato dalla presenza di sostanze odorigene.

Il trattamento biologico dell'aria

I biofiltri depurano l'aria con un meccanismo simile a quello con cui i depuratori trattano le acque reflue.

La capacità di depurazione del biofiltro dipende in larga misura dallo sviluppo spontaneo di una popolazione microbica eterogenea composta da batteri chemioeterotrofi e chemioautotrofi, da muffe e da lieviti. La flora microbica colonizza il materiale filtrante sviluppandosi soprattutto nell'acqua di umidificazione del biofiltro, costituendo un vero e proprio biofilm attivo. L'attività di tale biofilm dipende non solo dalle specie presenti, ma anche dalla disponibilità di sostanze nutritive, dall'umidità, dal pH, dall'ossigeno disciolto nel biofilm stesso, dalla temperatura e da

Tab. II. Composti espressamente identificati o implicati nelle emissioni odorose. (da WILLIAMS & MILLER, 1992)

Nome	Formula	Peso molec.	Punto ebolliz.	solubilità /100mL	Odore	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ bassa	Soglia olfattiva μ/m^3 alta	μ/m^3 a 20°C
Composti dello zolfo								
solfuro di idrogeno	H ₂ S	34,1	-60,7	437 mL	uova marce	0,7	14	6,7
ossisolfuro di carbonio	COS	60,1	-50,2	50 mL	pungente	-	-	-
disolfuro di carbonio	CS ₂	76,1	46,3	0,22 g	dolciastro, sgradevole	24,3	23000	665
dimetilsolfuro	(CH ₃) ₂ S	62,1	37,3	insolubile	cavoli marci	2,5	50,8	2,5
dimetilbisolfuro	(CH ₃) ₂ S ₂	94,2	109,7	insolubile	solfuro	0,1	346	-
dimetiltrisolfuro	(CH ₃) ₂ S ₃	126,2	165	insolubile	solfuro	6,2	6,2	-
metanetiolo	CH ₃ SH	48,1	6,2	molto bassa	solfuro, pungente	0,04	82	4,2
etanetiolo	CH ₃ CH ₂ SH	62,1	35	molto bassa	solfuro, terroso	0,032	92	2,6
Ammoniaca e composti azotati								
ammoniaca	NH ₃	17,1	-33,4	90 g	pungente, acuto	26,6	39600	33100
aminometano	(CH ₃)NH ₂	31,6	-6,3	elevata	pesce, pungente	25,2	12000	-
dimetilammina	(CH ₃) ₂ NH	45,1	7,4	elevata	pesce, ammina	84,6	84,6	88,1
trimetilammina	(CH ₃) ₃ N	59,1	2,9	elevata	pesce, pungente	0,8	0,8	0,52
trimetilindolo (scatolo)	C ₆ H ₃ C(CH ₃)CHNH	131,2	265	solubile	feci, cioccolato	4·10 ⁻⁵	268	-
Acidi grassi volatili								
metanoico (formico)	HCOOH	46,0	100,5	infinita	pungente	45,0	37800	-
etanoico (acetico)	CH ₃ COOH	60,1	118	infinita	aceto	2500	250000	2500
propanoico (propionico)	CH ₃ CH ₂ COOH	74,1	141	infinita	rancido, pungente	84,0	60000	-
butanoico (butirico)	CH ₃ CH ₂ CH ₂ COOH	88,1	164	infinita	rancido	1,0	9000	3,7
pentanoico (valerico)	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ COOH	102,1	187	3,7 g	sgradevole	2,6	2,6	-
3-metilbutanoico (isovalerico)	CH ₃ CH ₂ CH(CH ₃)COOH	102,1	176	4 g	formaggio rancido	52,8	52,8	-
Chetoni								
propanone (acetone)	CH ₃ COCH ₃	58,1	56,2	infinita	dolciastro, menta	47500	161000	241000
butanone (MEK)	CH ₃ COCH ₂ CH ₃	72,1	79,6	elevata	dolciastro, acetone	737	147000	30000
2-pentanone (MPK)	CH ₃ COCH ₂ CH ₂ CH ₃	86,1	102	lieve	dolciastro	28000	45000	-
Altri composti								
benzotiazolo	C ₆ H ₄ SCHN	135,2	231	infinita	penetrante	442	2210	-
etanale (acetaldeide)	CH ₃ CHO	44,1	20,8	infinita	dolciastro, erba	0,2	4140	385
fenolo	C ₆ H ₅ OH	94,1	181,8	solubile	medicinale	178	2240	184

eventuali inibizioni provocate da sostanze tossiche presenti nel gas o provenienti dal metabolismo microbico stesso.

Il trattamento di reflui gassosi viene generalmente effettuato utilizzando biofiltri nei quali il biofilm attivo si genera attraverso processi del tutto naturali; nel caso di reflui di tipo industriale con composizione costante e nota, tuttavia, il trattamento può avvenire per mezzo di biofiltri colonizzati da monoculture o da consorzi di batteri *wild type* selezionati ed adattati.

I composti maleodoranti che possono essere rimosi con la biofiltrazione sono i solfuri (in modo particolare l'idrogeno solforato), i composti azotati, le aldeidi, i chetoni, gli alcoli, gli eteri e la maggior parte dei solventi (tab. III).

