



Regione Veneto
Assessorato alle Politiche
per l'Ambiente e per la Mobilità
Segreteria Regionale all'Ambiente
e ai Lavori Pubblici



arpav

Agenzia Regionale
per la Prevenzione e
Protezione Ambientale
del Veneto

Osservatorio Regionale
per il Compostaggio

LA TECNOLOGIA DEL COMPOSTAGGIO



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE
DIPARTIMENTO DI PRODUZIONE
VEGETALE E TECNOLOGIE AGRARIE

Coordinamento

Roberto Casarin
*Segretario Regionale
all'Ambiente e ai Lavori Pubblici*

Carlo Terrabujo
*Direttore Area Ricerca e
Informazione - ARPAV*

Sandro Boato
*Dirigente Direzione Regionale Tutela
dell'Ambiente*

Gian Paolo Bozzo
*Direttore Centro Agroambientale
ARPAV*

Autori

Roberto Chiumenti
*Docente di Costruzioni e Impianti
per il Trattamento dei Reflui Agricoli*

*Dipartimento Produzione Vegetale e
Tecnologie Agrarie
Università degli studi di Udine*

Alessandro Chiumenti

Hanno collaborato

Fabio Fior, Laura Salvatore,
Tarcisio Sanavia,
Giuliano Vendrame
*Servizio Rifiuti
Direzione Regionale Tutela
dell'Ambiente*

Stefano Benazzato, Gianni Barban,
Lorena Franz, Federica Germani,
Paolo Giandon
*Osservatorio Regionale per il
Compostaggio - ARPAV*

L'Osservatorio Regionale per il Compostaggio ringrazia
la dr.ssa Paola Muraro per il contributo fornito.



REGIONE VENETO
Assessorato alle Politiche per l' Ambiente e per la Mobilità
Segreteria Regionale all' Ambiente e ai Lavori Pubblici

LA TECNOLOGIA DEL COMPOSTAGGIO



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE
DIPARTIMENTO DI PRODUZIONE
VEGETALE E TECNOLOGIE AGRARIE



arpav

Agenzia Regionale
per la Prevenzione e
Protezione Ambientale
del Veneto



INTRODUZIONE

Con l'applicazione del D.Lgs. n° 22/97 la gestione dei rifiuti ha subito una decisa svolta verso il recupero della materia. Gli obbiettivi previsti dalla normativa ha indotto le Regioni a rivedere i loro Piani Regionali di Gestione dei Rifiuti, perseguendo strategie che conducono a trattare il rifiuto sempre più come una risorsa da valorizzare e non materia da smaltire, in particolare la sostanza organica che rappresenta la frazione più consistente.

Recuperare pienamente un rifiuto vuol dire ottenere un prodotto che possa trovare una libera collocazione come risorsa nelle attività produttive o del consumo; questo per la sostanza organica significa l'impiego come compost nel settore agricolo e del giardinaggio.

La Regione Veneto, già alla fine degli anni ottanta, ha posto le basi per la regolamentazione del settore con l'obbiettivo di promuovere e sostenere la produzione di compost di qualità, liberamente utilizzabile in agricoltura, presupposto fondamentale per l'effettivo recupero della sostanza organica. E in questo proposito oltre ad una specifica normativa per la regolamentazione del settore, ha istituito l'Osservatorio Regionale per il Compostaggio, confluito nell'ARPAV, quale struttura tecnica di riferimento.

In questo contesto, l'attività di compostaggio ha assunto un ruolo di primaria importanza nella gestione dei rifiuti, si sono moltiplicati gli impianti di recupero e si sono affinate le esperienze. A seconda del materiale da trattare e in funzione degli obbiettivi di recupero, si possono trovare le soluzioni tecnologiche più corrispondenti alle esigenze, in modo da ottenere un compost di qualità, che possa trovare uno spazio sul mercato.

Da ciò nasce l'esigenza di una guida che possa fornire una panoramica sulle proposte tecniche presenti nel mercato e costituire un valido supporto per gli operatori potenziali e attuali del settore, fornendo validi spunti per migliorare il loro processo produttivo.

RENATO CHISSO
*Assessore alle Politiche
per l'Ambiente e la Mobilità*

PAOLO CADROBBI
Direttore Generale ARPAV

ELEMENTI DI BASE SULLA TECNOLOGIA DEL COMPOSTAGGIO

1. Il compostaggio	1
2. Le matrici organiche compostabili.....	2
3. Gli agenti del processo di compostaggio.....	3
I batteri.....	6
I funghi.....	7
Gli attinomiceti	8
Altri agenti.....	9
4. Le fasi del processo di compostaggio	11
4.1 La prima fase: decomposizione della sostanza organica.....	12
4.2 La seconda fase: la maturazione.....	14
5. Parametri e indici di evoluzione del processo.....	15
5.1 La porosità del substrato.....	16
5.2 L'umidità del substrato.....	18
5.3 La presenza di ossigeno	20
5.4 La temperatura del processo.....	22
5.5 Il rapporto carbonio/azoto e altri nutrienti.....	24
5.6 Il pH.....	26
5.7 La presenza di sostanze inibenti i processi di trasformazione.....	27
5.8 Gli indici di stabilità	27
L'indice di germinazione	28
L'indice di mineralizzazione dell'azoto.....	28
L'indice di respirazione.....	28
L'indice di umificazione.....	29

LE MACCHINE PER IL COMPOSTAGGIO

1. La preparazione del materiale.....	34
La triturazione	34
L'apparato di frantumazione a coclee	37
L'apparato di frantumazione a molino a martelli.....	39
L'apparato di frantumazione a rotore dentato	41
La miscelazione.....	42
2. Il rivoltamento del materiale	44
I rivoltatori a nastro elevatore inclinato	47
I rivoltatori a rotore a taglio laterale.....	50
I rivoltatori per piccoli cantieri	51
3. La separazione del materiale indesiderato	52
4. La spremitura.....	53
5. La selezione del materiale	55
6. Il confezionamento del compost	57

LE TECNOLOGIE IMPIANTISTICHE

1. Evoluzione della tecnologia del compostaggio.....	59
2. Le tipologie impiantistiche	61
2.1 Il compostaggio in cumulo	62
I cumuli statici	63

I cumuli a ricambio forzato dell'aria	64
La copertura dei cumuli in Gore-Tex	67
Il compostaggio in sacchi di materiale plastico: sistema CTI	68
I cumuli a rivoltamento meccanico.....	69
2.2 Il compostaggio in bioreattori	72
I bioreattori verticali	73
I bioreattori orizzontali	75
A. Reattori a corsie.....	75
A.1 Impianti a flusso longitudinale.....	75
Impianti tipo Royer, Okada, Sutco.....	77
Impianto tipo Backhus	78
Impianto tipo Okada, Farmer . Scolari-Emmepi	78
Impianto tipo Kishi.....	80
A.2. Impianti a traslazione laterale	81
B. I reattori a corsie a ciclo discontinuo.....	83
C. Gli impianti a bacino.....	84
Impianti tipo Buehler, Weser, WKW	85
Impianti tipo Horstmann.....	86
Impianto tipo De Nicola	87
Impianti a coclee verticali.....	88
D. I bioreattori orizzontali cilindrici.....	89
E. Le biocelle.....	90
La struttura delle biocelle.....	92
Sistemi di carico.....	95
Sistemi di scarico	97
Il sistema di ossigenazione	97
Il sistema di umidificazione	98
Le biocelle Herhof.....	98
Le biocelle Gicom.....	99
Le biocelle Horstmann	101
Le biocelle Thöni.....	102
F. I biocontainer.....	105
G. I biotunnel.....	106

IL TRATTAMENTO DELL'ARIA

1. Il problema ambientale.....	109
2. Il funzionamento dei biofiltri.....	111
Influenza della temperatura	113
Influenza dell'umidità.....	114
3. La struttura del biofiltro	114
Il materiale filtrante	116
La pavimentazione.....	117
La camera di espansione dell'aria.....	118
Le pareti del biofiltro.....	119
La copertura	120
I biofiltri a container.....	121
4. Dimensionamento del biofiltro.....	121
5. Efficienza del trattamento	122
6. Altri sistemi di trattamento.....	123

BIBLIOGRAFIA

.....	127
-------	-----



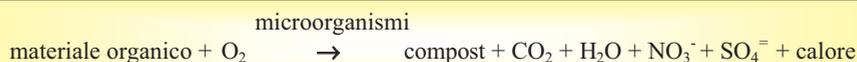
ELEMENTI DI BASE SULLA TECNOLOGIA DEL COMPOSTAGGIO

1. IL COMPOSTAGGIO

Con il termine compostaggio viene definito il processo di maturazione biologica controllata, in ambiente aerobico, della sostanza organica di residui animali e vegetali attraverso il quale si ha produzione di materiali a catena molecolare più semplice, più stabili, igienizzati, ricchi di composti umici, utili, in definitiva, per la concimazione delle colture agrarie e per il ripristino della sostanza organica nei suoli [52, 103, 109].

Il processo avviene ad opera di diversi ceppi di microrganismi operanti in ambiente aerobico: batteri, funghi, attinomiceti, alghe, protozoi, presenti naturalmente nelle biomasse organiche o artificialmente apportati con l'eventuale materiale di inoculo [73, 74, 125].

Sinteticamente il processo può essere descritto con la seguente relazione:



Il processo di compostaggio è oggi di grande interesse sotto diversi punti di vista:

- *dal punto di vista ecologico-ambientale*, perché trasforma biomasse provenienti dal ciclo urbano, da selezione di reflui agroalimentari, agricoli e zootecnici, nonché fanghi derivanti dalla depurazione di acque reflue civili, in materiali utili alla fertilizzazione dei terreni agricoli, perché non più fitotossici, apporti di nutrienti e miglioratori delle caratteristiche strutturali del terreno [8, 21, 45, 47, 72, 100, 103, 110, 111, 130];
- *dal punto di vista igienico-sanitario*, perché il materiale organico viene sanitzizzato nel processo, grazie alle elevate temperature che si generano [32, 128];
- *dal punto di vista energetico*, dato che il processo si autosostiene energeticamente, con l'energia derivante dalla demolizione dei legami biochimici caratterizzanti le complesse molecole della sostanza organica [70, 98, 114].

Il termine compostaggio viene comunemente usato - anche se impropriamente

- per il processo di stabilizzazione aerobica del materiale organico ottenuto dai RSU a raccolta indifferenziata, dopo selezione meccanica [1, 2, 27, 28, 30, 67]: le macchine e gli impianti per la lavorazione sono essenzialmente gli stessi, ma varia l'impostazione progettuale dell'impianto e soprattutto la qualità del materiale ottenuto.

Infatti, il materiale organico da raccolta indifferenziata resta destinato alla discarica; il ruolo del trattamento aerobico è solo riconducibile alla stabilizzazione della sostanza organica, utile a ridurre i processi fermentativi dopo lo smaltimento. In questo modo si possono attenuare i fenomeni di anaerobiosi che creano problemi di emissioni maleodoranti e di gas-serra, dato che il biogas prodotto (metano + anidride carbonica) viene classificato come tale [10, 31, 36, 83].

2. LE MATRICI ORGANICHE COMPOSTABILI

Da un punto di vista prettamente tecnico, le matrici organiche compostabili devono avere caratteristiche biochimiche tali da garantire una regolare attuazione del processo; in particolare devono contenere in entità sufficiente composti di facile degradabilità, per garantire il nutrimento dei microrganismi agenti del processo.

Un buon prodotto ai fini del compostaggio deve avere un'elevata attività biologica, definibile attraverso gli indici di respirazione di cui si parlerà più avanti.

I materiali organici utilizzabili per la produzione del *compost di qualità* sono regolamentati dal Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998 e, per il Veneto, dal DGRV 766, e riconducibili alle tipologie indicate in tab. 1.1.

Il prodotto ottenuto, poi, per potere essere commercializzato ed utilizzato in agricoltura senza controindicazioni come materiale ammendante/fertilizzante, deve possedere le specifiche caratteristiche e requisiti stabiliti dalla normativa relativa ai fertilizzanti, cioè dalla legge n. 748/1984 (e sue successive modifiche e integrazioni) [1, 29, 66, 108, 138].

Il processo di compostaggio, comunque, può essere adottato anche per la stabilizzazione della sostanza organica contenuta nei RSU e nei fanghi di depurazione prima dello smaltimento in discarica: il prodotto ottenuto non rientrerà nella categoria del "compost di qualità", ma dovrà essere considerato – da un punto di vista normativo – un rifiuto.

MATERIALE ORGANICO	PROVENIENZA
<ul style="list-style-type: none"> ◆ frazione fermentescibile RSU ◆ residui vegetali 	<ul style="list-style-type: none"> - raccolta differenziata - coltivazione e raccolta di colture vegetali - lavorazione di prodotti agricoli - manutenzione del verde ornamentale (residui di potatura, erba) - residui mercatali
<ul style="list-style-type: none"> ◆ segatura, trucioli di legno, sughero ◆ scarti di legno non impregnato ◆ cascami e scarti di cotone, lino, juta e canapa ◆ cascami e scarti di lana e seta ◆ deiezioni animali, letami e lettiere integrate 	<ul style="list-style-type: none"> - attività forestali e legno non trattato - imballaggi - attività tessili - attività tessili - attività zootecniche
<ul style="list-style-type: none"> ◆ sottoprodotti macellazione ◆ fanghi di depurazione 	<ul style="list-style-type: none"> - macellazione - attività di trasformazione alimentare (carne, pesce, orto-frutta, bevande,) - depuratori civili - industria della carta - attività zootecniche e agro-industria

Tab. 1.1 - Materiali organici compostabili [1, 29].

3. GLI AGENTI DEL PROCESSO DI COMPOSTAGGIO

Tra le diverse popolazioni di microrganismi che si alternano all'interno della matrice organica nelle diverse fasi del processo di compostaggio si ha una interazione sinergica: i prodotti metabolici di una tipologia di microrganismo possono essere usati come nutrimento di altri. Un utile esempio è quello dei microrganismi secernenti amminoacidi e vitamine, essenziali per la vita di altri ceppi microbici. Anche gli insetti e altri invertebrati sono utili alla disgregazione fisica di molte strutture organiche rendendole, così, disponibili per i batteri [22, 73, 74, 104, 125, 128].

In merito alla distribuzione dei microrganismi nel cumulo, i batteri si ritrovano un po' ovunque, mentre i funghi e gli attinomiceti si trovano prevalentemente nello strato superficiale (0,05-0,15 m dalla superficie). Anche le alghe si posizionano sullo strato superficiale dei cumuli.

In termini numerici i batteri rappresentano la parte dominante degli agenti del processo, risultando di circa cento volte superiori alle altre categorie di microrganismi [52, 88].

TEMPERATURA °C	
MICROORGANISMI PSICROFILI	$0 < t < 30$
MICROORGANISMI MESOFILI	$30 < t < 45$
MICROORGANISMI TERMOFILI	$45 < t < 90$

Tab. 1.2 - Classificazione dei microrganismi in funzione del regime termico.

I diversi microrganismi operano a regimi termici definiti e la loro attività è strettamente influenzata dalle temperature di processo, tanto da poter essere classificati in psicrofili, mesofili e termofili (tab. 1.2).

Durante il compostaggio, al variare della temperatura di processo, variano le popolazioni microbiche attive: nelle prime fasi, che comportano una rapida metabolizzazione dei composti carboniosi più semplici (monosaccaridi, lipidi e peptidi), operano inizialmente i microrganismi psicrofili e mesofili.

MICROORGANISMI	TEMPERATURA °C	
	<40	$40 < t < 70$
BATTERI		
mesofili	10^8	10^6
termofili	10^4	10^9
ATTINOMICETI		
termofili	10^4	10^8
FUNGHI		
mesofili	10^6	10^3
termofili	10^6	10^7

Tab. 1.3 - Popolazione microbica nel compostaggio [52].

Successivamente, a causa dell'innalzamento della temperatura, conseguente ad una intensa attività metabolica, si ha una forte selezione tra le popolazioni batteriche a vantaggio delle specie termofile, il cui campo di lavoro ottimale è indicabile nel campo 50-60°C [22, 73, 74, 104, 128].

Se si sale oltre gli 80-90°C si verifica la morte della maggior parte dei microrganismi ad eccezione di alcune specie batteriche ultra-termofile, che si trovano nella matrice organica sotto forma di spore (strutture di resistenza al calore). A tali condizioni corrisponde, comunque, una progressiva diminuzione dell'attività microbica, fino all'arresto della stessa [9, 71, 73, 74].

Il conseguente raffreddamento porta alla riattivazione dei microrganismi sporigeni,

a partire da quelli termofili, per passare poi a quelli mesofili e psicrofili in ordine cronologico [52, 74].

Tra i diversi microrganismi operanti nei processi di compostaggio appare indispensabile attuare una distinzione tra:

MICRORGANISMI AEROBI
MICRORGANISMI ANAEROBI

I *microrganismi aerobi* necessitano di ossigeno per il loro metabolismo; i *microrganismi anaerobi* sono attivi in ambienti privi di ossigeno.

Il compostaggio è, per definizione, un processo aerobico; dovrebbe, quindi, essere caratterizzato dalla presenza di soli microrganismi aerobi. Anche in condizioni ottimizzate, tuttavia, nei cumuli operano anche popolazioni anaerobie, che producono composti gassosi come metano, acido butirrico ed altri acidi grassi dal caratteristico odore sgradevole. L'importante è che queste attività siano di entità controllata, dato che con il prevalere di processi anaerobi si avrà una produzione di compost di non elevata qualità [35, 101, 112, 118, 131].

Una ulteriore classificazione dei microrganismi che operano nel processo di compostaggio può essere fatta in ordine alla loro funzione biochimica (tab.1.4).

CICLO DEL CARBONIO	MICRORGANISMI ATTIVI
funzione: amidolitica	batteri, attinomiceti, funghi
pectinolitica	batteri, attinomiceti, funghi
emicellulosolitica	batteri, attinomiceti, funghi
cellulosolitica	attinomiceti, funghi
ligninolitica	funghi, attinomiceti
chitinolitica	attinomiceti, funghi
CICLO DELL'AZOTO	
funzione: fissazione azoto libero	batteri
proteolitica	batteri
ammonificante	batteri
nitrificante	batteri
denitrificante	batteri
CICLO DELLO ZOLFO	
funzione: mineralizzazione zolfo	batteri

Tab. 1.4 - Microrganismi attivi nelle diverse trasformazioni dei cicli del carbonio dell'azoto e dello zolfo [78].

I BATTERI

I batteri sono i più piccoli organismi viventi conosciuti: sono prevalentemente unicellulari (cocchi, bacilli, vibrioni, spirilli), ma si hanno anche associazioni pluricellulari (diplococchi, streptococchi, stafilococchi, streptobacilli, sarcina).

Sono sempre presenti nelle biomasse e largamente dominanti per entità e tipo di attività. Sono presenti in almeno 1.000 specie diverse e sono suscettibili di forte crescita in ambiente ad elevata umidità e soprattutto in presenza di materiale di facile biodegradabilità. Hanno un largo spettro di attività e capacità di operare in un ampio intervallo di pH, mal adattandosi, tuttavia, a pH acidi [9, 22, 53, 73, 74, 88, 128].

Oltre che per l'ambiente di lavoro, che porta alla distinzione di batteri aerobi e anaerobi, si può fare una distinzione dei batteri tra:

BATTERI ETEROTROFI
BATTERI AUTOTROFI

I primi, che nel compostaggio sono nettamente prevalenti, utilizzano esclusivamente come fonte di carbonio quello organico e possono utilizzare anche l'azoto organico; i secondi utilizzano come fonte di carbonio quello minerale (anidride carbonica e carbonati) e come fonti di azoto l'ammoniaca, i nitriti, i nitrati e l'azoto gassoso.

BATTERI	FAMIGLIA	GENERE
Pseudomonadales		Pseudomonas, Nitrosomonas, Nitrobacter Thiobacillus, Vibrio, Acetobacter (tutti Gram -)
Hypomicrobiales		Hypomicrobium (fanghi impianti depurazione)
Eubacterales	Azotobacteriacees	Azotobacter, Beijerinchi (fissatori liberi di azoto atmosferico)
Organoheterotrophes	Rhizobacteriacees	Rhizobium
Enterobacteriacees	Achromobacteriacees	Achromobacter, Flavobacterium Escherichia (colibacillum), Proteus, Aerobacter, Serratia (degradano la sostanza organica)
Lactobacillacees		Streptococcus, Lactobacillus, Staphylococcus (degradano gli zuccheri)
	Corinebacteriacees	Corynebacterium, Arthrobacter (debole potere fermentativo)
	Bacillacees	Bacillus (aerobio), Clostridium (anaerobio) (alcuni sono fissatori dell'azoto atmosferico)

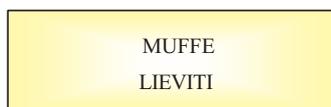
Tab. 1.5 - Classificazione dei batteri coinvolti nel processo di compostaggio [78].

I FUNGHI

I funghi sono presenti pressoché ovunque in natura e, in particolare, sono agenti della decomposizione della materia organica nel terreno, soprattutto in condizioni di acidità. Metabolicamente sono assimilabili ai batteri eterotrofi: usano, infatti, per lo più gli stessi substrati, trovandosi perciò spesso in competizione con questi e possono dissolvere il substrato solido tramite secrezione di enzimi idrolitici extracellulari.

Diversamente dai batteri, i funghi possono vivere anche in ambienti con bassa umidità e possono crescere su substrati secchi, sfruttando l'umidità dell'atmosfera. I funghi sono favoriti rispetto ai batteri da rapporti C/N alti, vivono in un ampio *range* di pH, potendo operare tra $2 < \text{pH} < 9$, ed hanno spesso più basse richieste di azoto dei batteri [22, 73, 74, 88, 125].

I funghi possono essere distinti in:



Le muffe hanno un metabolismo aerobico e tendono a formare strutture filamentose. Svolgono un ruolo importante nelle fasi finali del processo, con l'ossidazione dei materiali ricchi di lignina [125]. I lieviti, tendenzialmente unicellulari, hanno metabolismo aerobico ed anaerobico e svolgono un ruolo importante nei fenomeni di umificazione.



Fig. 1.1 - *Coprinus* su cumulo di compost di deiezioni cunicole.

FAMIGLIA		GENERE
Siphomycetes	Myxomycetes	Mixococcus
	Myxomycetales, Acrasiales	(substrati in decomposizione)
Eumycetes (Septomycetes)	Zygomycetes	Mucor, Rizhopus (muffe presenti in tutti i substrati prima del compostaggio: decompongono amidi, cellulosa)
Ascomycetes	Protoacomycetes	Candida, Torula, Lipomyces, Cryptococcus (lieviti sporigeni, utili nell'umificazione)
	Euascomycetes	Penicillum, Aspergillum, Sclerotinia, Bothritys, Fusarium (muffe, 30.000 specie,)
Basidiomycetes		Coprinus (fungo sul compost)

Tab. 1.6 - Sommara classificazione dei funghi coinvolti nel processo di compostaggio [78].

GLI ATTINOMICETI

Gli attinomiceti presenti nel processo di compostaggio sono aerobi e termofili. Sono assimilabili ai funghi (per la formazione di ife) e ai batteri. Se le condizioni ambientali sono sfavorevoli, come strategia di sopravvivenza, non si osserva riproduzione sessuale ma produzione di endospore. Sono microrganismi eterotrofi: per l'azoto usano prevalentemente quello organico (alcuni Mycobacterium sono in grado di fissare l'azoto gassoso); come sorgente di carbonio usano quella della sostanza organica ed in particolare la cellulosa e la lignina. Come fonte di energia utilizzano quella sprigionata dalla rottura dei legami biochimici.

FAMIGLIA	GENERE
Mycobacteriacees	Mycobacterium (M. Tuberculose patogeno)
Actinomycetacees	Nocardia, Pseudonocardia
Streptomycetacees	Streptomyces (la famiglia più diffusa nel suolo) Micromonospora (nel letame), Thermonospora, Thermopolyspora, Thermoactinomyces (termofili)

Tab. 1.7 - Classificazione degli attinomiceti coinvolti nel processo di compostaggio [78].



Fig.1.2 - Attinomiceti su un cumulo in compostaggio.

La maggior parte di essi vive nel terreno, cui conferisce il tipico odore di terra. Gli attinomiceti attaccano la sostanza organica non degradata da batteri e funghi, come ad esempio la chitina; sono neutrofilo, ma sopportano pH leggermente basici. Operano nella fase finale del processo in condizioni di lavoro difficili per funghi e batteri e divengono visibili nei cumuli statici sotto forma di polvere o filamenti di colore dal bianco grigio al verde chiaro. Se il compost è rivoltato meccanicamente, tali ampie colonie non sono visibili o, comunque, estremamente limitate [22, 69, 73, 74, 82, 125].

ALTRI AGENTI

Le Alghe

Sono organismi clorofilliani che si sviluppano in superficie, non oltre uno spessore di 0,1 m di prodotto. Vivono su substrati umidi con pH attorno alla neutralità o leggermente alcalino. In assenza di luce possono diventare organismi eterotrofi.