Per favorire la crescita batterica ed aumentare i rendimenti di rimozione degli inquinanti, si può agire sulla disponibilità di nutrienti e di ossigeno. I composti organici inquinanti provvedono a fornire il carbonio alla coltura microbica mentre azoto, fosforo, potassio e zolfo si possono dosare dall'esterno.

I biofiltri

Il biofiltro per il trattamento degli inquinanti aerodispersi consiste in un letto di materiale biologicamente attivo attraverso cui viene forzosamente ventilata l'aria contaminata; concedendo un opportuno tempo di permanenza dell'aria nel filtro, i contaminanti diffondono nello strato umido biologicamente attivo che circonda le particelle del filtro; la degradazione aerobica degli inquinanti avviene nel biofilm ed i prodotti finali della degradazione sono anidride carbonica,

acqua e biomassa microbica (fig. 1).

Perché un biofiltro operi con efficienza, il riempimento deve garantire non solo le condizioni ambientali migliori per le popolazioni microbiche residenti, ma anche una distribuzione delle particelle e dei pori tale da garantire ampie superfici di contatto e basse perdite di carico. Inoltre, il riempimento deve garantire la minima compattazione nel tempo per ridurre gli interventi di manutenzione e di aggiunta di materiale.

Un materiale fresco viene considerato adatto come riempimento quando presenta pH compreso fra 7 e 8,

Tab. III. Rimozione di vari composti odorosi in un biofiltro. (da I.P.S., 1990).

Composto odoroso	Rimozione %
aldeidi	92-99,9
ammine, ammidi	92-99,9
ammoniaca	92-95
benzene	> 92
cadaverina, putrescina, limonene	96
monossido di carbonio	90
dimetilsolfuro	91
etanolo, diacetile, acetoina	96
idrogeno solforato	98-100
isobutano, n-butano	95-98
mercaptani	92-95
acidi organici	99,9
solfuri e bisolfuri organici	90-99
idrocarburi poliaromatici	95-100
propano	92-98
biossido di zolfo	97-99
terpeni	> 98

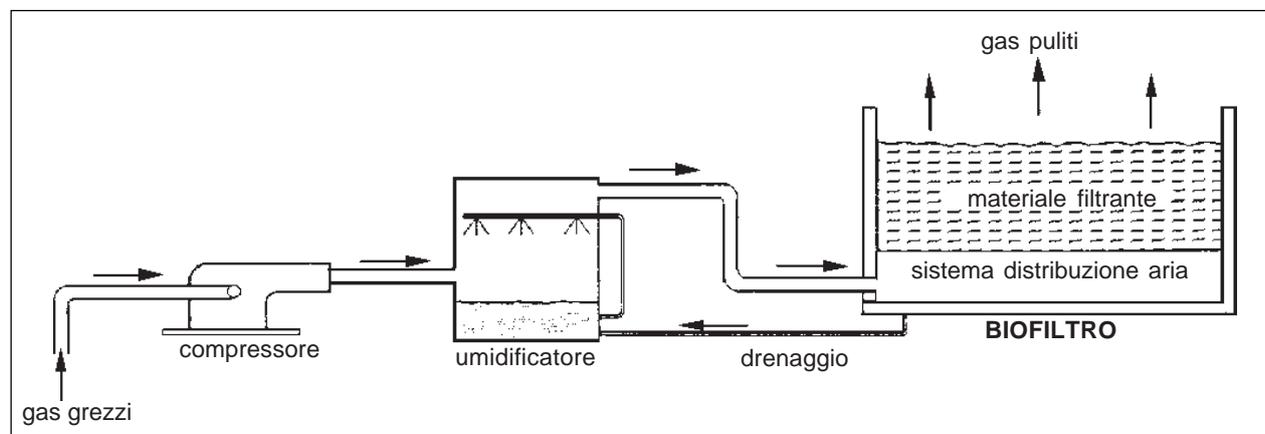


Fig. 1. Schema di un biofiltro aperto a letto singolo. (da LESON & WINER, 1991)

volume dei pori superiore all'80% e contenuto di sostanza organica superiore al 55%.

Il riempimento del filtro può essere realizzato con diversi materiali come: terreno, sabbia, compost, torba o cortecce d'albero.

Nel caso di un filtro costituito da terreno, il letto filtrante viene realizzato in trincea oppure in cumulo; sul fondo del letto si installa il sistema di diffusione dell'aria maleodorante, generalmente costituito da una tubazione forata avvolta in una camicia di ghiaia.

Il riempimento del filtro può essere lo stesso terreno dello scavo, se esso è di natura argillosa o sabbiosa; in altri casi può essere appositamente trasportato in loco in modo che il letto abbia le idonee caratteristiche. Lo spessore dello strato filtrante deve essere di almeno 1 m e, preferibilmente, superiore a 2 m.

Per diminuire l'acidità che si genera dall'ossidazione di alcuni composti, si procede normalmente all'innaffiamento del letto; questa operazione, mantenendo una sufficiente umidità nel filtro, crea anche le condizioni ottimali per la vita e lo sviluppo dei microrganismi e facilita l'utilizzo dei solfuri disciolti in acqua.

I biofiltri a terreno sono progettati in modo che la velocità del flusso d'aria ascendente sia compresa fra 0,2 e 1 m/min; per garantire un tempo di contatto sufficiente, la velocità più alta può essere raggiunta utilizzando un terreno sabbioso protetto dalla pioggia e spesso almeno 1,5 m; in queste condizioni, le perdite di carico sono piuttosto contenute.

I biofiltri a compost garantiscono concentrazioni di nutrienti inorganici più che sufficienti per la crescita dei microrganismi ed il tempo di ritenzione dell'aria consigliato è di circa 30 secondi; il letto di compost, però, si abbassa con il passare del tempo e quindi si deve prevedere di aggiungere continuamente del materiale. Talvolta, se gli stadi finali del processo di compostaggio sono stati effettuati in condizioni di insufficiente aerazione, all'avvio del biofiltro si possono verificare delle emissioni odorose.

Il compost presenta il vantaggio di dare perdite di carico minori rispetto al terreno.

I biofiltri che utilizzano come riempimento torba e cortecce d'albero sfruttano le proprietà d'entrambi i componenti. La torba, grazie alle sue proprietà assorbenti, funge da substrato per l'insediamento dei microrganismi mentre la cortecce d'albero, grazie al

suo buon comportamento meccanico, fa da supporto strutturale alla torba e quindi consente di ridurre le perdite di carico alle quali va incontro il flusso gassoso.

Le perdite di carico sono funzione dell'umidità ed aumentano all'aumentare del contenuto d'acqua; la torba è il materiale che riesce ad adsorbire la maggior quantità d'acqua e quindi, pur costituendo il substrato ideale per i microrganismi, deve essere miscelata a materiali che ne migliorino la resistenza strutturale, come le sfere di polistirene o la cortecce degli alberi (fig. 2).

Parametri costruttivi e gestionali

L'*umidità* è il parametro che, più di ogni altro, condiziona il rendimento del filtro: è necessario che sia sempre controllata e mantenuta pressoché costante.

Poiché il processo di ossidazione biologica è alla base del meccanismo di rimozione degli odori, è essenziale che il contenuto d'umidità sia quello ottimale per i microrganismi residenti; esso può variare dal 20% al 60% in peso a seconda del riempimento usato.

L'evaporazione dell'acqua assorbita dal materiale filtrante è determinata dall'attività dei microrganismi e dall'azione dei gas che, attraversando il filtro, prelevano acqua e fanno seccare il materiale di riempimento.

Con un sistema di umidificazione approssimativo può accadere che il letto si rigonfi nei periodi umidi e si ritiri durante quelli secchi: questa alternanza determina la riduzione di volume del filtro e la formazione di vie preferenziali per il flusso d'aria.

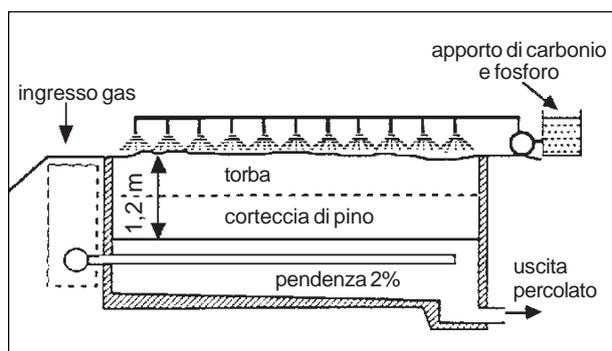


Fig. 2. Schema di trattamento di biodeodorizzazione su torba presso l'impianto di Carry-Sausset. (da BENEDESI *et al.*, 1993).

Un contenuto d'umidità inferiore al necessario provocherà una riduzione dell'attività biologica ed il trasferimento nella fase gassosa degli inquinanti già adsorbiti nel filtro; un eccesso d'acqua promuoverà lo sviluppo di zone anaerobiche all'interno del filtro provocando lo sviluppo di cattivi odori. L'ostruzione dei pori farà aumentare la perdita di carico del filtro determinando un aumento dei costi di gestione in quanto i compressori con i quali si convoglia l'aria al biofiltro dovranno consumare una maggiore quantità di energia per vincere le resistenze opposte al passaggio del flusso.

La quantità di acqua necessaria a mantenere una sufficiente umidità nel filtro può essere fornita in due diversi modi: per preumidificazione dell'aria entrante e per bagnatura diretta.

La preumidificazione consiste nel mettere a stretto contatto l'aria da trattare con molta acqua, in modo che il flusso aumenti il suo tenore di umidità, oppure nell'iniettare vapore nel flusso gassoso; la sola preumidificazione non è in grado di contrastare completamente l'evaporazione ed è quindi necessario ricorrere alla bagnatura diretta del riempimento con un sistema a pioggia disposto sopra il biofiltro (fig. 3).

Con forniture d'acqua eccessive si rischia la formazione di un percolato che, infiltrandosi nel letto, asporta parte dei nutrienti riducendo la qualità del substrato organico.