Le cianofite

Chiamate alghe blu-verdi, pur non essendo alghe, sono microrganismi procarioti simili ai batteri: sono fissatrici di azoto atmosferico e sono aerobie.

I protozoi

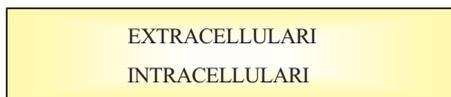
Sono organismi unicellulari mobili per la maggior parte saprofiti o predatori di batteri (alcune decine di migliaia nella vita) ed anche di altri microrganismi. Richiedono un ambiente umido.

Il loro ruolo nel compostaggio non è ben definito.

Gli enzimi

La trasformazione della sostanza organica ad opera dei microrganismi è garantita dagli enzimi, proteine speciali aventi il ruolo di catalizzatori di tutte le reazioni biochimiche.

Gli enzimi possono essere classificati in:



Gli enzimi sono prodotti dai microrganismi in attività; quelli extracellulari servono per idrolizzare le molecole che, per le loro dimensioni, non riescono ad entrare nelle cellule attraverso la membrana cellulare; quelli intracellulari operano all'interno delle cellule e servono per la demolizione delle molecole più piccole.

La microfauna del compost

Gli organismi fino ad ora menzionati rientrano nella cosiddetta categoria dei *consumatori primari*, che si cibano di sostanza organica in decomposizione.

A questa categoria appartengono anche nematodi, lombrichi, alcune specie di acari e millepiedi: il loro ruolo nel processo di compostaggio è quello di contribuire alla disgregazione fisica della matrice organica e di favorire l'azione dei microrganismi creando tunnel - soprattutto lombrichi e nematodi - che aumentano la porosità del compost e migliorano l'aerazione; producono, inoltre, escrementi ricchi di composti organici utili al processo.

La microfauna del compost è costituita anche dai *consumatori secondari e terziari* che svolgono essenzialmente il ruolo di predatori: fra di essi si possono citare aracnidi, miriapodi (centopiedi) ed insetti (collemboli, staphilinidae).

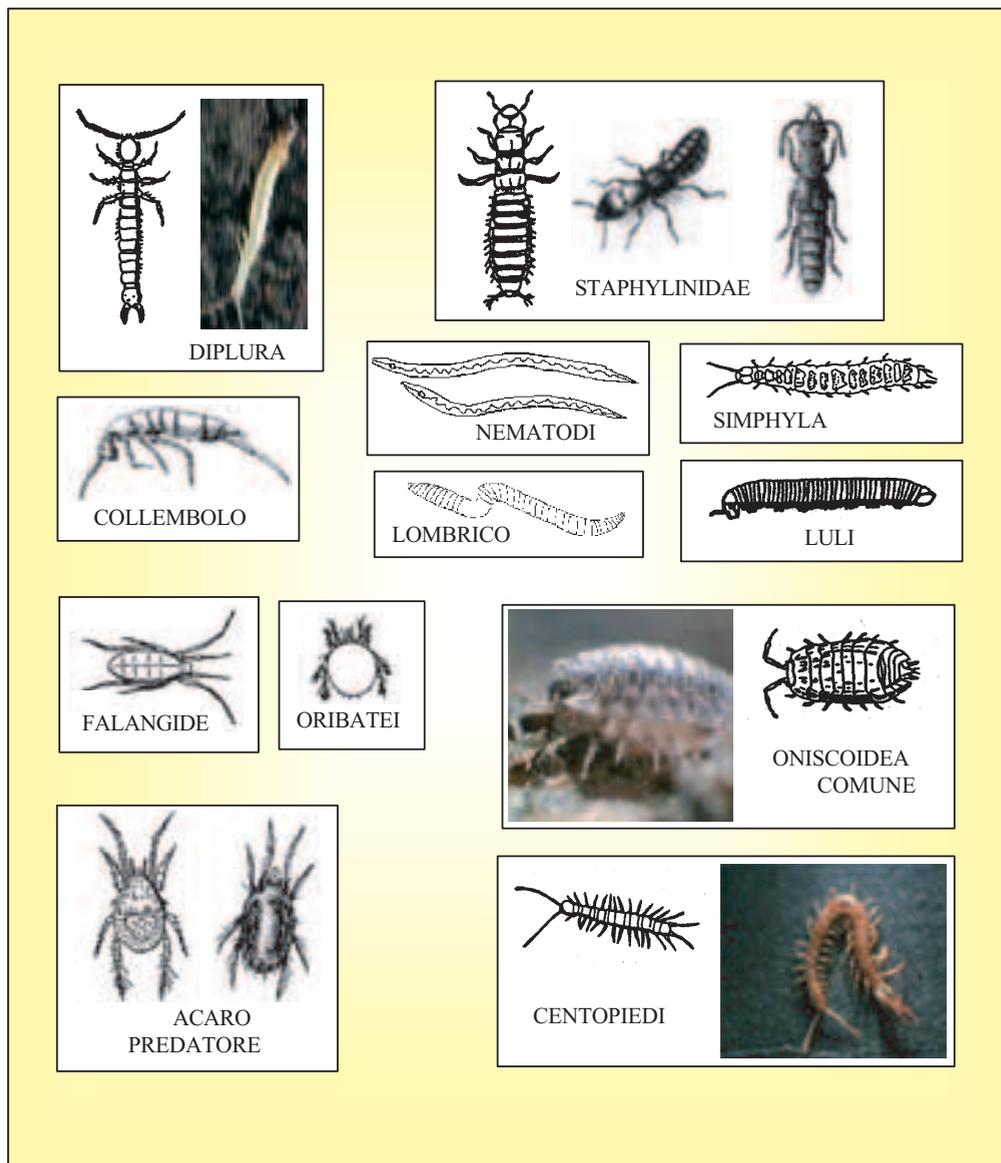


Fig. 1.3 - Alcuni degli organismi costituenti la microfauna del processo di compostaggio [AA vari].

4. LE FASI DEL PROCESSO DI COMPOSTAGGIO

Le trasformazioni che subisce la sostanza organica nel processo di compostaggio possono essere ricondotte a due fasi successive:

1. decomposizione o destrutturazione,
2. maturazione.

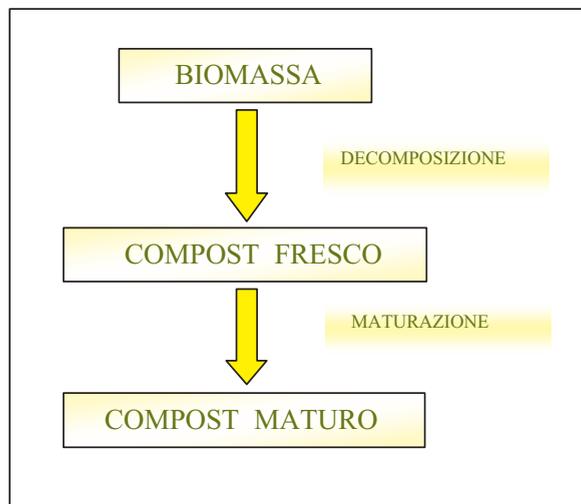


Fig. 1.4 - Fasi del processo di compostaggio.

La prima fase del processo termina con il declino delle fermentazioni termofile ed ha una durata limitata nel tempo; la seconda fase del processo, indicata come fase di maturazione, è caratterizzata da un processo mesofilo prolungato [1, 52, 73; 74; 103, 109; 125].

L'obiettivo principale del processo di compostaggio è quello di ottenere un prodotto stabilizzato, intendendo con questo termine sia il raggiungimento della maturità biologica (rallentamento delle attività biologiche sulla sostanza organica), sia la maturità agronomica (assenza di fitotossicità per le piante) [8, 45, 72, 103, 110, 113, 123, 130; 135].

In realtà anche dopo la fine del processo, cioè dopo la seconda fase, il compost non è completamente stabile, dato che i fenomeni biologici continuano, anche se con scarsi effetti sulla qualità del prodotto.

4.1. LA PRIMA FASE: DECOMPOSIZIONE DELLA SOSTANZA ORGANICA

Il processo di compostaggio inizia non appena il substrato organico viene correttamente messo in cumulo con la fase di destrutturazione della frazione organica più facilmente degradabile (zuccheri, acidi organici, amminoacidi) ad opera dei microrganismi aerobi, con consumo di ossigeno, liberazione di CO₂ e produzione di energia, necessaria a portare la temperatura del cumulo

progressivamente fino al previsto regime termofilo: ciò è ottenuto tramite la rottura dei legami chimici dei diversi composti organici.

Questa fase, prettamente termofila, è nota anche come *high rate phase* e può durare per alcune settimane e anche più di un mese: la durata è influenzata dalle caratteristiche del substrato e dalla tecnica di compostaggio adottata.

L'incremento in temperatura è assai marcato nelle 12-48 ore successive all'allestimento del cumulo e l'andamento è di rapida crescita fino a 55-60°C. Se il calore non viene adeguatamente dissipato le temperature possono aumentare portando all'inattivazione della maggior parte dei microrganismi.

La fase termofila comporta la devitalizzazione dei semi delle piante infestanti eventualmente presenti nelle matrici di partenza. [33, 73, 74, 103, 109, 125].

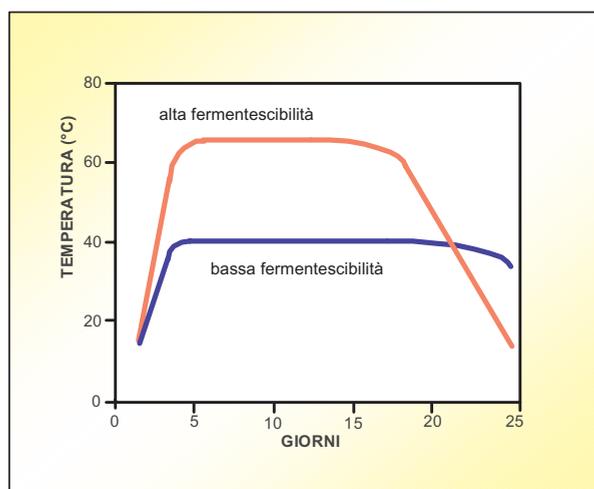


Grafico 1.1 - Andamento delle temperature nel cumulo durante il processo per una biomassa di elevata e bassa fermentescibilità.

L'aerazione forzata o il rivoltamento del cumulo sono, dunque, indispensabili per consentire il raffreddamento del substrato oltre che per mantenere l'ossigenazione della biomassa al di sopra dei valori critici per l'attività della popolazione microbica aerobia.

Durante questa fase del processo si ha la formazione temporanea di fitotossine, metaboliti naturali provenienti dalla degradazione dei materiali organici [6, 41, 74, 75, 76, 106, 109, 120, 125, 133].

Le più importanti sostanze fitotossiche sono probabilmente l'azoto ammoniacale e gli acidi grassi volatili a catena corta, come gli acidi acetico, propionico e butirrico, ma si suppone che l'insieme delle fitotossine racchiuda una più ampia gamma di composti tra cui ammine alifatiche ed aromatiche, nonché acidi

organici a struttura più complessa e fenoli. Le fitotossine vengono velocemente metabolizzate dalle popolazioni microbiche che man mano si susseguono nella massa in trasformazione.

Con il progredire del processo diminuiscono le sostanze solubili e contemporaneamente iniziano a formarsi sostanze pseudoumiche [33, 35, 61, 69, 76, 111, 118, 121, 124, 131, 133].

Le temperature elevate, le condizioni di pH e di umidità che si ingenerano nella massa in decomposizione, fanno sì che i batteri siano i microrganismi più attivi in questa fase.

Alla fine della prima fase si dispone di *compost fresco*.

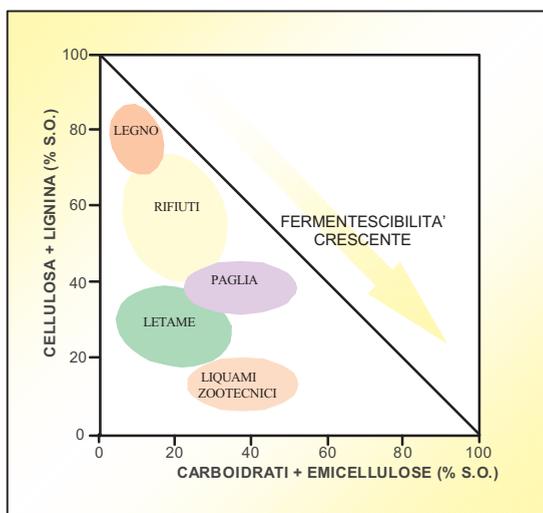


Grafico 1.2 - La qualità della sostanza organica, in termini di facilità di degradazione, influisce sull'andamento del processo: lignina e cellulosa richiedono, ovviamente, tempi di processo più lunghi [78 modificata].

4.2. LA SECONDA FASE: MATURAZIONE

Con la scomparsa dei composti più facilmente biodegradabili, metabolizzati nella prima fase del compostaggio, i processi metabolici di decomposizione interessano le molecole organiche più complesse e si attuano con processi più lenti, anche a seguito della morte di una buona parte della popolazione microbica per carenza di nutrimento.

Con il conseguente progressivo abbassamento della temperatura cambiano anche le popolazioni di microrganismi attivi, con passaggio da quelle termofile a quelle mesofile prima e psicrofile successivamente.

In questa fase, infatti, le temperature scendono a valori di 40-45°C per poi scendere progressivamente, stabilizzandosi poco al di sopra della temperatura ambiente.

Questa fase può durare anche alcuni mesi [73, 74, 103, 109, 125, 135].

Già nella fase mesofila appaiono gli attinomiceti: essi degradano attivamente amido, cellulosa e lignina, composti indispensabili per la sintesi delle sostanze umiche. L'intervento degli attinomiceti è fondamentale per l'umificazione: la loro presenza è facilmente rilevabile per la produzione di composti aromatici, come la geosmina, che conferiscono al prodotto finale il tipico odore di terriccio di bosco [22, 69, 73, 74, 82, 125].

Si ha anche una intensa colonizzazione del materiale da parte di animali di piccole dimensioni (ad esempio collemboli, acari e millepiedi) che contribuiscono in modo considerevole allo sminuzzamento e al rimescolamento dei composti organici e minerali. [73, 74].

Le sostanze umiche hanno origine dalla trasformazione chimica e biologica di residui animali e vegetali e dalle attività di sintesi dei microrganismi: i composti formati tendono ad associarsi in complesse strutture chimiche stabili. L'umificazione è dovuta soprattutto alla polimerizzazione ossidativa degli acidi fenolici e dei fenoli ottenuti dal catabolismo della lignina, dei tannini e dei polifenoli, oppure per neosintesi microbica [73, 74, 103, 109].

Per quanto concerne la morfologia del prodotto è simile a quella di un buon terreno: la pezzatura del prodotto è ridotta rispetto a quella di partenza, ma può presentare aggregazione glomerulare.

Alla fine della seconda fase, denominata anche *curing phase*, si dispone di *compost maturo*, cioè stabilizzato.

5. PARAMETRI E INDICI DI EVOLUZIONE DEL PROCESSO

I microrganismi hanno un ruolo fondamentale nella decomposizione della sostanza organica e vi è una relazione diretta tra la loro attività e l'evoluzione del processo di compostaggio. L'andamento e la velocità del processo sono, cioè, strettamente dipendenti dai fattori che influenzano le condizioni ottimali per la vita dei microrganismi operanti nelle diverse fasi del processo.

Parametri quali ossigeno, umidità e temperatura sono normalmente controllati per verificare il corretto andamento del processo, ma esistono altri parametri che influenzano le condizioni di vita dei microrganismi ed in particolare:

1. la porosità del substrato;
2. l'umidità del materiale;
3. la presenza di ossigeno;
4. la temperatura;
5. il rapporto C/N e la disponibilità dei nutrienti;
6. il pH;
7. la presenza di sostanze inibenti i processi di trasformazione.

Appare evidente, quindi, che l'evoluzione di un processo di compostaggio dipende non solo da una corretta composizione della biomassa organica, ma anche dal mantenimento delle condizioni di processo ottimali. Un corretto monitoraggio dei cumuli, soprattutto nelle fasi di avvio, è indispensabile per la rilevazione di eventuali anomalie di processo.

5.1. LA POROSITA' DEL SUBSTRATO

Si definisce *porosità totale del cumulo*, o *spazio lacunare*, il rapporto (espresso in percentuale) tra il volume occupato dagli spazi vuoti all'interno della biomassa e quello occupato dalla biomassa stessa. I vuoti sono occupati in parte da aria ed in parte da acqua: la *porosità libera*, che in bibliografia viene anche indicata con il termine F.A.S. = *free air space*, indica la percentuale di volume occupata dall'aria.

<p>Porosità totale $(V_v) / V_t$</p> <p>Porosità libera $(V_v - V_a) / V_t$</p> <p>ove: V_v = volume spazi vuoti V_a = volume occupato da acqua V_t = volume totale</p>

Questo parametro è di grande importanza, in quanto influenza la possibilità, o meno, di mantenere nella massa in compostaggio la quantità di ossigeno necessaria al processo.

Nel compostaggio si è, dunque, in presenza di un sistema a tre variabili: acqua, aria e materiale organico. In condizioni ottimali lo spazio lacunare si attesta su valori compresi tra il 35 e il 50% [1, 40, 44, 56, 74, 77, 109].

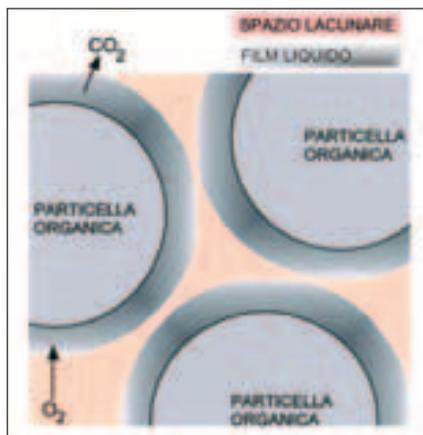


Fig. 1.5 - Schema del sistema trifasico nel compostaggio: aria, acqua e particelle solide [elaborazione 78].

La porosità libera della massa è strettamente dipendente da:

- dimensioni granulometriche del materiale da compostare,
- contenuto di umidità,
- spessore dello strato di materiale (altezza del cumulo).

Più le particelle sono fini e a minor contenuto di sostanza secca, più elevata risulta la compattabilità del cumulo e minore la sua porosità; a parità degli altri fattori, poi, ad una maggior altezza del cumulo corrisponde una minore porosità del materiale, soprattutto negli strati più vicini alla base.

La pezzatura ottimale del materiale risulta dell'ordine di 25-75 mm. Nel caso in cui la matrice compostabile abbia dimensioni inferiori (erba, foglie, deiezioni zootecniche) sarà necessario utilizzare dei materiali strutturanti (corteccia, cippato ecc.) [44, 56, 74, 109]. Ad elevati livelli di umidità della massa lo spazio lacunare può venire occupato in prevalenza dall'acqua, creando difficoltà di ossigenazione e conseguenti condizioni anaerobiche. [42, 44, 56].

Durante il processo la porosità della massa dovrebbe teoricamente diminuire, perché a seguito della decomposizione del prodotto e dell'assestamento del cumulo la granulometria del prodotto si riduce. In realtà, considerato che l'umidità del prodotto tende a decrescere con il procedere del processo, la porosità libera tende a restare costante, potendo anche aumentare.

MATERIALE ORGANICO	MASSA VOLUMICA (t/m ³)
RESIDUI VERDI	
Rifiuti lignocellulosici derivanti dalla manutenzione del verde ornamentale	0,30-0,50
Scarti di legno non impregnato	0,40-0,50
Segatura, trucioli, frammenti di legno, di sughero	0,40-0,60
FORSU	
Fanghi di depurazione a da digestione anaerobica	0,70-0,80
Fanghi di depurazione civili e alimentari	0,85-0,95
Fibra e fanghi di carta	0,75-0,85
SCARTI E DEIEZIONI ANIMALI	
Rifiuti tessili di origine animale, cascami e scarti	0,65-0,75
Deiezioni animali da sole o in miscela con materiale di lettiera	0,65-0,75
Contenuto di prestomaci	0,60-0,70
RIFIUTI VEGETALI E ALTRI	
Rifiuti tessili di origine vegetale, cascami e scarti	0,65-0,75
Rifiuti vegetali di coltivazioni agricole	0,50-0,60
Rifiuti vegetali derivanti da attività agroindustriali	0,60-0,70
Carta e cartone	0,60-0,70

Tab. 1.8 Massa volumica di diversi materiali compostabili [dati ARPAV].

Esiste una elevata correlazione tra gli spazi lacunari e la massa volumica del materiale in cumulo, anche se l'umidità del prodotto e l'altezza del cumulo influiscono in entità rilevante sulla compattazione della biomassa e conseguentemente sulla massa volumica stessa [42, 44, 56]. Questa può quindi variare dai valori minimi di 0,35 t/m³ per i materiali più grossolani, come la paglia, a massimi di 0,90 t/m³ per i fanghi. Per ottenere una matrice compostabile dalle ottimali caratteristiche di massa volumica, indicativamente di 0,60 t/m³, risulta di massima importanza la miscelazione di diversi materiali.

5.2. L'UMIDITÀ DEL SUBSTRATO

L'acqua è un elemento fondamentale per la vita della maggior parte dei microrganismi attivi nel processo di compostaggio, perché:

- è indispensabile per il verificarsi degli scambi nutritivi attraverso le membrane cellulari;

- è il veicolo per gli enzimi extracellulari;
- è il veicolo per i substrati solubili;
- è il mezzo in cui avvengono le reazioni chimiche.

I valori di umidità ottimali del materiale sono compresi tra il 65 e il 40%: con valori inferiori al 40% si ha un notevole rallentamento dell'attività biologica, che si ferma raggiunto il limite del 25-30%.

UMIDITA' OTTIMALE
50 – 60%

Con una umidità superiore al 65%, per contro, la diffusione dell'ossigeno nella massa risulta difficoltosa, potendo portare anche all'instaurarsi di condizioni anossiche [56, 105, 129, 137].

MATERIALE ORGANICO	UMIDITA' (% T.Q.)
FORSU	70-80
Fanghi di depurazione	70-80
Letame bovino	75-80
Deiezioni galline ovaiole	50-80 ⁽¹⁾
Solidi separati da liquami zootecnici	70-80
Lettiere avicole	40-60
Cortece conifere	70-75
Paglia, di cereali	15-20
Stocchi di mais	25-35
Sanse di oleificio	35-65 ⁽²⁾

⁽¹⁾ vecchi impianti, nuovi impianti a batterie sovrapposte
⁽²⁾ impianti a pressa e impianti a centrifuga

Tab. 1.9 - Umidità di diverse matrici organiche

È possibile, comunque, sottoporre a compostaggio anche materiali dotati di umidità prossima all'80% (fanghi di impianti di depurazione, erba, letami zootecnici): in tal caso si devono operare opportune miscele del prodotto con materiali ad alto contenuto di sostanza secca, come segatura e cortece, o materiali fibrosi, quali paglia, foglie secche, in modo che l'umidità media della massa non superi il 65% [136].

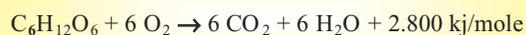
Il processo del compostaggio determina una naturale diminuzione di umidità nel

tempo per effetto dell'evaporazione, facilitata dal ricambio dell'aria nella massa [63, 79, 117, 120, 137]. Una eccessiva diminuzione comporta, però, il blocco del processo: il materiale è apparentemente stabile ma i fenomeni biologici riprendono nel caso di una sua reidratazione.

Appare quindi fondamentale garantire che i valori di questo parametro rientrino nel *range* ottimale, obiettivo che nella fase iniziale viene raggiunto miscelando correttamente le matrici da compostare, e durante il processo ricorrendo all'umidificazione del prodotto utilizzando diversi sistemi di lavaggio.

5.3. LA PRESENZA DI OSSIGENO

In condizioni aerobiche la degradazione di un substrato ricco di carbonio determina un forte consumo di ossigeno, con produzione di anidride carbonica, acqua e calore, come indicato di seguito a titolo di esempio per i carboidrati:



Ciò considerato, nel processo di compostaggio si ha una continua diminuzione dell'ossigeno a disposizione dei microrganismi: è necessario, dunque, reintegrarlo nella massa nella quantità necessaria per un regolare andamento del processo [54, 73, 74, 76, 109].

I microrganismi aerobi usano approssimativamente 1,6 kg di ossigeno per elaborare 1,0 kg di materia organica. Tale richiesta di ossigeno deve essere soddisfatta dall'O₂ introdotto nei cumuli.

La maggiore necessità di apporto di O₂ si ha all'inizio del processo, quando è massima l'attività di demolizione della sostanza organica da parte dei microrganismi: in questa fase la disponibilità di ossigeno negli spazi lacunari deve mantenersi nel campo 5 - 15% in volume [62]. In tali condizioni non si raggiungono le condizioni di anaerobiosi ma neppure quelle della completa demolizione della sostanza organica tipica dei fenomeni di combustione.

	(% in volume)
PRIMA FASE	5 - 15
SECONDA FASE	1 - 5

Tab. 1.10 - Necessità di O₂ nelle diverse fasi del processo di compostaggio

Si deve ricordare, infatti, che il processo non deve portare ad una totale mineralizzazione della sostanza organica (combustione), ma ad una sua stabilizzazione ed umificazione [49].

La fase di maturazione-umificazione richiede un minor livello di ossigenazione, con O_2 compreso tra l'1% ed il 5%, per cui sono sufficienti limitati interventi di ossigenazione.

L'ossigenazione della massa viene attuata con tecniche di introduzione di aria nei cumuli (ventilazione forzata in compressione e depressione) o con tecniche di rivoltamento. Con questi interventi oltre che garantire il necessario apporto di ossigeno alla massa, si favorisce l'eliminazione del calore in eccesso, l'eliminazione del vapore acqueo e dei gas formati negli spazi lacunari [54, 62, 76, 120].

L'eventuale presenza di idrogeno solforato e metano nell'aria in uscita dal cumulo indica fenomeni anaerobici, conseguenti a deficit di ossigeno.

L'aria necessaria per il processo viene indicata tra i 10 e 100 Nm^3/h per tonnellata di materiale organico, variando a seconda delle caratteristiche del materiale organico. Il mantenimento della corretta concentrazione di ossigeno nella massa in compostaggio viene garantito variando la portata dell'aria introdotta e/o variando la frequenza dei rivoltamenti meccanici.

5.4. LA TEMPERATURA DI PROCESSO

La temperatura della massa in compostaggio è il parametro che meglio indica l'andamento del processo ed è anche quello di più facile monitoraggio [10, 56, 91]. Oltre che per una corretta trasformazione della sostanza organica da parte dei microrganismi ai fini di renderla disponibile per gli usi agronomici, va ricordato che la fase termofila è molto importante nel processo, perché porta a:

- l'igienizzazione del prodotto, con la distruzione dei microrganismi patogeni, che si ha a temperature non inferiori ai 55°C, come evidenziato anche nella tabella 1.12;
- l'inattivazione dei semi di erbe infestanti e dei parassiti delle piante, che si ha a non meno di 60°C. [32, 33, 65, 73, 74, 75, 81, 91, 103, 109, 119, 128].

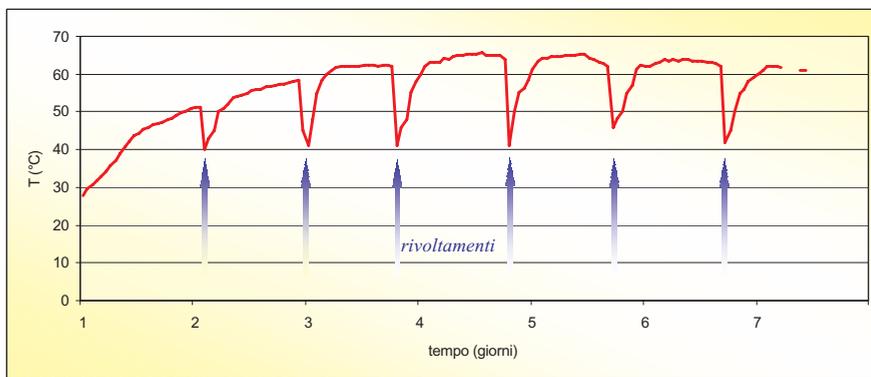


Grafico 1.3. Andamento della temperatura in un cumulo rivoltato [elaborazione12].

Nella fase termofila, va evitato un innalzamento della temperatura oltre i 70°C, perché ciò comporta un'alta mortalità microbica, visto che sono pochi i ceppi batterici in grado di sopravvivere a tali condizioni: ciò comprometterebbe l'efficienza del processo.

Per tal ragione, per non superare gli ottimali livelli di temperatura di 55-60°C, è necessario intervenire con il rivoltamento della massa o con una appropriata ventilazione forzata del cumulo [10, 34, 42, 75, 99, 101, 102, 104, 120].

Attraverso il monitoraggio della temperatura del cumulo è possibile anche valutare il livello di ossigenazione della massa: l'abbassamento di temperatura va messo in prima istanza in relazione alla carenza di ossigeno [56, 74, 76, 101]. Il controllo di questo parametro viene attuato essenzialmente mediante il rivoltamento meccanico che determina, come immediato effetto, il raffreddamento della massa. Il ripristino delle condizioni aerobiche determina, a sua volta, l'aumento delle attività esotermiche: la temperatura riprende, dunque, ad aumentare (vedi grafico 1.3).

POTERE CALORICO	
GLUCOSIO	19 kJ/grammo
LIPIDI	39 kJ/grammo
PROTEINE	23 kJ/grammo

Tab. 1.11 - Valore energetico di diverse sostanze.

PATOGENO	CONDIZIONI PER LA DISTRUZIONE
Salmonella typhosa	30 minuti a 55°C, 20 minuti a 60°C
Salmonella sp .	un'ora a 55°C, 15-20 minuti a 60°C
75gella sp.	un'ora a 55°C
Escherichia coli	un'ora a 55°C e 15-20 minuti a 60°C
Entamoeba histolytica (cisti)	pochi minuti a 45°C, qualche secondo a 55°C
Taenia satinata	qualche minuto a 55°C
Trichinella spiralis (larvae)	rapida a 55°C, istantanea a 60°C
Brucella abortus e suis	un'ora a 55°C, 3 minuti a 62°C
Mycobacterium tuberculosis var. hominis	15-20 minuti a 65°C qualche minuto a 67°C
Micrococcus piogenes v. aereus	10 minuti a 50°
Corynebacter diphteriae	45 minuti a 55°C
Necator americanus	50 minuti a 45°C

Tab. 1.12 - Effetto della temperatura sulla devitalizzazione dei patogeni [78].

La maggiore o minore rapidità con cui si raggiungono temperature elevate all'inizio del processo dipende dalle caratteristiche del materiale di partenza: tanto più questo è di facile biodegradabilità, tanto più velocemente si arriva ai regimi termofili (vedi grafico 1.1).

Va ricordato che la produzione di calore varia al variare del materiale degradato, come indicato nella tab. 1.11.

Una bassa fermentescibilità è tipica degli scarti lignocellulosici, che mostrano anche una limitata capacità di degradazione [125].

Valori di temperatura dell'ordine dei 35-45°C si hanno nella seconda fase del processo; livelli di temperatura di poco dissimili da quella ambientale indicano, di norma, la fine del processo [121].

5.5. IL RAPPORTO CARBONIO/AZOTO E ALTRI NUTRIENTI

Carbonio, azoto, fosforo e potassio sono naturalmente contenuti nella maggior parte delle matrici compostabili. La loro presenza è fondamentale per il processo, in quanto non sono solo unità strutturali, ma anche fonti di energia per i microrganismi.

In particolare è assai importante avere un equilibrato rapporto tra carbonio e azoto: la carenza di uno dei due elementi (ma anche di altri nutrienti) è un fattore limitante per l'attività microbica, nonché per il suo sviluppo. Infatti, i microrganismi eterotrofi utilizzano il carbonio come fonte di energia e hanno bisogno dell'azoto per sintetizzare le proteine [52, 73, 74, 103, 122].

L'azoto viene ottenuto per scissione delle proteine in peptidi ed aminoacidi liberi; questi possono essere soggetti ad una assimilazione diretta o ad un'ulteriore scissione con produzione di ammoniaca. Questa può tornare a far parte di composti organici se utilizzata dai microrganismi; può essere persa tramite volatilizzazione oppure trasformata in nitrato [34, 51, 60, 120, 122].

Durante le diverse fasi del processo le popolazioni microbiche utilizzano un terzo del carbonio combinandolo con l'azoto per formare il protoplasma cellulare; la parte restante è ossidata ad anidride carbonica.

C/N OTTIMALE	
INIZIALE	25-35
FINALE	< 20

Considerando che in genere vengono utilizzati trenta atomi di carbonio per ogni atomo di azoto, si deduce che il rapporto ottimale C/N all'inizio del compostaggio dovrebbe attestarsi su un valore di 30 [20, 60, 107, 133].

In condizioni di eccesso di carbonio ($C/N > 30$) si ha un rallentamento della decomposizione, con allungamento della durata del processo.

Per contro con un valore di $C/N < 20$, si verifica la liberazione dell'eccesso di azoto sotto forma di NH_3 . La liberazione di ammoniaca in atmosfera è particolarmente elevata in presenza di un elevato tenore di azoto e alti valori di temperatura e pH [11, 34, 51, 57, 64, 90, 107, 122].

Qualora si sia in presenza di biomasse con C/N 5-15 è opportuna, quindi, una loro miscelazione con residui lignocellulosici (C/N 100-300): in tal modo si giunge ad un bilanciamento del rapporto garantendo le condizioni ottimali per il processo [34, 51, 107].

E', tuttavia, necessario ricordare che l'aggiunta di materiali ricchi di carbonio non è per sé condizione sufficiente per riequilibrare le caratteristiche di C/N del substrato da compostare: il carbonio di materiali lignei – di lenta degradabilità – è di scarsa utilità.

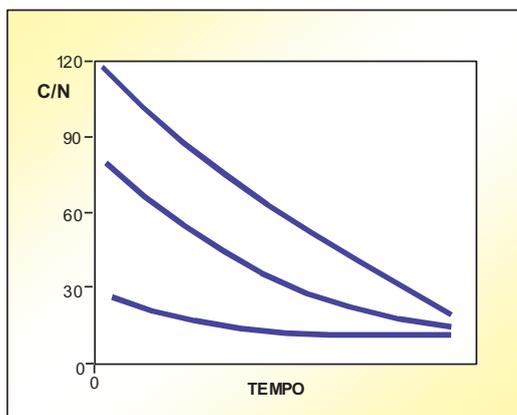


Grafico 1.4 - Andamento del rapporto C/N nel corso del processo di compostaggio.

MATERIALE ORGANICO	C/N
FOGLIE	35-85
CORTECCE CONIFERE	150
CORTECCE DI PIOPPA	80
SEGATURA E TRUCIOLO LEGNO	150
CARTA	100
PAGLIA E STOCCHI	50
RESIDUI POTATURA	30
SCARTI MERCATALI	20
SFALCI DI PRATO	20
FRAZIONE SOLIDA LIQUAMI BOVINI	30
FRAZIONE SOLIDA LIQUAMI CONIGLI	60
FRAZIONE SOLIDA LIQUAMI SUINI	10
LETAME BOVINO	25
POLLINA GALLINE OVAIOLE	8
LETTIERA POLLI CARNE	12
FANGHI URBANI	6
FANGHI AGROINDUSTRIALI	6
FORSU	12

Tab. 1.13 - Rapporto C/N di diverse matrici organiche

Il rapporto C/N diminuisce nel tempo in quanto si verifica una perdita di carbonio per emissione di CO_2 mentre l'azoto, componente delle strutture aromatiche delle sostanze umiche, tende a rimanere nella massa. Alla fine del processo di compostaggio il C/N risulta inferiore a quello di partenza: in condizioni ottimali si arriva a valori $\text{C/N} = 15 - 20$.

Con un valore troppo basso del rapporto C/N il compost può essere tossico per le piante, per il potenziale rilascio di ammoniaca; con un valore troppo alto, invece, può determinare una competizione tra radici e microrganismi del suolo per l'azoto disponibile [40, 50].

IL RAPPORTO CARBONIO/FOSFORO E ALTRI NUTRIENTI

Macroelementi come fosforo, calcio e oligoelementi, fungono da stimolanti per l'attività microbica e da catalizzatori delle diverse reazioni biochimiche [5, 53, 60]. Particolarmente importante è una adeguata presenza di fosforo nel materiale organico da compostare: il rapporto ottimale con il carbonio è indicato $100 < \text{C/P} < 200$ [89].

Il rapporto carbonio/zolfo deve restare nel campo $100 < \text{C/S} < 300$ [78].

5.6. IL pH

Il processo di compostaggio avviene con pH estremamente variabili, ma i valori ottimali per la miscela di partenza sono compresi tra 5,5 e 8,0, considerato che i batteri preferiscono un pH vicino alla neutralità e che i funghi preferiscono pH acidi [22, 34, 43, 56, 71, 101].

All'inizio del processo si ha un naturale spostamento di pH verso valori acidi a seguito della formazione di CO_2 e di acidi organici; successivamente il pH sale fino ad 8-9 a causa dell'eliminazione di CO_2 con l'aerazione ed a seguito della decomposizione delle proteine con produzione di ammoniaca (grafico 1.5) [34, 58, 90, 122, 134, 135].

Alla fine del processo si registra un pH neutro o leggermente alcalino; in molti casi risulta difficile rispettare il valore limite imposto dalla legge nazionale (pH max 8,5). In ogni caso, la correzione del pH non viene di norma attuata, né intervenendo sul prodotto iniziale, né su quello finale [39, 47, 48, 55, 68].

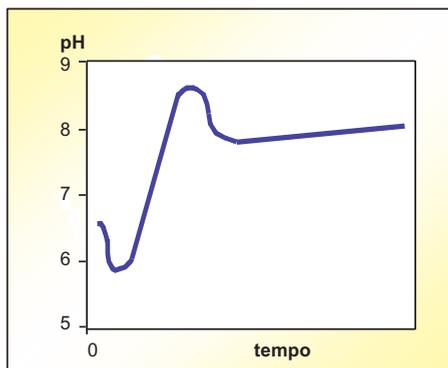


Grafico 1.5 - Andamento del pH nel corso del processo [80].

5.7. PRESENZA DI SOSTANZE INIBENTI I PROCESSI DI TRASFORMAZIONE

I processi biologici di degradazione della sostanza organica sono influenzati negativamente dalla presenza nel substrato di metalli pesanti in concentrazioni superiori a quelle compatibili con l'attività batterica. Valori troppo elevati determinano effetti tossici che nel migliore dei casi inducono soltanto l'inibizione dell'attività biologica, ma possono anche portare alla morte di tutti i ceppi batterici non resistenti.

Particolare effetto negativo viene esplicato dagli ioni cromo, in particolare dal cromo esavalente che penetra nella membrana cellulare più facilmente del trivalente ed interferisce con le funzioni cellulari [92].

5.8 GLI INDICI DI STABILITA'

Appare di notevole rilevanza la necessità di ricorrere ad indici che permettano di valutare la stabilità biologica del materiale compostato. I parametri principalmente utilizzati a questo scopo sono:

- l'indice di germinazione
- l'indice di mineralizzazione dell'azoto
- l'indice di respirazione
- l'indice di umificazione

Con il termine di stabilità biologica si intende quello stadio di evoluzione della sostanza organica in cui i processi risultano decisamente rallentati, perché non esistono più le condizioni per una normale attività dei microrganismi responsabili dei processi di trasformazione biologica delle biomasse [50, 56, 97, 129].

INDICE DI GERMINAZIONE

Prevede la valutazione della germinazione e l'accrescimento radicale di semi di *Lepidium sativum* in presenza dell'estratto acquoso del compost da saggiare. Si ricava dalla media dei semi germinati, per la lunghezza radicale in percento rispetto a un testimone in acqua. Il saggio consente di valutare la presenza di sostanze fitotossiche che è correlata negativamente con la maturità del compost. Le sostanze fitotossiche sono rappresentate prevalentemente da composti labili prodotti di trasformazioni intermedie (acido acetico, acidi grassi volatili, fenoli, ecc.) legati anche all'andamento del processo di compostaggio (condizioni di anaerobiosi). Con la maturazione della matrice i prodotti intermedi subiscono processi di mineralizzazione e complessazione evolvendo verso composti più stabili e meno fitotossici, così un compost con indice di germinazione superiore al 60%, alla diluizione del 30 %, è considerato non fitotossico.

L'indice è comunque basso per compost con elevata salinità.

INDICE DI MINERALIZZAZIONE DELL'AZOTO

Consiste nella valutazione della biodegradabilità dell'azoto organico presente nel compost. Durante il compostaggio le frazioni azotate facilmente biodegradabili evolvono verso azoto minerale e sostanze organiche azotate più stabili di conseguenza la loro biodegradabilità diminuisce. Il saggio di mineralizzazione prevede la determinazione dell'azoto minerale prodotto durante un tempo di incubazione di 10 giorni espresso come percentuale dell'azoto organico totale iniziale. L'indice del materiale avviato al compostaggio nelle prime fasi ha valori massimi o in aumento, per poi decrescere progressivamente con l'evolversi del processo. Si ritiene stabile un compost con indice di mineralizzazione dell'azoto inferiore a 3.5 %.

INDICE DI RESPIRAZIONE

L'indice di respirazione rappresenta la stima del consumo di ossigeno di un substrato organico. Tale parametro è inversamente correlato con la stabilità biologica del materiale: più alto è l'indice di respirazione, meno stabile e il prodotto e viceversa.

Si determina ponendo il materiale in un recipiente chiuso a condizioni standard dove viene lasciato per un tempo variabile a seconda del metodo. Durante il procedimento la respirazione della biomassa porta al consumo di ossigeno e alla liberazione di anidride carbonica; a seconda che il metodo sia statico o dinamico si misura rispettivamente, la depressione creata dalla fissazione della anidride carbonica da parte della soda o la concentrazione di ossigeno nel recipiente. In entrambi i casi si giunge alla determinazione della quantità di ossigeno consumata per kg di sostanza volatile nell'unità di tempo di un ora.

Con materiale fresco l'indice sarà massimo per poi diminuire man mano che evolve il processo di compostaggio. La soglia che individua un compost maturo varia a seconda del metodo adottato.

Un altro parametro che dà analoghe indicazioni è il *quoziente respiratorio*, definito dal rapporto tra l'anidride carbonica prodotta e l'ossigeno consumato. Ciascun composto organico ha un suo quoziente respiratorio teorico.

MATRICE ORGANICA	QUOZIENTE RESPIRATORIO
AMIDO	1,00
PROTEINE	0,81
GRASSI	0,71

Tab. 1.14 - Valori del quoziente respiratorio per diversi prodotti [46].

Il valore medio per una ottimale matrice in compostaggio dovrebbe essere compresa tra 0,87 e 0,91 [37].

L'INDICE DI UMIFICAZIONE

Il processo di umificazione è un insieme di trasformazioni che portano ad un progressivo arricchimento in gruppi funzionali fenolici della sostanza organica.

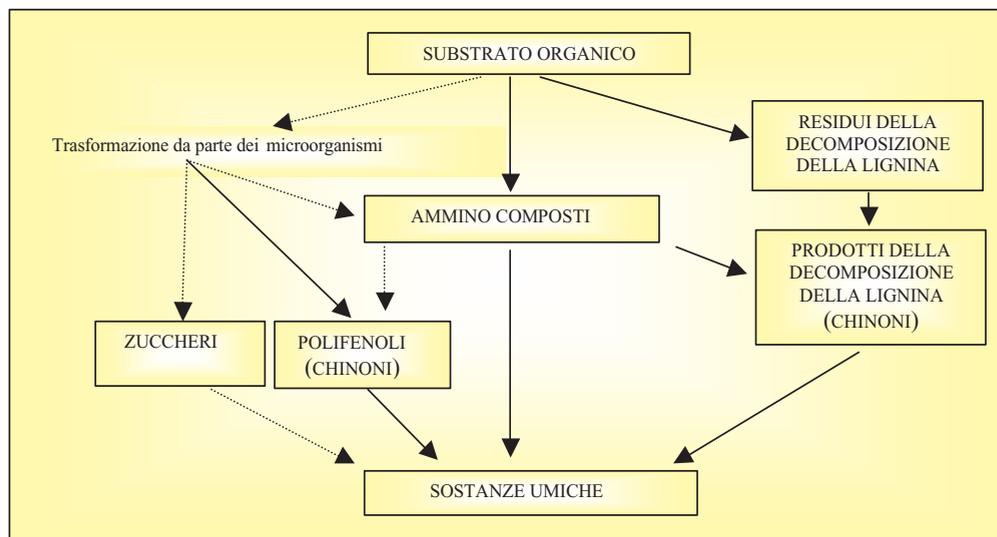


Fig. 1.6 - Diversi meccanismi di formazione delle sostanze umiche con in evidenza le vie che portano ad un progressivo aumento dei gruppi fenolici del substrato [Fonte: De Nobili M.].

Al progredire del processo di umificazione devono, quindi, corrispondere da una parte la formazione e l'accumulo di sostanze umiche (che hanno natura prevalentemente polifenolica) e, dall'altra, a causa della diminuzione del materiale che viene via via consumato anche nel contemporaneo procedere dei processi di mineralizzazione, la diminuzione della frazione estraibile della sostanza organica labile.

La valutazione del grado di stabilizzazione della sostanza organica è fondamentale per il rispetto delle normative, che fissano i requisiti minimi per il compost utilizzabile in agricoltura.

Per la determinazione dell'indice umificazione di norma viene utilizzato è il metodo Sequi et al.

$$HI = NH / (HA+FA)$$

ove:

HI = indice di umificazione

NH = frazione non umificata

HA = acidi umici

FA = acidi fulvici

HA+FA = frazione umificata

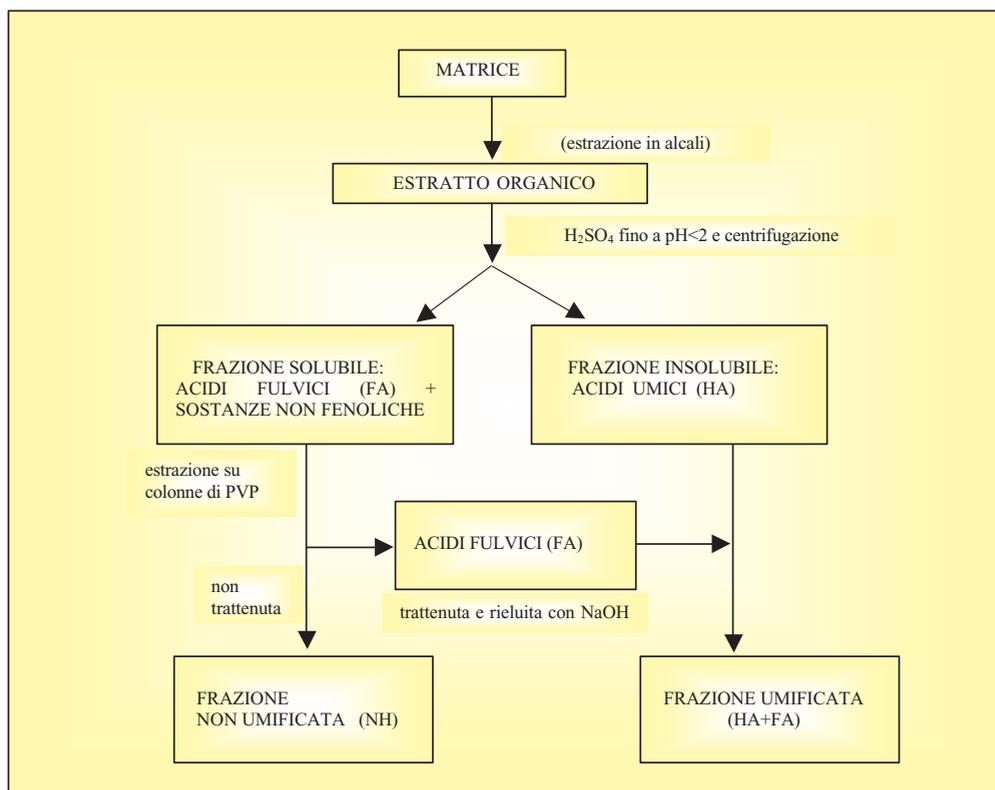


Fig. 1.7 - Schematizzazione del metodo Sequi: separazione della frazione non umificata (NH) da quella umificata (HA+FA).

Questo metodo si basa sulla possibilità di suddividere in diverse frazioni la sostanza organica e successivamente di caratterizzarle chimicamente. L'indice di umificazione (HI) assume valori tanto più piccoli quanto maggiore è la quantità di sostanze umiche presenti nell'estratto e assume in genere valori inferiori a 0,5 per substrati umificati (estratti di terreno, torbe umificate, compost maturi), o addirittura prossimi a zero per leonarditi ed estratti umici da esse derivati, mentre assume valori >1 per materiali non umificati, come compost e/o fanghi non maturi e concimi organici.



LE MACCHINE PER IL COMPOSTAGGIO

Nel processo di compostaggio sono impiegate diverse tipologie di macchine e di attrezzature, utilizzate essenzialmente nelle tre fasi di lavoro:

1. preparazione del materiale organico,
2. ossigenazione della miscela mediante rivoltamento,
3. vagliatura del prodotto,

come indicato nello schema a blocchi visualizzato in figura 2.1.