Il processo di essiccamento del filtro causato dal flusso di gas insaturo è più importante in corrispondenza del punto di immissione poiché –una volta entrato– il gas si satura piuttosto velocemente; inoltre, l'ossidazione biologica esotermica è più spinta dove gli inquinanti hanno le concentrazioni più elevate, cioè all'ingresso del filtro. Una interessante soluzione impiantistica, che può prevenire tale essiccamento, prevede l'immissione dell'aria dall'alto al basso in equicorrente con l'acqua.

La *portata*, calcolabile in fase progettuale in funzione del tempo di ritenzione ottimale per la rimozione dei contaminanti, può subire nel tempo diminuzioni più o meno modeste in seguito all'aumentare delle perdite di carico determinate dall'impaccamento dello strato filtrante.

Il *contenuto d'ossigeno* nel biofiltro deve essere

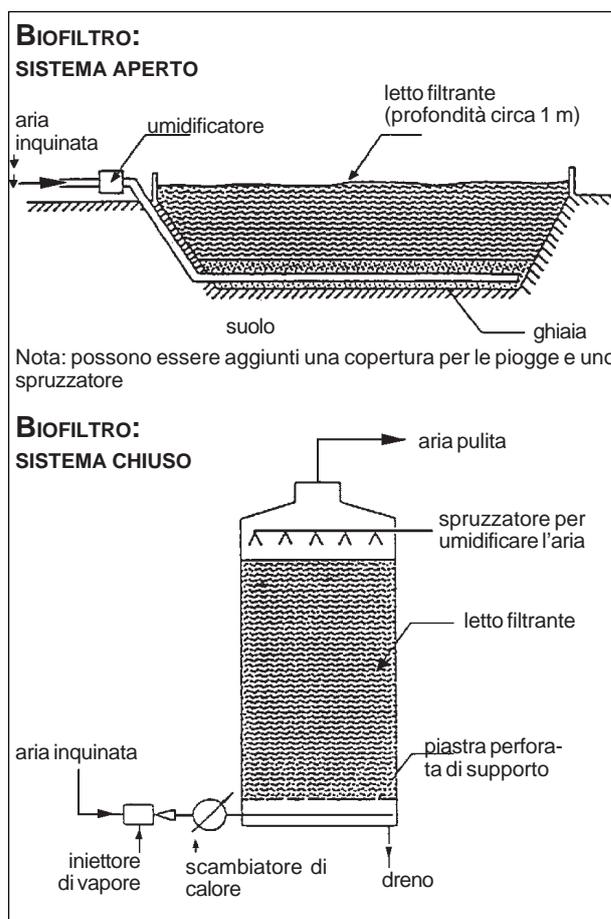


Fig. 3. Sistemi di deumidificazione dell'aria. (da WILLIAMS & MILLER, 1992)

tale da consentire l'ossidazione biologica dei composti odorosi. Indicativamente, sono necessarie almeno 100 parti di ossigeno per ogni parte di gas ossidabile; considerato che le concentrazioni dei composti osmogeni presenti nella miscela gassosa sono piuttosto basse, tale rapporto viene mantenuto facilmente.

La *temperatura* è un fattore di grande importanza per il funzionamento del biofiltro poiché la rimozione delle sostanze odorose richiede un'elevata attività microbica e questa indicativamente raddoppia per ogni dieci gradi di aumento della temperatura. Ne deriva che possono essere richiesti aggiustamenti della temperatura dell'aria influente per assicurare il mantenimento di buone condizioni operative; vengono raccomandate temperature operative comprese fra 10 °C e 40 °C.

Nei biofiltri si può generare calore a causa dell'at-

tività microbica: questo fenomeno può permettere di mantenere un adeguato rendimento di rimozione delle sostanze odorose anche quando la temperatura dell'aria è molto bassa.

La temperatura interna del biofiltro può essere controllata operando una buona umidificazione: durante i periodi più caldi, nei quali si può superare il valore di 40 °C, l'evaporazione dell'acqua consente di abbassare la temperatura poiché smaltisce il calore necessario al cambiamento di stato.

Basando i biofiltri il loro funzionamento sull'attività microbica, è necessario mantenere il *pH* vicino alla neutralità per favorire il massimo trattamento degli odori. Quando viene trattato idrogeno solforato, si produce acido solforico; i biofiltri devono possedere una capacità tampone sufficiente per prevenire l'abbassamento del *pH* del mezzo. Se si mantiene per un periodo di tempo lungo un alto carico di acido solfidrico, si verificherà comunque un abbassamento del *pH*; in questo caso è necessario sostituire il riempimento o aggiustarne il *pH* tramite un apporto d'acqua che, attraversando il letto biologico, asporti l'acido solforico trasferendo l'acidità dal materiale al percolato.

Le perdite di carico assumono dimensioni diverse a seconda del materiale usato per il riempimento. La porosità del riempimento può cambiare nel tempo in funzione dei cambiamenti del contenuto di umidità, della degradazione microbica della matrice di supporto e della compattazione del materiale. Le variazioni di porosità sono in grado di influire sulla pressione gassosa richiesta per far passare l'aria da depurare attraverso il filtro; il continuo monitoraggio delle cadute di pressione attraverso il filtro permettono l'individuazione precoce di "cortocircuiti" oppure della compattazione.