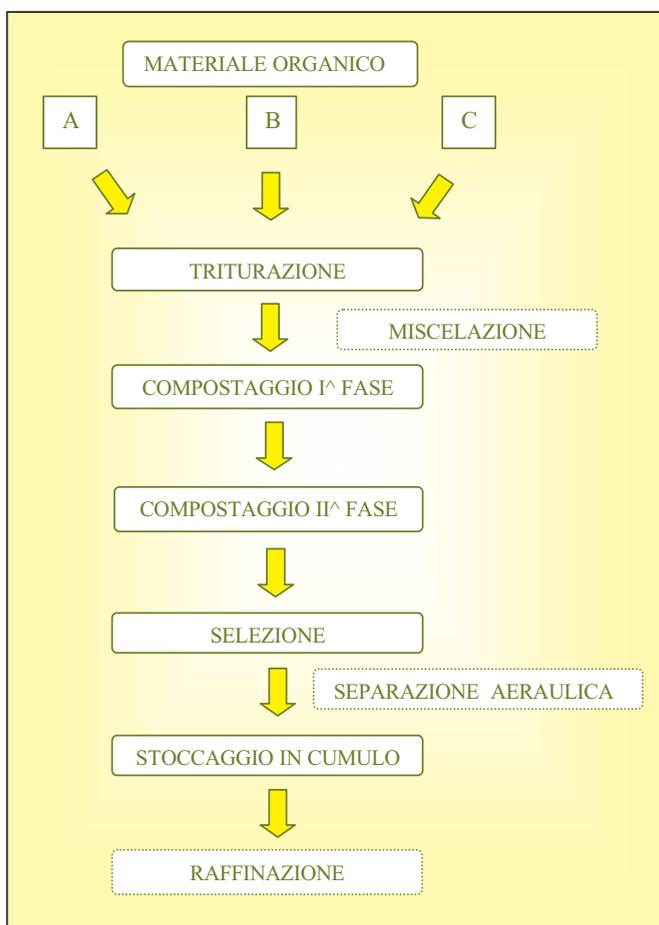


Fig. 2.1 - Schema a blocchi del processo di compostaggio.

1. LA PREPARAZIONE DEL MATERIALE

Nella preparazione del materiale da avviare al compostaggio si hanno essenzialmente le seguenti operazioni:

TRITURAZIONE
MISCELAZIONE

LA TRITURAZIONE

La riduzione dei materiali organici alla pezzatura ottimale di 25-75 mm ha la funzione di aumentarne la superficie di contatto con la flora batterica, facilitando così l'attività biologica, e, nello stesso tempo, di avvicinare la pezzatura del prodotto a quella che si vuole ottenere nel prodotto finale.

Le macchine per la frantumazione del materiale impiegate nei processi di compostaggio finalizzati alla produzione di compost di qualità - essenzialmente triturazione di materiali ligno/cellulosici - sono diverse da quelle utilizzate nella lavorazione dei rifiuti a raccolta indifferenziata, in cui la triturazione normalmente interessa il materiale raccolto prima della selezione, operazione dalla quale si otterrà la frazione organica da sottoporre a processo di stabilizzazione aerobica.

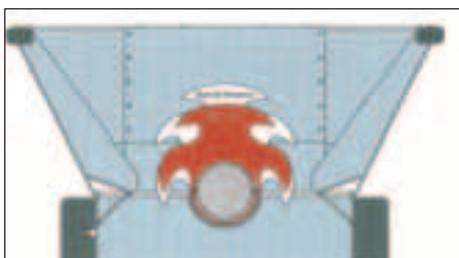
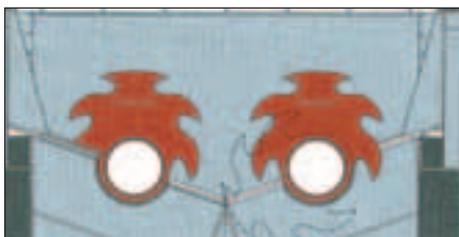


Fig. 2.2 - Apparatı di triturazione a uno e due rotori utilizzati per la frantumazione di RSU e legname da demolizioni [foto: NIRO INDUSTRIES].

Nella frantumazione dei RSU si utilizzano macchine a uno o due rotori dentati (fig. 2.2), dato che si opera su matrici che richiedono la disponibilità di potenze decisamente superiori rispetto alla frantumazione del materiale ligno-cellulosico

utilizzato come strutturante nel processo di compostaggio.

La macchina di triturazione può favorire anche la miscelazione dei diversi prodotti costituenti il substrato da compostare (erba, paglia, arbusti e rami, radici e legnami usati, cassette di frutta e verdura, *pallets*): una buona miscelazione dei prodotti dipende ovviamente dall'attenzione posta nel dosare con sufficiente precisione i diversi materiali.



Fig. 2.3 - Carico di una macchina tritratrice con residui ligno-cellulosici utilizzando forcone montato anteriormente su trattore; in evidenza anche lo scarico posteriore a terra [foto: TIM].

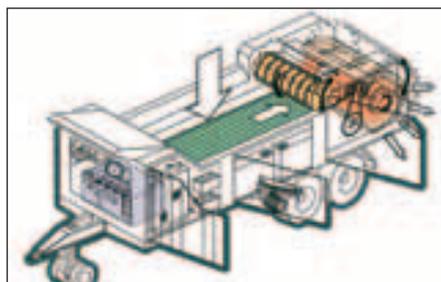


Fig. 2.4 - Schema di macchina frantumatrice di tipo tradizionale con scarico posteriore a terra: in evidenza la tramoggia di carico, il nastro trasportatore, l'apparato di alimentazione e quello di frantumazione a molino a martelli [foto: DOPPSTADT].

Un corretto dosaggio dei diversi materiali può essere facilitato dalla presenza di un sistema di pesatura elettronico, applicabile al telaio della macchina; questa è, però, una soluzione poco diffusa.



Fig. 2.5 - Carico con pala gommata e scarico su nastro: la presenza del nastro consente una migliore formazione del cumulo [foto: WILLIBALD].



Fig. 2.6 - Carico di materiale ligno-cellulosico in macchina tritratrice con benna: in evidenza anche il nastro di scarico posteriore [foto: JENZ].

Il *carico del prodotto* avviene dall'alto ed è effettuato con benna (in alcuni casi montata sulla stessa macchina trituratrice) o con forcone anteriore applicato al trattore. Quest'ultima soluzione appare preferibile, perché la mobilità del sistema è importante, dovendosi di norma prelevare le diverse matrici organiche da cumuli differenti.

Lo *scarico del prodotto* avviene direttamente a terra o in cumulo per mezzo di nastro trasportatore-elevatore. Sul nastro può essere applicato un separatore magnetico per l'eliminazione di eventuale materiale metallico.

I trituratori sono di norma montati su telaio fisso o mobile, trainabile da trattore; solo in casi limite sono montati su telaio semovente.

Per l'azionamento i trituratori di norma montano motori diesel, con potenze di almeno 100 kW, potendo arrivare a 300 kW in macchine della capacità di lavoro di 200 m³/h.

Solo per piccoli impianti si può derivare la potenza richiesta da un trattore, con collegamento con giunto cardanico.

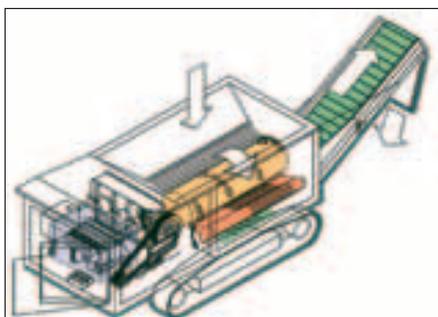


Fig. 2.7 - Schema di macchina frantumatrice per legno di recupero, RSU: in evidenza la tramoggia di carico, l'apparato di frantumazione a rotore e il nastro di scarico [foto: DOPPSTADT].

L'apparato di frantumazione è realizzato con soluzioni diverse:

- A COCLEE CON LAME DI TAGLIO PERIFERICHE
- A MOLINO A MARTELLI
- A ROTORE DENTATO

L'APPARATO DI FRANTUMAZIONE A COCLEE

Le macchine che montano questo sistema di frantumazione sono derivate dai carri miscelatori-trituratori utilizzati nelle attività zootecniche, i cosiddetti carri *unifeed*, nei quali i diversi costituenti della razione alimentare sono caricati sequenzialmente per essere miscelati prima di essere distribuiti nella mangiatoia.

Nella tramoggia di miscelazione sono presenti generalmente tre coclee (due superiori e una centrale-inferiore) aventi ad un tempo il ruolo di agenti della miscelazione e della frantumazione dei materiali lunghi come il fieno e la paglia.

Nei carri trituratori-miscelatori adottati nel processo di compostaggio si utilizzano da 2 a 4 coclee, che differiscono da quelle dei carri *unifeed* per la presenza di robuste lame di taglio - in genere a sezione triangolare - oltre che per la ovvia maggior robustezza generale delle macchine.

Queste attrezzature sono utilizzate con ottimi risultati con materiale organico di origine vegetale, con un limite nelle dimensioni dei rami o, comunque, di altro materiale ligneo, indicativamente di 70-80 mm.

Fig. 2.8 - Carro frantumatore derivato dai carri unifeed di impiego zootecnico, dotato anche di benna di carico [foto: FARESIN].



Fig. 2.9 - Apparato di triturazione a tre coclee, analogo a quello dei carri unifeed [foto: FARESIN].



Fig. 2.10 - Apparato di frantumazione a due coclee [foto: SEKO].

La capacità della tramoggia (di norma troncoconica) varia da 10 a 20 m³; al variare della tipologia dell'apparato di frantumazione cambia anche la forma della tramoggia.

La capacità di frantumazione di queste attrezzature è buona e consente di portare il prodotto alla pezzatura mediamente richiesta dal processo di compostaggio, pari a 20 - 50 mm.

Il funzionamento delle macchine montanti questo apparato di frantumazione è discontinuo: il tempo di permanenza del prodotto all'interno della tramoggia ne determina la pezzatura. Il regime di rotazione delle coclee è lento, dell'ordine di qualche centinaio di giri/min.

Lo scarico viene attuato in circa 5-10 minuti.

La capacità di lavoro di questo sistema di frantumazione è influenzata dal materiale di partenza e dalle sue caratteristiche fisiche, oltre che dalla potenza in gioco: con macchine azionate dalla presa di potenza (p.d.p.) del trattore si arriva ad una capacità di lavoro massima di 50 m³/ora mentre con macchine dotate di motore da 400 kW si arriva ad oltre 100 m³/ora.

Oltre alle diverse soluzioni mobili esistono anche sistemi operanti a punto fisso.

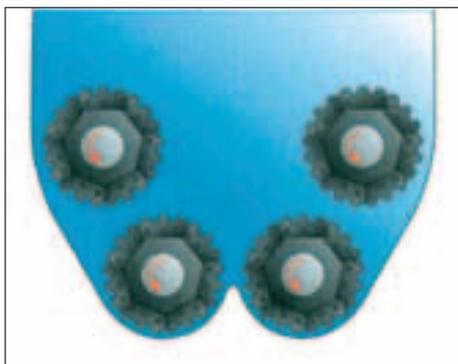


Fig. 2.11 - Apparato di triturazione a quattro coclee [foto: PAGLIARI].



Fig. 2.12 - Particolare di un rotore cocleare [foto: PAGLIARI].



Fig. 2.13 - Carro miscelatore trituratore in postazione fissa con in evidenza la sopraelevazione della tramoggia [foto: PAGLIARI].

L'APPARATO DI FRANTUMAZIONE A MOLINO A MARTELLI

E' l'apparato di frantumazione più usato, sia per la semplicità costruttiva, sia per la qualità del lavoro: un materiale sfibrato, anziché a taglio netto, infatti, viene più facilmente aggredito dai microrganismi, con evidenti vantaggi per il processo di demolizione della sostanza organica.



Fig. 2.14 - Apparato di frantumazione a martelli [foto:TIM].

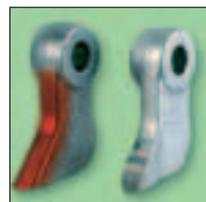


Fig. 2.15 - Apparato di frantumazione a martelli e particolare degli stessi [foto: WILLIBAND].



Il *molino a martelli* è caratterizzato da un rotore ad asse orizzontale su cui sono incernierate più serie di martelli folli, che, all'elevato regime di rotazione previsto (oltre 1.000 giri/min.), determinano con la loro inerzia la frantumazione del materiale.



Fig. 2.16 - Particolari di griglie montate su apparati di frantumazione a martelli [Foto: TIM a sinistra e JENZ a destra].

La pezzatura del materiale in uscita dall'apparato di frantumazione dipende dalle dimensioni della griglia applicata posteriormente al rotore che, consentendo al materiale di uscire solo al raggiungimento della pezzatura richiesta, condiziona di fatto la capacità di lavoro della macchina.

A monte del rotore è di norma montato un apparato di alimentazione a rulli dentati, il cui scopo è quello di dosare con regolarità e continuità il materiale all'apparato di frantumazione e di comprimerlo per una migliore azione del rotore. Tale soluzione è adottata soprattutto su macchine aventi sul fondo della tramoggia di carico un nastro trasportatore a catena il cui ruolo è quello di far avanzare il materiale verso il rotore.

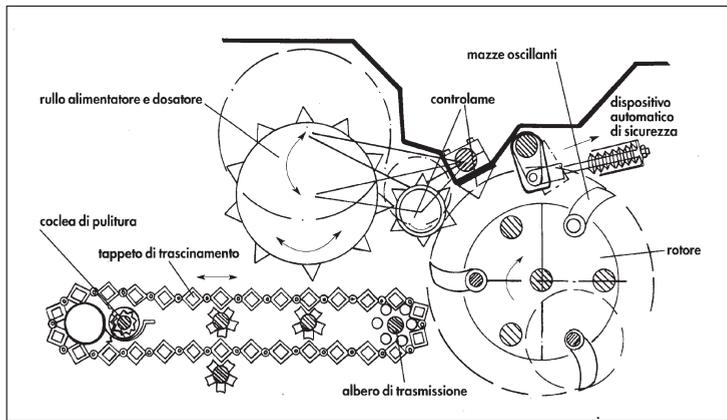


Fig. 2.17 - Schema dell'apparato di alimentazione di un carro trituratore a molino a martelli. In evidenza il pianale mobile della tramoggia, l'apparato di alimentazione a rulli, il rotore a martelli e le controlame dentate che possono sostituire in certi casi la griglia [fonte: WILLIBALD].

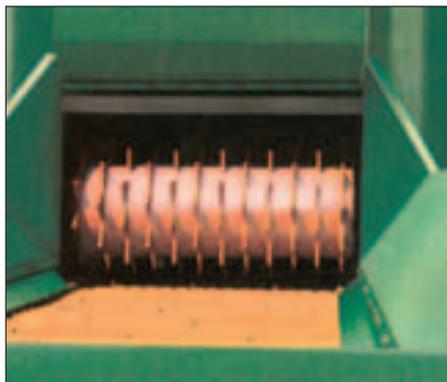


Fig. 2.18 - Particolare del rullo di alimentazione di un apparato di frantumazione a martelli; in evidenza anche il tappeto mobile di alimentazione [foto: WILLIBALD].

Dato che la qualità del materiale prodotto dipende dalle dimensioni della griglia, con questa tipologia di apparato di frantumazione si può arrivare, ove necessario, a pezzature inferiori a quelle garantite dall'apparato di frantumazione cocleare.

Le macchine che montano questo apparato di frantumazione hanno funzionamento continuo e garantiscono, di conseguenza, una capacità di lavoro più elevata rispetto a quelle discontinue. Questa dipende, comunque, dal tipo di griglia montata: per una pezzatura normale del prodotto dell'ordine di 20-50 mm e operando su residui vegetali, si può arrivare ad oltre 150 m³/ora con una potenza installata di 250 kW, per arrivare a circa 250 m³/ora con una potenza installata di 350 kW.



Fig. 2.19 - Macchina frantumatrice con molino a martelli a tramoggia rotante [foto: SANDBERGER].

Esistono anche *macchine a tramoggia rotante* con apparato di frantumazione a martelli (generalmente circolare - fig. 2.19): il contatto tra il materiale e l'apparato di frantumazione si ha a livello del fondo della tramoggia, ove esiste una ferritoia di larghezza opportuna per far arrivare il materiale a contatto con il rotore a martelli. La griglia - le cui luci, come si è già ricordato, determinano la pezzatura del prodotto - si trova in posizione sottostante e da questa il prodotto in uscita viene raccolto da un nastro elevatore per la formazione del cumulo o per il carico del prodotto su un mezzo di trasporto.

L'APPARATO DI FRANTUMAZIONE A ROTORE DENTATO

E' costituito essenzialmente da un rotore su cui sono montati con passo elicoidale, in doppia spira centripeta, dei denti taglienti a forma triangolare e da una contro-piastra fissa a taglienti, su cui viene compresso il materiale.

Questo sistema garantisce una capacità di frantumazione superiore agli apparati di frantumazione già descritti, necessaria per biomasse ricche di legname di recupero o rami di dimensioni superiori a 80 mm.



Fig. 2.20 - Tipico apparato di frantumazione a rotore dentato (sopra) e particolari: in evidenza i taglianti del rotore, la contropiastra ad incastro e la griglia post-frantumazione [foto: VMC IMPIANTI, LINDNER e KOMPTECH].

Il rotore opera ad un bassissimo regime di rotazione (circa 30 giri/minuto) e può essere dotato di un sistema di regolazione idraulica della rotazione in funzione della resistenza esercitata dal materiale: in tal modo è possibile sfruttare a pieno la potenza installata senza intasamenti. Le macchine operanti con questo sistema sono a funzionamento continuo e presentano potenze fino a 300 kW e capacità di lavoro fino a 120 m³/ora.

LA MISCELAZIONE

La necessità di disporre di un substrato omogeneo è fondamentale per la riuscita del compostaggio in cumuli statici, non avendosi il rimescolamento conseguente al rivoltamento. Ciò al fine di garantire un'evoluzione uniforme del processo su tutto il cumulo e una qualità omogenea del materiale finale. Negli impianti a rivoltamento meccanico l'omogenizzazione iniziale della massa è meno importante, dato che i successivi interventi di movimentazione portano progressivamente anche a questo risultato.

Nella maggior parte dei casi, comunque, si ottiene una buona miscelazione dei diversi materiali da compostare già all'atto della loro frantumazione.

Molto utile si presenta la miscelazione nel caso di compostaggio della frazione umida dei rifiuti organici raccolti "porta a porta": in questa fase si ha la rottura

dei sacchetti ed il rimescolamento del materiale con altre biomasse più secche che compensano l'elevata umidità del prodotto.

Qualora necessario, quindi, si dovrà ricorrere a specifiche macchine, ricordando, tuttavia, che non sempre una omogenizzazione spinta può essere utile. Ad esempio, nel caso di miscelazione di fanghi di impianti di depurazione, civili o agro-industriali con altri materiali organici, esiste il rischio di ricoprire le frazioni organiche a maggior livello di fermentescibilità con uno strato di materiale di difficile permeabilità all'aria, rendendo più complessa l'attivazione del processo aerobico.

Lo stesso può accadere miscelando deiezioni avicole con paglia o truciolo di legno per migliorarne le caratteristiche di compostabilità. La miscelazione si è dimostrata spesso controproducente, potendo creare un composto "plastico", di difficile permeazione da parte dell'aria e, quindi, suscettibile di fermentazioni anaerobiche: è meglio che la miscelazione avvenga con i rivoltamenti nel corso del processo.



Fig. 2.21 - Miscelatore a tamburo rotante in fase di trasporto: è funzionalmente analogo ai bioreattori orizzontali rotanti [fonte: UT].



Fig. 2.22 - Macchina miscelatrice verticale in fase di carico e particolare dell'apparato miscelatore [foto: FARESIN].



Oltre ai più comuni miscelatori orizzontali, esistono sul mercato anche *miscelatori verticali*, caratterizzati da una tramoggia cilindrica, del diametro di 2,0-3,0 m ed

altezza di 1,5-2,0 m al centro della quale è presente un albero rotante verticale montante una serie di pale miscelatrici con lame di taglio periferiche. Nei miscelatori di norma il ciclo di lavoro è discontinuo; lo scarico del prodotto avviene dalla base della macchina per mezzo di nastro trasportatore.

2. IL RIVOLTAMENTO DEL MATERIALE

Le macchine rivoltatrici aggrediscono di norma il cumulo frontalmente; alcune lavorano il cumulo in tutta la sua larghezza con una sola passata, altre interessano solo una parte dello stesso e, quindi, devono fare più passaggi per il rivoltamento dell'intero cumulo.

In funzione delle caratteristiche costruttive e funzionali le macchine per il rivoltamento dei cumuli vengono distinte in diverse categorie, indicate nella tabella 2.1.

APPARATO DI LAVORO	a nastro elevatore dentato a dispositivo cocleare a fresa + nastro elevatore
AZIONAMENTO	semoventi trainate o portate da trattore
TRASLAZIONE PRODOTTO	a traslazione longitudinale a traslazione laterale

Tab. 2.1 - Classificazione delle macchine per il rivoltamento dei cumuli in funzione delle loro caratteristiche costruttive e funzionali.

Le macchine più diffuse operanti negli *impianti a cumulo* sono quelle di tipo semovente a traslazione longitudinale del prodotto; la tipologia più diffusa è quella delle macchine *scavallatrici*.



Fig. 2.23 - Rivoltatrici scavallatrici semoventi in lavoro all'aperto [fonte: BACKHUS, a sinistra e KOMPTECH a destra].

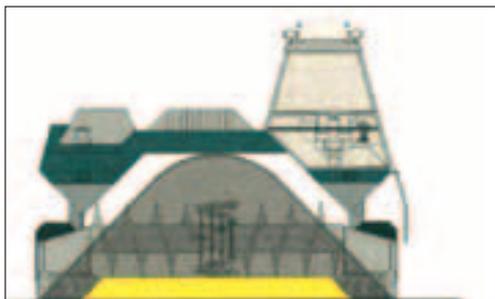


Fig. 2.24 - Particolare del dispositivo cocleare di rivoltamento con palette centrali di lancio del prodotto [fonte: KOMPTECH].

L'apparato di rivoltamento è costituito essenzialmente da un rotore orizzontale, ortogonale alla direzione di avanzamento della macchina, montante due spire cocleari a taglianti, una destrorsa e una sinistrorsa, convoglianti verso il centro il materiale; in posizione centrale sull'albero sono generalmente montate delle pale per il lancio all'indietro del prodotto (fig. 2.24).

Le dimensioni dei cumuli lavorabili da queste macchine variano con il variare delle potenze disponibili; sono ovviamente superiori con le macchine semoventi (tabella 2.2).

operatrici	cumuli	
	altezza (m)	larghezza (m)
PORTATE LATERALMENTE	1,0 - 1,5	2,0 - 3,0
SEMOVENTI	1,5 - 3,5	3,0 - 7,5

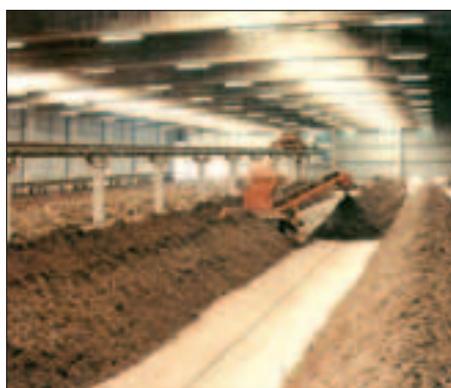
Tab. 2.2 - Dimensioni dei cumuli lavorabili dalle macchine rivoltatrici a dispositivo cocleare.

Le macchine semoventi più potenti, dotate di motori da 250-300 kW, sono accreditate di una capacità di lavoro di 2.500 - 3.000 m³/ora; quelle della classe 150-200 kW di capacità operative di 1.500 - 2.000 m³/ora.

In alcuni modelli di operatrici semoventi è previsto il dispositivo di traslazione laterale del materiale.



Fig. 2.24 - Macchine scavallatrici semoventi con dispositivo di traslazione laterale del prodotto [foto: KOMPTECK e IPALLE].



Altri modelli di macchine semoventi *scavallatrici* possono montare un dispositivo di irrorazione dei cumuli per il ripristino dell'umidità ottimale di processo (fig. 2.25).

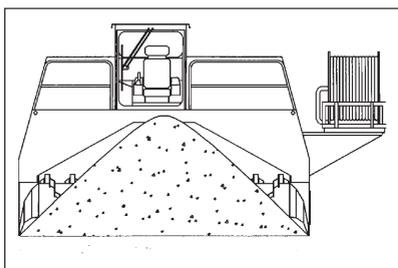


Fig. 2.25 - Schema di operatrice semovente montante il sistema di irrorazione dei cumuli [foto: BACKHUS].



Fig. 2.26 - Macchina semovente collegata a sistema di irrigazione dei cumuli a rotolone [foto: KOMPTECK].

Le *macchine portate lateralmente* da trattore sono adatte a cantieri di compostaggio di medio-piccole dimensioni; sono usate prevalentemente in ambito agricolo per il trattamento di deiezioni animali o biomasse provenienti dall'agro-industria (fig. 2.26 e 2.27).

Fig. 2.27 - Schema di macchina scavallatrice portata lateralmente da trattore.

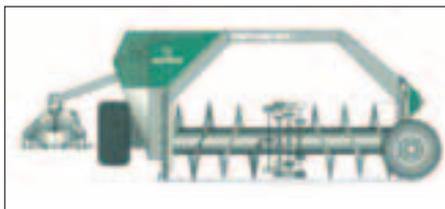


Fig. 2.28 - Macchina scavallatrice portata da trattore: sopra, in lavoro; a destra, in posizione di trasporto [foto: SANDBERGER].



I RIVOLTATORI A NASTRO ELEVATORE INCLINATO

I rivoltatori a nastro elevatore inclinato sono usati da molti decenni; pur essendo sempre risultati fonte di problemi per la loro delicatezza, soprattutto se privi di un convogliatore anteriore, appaiono interessanti perché garantiscono una migliore ossigenazione del materiale rispetto a quelli a rotore cocleare (macchine scavallatrici) per il più elevato tempo di contatto della biomassa con l'aria atmosferica.

Attualmente sul mercato esistono rivoltatori semoventi con larghezza di lavoro fino a 3 metri, in grado di lavorare cumuli fino a 3 metri di altezza. La potenza installata raggiunge i 150 kW per una capacità di lavoro fino a 1.800 m³/ora.



Fig. 2.29 - Rivoltatori semoventi a nastro elevatore inclinato in lavoro e particolare le lame di taglio montate sul nastro [foto: SCAT ENG. e GANDINI].



Fig. 2.30 - Rivoltatore a nastro inclinato di tipo trainato [foto: SCAT ENG.].

Per questa tipologia di rivoltatore, la presenza di un convogliatore anteriore risulta molto utile, perché diminuisce lo sforzo del nastro, riducendone l'invecchiamento; ha anche il vantaggio di consentire la riduzione della larghezza del nastro elevatore - e quindi del costo - a parità di larghezza della corsia.

Un'interessante applicazione è quella dell'impiego di un convogliatore a fresa (fig. 2.32), del tipo usato per il dessilamento del mais ceroso e di altri insilati ad uso zootecnico: infatti, l'elevato regime di rotazione del rotore e la presenza di numerose lame taglienti alla sua periferia riducono al solo trasporto il lavoro del nastro elevatore.



Fig. 2.31 - Rivoltatore semovente a nastro elevatore inclinato con convogliatore anteriore cocleare [foto: SEKO].



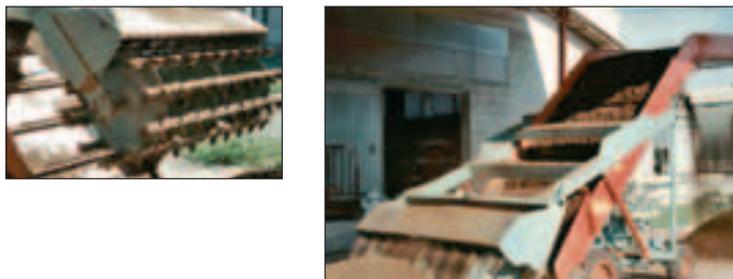


Fig. 2.32 - Schema di rivoltatore a nastro elevatore inclinato e fresa anteriore nella versione a motore elettrico (15 kW) in lavoro su andana e particolare della fresa [foto: GONELLA].

Questo tipo di macchina, oggi presente sul mercato anche a guida automatica per operare in corsia, è prevalentemente usato in ambito agricolo-zootecnico per il compostaggio di deiezioni animali e, avendo una larghezza di lavoro di circa 2 metri, risulta adatta a impianti di medio-piccole dimensioni e ad operare su andane o su corsia. E' presente sul mercato anche nella versione elettrico-idraulica, con una potenza installata totale, per l'autodislocazione e l'azionamento dei dispositivi di movimentazione della massa, di 15 kW.



Fig. 2.33 - Operatrice semovente a nastro elevatore con traslazione laterale del materiale [Foto: KOMPTECH].



Fig. 2.34 - Operatrice semovente a doppio nastro elevatore inclinato con apparato cocleare verticale [foto: SEKO].

Tra le macchine a nastro elevatore inclinato si è inserita recentemente sul mercato una operatrice semovente con apparato cocleare verticale e a doppio nastro, in grado di operare con *cumuli a tavola* dell'altezza massima di 3 metri (fig. 2.34).

I RIVOLTATORI A ROTORE A TAGLIO LATERALE

Queste macchine sono caratterizzate da uno o due rotori, ad asse inclinato o orizzontale, il cui ruolo è quello di rimuovere per strati verticali il materiale e di spostarlo lateralmente a formare un nuovo cumulo.

Il prodotto rimosso verticalmente dal dispositivo fresante viene deposto su un nastro trasportatore ad alta velocità e viene lanciato da questo lateralmente formando, così, un nuovo cumulo.



Fig. 2.35 - Rivoltatore a rotore a taglio laterale in lavoro a sinistra; in evidenza a destra il fronte di asportazione del prodotto [foto: WILLIBALD].



Fig. 2.36 - Particolare dell'apparato fresante di una macchina a traslazione laterale portata da trattore [fonte: WILLIBALD].

Vantaggio di questa tipologia di macchina è quello di poter operare su *cumuli a tavola* di illimitata larghezza.

La capacità di lavoro è elevata, raggiungendo i 1.500 m³/ora nella versione semovente con una potenza disponibile di 180 kW.



Fig. 2.37 - Rivoltatrice a due rotori ad asse di rotazione orizzontale a traslazione laterale e particolare delle lame montate sul rotore [foto: DOPPSTADT].

I RIVOLTATORI PER PICCOLI CANTIERI

Per cantieri di non grandi esigenze operative possono essere utilizzate macchine più semplici di quelle finora prese in esame.

Tra queste si possono ricordare alcuni rivoltatori portati anteriormente da trattore e benne particolari.



Fig. 2.38 - Rivoltatori portati per piccole andane [foto: BROWN].

Interessante può risultare – anche per la miscelazione di compost – la benna rivoltatrice applicabile all’attacco a tre punti del trattore ed azionata dalla presa di potenza.



Fig. 2.39 - Rivoltatore a benna a scarico meccanico laterale: applicata all’attacco a tre punti del trattore consente lo scarico anche a consistente altezza garantendo una accettabile ossigenazione della massa [foto: TIM].

Questa attrezzatura monta sul fondo della tramoggia un nastro trasportatore veloce che consente il lancio del prodotto, favorendone un migliore contatto con l’ossigeno atmosferico.

La capacità della tramoggia è dell’ordine di 2-3 m³ e la capacità di lavoro è indicata in circa 100 m³/ora.

Di ancor minore capacità di lavoro, ma interessante in alternativa alla benna tradizionale, è la benna a fondo mobile, che consente una aerazione della massa decisamente migliore (fig. 2.40).



Fig. 2.40 - Rivoltamento con benna a fondo mobile [foto: ALLU].

3. LA SEPARAZIONE DEL MATERIALE INDESIDERATO

Negli impianti di compostaggio operanti su residui organici misti, provenienti dall’agricoltura, dal verde dell’arredo urbano, da scarti lignocellulosici, dalla raccolta differenziata dei RSU, restano nel prodotto finale particelle di film plastico che è

bene eliminare, per non penalizzare commercialmente il compost.

Poiché la separazione risulta difficile sul prodotto umido, cioè all'atto del carico nell'impianto, questa operazione viene preferenzialmente fatta alla fine del processo.

Le macchine più utilizzate allo scopo sono quelle appartenenti alla tipologia dei separatori aeraulici, che attuano la separazione del materiale leggero, come i film plastici, in corrente d'aria, sfruttando la diversa massa volumica dei materiali. La potenza richiesta per una capacità di lavoro di circa 40 m³/ora è di 20 kW. La macchina viene di norma utilizzata in serie con il vaglio selezionatore.



Fig. 2.41 - Schema di separatore aeraulico [foto: FARWICK].



Fig. 2.42 - Separatore aeraulico nel tradizionale abbinamento con il vaglio [foto: FARWICK].

4. LA SPREMITURA

Queste macchine sono utilizzate a valle della tramoggia *rompi sacchi* nei cantieri di compostaggio della frazione umida dei RSU raccolti *porta a porta*, con la funzione di eliminare l'eccesso di acqua dal materiale umido che dovrà essere compostato. Il liquame ottenuto con il trattamento di spremitura è destinato alla digestione anaerobica con produzione di biogas.

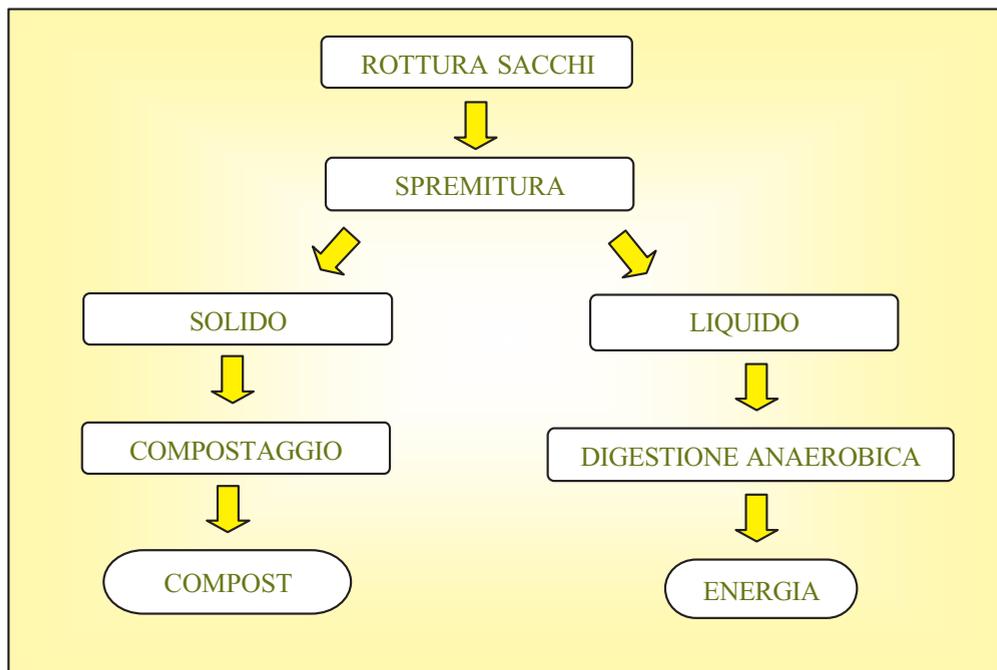


Fig. 2.43 - Schema a blocchi del processo di compostaggio con spremitura del materiale umido.

La macchina utilizzata allo scopo è costituita da una o due coclee rotanti a bassa velocità all'interno di un cilindro in lamiera forata.



Fig. 2.44 - Macchina per la spremitura della frazione umida dei RSU: in evidenza la macchina montata a valle della tramoggia rompi sacchi e particolare della griglia esterna attraverso la quale passa il liquido separato [foto: KOMPTECH].



Fig. 2.45 - I due prodotti ottenuti dalla spremitura: il solido che andrà al compostaggio e il liquido che subirà il processo di digestione anaerobica [foto: BIO.GE.CO].

5. LA SELEZIONE DEL MATERIALE

L'allontanamento del materiale grossolano, eccedente la pezzatura ottimale per il compost e a volte presente in percentuali superiori al 30%, viene fatto alla fine del processo con le macchine selezionatrici.



Fig. 2.46 - Vaglio in lavoro [Foto: TIM].

La macchina selezionatrice tipo è una attrezzatura carrellata, costituita essenzialmente da:

- un sistema di prima vagliatura, per l'allontanamento di eventuali corpi grossolani (pietre o corpi grossolani);
- un tamburo di vagliatura rotante di forma cilindrica;
- un rullo di pulizia del tamburo vagliante;
- n. 2 nastri trasportatori: il primo adibito allo scarico del compost alla pezzatura richiesta; il secondo per lo scarico in cumulo separato del sovrallo.

Fig. 2.47 - Schema di una macchina selezionatrice normale a due nastri con in evidenza il sistema di grigliatura grossolana, il tamburo di vagliatura, il rullo di pulizia del tamburo, il nastro del sottovallo, il nastro del sovravallo [foto: DOPPSTADT].

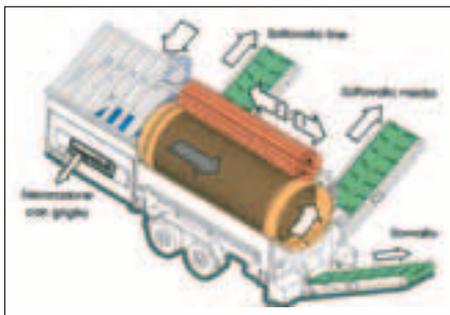
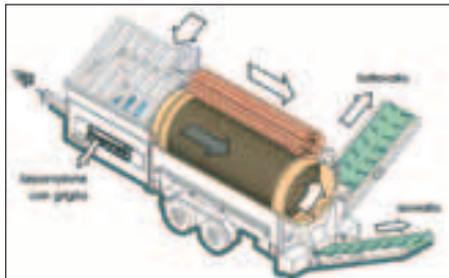


Fig. 2.48 - Schema di una macchina selezionatrice a tre nastri [foto:DOPPSTADT].

Il sistema di vagliatura grossolana è costituito da una griglia a luci > 100 mm facilmente rimovibile se non necessaria.

Il rotore di vagliatura è costituito da un cilindro in acciaio inox con fori di diametro diverso a seconda della destinazione del prodotto compostato: per un prodotto di qualità ottimale si utilizzano luci di 5-6 mm; per un prodotto più grossolano, di minor valore commerciale, ci si accontenta di luci di 10-15 mm.

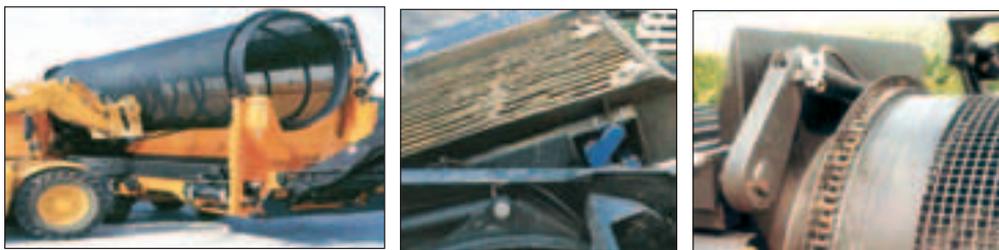


Fig. 2.49 - Particolari di un vaglio selezionatore: il rullo selezionatore in fase di sostituzione (a sinistra), il sistema di trasmissione del moto (destra) e la griglia di vagliatura grossolana asportabile (al centro) [foto: DOPPSTADT].

Fig. 2.50 - Particolare del rullo di pulizia di un vaglio selezionatore [foto:TIM].



6. IL CONFEZIONAMENTO DEL COMPOST

Prima della vendita il compost può essere confezionato in sacchi: è una soluzione adottata prevalentemente per il materiale proveniente dal settore zootecnico, per il quale il mercato riserva prezzi più remunerativi.

Tale operazione può essere attuata sia con impianti semplici, che ovviamente richiedono molta manodopera, sia con impianti automatizzati.



Fig. 2.51 - Tramoggia insaccatrice [fonte: WILLIBALD].



Fig. 2.52 - Tramoggia insaccatrice in un'azienda avicola.



Fig. 2.53 - Impianto automatizzato di confezionamento in un centro di lavorazione di compost zootecnico.



Fig. 2.54 - Termosaldatrice manuale per i sacchi di compost

LE TECNOLOGIE IMPIANTISTICHE

1. EVOLUZIONE DELLA TECNOLOGIA DEL COMPOSTAGGIO

La tecnica della maturazione dei residui vegetali e zootecnici per la produzione di fertilizzanti destinati alla produzione agricola era largamente conosciuta fin dall'antichità. Basti pensare che duemila anni fa Colummella nel suo *de rerum natura* indicava dettagliatamente come attuare il processo di compostaggio miscelando diverse matrici organiche⁽¹⁾. Il sistema di compostaggio primigenio è stato ovviamente un sistema tendenzialmente statico, attuato in cumulo, con il rivoltamento periodico della massa per mantenere le attività biologiche in condizioni aerobiche. Ancor oggi nel compostaggio domestico questa soluzione non ha alternative, pur essendo a tutti nota la difficoltà di ottimizzare il processo.

Fino a qualche decennio fa anche nel nostro Paese il compostaggio veniva attuato in grandi cumuli all'aperto, con limitati rivoltamenti della massa, con tempi di maturazione molto lunghi. Era un processo destinato soprattutto ai sottoprodotti dell'agricoltura ed in particolare alle deiezioni degli animali, dato che la frazione organica dei rifiuti solidi urbani - ancora in quantità non preoccupanti come quelle attuali - era destinata alle discariche o all'incenerimento.

La mancanza di una pavimentazione tra il materiale in fermentazione e il terreno, nel compostaggio attuato in pieno campo, poneva in essere obiettivi rischi di inquinamento delle falde superficiali, con le ovvie ripercussioni di ordine ambientale.

Con l'entrata in vigore della prima legge quadro di tutela ambientale (legge 319/1976)⁽²⁾, che ha cominciato a porre all'attenzione dei mass media il problema ecologico, è nata la necessità di passare a soluzioni impiantistiche più rispettose dell'ambiente anche per il compostaggio.

Il primo passo fatto è stato quello di non consentire il compostaggio su terreno non impermeabilizzato⁽³⁾, di fatto portando ad una nuova e più moderna concezione del processo.

Contemporaneamente, le aumentate produzioni di rifiuti urbani e le difficoltà di gestione della frazione organica in questi contenuta evidenziava l'utilità del compostaggio come tecnica di recupero dei rifiuti.

Il compostaggio, in questo modo, cominciava ad assumere le connotazioni di processo industriale e dal rivoltamento periodico dei cumuli in campo si è passati ai primi veri reattori biologici, fino ad arrivare agli attuali impianti a controllo computerizzato.

(1) il termine compost deriva dal latino compositum, indicante un prodotto fatto da più matrici organiche

(2) nota come legge Merli e avente per obiettivo la tutela delle acque dall'inquinamento

(3) con riferimento al testo unico delle leggi sanitarie del 1934

Durante questa fase di sviluppo, iniziata nei primi anni '80, si sono imposte all'attenzione pubblica due nuove problematiche: quella dell'inquinamento atmosferico e quella della raccolta differenziata della frazione organica dei RSU.

La prima, recepita con la legge n. 203/1988 (legge quadro sulle emissioni in atmosfera), ha condizionato in modo profondo la progettazione degli impianti di compostaggio, imponendo di fatto il lavoro in *ambiente confinato* per la prima fase del processo; la seconda, recepita dal D.L. n. 22/1997 (legge quadro sui rifiuti – nota come decreto Ronchi) ha imposto la raccolta differenziata dei rifiuti domestici, in modo da ridurre non solo la quantità totale di rifiuti da gestire, ma anche la sostanza organica da collocare in discarica.

Il processo di compostaggio ha ormai assunto due diverse connotazioni: di produzione di materiale ammendante per l'agricoltura - il compost - e di produzione di biostabilizzato da collocare in discarica.

Nel primo caso è corretto parlare di processo *di compostaggio*, nel secondo *di processo di stabilizzazione aerobica*.

Alla luce di queste considerazioni, appare evidente come gli impianti di compostaggio realizzati negli anni '80 siano da considerarsi obsoleti, per la continua innovazione tecnologica - cui ancor oggi stiamo assistendo - resa necessaria soprattutto dal cambiamento delle matrici trattate a seguito della nuova impostazione del *problema rifiuti*.



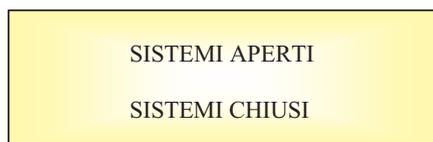
Fig. 3.1 - Diversi materiali utilizzabili nel compostaggio per la produzione di compost di qualità: sopra, residui di potatura e piante; sotto, pallet di recupero e la frazione organica da raccolta differenziata dei rifiuti urbani.



Fig. 3.2 - La frazione organica di RSU proveniente da operazioni di separazione da raccolta indifferenziata non viene trattata per la produzione di compost di qualità, ma stabilizzata prima della collocazione in discarica.

2. LE TIPOLOGIE IMPIANTISTICHE

L'analisi delle tipologie impiantistiche del compostaggio non può che partire dalla distinzione tra:



I *sistemi aperti* sono quelli che vengono attuati all'aperto o in locali non completamente chiusi; i *sistemi chiusi* si riferiscono a processi attuati in ambienti confinati, nei quali è possibile il controllo dell'aria in uscita dai cumuli.

Per la prima fase del processo e anche per lo stoccaggio delle diverse biomasse si sta ricorrendo sempre più a quest'ultima soluzione, allo scopo di contenere le emissioni di odori molesti in atmosfera, che oggi costituiscono il problema maggiore di questi impianti, soprattutto per quelli destinati a trattare biomasse di facile degradazione biologica.

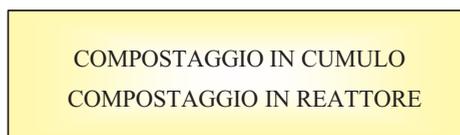
I vantaggi dei *sistemi chiusi* sono essenzialmente riconducibili a:

- minore dipendenza dalle variabili metereologiche,
- minori dispersioni di calore dalla biomassa all'ambiente circostante,
- riduzione dell'impatto ambientale, per la possibilità di gestire l'aria in uscita dall'impianto.

In relazione alle modalità di carico degli impianti si può attuare una distinzione tra



In ordine alla tipologia di impianto si può effettuare anche una distinzione tra



2.1. IL COMPOSTAGGIO IN CUMULO

E' derivato dal compostaggio in cumulo all'aperto, oggi nella maggior parte dei casi trasferito in ambiente confinato: il materiale organico viene sistemato in cumulo-andana di dimensioni variabili: in altezza da 1 metro ad oltre 3 metri e in larghezza da 2 metri fino ai 6-7 metri. Fino a queste larghezze esiste la possibilità di rivoltamento della massa in un unico intervento; quando la larghezza del cumulo supera i 7 metri, il materiale viene rivoltato in più passate: in questo caso si parla usualmente di *cumulo a tavola*.

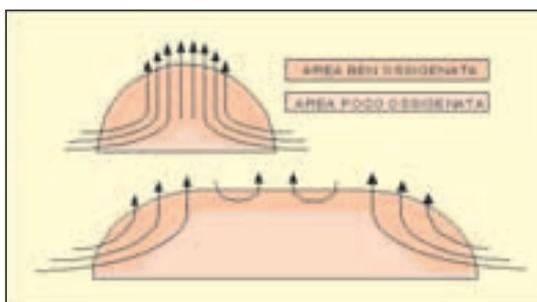


Fig. 3.3 - Cumuli di diversa larghezza con in evidenza la zona maggiormente ossigenata nel caso di aerazione naturale.

Le dimensioni dei cumuli dipendono essenzialmente dal materiale da trattare e dal sistema usato per la reintegrazione nel cumulo dell'ossigeno necessario al processo: i cumuli a ventilazione forzata (cumuli statici) sono tendenzialmente di

minori dimensioni; quelli a rivoltamento meccanico (cumuli dinamici) possono raggiungere le dimensioni maggiori.

In ordine alla forma, i cumuli a *sezione trapezoidale* (assimilabili a quelli a *sezione triangolare* di maggiori dimensioni) sembrano preferibili per il migliore sfruttamento dello spazio, dato che la superficie inutilizzata – non occupata dai cumuli – risulta inferiore. In questa ottica, ovviamente, i *cumuli a tavola* risultano ancor più interessanti.

Va, comunque, considerato che all'aumentare della sezione aumenta la massa di prodotto che non è interessata dalla circolazione naturale dell'aria per l'*effetto camino*, cioè per il richiamo di aria dall'ambiente esterno generato dalla depressione creata dall'uscita di aria calda dal cumulo. Sotto questo aspetto i cumuli piccoli e a sezione "triangolare" appaiono preferibili.

I *cumuli a tavola*, non garantendo un naturale rifornimento di ossigeno alla biomassa, devono essere abbinati a sistemi dinamici di rivoltamento e/o sistemi di insufflazione d'aria nella massa.

Le tipologie impiantistiche di compostaggio in cumulo, in relazione al sistema di ossigenazione della massa, possono essere distinte in:

CUMULI STATICI

CUMULI A VENTILAZIONE FORZATA

CUMULI A RIVOLTAMENTO MECCANICO

CUMULI A RIVOLTAMENTO MECCANICO E VENTILAZIONE FORZATA

I CUMULI STATICI

Il compostaggio senza rivoltamento e ventilazione forzata della massa può essere proponibile solo in casi limite, con un materiale ottimizzato in tutti i parametri di processo, dato che la zona interessata da processi anaerobici in queste condizioni può essere molto estesa.