L'altezza del letto filtrante può variare da meno di 0,5 m fino a 2,5 m; l'altezza di circa 1 m è la più frequente e consente di mantenere un tempo di residenza sufficiente riducendo al minimo lo spazio necessario per l'installazione del biofiltro. Alcuni costruttori raccomandano l'uso di biofiltri multistrato per permettere maggiori portate a parità di area di base; a tale risparmio di superficie aziendale impiegata per l'installazione del biofiltro, però, può corri-

spondere un minor rendimento determinato dalla canalizzazione dei gas lungo lo spessore del filtro.

I fenomeni di canalizzazione, compattazione, acidificazione possono verificarsi in meno di sei mesi nei biofiltri che trattano composti puri, o possono non verificarsi per anni in altri casi; cautelativamente, è consigliabile progettare il biofiltro in modo tale da permettere il rimescolamento o la sostituzione del materiale più superficiale.

Aspetti microbiologici

Il processo di adesione dei microrganismi ai substrati avviene in tempi brevi ed in ambiente umido essi tendono a colonizzare le superfici formando biocenosi che vengono definite biofilm.

Ogni discontinuità presente in un sistema colonizzato da microrganismi crea una "interfaccia" che può influenzare lo sviluppo della microbiocenosi; le interfacce separano: solidi/liquidi, solidi/gas, liquidi/gas e liquidi/liquidi non miscibili. Ogni fase presenta caratteristiche fisico-chimiche differenti e può costituire un sito di colonizzazione, una sorgente di nutrienti o di sostanze tossiche o una barriera da superare per raggiungere nuovi substrati colonizzabili. A livello dell'interfaccia aria/acqua si forma un microstrato costituito da sostanze nutritive nel quale si accumulano sostanze idrofobiche e agglomerati di detriti di peso specifico molto basso.

Il materiale di riempimento di un biofiltro regolarmente umidificato presenta le caratteristiche illustrate in fig. 4 e deve, di conseguenza, essere considerato come un substrato colonizzabile che si ricopre di un biofilm più o meno distribuito, nel quale la microbiocenosi sarà costituita dalle specie microbiche più adatte allo sviluppo nelle varie condizioni di funzionamento.

Le attività metaboliche dei microrganismi dipendono principalmente dalla possibilità di intrappolare nella matrice polimerica del biofilm sostanze nutrienti solubili ed insolubili che possono essere utilizzate dai microrganismi disposti sulla superficie del materiale di riempimento. La matrice polisaccaridica, a causa della sua viscosità, può intrappolare anche particelle di materiale organico che devono essere progressivamente degradate ad opera degli enzimi batterici. La matrice polisaccaridica che separa la componente cellulare del biofilm stesso dalla fase liquida dell'am-

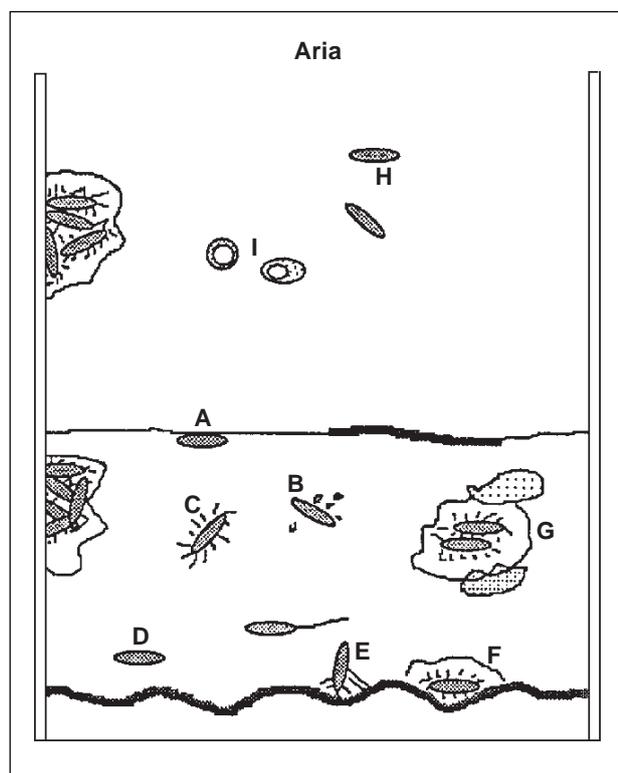


Fig. 4. Sviluppo dei batteri in presenza di differenti tipi di interfaccia. (da DACCARO, 1997).

- A: batteri all'interfaccia aria/acqua
- B: batteri nella fase acquosa
- C: batteri nella fase liquida con glicocalice
- D: adesione reversibile
- E: adesione reversibile
- F: adesione irreversibile
- G: microcolonie nella fase acquosa + detriti
- H: batteri aerodiffusi
- I: spore aerodiffuse

biente esterno svolge, quindi, un ruolo fondamentale per la cattura e l'inglobamento delle sostanze nutritive, per il mantenimento dell'umidità e per la difesa dei microrganismi da situazioni avverse provocate da agenti di varia natura.