Questa è, in definitiva, una soluzione priva di interesse pratico, dato che non consente di produrre del materiale omogeneo: i cumuli statici sono oggi utilizzati solo per lo stoccaggio dei materiali in attesa di essere compostati e, comunque, ciò dovrebbe avvenire solo per tempi limitati. Infatti, per alcune matrici ad elevato indice respiratorio come l'erba proveniente dagli sfalci urbani, nello stoccaggio si ingenera l'avvio di processi anaerobici, con risultati negativi in ordine alle emissioni di odori molesti.



Fig. 3.4 - Lo stoccaggio di materiali lignocellulosici può essere effettuato in cumulo statico senza problemi.

I CUMULI A RICAMBIO FORZATO DELL'ARIA

I cumuli sono realizzati generalmente con sezione triangolare o trapezoidale di altezza pari a 1,5 – 2,0 m, larghezza alla base di 2,5 – 3,0 metri e lunghezza teoricamente illimitata (disposizione in andana).

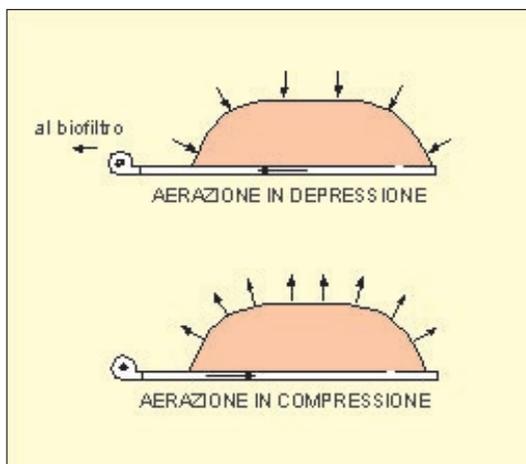


Fig. 3.5 - Schemi di ventilazione dei cumuli in compressione e depressione.

Nella pavimentazione sono ricavati i canali, coperti da griglie generalmente metalliche, attraverso i quali viene effettuato il ricambio dell'aria. L'aria può essere aspirata; anche in questo caso ad opera di uno o più ventilatori centrifughi, i soli in grado di vincere la resistenza offerta al passaggio dell'aria dalla biomassa in cumulo.

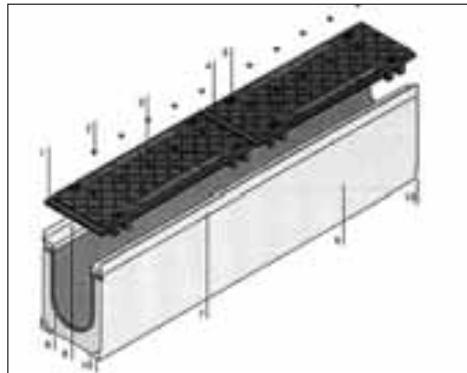


Fig. 3.6 - Compostaggio all'aperto con in evidenza la pavimentazione predisposta per la ventilazione forzata: questa soluzione è ormai riservata alla seconda fase del processo [foto: GICOM].



Fig. 3.7 - Capannone "aperto" per il compostaggio in cumuli aerati: in evidenza (a sinistra) il canale coperto da grigliato per l'ossigenazione della massa.

Fig. 3.8 - Canali prefabbricati, con in evidenza: 1. giunto dei coperchi in acciaio, 2. tappi dei fori di aerazione, 3. fori di aerazione, 4,5,6,10 giunti di protezione, 7. telaio in acciaio inox, 8. barra di fissaggio bulloni in inox, 9. canaletta in cemento rinforzato con fibre di vetro [fonte: HAURATON].



Alla ventilazione forzata per aspirazione viene attribuita una più omogenea distribuzione dell'aria e, conseguentemente, una più regolare ossigenazione del materiale. Con la ventilazione forzata in compressione, infatti, si formano più facilmente nella massa percorsi preferenziali per l'aria - comunque non eliminabili anche nella ventilazione per depressione - con la creazione di indesiderate zone anaerobiche. La ventilazione in depressione, dalla base del cumulo, offre anche il vantaggio di poter convogliare l'aria direttamente ad un impianto di trattamento degli inquinanti gassosi. Le portate d'aria utilizzate sono dell'ordine di 50-100 m³/h per m² di superficie, 3,5-7,0 m³/h per tonnellata di materiale.

Fig. 3.9 - Impianto di aspirazione dell'aria dal capannone in un impianto aperto con in evidenza i ventilatori radiali e sulla destra la struttura del biofiltro.



L'ossigenazione della massa in compostaggio solo con un sistema ad aria forzata non è idonea a garantire l'ottimizzazione del processo, sia per il già ricordato problema della regolarità di distribuzione d'aria nella massa, sia per i problemi dell'utilizzo di aria fredda, prelevata dall'esterno, nel periodo invernale. Questo problema è ovviamente più sentito nei piccoli cumuli - proprio quelli che in genere adottano questa tecnologia - e particolarmente nella fase di avvio del processo, perché rallenta il raggiungimento della fase termofila.

La tecnica del ricambio dell'aria con ventilazione forzata ha costituito per lungo tempo la soluzione più adottata nel compostaggio: dapprima in impianti all'aperto, poi all'interno di capannoni - comunque in *sistemi aperti*. Si trattava di processi gestiti approssimativamente, data la difficoltà di monitorarli con un sistema computerizzato, come avviene oggi negli impianti di nuova generazione.

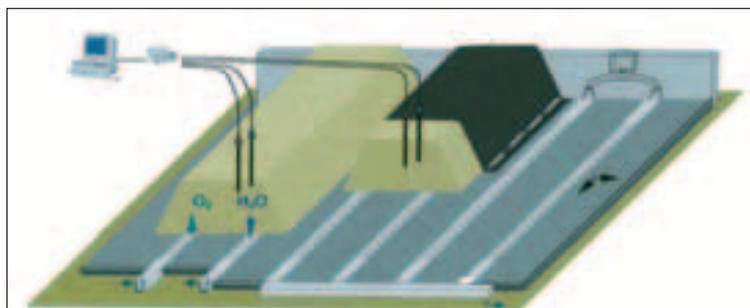


Fig. 3.10 - Schema di un impianto di compostaggio in cumuli a ventilazione forzata, con in evidenza i canali di aerazione ricavati nella pavimentazione (che fungono anche da canali di deflusso del percolato), la possibile copertura dei cumuli con teli in Gore-Tex e le sonde di controllo del processo [fonte: THÖNI].

Negli impianti a gestione computerizzata si interviene con la ventilazione quando il contenuto di ossigeno lacunare risulta al di sotto del limite pre-impostato, che per la prima fase - la più importante del processo - è indicativamente il 5-15 % in volume.

Con questo tipo di impianto la prima fase del processo dura almeno 3 settimane; quella di maturazione un periodo almeno analogo.

La copertura dei cumuli con teli in Gore-Tex

Per i cumuli all'aperto si sta proponendo la copertura con teli in Gore-Tex, materiale permeabile ai gas prodotti nel processo ed impermeabile all'acqua.

I teloni utilizzati nel compostaggio sono costituiti da due strati di poliestere esterni aventi funzione strutturale-meccanica, necessaria per poter stendere e riavvolgere i teli senza problemi - con all'interno la lamina di Gore-Tex.

I vantaggi attribuiti alla copertura dei cumuli sono essenzialmente riconducibili alla pressoché totale eliminazione del percolato, per l'impossibilità di ingresso dell'acqua meteorica nel cumulo, e anche alla riduzione delle emissioni in atmosfera di gas maleodoranti, per il minor contatto del cumulo con l'ambiente esterno.

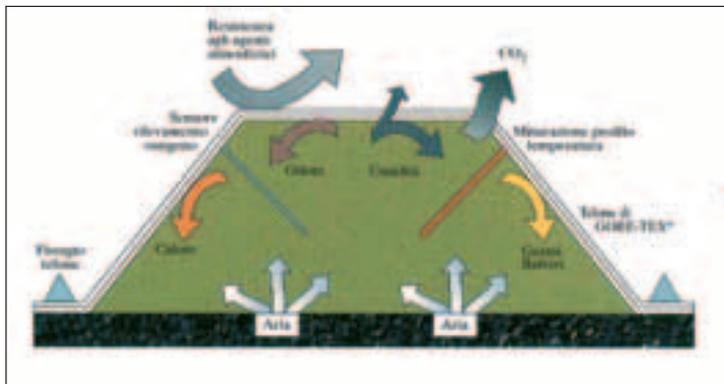


Fig. 3.11 - Schema del flusso dei gas dei cumuli in compostaggio coperti con teli in Gore-Tex [Fonte BIOE].



Fig. 3.12 - Cumuli a ventilazione forzata con telo di copertura e particolare del sistema di insufflazione dell'aria [fonte: BIOE].

La condensazione del vapore acqueo alla sommità del cumulo impedisce

un'eccessiva disidratazione della massa, garantendo un regolare processo di compostaggio anche senza interventi di umidificazione.

Il compostaggio in sacchi di materiale plastico: il sistema CTI

Un particolare sistema di compostaggio in cumuli a ventilazione forzata è quello statunitense *CTI* che si basa sull'impiego di sacconi in materiale plastico del diametro di 2,4 e 3,6 metri e lunghezza fino a 150 metri, nei quali viene compresso il materiale da compostare ad opera di una apposita pressa insaccatrice.

I sacchi sono dotati nella parte superiore di fori per la fuoriuscita dell'aria che viene insufflata per mezzo di due tubazioni in PVC opportunamente forate e collegate con una soffiante.

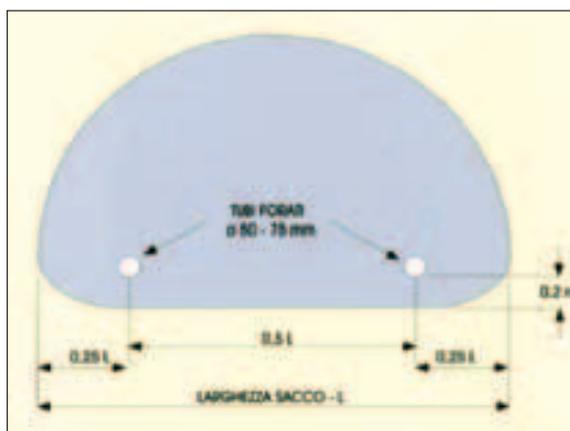


Fig. 3.13 - Sezione del saccone, con in evidenza le due tubazioni di insufflazione dell'aria [fonte: APIESSE].

Queste tubazioni vengono inserite ad opera dello stesso apparato di compressione del prodotto e svolgimento del saccone: la formazione del saccone, infatti, avviene per il progressivo arretramento della pressa insaccatrice durante il carico del materiale.

Fig. 3.14 - Primo piano della tramoggia di carico della macchina insaccatrice [foto: CTI].





Fig. 3.15 - Particolare del sistema di insufflazione dell'aria dell'impianto [Foto: APIESSE].



Fig. 3.16 - Primo piano della macchina insaccatrice con in evidenza una delle tubazioni forate inserite nel sacco per la distribuzione dell'aria [Foto: APIESSE].

I *vantaggi* indicati per questa tecnologia sono essenzialmente:

- superficie richiesta inferiore rispetto ai normali cumuli, soprattutto con i sacchi di maggior diametro,
- minore influenza delle precipitazioni e degli agenti meteorologici (minore umidificazione della massa e riduzione della produzione di percolato e minore essiccazione),
- attuazione delle due fasi del processo senza movimentazione della massa,
- eliminazione dei costi del fabbricato e dei vincoli urbanistici.

Gli *svantaggi* di questo sistema di compostaggio sono riconducibili a:

- impossibilità di convogliare l'aria in uscita dal cumulo ad un impianto di trattamento. Il processo, di conseguenza, deve necessariamente essere attuato su matrici di "piena sicurezza ambientale" in termini di emissioni di odori molesti, come i materiali ligno-cellulosici;
- il controllo del processo può avvenire solo con sonde di temperatura, essendo impossibile riciclare l'aria espulsa.

La durata del processo (prima e seconda fase sequenziali nello stesso *saccone*) viene indicata in circa 8 settimane.

I CUMULI A RIVOLTAMENTO MECCANICO

Nella sua configurazione più semplice il sistema è costituito da uno o più cumuli a sezione triangolare o trapezoidale con rapporto tra altezza e larghezza indicativamente pari a 1:2 e lunghezza teoricamente illimitata.

Per il rivoltamento, la pala meccanica, che ha costituito per decenni la sola soluzione adottata (e lo è tuttora nei piccoli impianti soprattutto trattanti biomasse agro-zootecniche), è stata progressivamente sostituita dalle specifiche attrezzature di cui si è parlato nella seconda parte.

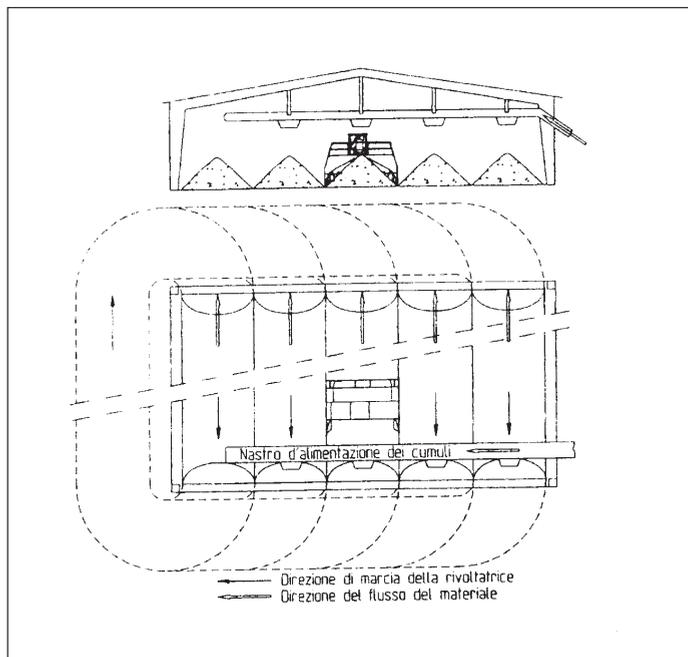


Fig. 3.17 - Schema funzionale di impianto a cumuli dinamici a rivoltamento meccanico con in evidenza il ritorno a vuoto della macchina rivoltatrice all'esterno del fabbricato [fonte: BACKHUS].

In termini temporali, la prima fase del processo ha una durata indicativa di 3-4 settimane, con rivoltamenti di norma effettuati 2 - 3 volte la settimana; la seconda fase ha una analoga durata e prevede due o tre rivoltamenti nel periodo.

I vantaggi di questa soluzione nei confronti dei cumuli a ventilazione forzata, sono sintetizzabili nei seguenti punti:

- maggiore omogeneità del prodotto finale;
- possibilità di accelerare il processo con rivoltamenti frequenti;
- maggiore sicurezza nella ossigenazione e nella igienizzazione del prodotto;
- maggiore facilità di essiccazione del prodotto (utile nella fase finale della maturazione).



Fig. 3.18 - Il rivoltamento meccanico dei cumuli con macchine semoventi è ancora il sistema di ossigenazione della massa più usato, soprattutto per la seconda fase del processo di compostaggio [foto: BACKHUS].

Fig. 3.19 - Rivoltatore portato da trattore con dispositivo di riavvolgimento e stendimento del telo di copertura sul cumulo [foto: SANDBERGER].



Gli svantaggi dei cumuli a rivoltamento meccanico rispetto a quelli a ventilazione forzata sono essenzialmente:

- spesa energetica più elevata,
- maggiore evaporazione di acqua (svantaggiosa per la fase di biossidazione),
- maggiore difficoltà nel controllo del processo.

Anche nel compostaggio in cumuli all'aperto (o al chiuso) si possono utilizzare i teli di copertura in Gore-Tex, dato che esistono macchine scavallatrici, sia di tipo semovente, sia di tipo trainato, in grado di riavvolgere il telo prima del rivoltamento e stenderlo dopo il passaggio.



Fig. 3.20 - Cumuli dinamici all'aperto coperti con teli in Gore-Tex, con macchina rivoltatrice in lavoro [foto: SANDBERGER].

2.2. IL COMPOSTAGGIO IN BIOREATTORI

Si possono definire *bioreattori* tutti gli impianti aventi caratteristiche costruttive diverse da una semplice pavimentazione - come si ha negli impianti a cumuli che abbiamo precedentemente descritto - e dotati di tecnologia avanzata.

Si tratta di impianti generalmente usati per la prima fase del processo (*bio-ossidazione accelerata*) che necessita di un controllo di processo superiore a quella della seconda fase, soprattutto in ordine ai problemi ambientali. Nella maggior parte di questi impianti, infatti, si ha anche il trattamento dell'aria espulsa, per limitare le emissioni in atmosfera di inquinanti gassosi e polveri.

Indipendentemente dalla tipologia costruttiva si tratta di impianti a processo controllato, con sonde che misurano la temperatura dell'aria e controllano l'andamento dei processi biologici tramite l'O₂ e/o la CO₂ secondo la relazione:

$$Q_r = \frac{[O_2]_{out} + [CO_2]_{out}}{[O_2]_{in}}$$

In cui:

- [O₂]_{out} e [CO₂]_{out} sono le concentrazioni di O₂ e di CO₂ effluenti in un certo istante dal cumulo,
- [O₂]_{in} la concentrazione di ossigeno nell'aria immessa nello stesso.
- Q_r è il coefficiente di respirazione

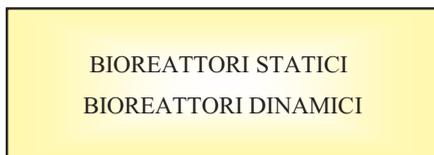
Per un regolare processo di compostaggio il coefficiente di respirazione deve risultare minore di 1 (un valore > 1 indica un eccesso di CO₂ dovuto a condizioni di anaerobiosi): con la ventilazione forzata si deve, pertanto, intervenire per mantenere in ambiente aerobico la massa.

Ai bioreattori fanno riferimento diverse tipologie di impianto, distinguibili tra:

BIOREATTORI VERTICALI
BIOREATTORI ORIZZONTALI
A CORSIE
A CELLE
A CONTAINER
A TUNNEL
A CILINDRO ROTANTE

Oltre che nella diversificazione strutturale, gli impianti devono essere distinti tra *impianti continui* e *impianti discontinui*: nei primi il carico del prodotto avviene con continuità, di norma giornalmente; nei secondi solo dopo la rimozione dall'impianto del prodotto lavorato.

Una ulteriore classificazione, basata sulla movimentazione o meno della massa, prevede la distinzione tra:



Nei reattori statici il materiale caricato non viene movimentato fino allo scarico; nei reattori dinamici il materiale viene periodicamente rivoltato o traslato durante il processo.

In tutti i bioreattori la fase di bioossidazione risulta di durata inferiore rispetto ai tradizionali impianti di compostaggio in cumulo: contro i normali 20-30 giorni dei primi, si completa in 7-15 giorni a seconda del materiale trattato. Per ottenere questo risultato, tuttavia, il processo deve essere ottimizzato sia in termini di qualità del materiale di partenza, sia per gli altri parametri condizionanti il processo.

I BIOREATTORI VERTICALI

I bioreattori verticali sono strutturalmente riconducibili ad un contenitore cilindrico, in acciaio o in calcestruzzo, opportunamente isolato termicamente, avente volume variabile da poche centinaia ad oltre duemila metri cubi, nel quale il carico del prodotto viene effettuato dall'alto e l'estrazione dal basso, con ciclo continuo.

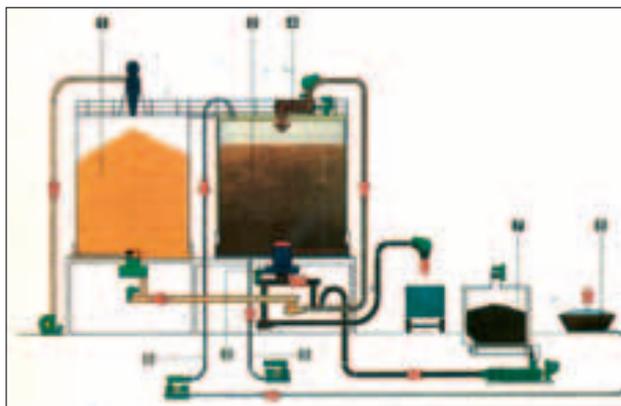


Fig. 3.21 - Schema del reattore verticale a flusso a pistone tipo WEISS. Sono evidenziati: 1. il silos del materiale integrativo, 2. il reattore verticale, 3. il dispositivo di scarico, 4. il dispositivo di carico, 5. il sistema di ventilazione, 6. il sistema di aspirazione dell'aria in uscita, 7. la tramoggia di accumulo del compost da riciclare come inoculo, 8. il biofiltro per il trattamento dell'aria [fonte: WEISS].

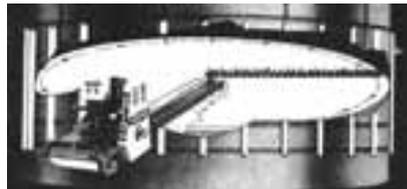


Fig. 3.22 - Apparato di scarico di fondo.

In questi impianti (sistema Weiss e altri), definiti *a flusso a pistone verticale*, l'apporto di ossigeno viene garantito con insufflazione di aria dal fondo del reattore, in controcorrente rispetto al flusso del materiale, per mezzo di una soffiante centrifuga. L'aria esausta viene aspirata dall'alto e convogliata di norma ad un biofiltro.

L'estrazione dal fondo viene effettuata con una fresa cocleare rotante, analoga a quella usata nei silos di uso agricolo. I reattori verticali hanno ormai perso di importanza e sono stati quasi completamente soppiantati dai reattori orizzontali.

Tra gli altri reattori verticali si può ricordare il *reattore tipo Peabody*: è un reattore pluripiano, in cui il materiale procede dall'alto verso il basso con una sosta di 1-2 giorni in ciascun piano della torre. Il passaggio di piano è indotto da un raschiatore rotante e avviene attraverso una apposita apertura. Nella caduta si ha l'ossigenazione della massa per la presenza di un flusso d'aria dal basso verso l'alto.

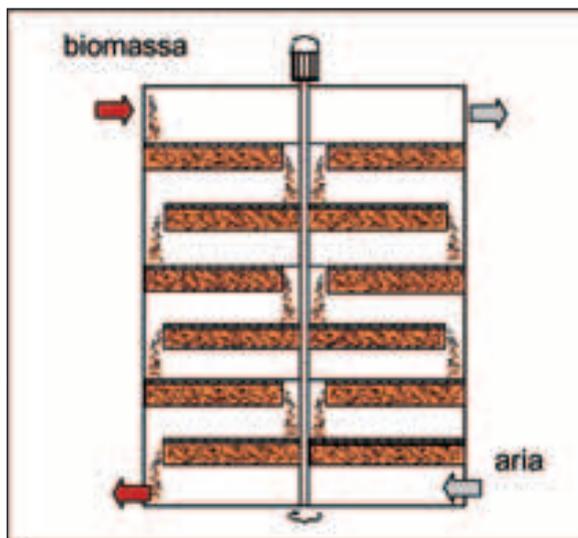


Fig. 3.23 - Schema di reattore verticale tipo PEABODY.

Questo tipo di impianto è strutturato in moduli di 3 metri di altezza ed arriva ad una decina di moduli, superando i 30 metri.

I BIOREATTORI ORIZZONTALI

Differiscono da quelli *a cumulo* (statici o dinamici) per la presenza di pareti in muratura, di altezza variabile da 1 a 3 metri, per la suddivisione dei diversi cumuli. In questi impianti la biomassa viene mantenuta nelle necessarie condizioni aerobiche con insufflazione d'aria, cui spesso viene abbinata la movimentazione meccanica.

L'ambiente è in depressione e l'aria in uscita è inviata al sistema di abbattimento degli inquinanti.

Il carico e lo scarico delle corsie possono essere attuati con sistemi automatizzati a nastro trasportatore o a coclea; in alternativa si utilizza la pala gommata.

A seconda delle modalità di gestione del materiale in compostaggio si ha la differenziazione tra cumuli statici (sola insufflazione d'aria) e sistemi dinamici (con movimentazione del prodotto).

A. I REATTORI A CORSIE

Sono impianti caratterizzati da cumuli di larghezza limitata, di norma non superiore a 6 metri, con lunghezza che può superare i 50 metri. Il ciclo può essere continuo o discontinuo: nel primo caso il carico avviene con frequenza pressoché giornaliera; nel secondo il carico avviene solo dopo aver concluso il ciclo di lavorazione, dopo lo scarico del materiale dall'impianto.

Per gli impianti a ciclo continuo, per definizione *impianti dinamici*, si ha la distinzione tra:

IMPIANTI A FLUSSO LONGITUDINALE

IMPIANTI A TRASLAZIONE LATERALE

A.1. Impianti a flusso longitudinale

In questi impianti il flusso del materiale è unidirezionale, con graduale trasferimento del materiale da una estremità della corsia (zona di carico) all'estremità opposta (zona di scarico).