I componenti stessi del biofilm, per effetto del loro metabolismo, possono preparare i substrati per una progressiva degradazione operata da più specie microbiche. La presenza di batteri che svolgono il ruolo di produttori di fattori nutritivi favorisce l'aggregarsi attorno ad essi di specie differenti che vengono in questo modo stimolate. In un ambiente nutrizionalmente carente, come quello che si ottiene nei biofiltri, si può verificare il fenomeno del "sintrofismo incro-

ciato", in cui microrganismi differenti dipendono l'uno dall'altro per la produzione di qualche elemento nutritivo essenziale. Il sintrofismo incrociato è una forma di simbiosi mutualistica che rende possibile lo sviluppo di aggregazioni complesse di microrganismi.

Anche la morte dei componenti del biofilm seguita dalla lisi delle cellule rientra nei meccanismi fisiologici di mantenimento in attività del biofilm poiché il materiale cellulare liberato dalla lisi, rimanendo intrappolato nella matrice polimerica, viene riciclato.

Quando la formazione del biofilm avviene su un substrato di natura organica, viene favorito lo sviluppo di specifici batteri che possono digerire il substrato stesso; la colonizzazione primaria produce enzimi che attaccano il substrato insolubile producendo composti solubili che possono stimolare la crescita dei batteri eterotrofi adiacenti.

L'immissione del refluo gassoso nel biofiltro provoca la progressiva selezione di specie batteriche capaci di utilizzare le sostanze inquinanti come fonte di carbonio e di energia. È ovvio che, per poter ottenere una popolazione idonea a degradare efficacemente le sostanze inquinanti, è necessario che il biofiltro venga sottoposto ad un periodo di acclimatazione, normalmente abbastanza breve.

Il funzionamento del biofiltro può essere paragonato alla coltura continua di microrganismi in un chemostato, dove il continuo apporto di sostanze nutritive consente la moltiplicazione delle cellule ad una velocità costante di duplicazione. Nel biofiltro viene assicurato il continuo allontanamento di cellule morte, di terreno nutritivo esausto e di sostanze di rifiuto prodotte dal catabolismo microbico, sostanze che ad alte concentrazioni possono determinare effetti tossici sui microrganismi stessi; tale allontanamento viene garantito attraverso la formazione del percolato, generato dall'innaffiamento del letto filtrante.

La mancata utilizzazione in continuo dell'impianto di biofiltrazione può provocare la morte dei microrganismi che costituiscono la flora attiva del materiale di riempimento. Tuttavia, è prevedibile la sopravvivenza della microbiocenosi durante le pause di funzionamento nel caso in cui il materiale stesso sia in grado di fornire un sufficiente apporto di sostanze nutritive attraverso il rilascio di composti adsorbiti ad esso durante il periodo di utilizzazione a regime.

I microrganismi responsabili della degradazione

degli inquinanti presenti nei reflui gassosi sono i batteri, gli attinomiceti e i funghi. La velocità di degradazione degli inquinanti dipende dalla presenza nel materiale filtrante di microrganismi adatti, le cui attività metaboliche dipendono principalmente dal tipo di materiale di riempimento, dalla disponibilità di nutrienti, dalla presenza di ossigeno disciolto nel biofilm, dall'assenza di sostanze tossiche, da una sufficiente umidità e da convenienti temperatura e pH.

La flora microbica responsabile dell'eliminazione delle sostanze inquinanti aerodisperse può essere classificata nelle seguenti categorie:

- microrganismi chemioautotrofi che, utilizzando la CO_2 come principale fonte di carbonio, possono impiegare come fonti ossidabili di energia composti solforati ridotti (H_2S , S , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$); composti azotati ridotti (NH_3 , NO_2^-); composti ferrosi oppure H_2 .
- microrganismi chemioeterotrofi, che impiegano composti organici come fonte principale di carbonio ed energia.

Alcune specie microbiche sono capaci di passare da un metabolismo di tipo autotrofo ad uno eterotrofo: la loro crescita diventa quindi di tipo mixotrofico, nella quale risultano fattori limitanti di crescita sia un substrato organico, sia una fonte di energia inorganica. Anche substrati inorganici che potrebbero essere degradati ad opera di microrganismi autotrofi, nei biofiltri sono più spesso attaccati ad opera di microrganismi eterotrofi. Sono stati infatti descritti casi in cui il solfuro di idrogeno, uno dei composti maleodoranti più frequentemente presente nei reflui gassosi, può essere degradato ad opera di microrganismi eterotrofi come *Xantomonas*. L'intervento di questi microrganismi risulta essere più vantaggioso rispetto a processi per la rimozione di H_2S basati sull'ossidazione ad opera di tiobacilli o altri solfobatteri, che presentano velocità di crescita più basse rispetto ai microrganismi eterotrofi.

A titolo esemplificativo, vengono riportati i risultati delle analisi microbiologiche effettuate su campioni della miscela torba-erica prelevati dal biofiltro installato presso l'impianto di depurazione di Mortara (PV) e dedicato alla rimozione di composti osmogeni nella stazione di pretrattamento dei reflui provenienti da fosse settiche. Tale biofiltro è costituito da un cilindro di vetroresina di diametro 2,3 m ed altezza 4

m, all'interno del quale è collocato materiale filtrante per 1,5 m d'altezza

Con il biofiltro funzionante a regime e in condizioni di uniforme umidificazione, le determinazioni microbiologiche evidenziano una stratificazione della flora batterica, che raggiunge i valori massimi in superficie e diminuisce progressivamente nei prelievi più vicini alle immissioni del refluo gassoso. Si riscontra la predominanza di microrganismi chemioeterotrofi in tutte le posizioni di prelievo (superficie, media altezza, fondo) con valore di CFU/g pari a 240×10^6 negli strati più superficiali del biofiltro. I microrganismi copiotrofi sono numericamente meno rappresentati: in superficie, infatti, si riscontra un valore di CFU/g pari a $57 \cdot 10^5$.