Gli impianti che adottano questo schema operativo vengono definiti a funzionamento a *flusso a pistone orizzontale*.

L'entità dell'avanzamento del prodotto nella corsia dipende dalla tipologia del rivoltatore adottato e risulta mediamente dell'ordine di 2-3 metri.



Fig. 3.24 - Schema di impianto di compostaggio a corsie a flusso continuo (flusso a pistone orizzontale): la macchina rivoltatrice ritorna a vuoto all'interno del capannone, passando sopra il cumulo. In evidenza i carichi giornalieri.

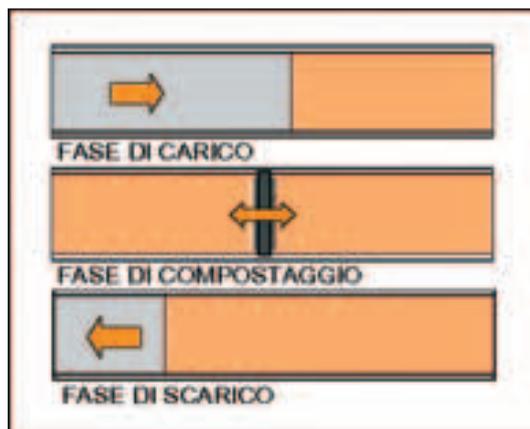


Fig. 3.25 - Schema di impianto di compostaggio a corsie a ciclo discontinuo: in questo caso la macchina rivoltatrice opera nei due sensi. Il carico e lo scarico avvengono sullo stesso fronte.

Il tempo di permanenza della biomassa all'interno della corsia per la sola prima fase del processo di compostaggio risulta dell'ordine di 4 settimane e dipende dalla capacità di ossigenazione della macchina rivoltatrice, dalla presenza o meno di un sistema integrato di ossigenazione ad insufflazione d'aria e, ovviamente, dalla frequenza di rivoltamento.

Negli impianti a ciclo continuo per la prima fase di trattamento, la lunghezza di una corsia di compostaggio (L) risulta:

$$L = n \times L_t \quad (\text{m})$$

ove:

- $n = T/i$ è il numero di rivoltamenti nel periodo considerato (T) effettuati con un intervallo di giorni (i)
- L_t è la traslazione del prodotto (di norma pari a 2-3 m)

Ad esempio: per una durata del processo $T = 27$ gg, un rivoltamento ogni 3 giorni e un avanzamento di 3 metri per rivoltamento, il numero di rivoltamenti nel periodo risulta pari a 9 e la lunghezza della corsia risulta pari a circa $9 \times 3 = 27$ metri.

Il numero di corsie necessarie, determinato dalla quantità di materiale organico affluente nelle 24 ore, risulta:

$$\text{N}^\circ \text{ corsie} = \frac{Q \times i}{M_v \times L_a \times L_t \times H}$$

ove:

- (H) altezza di carico nella corsia (m)
- (L_a) larghezza della corsia (m)
- (L_t) avanzamento nel rivoltamento (m)
- (Q) materiale caricato nell'impianto nelle 24 ore (t/giorno)
- (M_v) massa volumica del materiale (t/m³)
- (i) intervallo tra due rivoltamenti (giorni)

Questa tipologia di impianti è molto diffusa, con soluzioni costruttive diversificate in funzione del materiale da trattare e delle dimensioni dell'impianto.

Impianti tipo Royer, Okada, Sutco

Sono caratterizzati da un rivoltatore a nastro elevatore inclinato (45 e 55° rispettivamente) abbinato ad un rotore anteriore operante in corsie in cemento armato della larghezza di 2-3 m e altezze di 1 - 2 m. La macchina rivoltatrice si muove su binari posti alla sommità delle pareti della corsia ed è dotata di un sistema di sollevamento per il ritorno a vuoto (velocità a vuoto 0-4 m/minuto; velocità di lavoro 0-1,3 m/minuto).

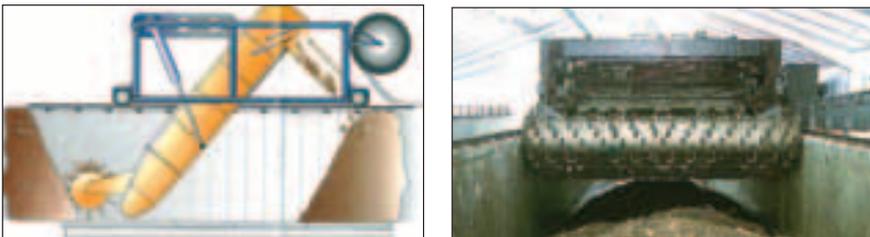


Fig. 3.26 - Schema di impianto a traslazione longitudinale a corsia con rivoltatore a nastro elevatore inclinato abbinato a rotore anteriore [fonte: SUTCO].



Fig. 3.27 - Impianto OKADA di prima generazione.

Impianto tipo BACKHUS

L'apparato rivoltatore è costituito essenzialmente da un rotore del diametro di 1,2 m e della larghezza di 3 m, azionato da un motore da 55 kW, mobile su rotaie ricavate alla sommità delle pareti, dell'altezza massima di 2,2 m. La velocità di rotazione del rotore è lenta, dell'ordine di 100-250 giri/min. La velocità di avanzamento in lavoro è dell'ordine di 3 m/min e di 10 m/min in fase di ritorno, che avviene con rotore sollevato. L'avanzamento del prodotto è di circa 2 metri per passata. La capacità di lavoro viene indicata da 300 a 1500 m³/ora a seconda della qualità del materiale.

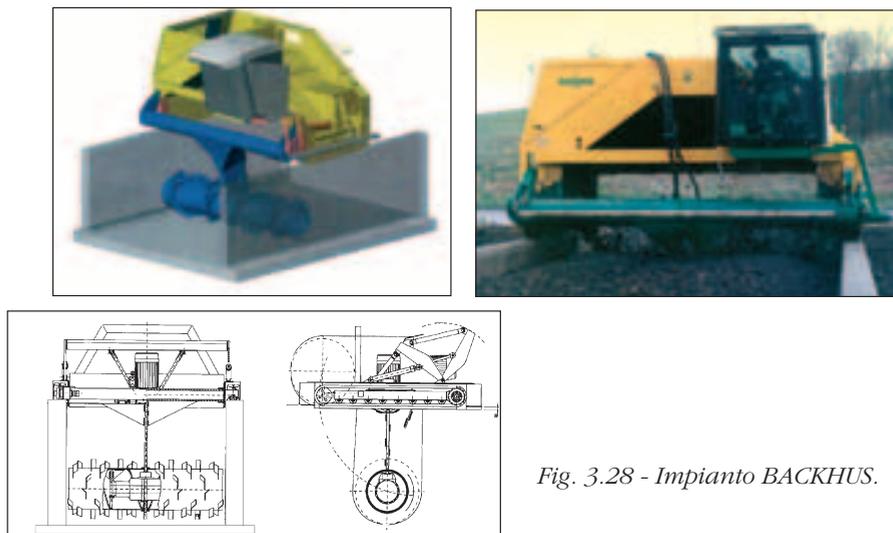


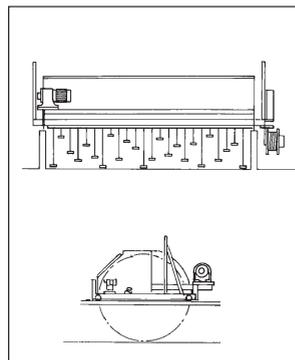
Fig. 3.28 - Impianto BACKHUS.

Impianto tipo Okada, Farmer automatic, Scolari-Emmepi

Le macchine rivoltatrici sono caratterizzate da un rotore a flagelli (di forma diversa a seconda del materiale da compostare) del diametro di circa 2-3 m - cui corrisponde un analogo avanzamento del prodotto - azionato da motori elettrici per una potenza totale di circa 15-30 kW a seconda del tipo di prodotto e della larghezza della corsia variabile da 3 a 6 m, con altezza delle pareti di 1,0-1,5 metri.



Fig. 3.29 - Macchina con apparato di rivoltamento a palette [foto: EMMEPI].



Le macchine si muovono su rotaie e vengono sollevate per il ritorno a vuoto e possono essere traslate da una corsia all'altra con apposita attrezzatura. Una macchina può servire, pertanto, più corsie di compostaggio.

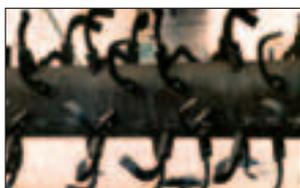


Fig. 3.30 - Macchina rivoltatrice con rotore a flagelli [foto: KISHII].

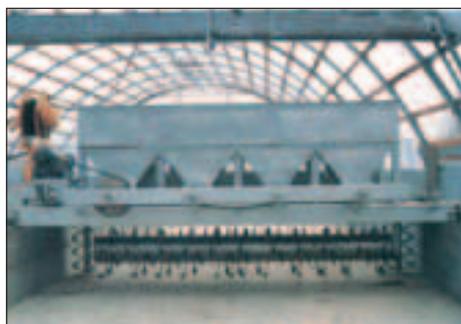


Fig. 3.31 - Attrezzature per il trasferimento della macchina rivoltatrice [foto: FARMER AUTOMATIC e OKADA].



Questa tipologia di impianto viene preferenzialmente utilizzata, date le caratteristiche dell'apparato rivoltatore, per le deiezioni zootecniche, per i fanghi biologici di impianti di depurazione civili e agro-alimentari e, comunque, per materiale

di granulometria tendenzialmente fine; non si prestano di norma per materiali grossolani come i ligno-cellulosici.

La limitata altezza di carico dipende proprio da questa prevalente destinazione degli impianti.

Il funzionamento è quello tipico delle corsie, con carico ad una estremità della pista e scarico all'estremità opposta: il carico viene generalmente effettuato con pala gommata.

Il mantenimento delle condizioni ottimali di processo è demandato all'apparato rivoltatore; solo in qualche caso l'ossigenazione è integrata con l'insufflazione di aria attraverso la pavimentazione: la soluzione più adottata è quella di prevedere l'insufflazione dell'aria solo nella parte iniziale della corsia (prima metà) ove maggiori sono i rischi di insorgenza di fenomeni fermentativi anaerobici.

Il rivoltamento è di norma giornaliero.

L'avanzamento del materiale nella corsia è dell'ordine di 1-3 metri a seconda del modello di rivoltatore.



Fig. 3.32 - Tipico impianto di impiego zootecnico in struttura tipo serra [foto: SCOLARI].



Fig. 3.33 - Impianto con predisposizione per la ventilazione forzata: in evidenza le zone in grigliato nella pavimentazione e la tubazione di mandata dell'aria [foto: EMMEPI].

Impianto tipo Kishi

La macchina rivoltatrice è simile a quella del sistema Okada, ma ha la peculiarità di avere la tramoggia di carico e di operare in una pista ellittica. Il carico viene fatto per strati sovrapposti e nella prima metà dell'impianto. Il vantaggio di questo sistema di compostaggio è essenzialmente riconducibile alla possibilità di caricare sulla corsia del materiale con umidità superiore a quella di norma indicata per il processo di compostaggio, cioè superiore al 65%. Con il carico del nuovo materiale sopra a quello già alla temperatura di processo si ha, infatti, una rapida evaporazione dell'acqua in eccesso.

E' una tipologia di impianto che ben si presta per il trattamento dei fanghi biologici, ovviamente in co-compostaggio con altri materiali.

Il carico della tramoggia viene effettuato con nastro trasportatore o coclea collegati

con la tramoggia di carico esterna.



Fig. 3.34 - Impianto KISHI con in evidenza oltre alla pista ellittica anche il rullo avvolgitore del cavo elettrico di alimentazione, il dispositivo di rotazione e l'apertura della corsia, nonché la coclea di carico della tramoggia.

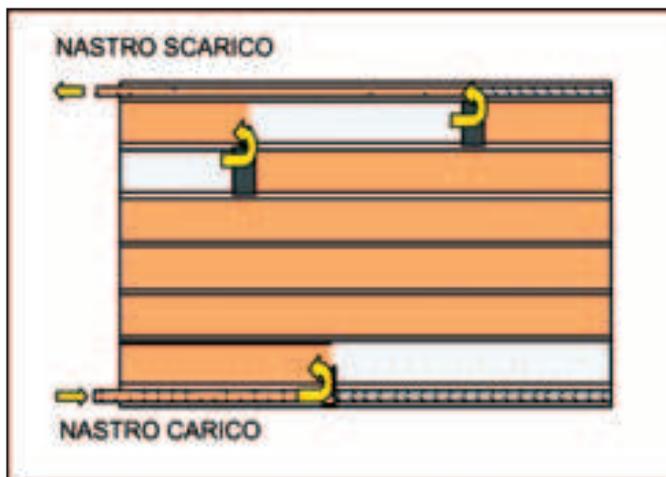


Fig. 3.35 - Impianto tipo KISHI dopo la distribuzione di fanghi: operando per strati sovrapposti è possibile caricare anche prodotti con umidità superiore allo standard del compostaggio.

A.2. Impianti a traslazione laterale

In queste corsie ad ogni passaggio della macchina rivoltatrice il materiale viene traslato nella corsia adiacente. Con questa strutturazione dell'impianto si ha il vantaggio di poter utilizzare un nastro trasportatore *a navetta* semplificando le operazioni di carico. Questo, infatti, viene effettuato sempre nella corsia attigua al nastro trasportatore.

Fig. 3.36 - Con le macchine rivoltatrici a traslazione laterale è possibile utilizzare il carico con nastro trasportatore a navetta.



Uno dei sistemi più noti è quello *OTV*, caratterizzato da corsie della larghezza di 4 metri e altezza pari a 1,7 m. In questo processo il carico viene effettuato indicativamente ogni due-tre giorni (tempo necessario al riempimento della corsia).

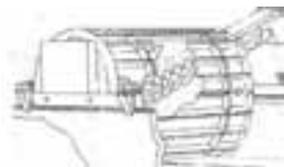


Fig. 3.37 - Impianto a traslazione laterale sistema OTV.



La macchina rivoltitrice è costituita da un rotore del diametro di circa 3,6 m che, avanzando, solleva il materiale della corsia e lo trasferisce nella corsia attigua per mezzo di un apparato di traslazione composto da due coclee. Il materiale movimentato dalla macchina nell'ultima corsia viene trasferito direttamente su un secondo nastro trasportatore per il trasferimento al locale ove si avrà la seconda fase del compostaggio.

Il trasferimento della macchina rivoltitrice da corsia a corsia avviene con carrello traslatore, dopo ritorno a vuoto.

La velocità di avanzamento del rivoltatore in lavoro è dell'ordine di 3,7 m/minuto e quella di ritorno è analoga. La capacità di lavoro è indicata in 220 m³/ora.

La potenza è di 15 kW per il rotore e di 7,5+7,5 kW per le due coclee traslatrici.

B) I REATTORI A CORSIE A CICLO DISCONTINUO

La differenza significativa dagli impianti a corsia a ciclo continuo è riconducibile alle modalità di carico: mentre nella tipologia continua si viene a creare nella corsia un flusso continuo di materiale da una estremità all'altra, negli impianti discontinui viene dapprima completato il carico della pista, poi si iniziano le operazioni di rivoltamento/ossigenazione della massa.

Il carico può essere effettuato con pala gommata, con nastri navetta, con carroponte.



Fig. 3.38 - Impianto a corsie con in primo piano il nastro trasportatore a navetta utilizzato per il carico [foto: DE NICOLA].

In realtà non c'è una netta distinzione tra gli impianti che spesso hanno un funzionamento intermedio tra il continuo e il discontinuo.

Negli impianti strettamente discontinui a movimentazione meccanica la macchina rivoltatrice opera alternativamente nel senso longitudinale della corsia: è, quindi, indispensabile disporre di macchine che possano invertire il senso di marcia o di carrelli che possano effettuare la rotazione di 180° del rivoltatore.

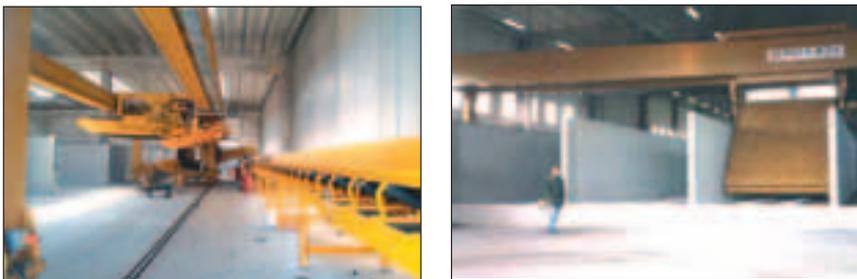


Fig. 3.39 - Impianto a corsie con rivoltatrice a nastro elevatore su ponteggio aereo che ne consente il trasferimento da corsia a corsia: a destra la macchina in posizione di lavoro - inclinazione di 45° - a sinistra in posizione di ritorno a vuoto [foto: DE NICOLA].

C) IMPIANTI “A BACINO”

Questi impianti, definiti anche *impianti a bacino*, prevedono una corsia-platea unica di consistente larghezza (fino a 30 metri) ed una altezza del cumulo fino a 3 metri. Il cumulo viene generalmente definito *a tavola*.

In questa tipologia di impianto la movimentazione del materiale avviene per settori longitudinali o trasversali, come se di fatto si operasse entro singole corsie.



Fig. 3.40 - Impianto a bacino di grandi dimensioni con in evidenza il carroponte [foto: SCT].



Nella maggior parte degli impianti si opera con rivoltatori portati da carroponte, oltre a quelli semoventi, il cui ruolo è anche quello di effettuarne la traslazione da settore a settore e di consentirne il ritorno a vuoto.

Per questi impianti vanno ricordati i rivoltatori:

- a nastro elevatore inclinato,
- a rotore a tazze,
- a coclee verticali o inclinate

Il carico viene generalmente effettuato mediante dei nastri trasportatori e viene fatto avanzare verso l'estremità di scarico con i successivi rivoltamenti. Nell'ultimo rivoltamento il materiale viene di norma scaricato su un sistema a nastri di trasporto per essere avviato alla fase di maturazione.



Fig. 3.41 - Impianto a bacino in fase di realizzazione con in evidenza la predisposizione a pavimento delle tubazioni per la ventilazione forzata [foto: SCT].



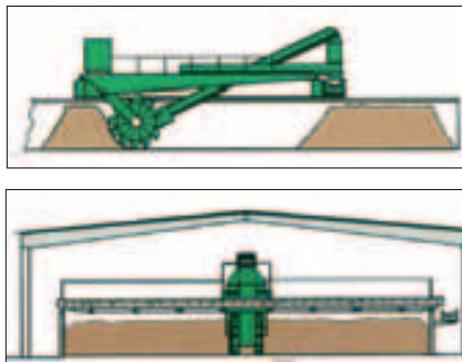
Fig. 3.42 - Impianto a platea con in evidenza il pavimento con i canali di insufflazione di aria e l'impianto di aspirazione dell'aria [fonte: HORSTMANN].

Impianti tipo Buebler, Weser, VKW

Sono impianti basati sull'impiego di un apparato rivoltatore *a tazze* portato dal carroponete: questo scarica il materiale sollevato in posizione posteriore (fase di lavoro normale) o su un nastro trasportatore (scarico dell'impianto).

L'apparato traslatore è azionato da motori elettrici ed idraulici. La potenza installata è dell'ordine di 80-90 kW . Il ciclo è automatizzato.

Fig. 3.43 - Vista longitudinale del sistema di movimentazione del materiale in un impianto a platea con rivoltatore a tazze, con in evidenza anche il nastro trasversale (sopra). Vista trasversale con in evidenza il carroponete, il rivoltatore "a tazze", il nastro trasversale e quello longitudinale di scarico (sotto) [fonte: VKW].



Le diverse soluzioni costruttive dei *rivoltatori a tazze* differiscono per forma e dimensioni delle tazze , per diametro del rotore e profondità di lavoro.

La durata della prima fase del processo è dell'ordine di 4 settimane a seconda dell'intensità del materiale in compostaggio e dell'intensità dell'aerazione del cumulo.

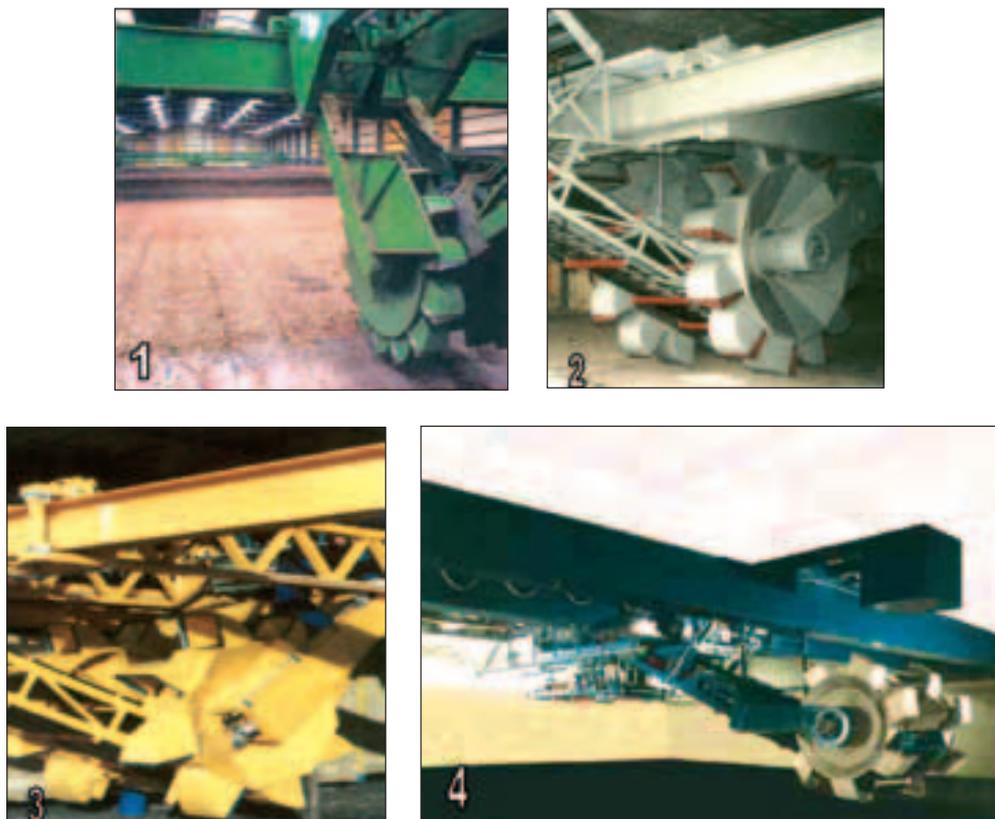


Fig. 3.44 - Rivoltatori a rotore a tazze su ponteggio aereo:
1. BUEHLER, 2. VKW, 3. KUM, 4. WESER INGENEERING.

Impianto tipo HORSTMANN

Questo tipo di impianto è assimilabile al precedente per la tipologia di rivoltatore, anch'esso definibile a *rotore a tazze*. La differenza significativa di questo impianto è il trasferimento del materiale movimentato dal traslatore ad un'altra zona dell'impianto: il prodotto prelevato dal rivoltatore, infatti, viene caricato dal nastro trasportatore del primo ponteggio su un altro nastro, che lo invia ad un secondo ponteggio dove viene ridistribuito. L'impianto ha funzionamento intermedio tra gli impianti statici, in cui il prodotto rimane sul posto per tutto il ciclo, e quelli continui.

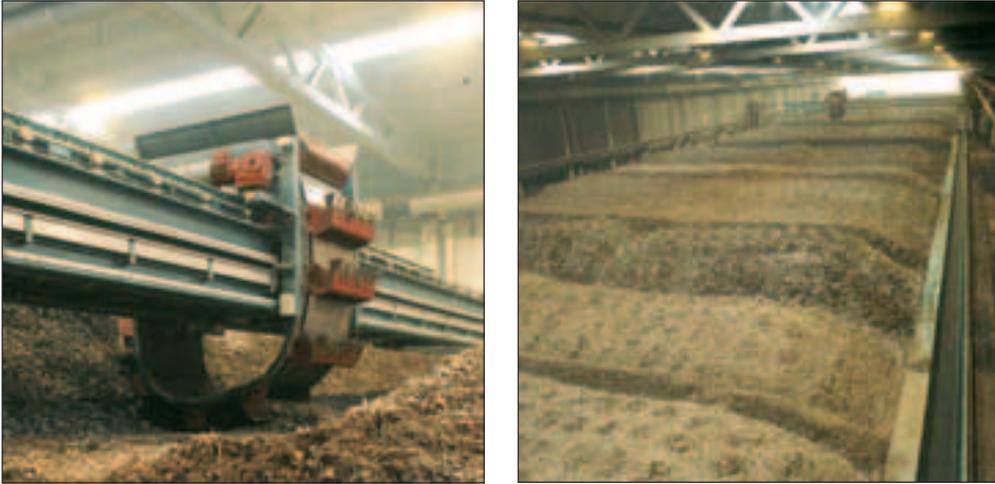


Fig. 3.45 - Impianto HORSTMANN: a sinistra l'apparato rivoltatore a rotore a tazze montato su ponteggio aereo e a destra una vista dell'impianto in cui si notano: sullo sfondo uno dei due ponteggi con il rivoltatore, i diversi cumuli che costituiscono la platea e uno dei nastri trasportatori longitudinali utilizzati per la movimentazione del prodotto.