I batteri chemioautotrofi sono presenti in numero assai inferiore, con valori negli strati superficiali intorno a 10^3 sia per i batteri ossidanti i solfuri che per i batteri nitrificanti. Il numero di microrganismi chemioautotrofi presenti ai vari livelli nel biofiltro non è tale da giustificarne un ruolo fondamentale ai fini della depurazione del refluo. La velocità di crescita degli autotrofi è significativamente più bassa rispetto a quella degli eterotrofi, di conseguenza la degradazione delle sostanze presenti nel refluo può essere più rapidamente realizzata da batteri con metabolismo eterotrofo.

Il numero di microrganismi presenti nel materiale di riempimento aumenta progressivamente dopo l'immissione del refluo. I valori più elevati di carica batterica si raggiungono durante le fasi di funzionamento a regime nelle quali, in particolare negli strati più lontani dall'immissione del refluo, il ruolo degli oligotrofi appare predominante. In caso di riempimento di ripristino, la torba di più recente immissione risulta essere colonizzata da un numero di microrganismi oligotrofi inferiore rispetto a quello riscontrato nel materiale di riempimento prelevato allo stesso livello, ma in condizioni di funzionamento a regime; ciò dimostra che questi batteri, fondamentali per la formazione del biofilm attivo, necessitano di un periodo di adattamento. I copiotrofi, confermando la loro maggior velocità di riproduzione, assumono invece più rapidamente valori di CFU/g paragonabili a quelli che si riscontrano a regime, e rappresentano una fase precoce nel raggiungimento dell'equilibrio che caratterizzerà la flora microbica definitiva.

Aspetti micologici

In generale si ritiene che la presenza ed il ruolo dei funghi nella depurazione sia di secondaria importanza; nel campo della biofiltrazione dell'aria pare invece che l'abbattimento di alcuni composti –quali ammoniaca, stirene e toluene– vedano il coinvolgimento diretto di alcuni di questi organismi.

I risultati micologici riportati riguardano l'analisi del materiale di torba ed erica costituente il biofiltro già descritto nel paragrafo relativo agli aspetti microbiologici.

In generale, col termine di torba si intende il risultato dell'accumulo di residui di muschi e di vegetali superiori in ambienti con ristagno d'acqua; in tali condizioni questi accumuli vanno incontro ad un processo di lenta carbonizzazione in quanto la carenza di ossigeno ritarda i normali processi di decomposizione. Nelle zone con elevate precipitazioni, i muschi del genere *Sphagnum* si accumulano sul suolo formando dei cuscinetti dove le parti vive continuano a svilupparsi sulle sottostanti parti morte impregnate d'acqua. La torba presenta una composizione non ben definita che dipende sia dal tipo di vegetazione da cui si origina, sia dalle condizioni che ne hanno regolato la formazione; in essa sono presenti numerosi composti quali cellulose, emicellulose, pectine e carboidrati solubili che possono essere utilizzati dai funghi.

Le ericacee si sviluppano su substrati fortemente acidi come gli ambienti forestali, alpini, subalpini e talvolta palustri grazie alla formazione di un partico-

lare tipo di micorrizia detta, appunto, ericoide; queste associazioni simbiotiche con particolari funghi permettono alle piante di sopravvivere su substrati di difficile sfruttamento, dove solo i funghi possono rimettere in circolo le sostanze nutritive.

I campioni di torba ed erica utilizzati per le indagini micologiche sono stati prelevati a tre diverse altezze del biofiltro: in superficie, a media profondità ed in prossimità dell'immissione dell'aria; è stato inoltre analizzato un campione di materiale vergine.

I taxa fungini individuati sono scarsi e rappresentativi di nove generi: la distribuzione osservata è riportata in tab. IV.

I taxa fungini isolati rientrano fra i funghi più frequentemente presenti nel terreno, in cui operano un'azione geochimica di riciclaggio della sostanza organica. Alcuni generi, inoltre, sono particolarmente frequenti in substrati torbosi o contemplati nell'associazione micorrizica di alcune piante, in particolare dell'erica. *Mucor*, *Mortierella*, *Geomyces*, *Penicillium* e *Oidiodendron* sono i funghi più comunemente riportati in letteratura in ricerche floristiche micologiche della lettiera o del terreno.

Il fatto che questi funghi siano stati isolati da un filtro nella cui composizione entra la torba, fa pensare che essa rappresenti un substrato di facile utilizzazione per la produzione di biomassa fungina. La torba include infatti numerosi composti che possono essere utilizzati dai funghi; la flora fungina del biofiltro contiene in abbondanza alcuni *Penicillium* che, acidi-

Tab. 4. Funghi isolati dal materiale vergine e dal biofiltro in attività. (da BENEDESI *et al.*, 1993).

Taxa fungini	materiale vergine		umidità irregolare		umidità regolare			
	torba	erica	materiale in superf.	materiale a 25 cm	mat. recente in superf.	materiale in superf.	materiale a 20 cm	materiale a 40 cm
<i>Drechslera australiensis</i> Bugn.					+	+++	+	+
<i>Geomyces pannorum</i> var. <i>pannorum</i> Link	+++	+				+	+	
<i>Mortierella bainieri</i> Cost.					+++	+++	+	+
<i>Mucor</i> sp.				+				
<i>Oidiodendron griseum</i> Robak	+	+						
<i>Penicillium citrinum</i> Thom	+++	+						
<i>Penicillium frequentans</i> Westling	+++	+						
<i>Pestalotiopsis guepinii</i> Desm.		+						
<i>Trichoderma koningii</i>		+	+++	+				
<i>Trichotecium roseum</i> Pers.								+

+ presente

++ frequente

+++ molto frequente

ficando il substrato, potrebbero liberare o favorire l'utilizzazione di più fonti organiche, o inibirne l'utilizzazione da parte di alcuni batteri. L'isolamento dal biofiltro di *Geomyces pannorum* var. *pannorum* e di *Oidiodendron griseum* potrebbe essere correlato all'utilizzo dell'erica, alle radici della quale questi funghi sono associati; la presenza dei generi tellurici *Mortierella* e *Trichoderma* potrebbe essere legata all'uso della torba.

In natura i funghi entrano in molte trasformazioni biogeochimiche, tuttavia è difficile stabilire la loro importanza rispetto ai batteri nel mediare tali reazioni o nell'inibire alcune attività batteriche. Essi svolgono un ruolo importante nella degradazione dell'azoto organico, dello zolfo e del potassio nel terreno. In particolare, recenti studi hanno evidenziato l'importanza dell'azione di lieviti e di funghi filamentosi nel processo di ossidazione dello zolfo nel suolo; il processo biochimico della solfo ossidazione fungina non è ancora ben noto ma si ritiene che sia di tipo enzimatico.

L'abbattimento di sostanze osmogene ad opera del biofiltro potrebbe essere pertanto dovuto alla presenza di organismi eterotrofi (funghi e batteri) in grado di biodegradare composti organici e svolgere, inoltre, l'importante funzione di solfo-ossidazione. Questa funzione è normalmente svolta in natura dai taxa fungini isolati, la cui presenza non è occasionale ma dovuta al fatto di essere associati come simbionti o saprotrofi rispettivamente all'erica e alla torba.

Bibliografia di riferimento

- ALFANI F., CANTARELLA L., GALLIFUOCO A., CANTARELLA M. - 1990. Rimozione di inquinanti gassosi per via biologica. *Acqua-Aria*, **10**: 877-884.
- ANDREOTTOLA G., RIGANTI V. - 1997. Gli odori e le sostanze odorigene. Atti del Seminario di studio: "Il contenimento degli odori negli impianti di trattamento di acque e rifiuti". Università degli Studi di Pavia.
- BENEDUSI L., CARETTA G., COLLIVIGNARELLI C., DACARRO C., DEL FRATE G., RIGANTI V. - 1993. Esperienza di rimozione di odori da impianti di depurazione tramite biofiltrazione. *Ingegneria Ambientale*, **XXII** (5): 271-284.
- CARETTA G., DELFRATE G. - 1997. Il caso dell'impianto di depurazione di Mortara: un esempio di approccio metodologico. Monitoraggio dell'impianto: aspetti micologici. Atti del Seminario di studio: "Il contenimento degli odori negli impianti di trattamento di acque e rifiuti". Università degli Studi di Pavia.
- DACCARO C. - 1997. Il caso dell'impianto di depurazione di Mortara: un esempio di approccio metodologico. Monitoraggio dell'impianto: aspetti microbiologici. Atti del Seminario di studio: "Il contenimento degli odori negli impianti di trattamento di acque e rifiuti". Università degli Studi di Pavia.
- KIRCHNER K. - 1990. Biological purification of exhaust air. *Chimicaoggi*, **3**: 51-55.
- LESON G., WINER A. - 1991. Biofiltration: an innovative Air Pollution Control Technology For VOC Emissions. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **41**: 1045-1054.
- OTTENGRAF S.P. & VAN DEN OEVER - 1983. Kinetics of Organic Compound Removal from Waste Gases with a Biological Filter. *Biotechnology and Bioengineering*, **XXV**: 3089-3102.
- STUDIES IN ENVIRONMENTAL SCIENCES 51. Biotechniques for air pollution abatement and odour control policies. A.J. Dragt and J. van Ham (Editors), Elsevier Publisher, 1992.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. Biologische Abgas-/Abluftreinigung. Biofilter. VDI 3477, 1991
- WILLIAMS T.O. & MILLER F.C. - 1992. Odor Control using biofilters. *BioCycle*, **7**: 72-77.
- WILLIAMS T.O. & MILLER F.C. - 1992. Biofilters and facility operations. *BioCycle*, **11**: 75-79.
- I.P.S. - 1990. Odor control. Completing the composting process. *International Process Systems, Inc.*, USA.