Il sistema opera come un impianto a corsie, anche se non si ha la presenza di pareti divisorie tra corsia e corsia. Il sistema prevede due macchine rivoltatrici in grado di muoversi sui due ponteggi aerei, dotati anche di movimenti sulla verticale in modo da poter operare su tutto lo strato di materiale (2,5 metri) presente nell'impianto. Il ponteggio aereo è dotato di nastro trasportatore a navetta, utilizzabile sia per il carico dell'impianto (essendo collegato con il nastro longitudinale di carico) che per lo scarico (per mezzo di un secondo nastro longitudinale). Il carico del prodotto viene fatto per settori trasversali proprio come in un impianto discontinuo.

Impianto tipo De Nicola

L'apparato di rivoltamento è del tipo a nastro elevatore con inclinazione in lavoro di circa 45°. La macchina è mobile su un ponteggio aereo e può essere dotata di ralla per la rotazione di 180°: in questo modo la macchina può operare anche durante il ritorno (e quindi il materiale ritornerà verso l'estremità di carico della corsia).

Per il ritorno a vuoto il nastro viene sollevato in posizione orizzontale. La macchina ha una larghezza di lavoro di 3,4 metri e può operare con cumuli dell'altezza massima di 2,5-2,6 m.

Il rivoltatore è comandato da un impianto idraulico azionato da motori elettrici della potenza complessiva di 110 kW.

L'avanzamento del materiale in compostaggio è di circa 6 m per ogni rivoltamento. La velocità di avanzamento massima in lavoro è di 2 m/minuto e quella a vuoto di 12 m/minuto.

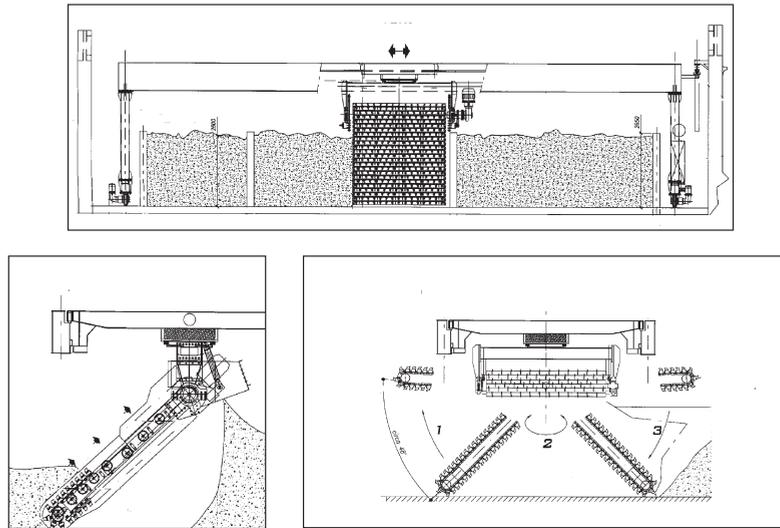


Fig. 3.46 - Schemi funzionali del sistema di rivoltamento DE NICOLA che può operare anche in impianti a corsie: sopra visione anteriore della macchina; sotto a sinistra, visione trasversale, sotto a destra indicazione della posizione di lavoro e di ritorno a vuoto.

Impianti a coclee verticali

Il rivoltamento - ossigenazione del materiale nella corsia è ottenuto tramite un dispositivo a coclea inclinata portata ed azionata dal carroponete. Tale sistema viene usato in impianti a ciclo discontinuo, non prevedendo l'avanzamento del prodotto.



Fig. 3.47 - Impianto di rivoltamento a coclea: 1. TYSSEN, 2. SCT.



Fig. 3.48 - Impianto di rivoltamento cocleare con in evidenza le due coclee ed il nastro trasportatore di servizio all'impianto [foto: SCT].

Le coclee sono di lunghezza e diametro variabile a seconda delle esigenze: si arriva ad lunghezza di 4,0 m per lavorare su cumuli dell'altezza massima di 3,3 m. La potenza installata è di 7-80 kW. La capacità di movimentazione viene indicata da 100 a 250 m³/ora.

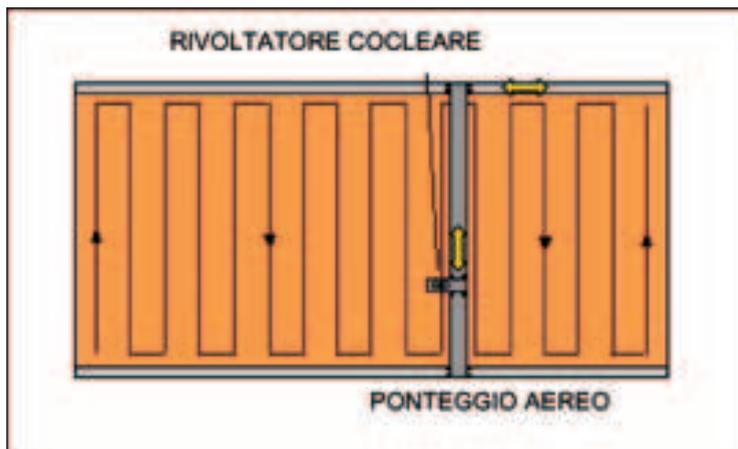


Fig. 3.49 - Schema del funzionamento di un impianto a rivoltamento cocleare.

D) I BIOREATTORI ORIZZONTALI CILINDRICI

I bioreattori orizzontali cilindrici sono generalmente impianti di tipo continuo e sono costituiti essenzialmente da un cilindro leggermente inclinato sul piano orizzontale, del diametro di 2 - 4 m e lunghezza fino a 45 m, mantenuto in rotazione lenta (0,2 - 2 giri al minuto) e operante ad insufflazione dell'aria in controcorrente rispetto al flusso dei rifiuti. Il cilindro presenta al suo interno dei

profili elicoidali taglienti che favoriscono ad un tempo l'avanzamento del prodotto nella rotazione del cilindro e la rottura di eventuali sacchetti di plastica.

Il reattore, riempito fino a 2/3 della sua capacità, ha un ciclo di lavorazione per la prima fase di compostaggio indicativamente di una settimana, potendo risultare anche sensibilmente inferiore per matrici organiche caratterizzate da un elevato indice di respirazione, scendendo a soli 2-3 giorni.



Fig. 3.50 - Particolari di impianti a cilindro rotante DANO [fonte: ICS].

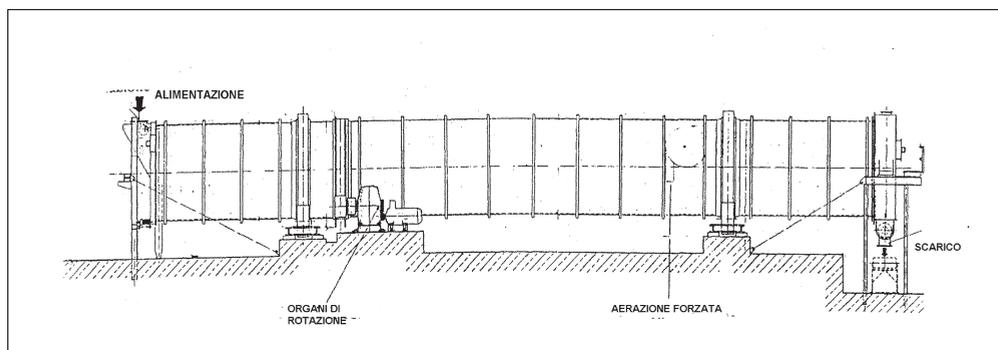


Fig. 3.51 - Schema di un reattore tipo DANO [fonte: Consorzio Compostatori Italiani].

E) LE BIOCELLE

Nell'ultimo decennio si è assistito ad una continua evoluzione tecnologica di questa tipologia di impianti, ormai arrivata a livelli di piena affidabilità. Si tratta di impianti chiusi a perfetta tenuta, nei quali il materiale in compostaggio viene mantenuto in ambiente controllato.

Peculiarità di questi impianti è la ventilazione forzata attuata generalmente in compressione con insufflazione dalla pavimentazione e aspirata dalla sommità della cella. Lo schema funzionale delle biocelle è discontinuo: a completamento del carico del materiale segue la chiusura della cella e inizia il processo, che mediamente dura due settimane.

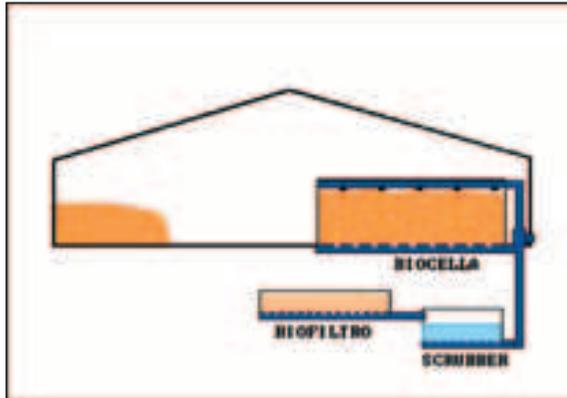


Fig. 3.52 - Schema di impianto di compostaggio a cella (1), con in evidenza il flusso dell'aria che prima di essere immessa in atmosfera viene convogliata ad un impianto di lavaggio (2) prima del biofiltro (3).

Sono impianti essenzialmente derivati da quelli utilizzati nelle fungaie per la preparazione del materiale organico (*composta*) che costituisce il letto di coltivazione del micelio.

Il vantaggi di questa tipologia di impianto sono essenzialmente riconducibili a:

- possibilità di controllare il processo con sistemi computerizzati: la ventilazione viene regolata in funzione dell'andamento delle attività biologiche, monitorate con sensori di temperatura, misuratori di umidità, ossigeno e/o biossido di carbonio presenti nell'aria. Ciò offre maggiori garanzie sulla qualità del compost in uscita dall'impianto, importante nei processi di produzione di compost di qualità;
- maggior controllo delle emissioni di inquinanti in atmosfera attraverso il convogliamento dell'aria esausta al biofiltro;
- maggiore facilità di effettuare il ricircolo dell'aria anziché introdurre con continuità nei cumuli aria prelevata all'esterno, con vantaggi per il processo nel periodo invernale;
- eliminazione della presenza dell'uomo a contatto con il prodotto in compostaggio: questo aspetto va valutato con particolare attenzione, non trattandosi di cosa di poco conto, considerato che nei rifiuti la carica patogena può essere elevata.

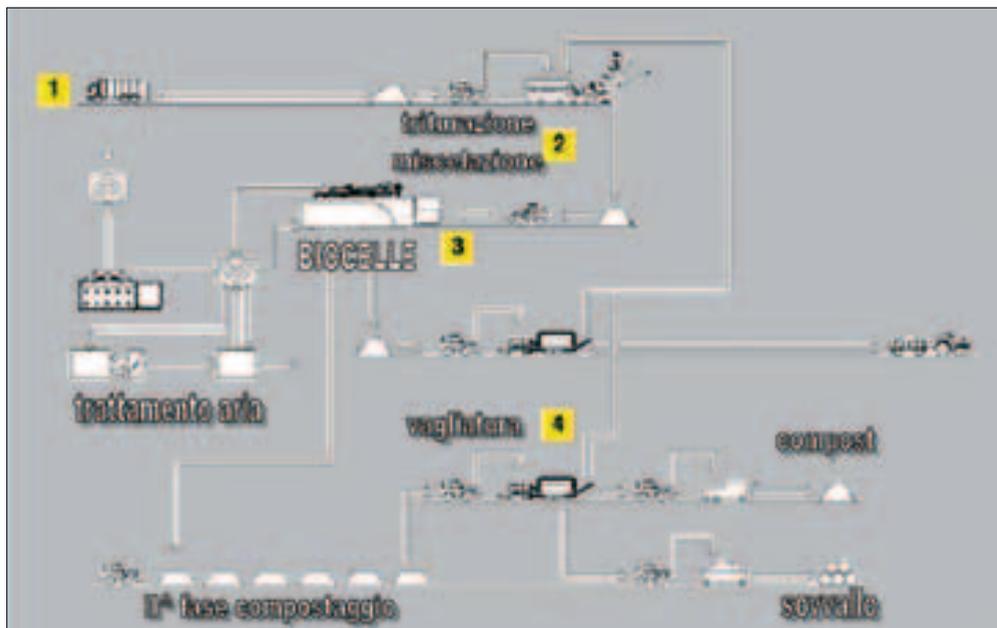
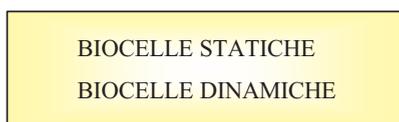


Fig. 3.53 - Schema generale del processo di compostaggio con biocelle: 1. Arrivo materiale; 2. triturazione/miscelazione; 3. carico cella; 4. fasi successive: completamento del processo in cumulo (II fase), vagliatura finale [fonte: HERHOF].

La differenziazione delle biocelle si ha non solo nelle dimensioni, ma anche per la staticità o meno del materiale all'interno della cella e per le modalità di carico e scarico.

La distinzione più importante delle biocelle può essere fatta tra:



Nelle biocelle statiche il materiale non subisce spostamenti per tutta la durata del processo; nelle biocelle dinamiche il materiale viene movimentato all'interno della cella con sistema automatizzato.

La struttura delle biocelle

L'unità di compostaggio è a pianta rettangolare, di dimensioni variabili da 100 a 1000 m³:

- lunghezza: si possono anche superare i 50 metri;

- larghezza: di norma non supera i 4 metri, anche in relazione ai problemi di realizzazione di portoni a perfetta tenuta;
- altezza: si mantiene mediamente al di sotto di 4 metri, con un'altezza di carico di circa 3 metri. Altezze superiori creerebbero, infatti, un'eccessiva compattazione della massa con conseguente difficoltà di passaggio dell'aria attraverso il materiale.

La *struttura portante* può essere gettata in opera o in struttura prefabbricata: in ogni caso è buona norma disporre di un manufatto isolato termicamente, in modo da contenere le dispersioni, per irraggiamento, dal cumulo in fermentazione verso l'ambiente esterno; ovviamente non sono evitabili le dispersioni per convezione a seguito della ventilazione forzata. Viene in genere utilizzato un isolamento esterno.

La *pavimentazione* costituisce l'elemento forse più importante della biocella: da una corretta realizzazione del sistema di immissione dell'aria nella massa dipende, infatti, il risultato sia in termini di qualità del materiale ottenuto, sia in termini energetici.

Le soluzioni adottate sono:

- pavimentazione a canali;
- pavimentazione con diffusori inseriti nella gettata;
- pavimentazione con sottostante camera di espansione dell'aria.

Nel pavimento deve anche essere realizzata la canalizzazione per l'allontanamento del percolato che può ingenerarsi con biomasse eccessivamente umide, o anche per effetto dell'umidificazione del materiale in cumulo (effettuata nel caso di una sua eccessiva disidratazione).

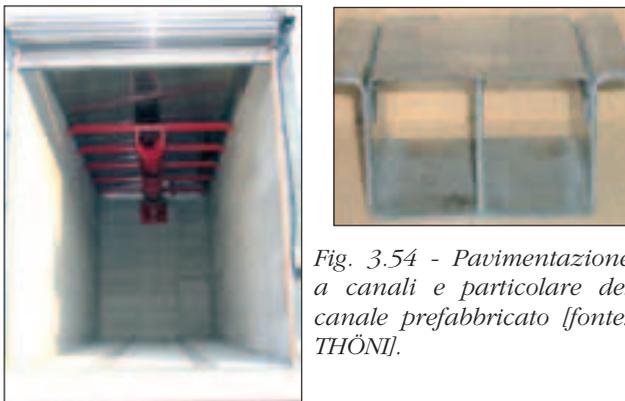


Fig. 3.54 - Pavimentazione a canali e particolare del canale prefabbricato [fonte: THÖNI].

La qualità della pavimentazione è particolarmente importante, risultando a contatto

con materiale corrosivo come il percolato e dovendo sopportare un carico dell'ordine di 0,15-0,18 kg/cm².



Fig. 3.55 - Pavimentazione prefabbricata a fori [fonte: HERHOF].



Fig. 3.56 - Diffusori dell'aria in una biocella in fase di costruzione [foto: HORSTMANN].

La normale pavimentazione viene sostituita nelle biocelle dinamiche con un pavimento mobile, utilizzabile comunque anche nelle biocelle statiche. E' questa una peculiarità delle tipologie utilizzate nelle fungaie.



Fig. 3.57 - Particolare della pavimentazione a tappeto mobile di una biocella dinamica THÖNI.



Fig. 3.58 - Camera di espansione dell'aria in una biocella a pavimentazione mobile [foto: CHRISTIAENS].

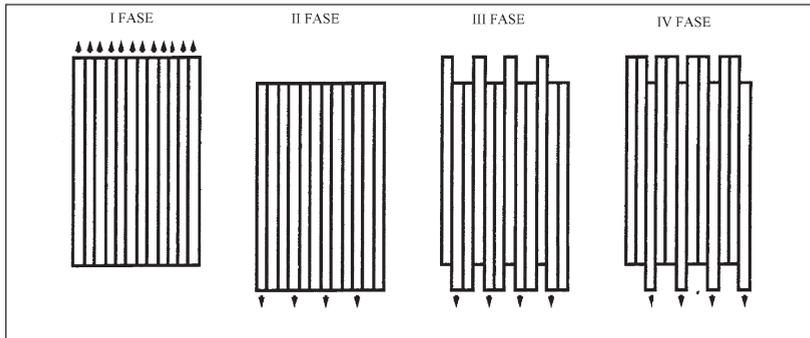


Fig. 3.59 - Schema del funzionamento della pavimentazione mobile tipo HORSTMANN.

Sistemi di carico

Nelle biocelle il sistema di carico più usato è quello meccanico con pala gommata. Alcuni impianti sono dotati di dispositivi di carico a nastro trasportatore a navetta e a coclea.



Fig. 3.60 - Il sistema di carico delle celle più usato: la pala gommata [foto: GICOM].

I vantaggi dell'impiego di impianti centralizzati sono riconducibili a: minor impiego di manodopera e minore compattazione della massa nella biocella. Quest'ultimo è, forse, il vantaggio maggiore. Si ha come contropartita, ovviamente, il maggiore investimento iniziale rispetto al normale impiego della pala gommata.



Fig. 3.61 - Particolare di una coclea utilizzata nelle biocelle dinamiche THÖNI e bocchetta di ispezione.

Allo stato attuale l'impiego del sistema di carico automatico sembra preferibile per i grandi impianti, con tendenza, peraltro, alla semplificazione del sistema nel caso di biocelle statiche.



Fig. 3.62 - Particolari di un nastro telescopico di carico in una biocella [foto: CHRISTIAENS].



Fig. 3.63 - Schema di impianto a biocelle statiche con sistema centralizzato di carico e scarico [fonte: HERHOF].

Sistemi di scarico

Lo scarico delle celle avviene nella maggior parte dei casi con pala gommata: è questa la soluzione meno impegnativa dal punto di vista degli investimenti iniziali, ma che comporta oneri di gestione superiori rispetto alle soluzioni automatizzate. Nelle prime biocelle realizzate lo scarico è attuato utilizzando la pavimentazione mobile abbinata ad una macchina scaricatrice a rotore, posizionata sul portone. Questa macchina è collegata con una serie di nastri al locale ove il materiale subirà la II^a fase del processo.



Fig. 3.64 - Sistema di scarico di una biocella a pavimentazione mobile [foto: CHRISTIAENS].



Fig. 3.65 - Particolare del rotore di scarico di una macchina per il prelievo del compost visto dall'interno di una biocella a pavimentazione mobile GICOM.

Il sistema di ossigenazione

Per l'aerazione della massa vengono utilizzati ventilatori centrifughi dimensionati per garantire una portata d'aria massima di 10-12 m³/h·m³ di cella ad una prevalenza massima dell'ordine di 120-150 mm C.A..

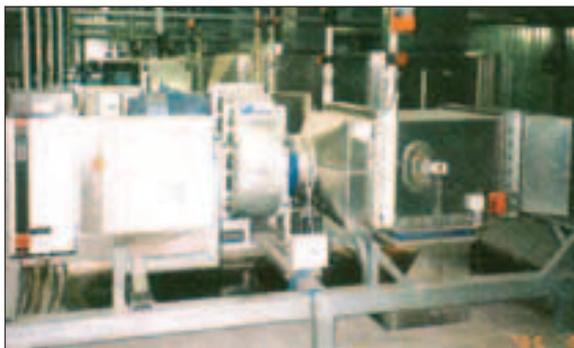
Con l'impiego di una serie di elettrovalvole comandate dal sistema computerizzato di controllo del processo è possibile convogliare l'aria al biofiltro o riciclarla alla biocella.

Di norma il sistema prevede il prelievo dell'aria dalla sommità della cella attraverso una serie di bocchette di aspirazione.



Fig. 3.66 - Impianto di aerazione di un complesso di biocelle [foto: HERHOF e HORTSMANN].

Fig. 3.67 - Impianto di aerazione di biocelle, con in evidenza anche lo scambiatore di calore per il preriscaldamento dell'aria in entrata [foto: GICOM].



Il sistema di umidificazione

Alla sommità della cella è previsto di norma un sistema di nebulizzazione per l'umidificazione del materiale; si può prevedere il riutilizzo del percolato prodotto. L'azionamento dell'impianto avviene con intervento manuale o su controllo dell'umidità dell'aria espulsa dalla biocella.

Fig. 3.68 - Particolare di interno di una biocella HORSTMANN con in evidenza sul soffitto le bocchette di aspirazione dell'aria e le tubazioni di umidificazione del prodotto.



Le biocelle Herhof

Le biocelle Herhof sono impianti a ciclo discontinuo di tipo statico: sono realizzate in cemento armato e strutturate a pianta rettangolare. Nella configurazione normale hanno una lunghezza fino 30 m e larghezza di 2,9 m (portone dalla misura indicativa di 3x3 m). L'altezza utile di carico è di 3,3 m.

Nelle celle di maggior lunghezza il volume totale risulta, pertanto, dell'ordine di 300 m³.



Fig. 3.69 - Doppia batteria di biocelle HERHOF con impianto di carico-scarico centralizzato [fonte: HERHOF].
 Fig. 3.70 - Batteria di biocelle con in evidenza i portoni basculanti [foto: HERHOF].

Il carico del materiale viene effettuato di norma con pala meccanica, così come lo scarico a fine ciclo. E' possibile, comunque, adottare un sistema di carico automatico a nastro trasportatore telescopico a navetta. Anche lo scarico può essere automatizzato con un sistema di prelievo costituito da rotori dentati che operano verticalmente e scaricano il prodotto su un nastro trasportatore telescopico.

Il sistema di aerazione forzata prevede l'insufflazione d'aria (prelevata dall'esterno o riciclata) attraverso canalizzazioni ricavate nella pavimentazione della cella. Il sistema di insufflazione d'aria è suddiviso in 6 settori, che consentono una aerazione diversificata.

Alla sommità della cella sono presenti le bocchette di aspirazione dell'aria (la scelta del ricircolo o espulsione dell'aria è attuata sulla base delle indicazioni di sonde di temperatura e CO₂ collegate al sistema computerizzato di elaborazione dati) e il sistema di nebulizzazione.

Nel caso di espulsione, l'aria viene dapprima fatta passare attraverso uno scambiatore di calore aria-aria e, poi, attraverso il biofiltro. L'utilizzo di scambiatori di calore (aria espulsa/aria entrante) consente il preriscaldamento dell'aria in entrata: in tal modo nei periodi freddi non si penalizza il processo.

Il programma di controllo delle condizioni di processo prevede 4 fasi successive:

- fase 1 - avvio del processo: durata 1 giorno circa, fino al raggiungimento dei 40°C;
- fase 2 - fase mesofila (dai 40 ai 50°C): durata 4 giorni circa;
- fase 3 - fase termofila (a 60°C): durata di 3 giorni circa (igienizzazione);
- fase 4 - raffreddamento della massa: durata 2 giorni.

La durata della fase di biossidazione si attesta indicativamente su 10 giorni.

Le biocelle GICOM

Sono biocelle di tipo statico, costituite da strutture in c.a. con lunghezza massima fino a 50 m, larghezza fino a 6 m e analoga altezza.



Fig. 3.71- Batteria di biocelle con in evidenza i portoni scorrevoli. Anche questa soluzione può garantire la tenuta necessaria per evitare scambi gassosi con l'esterno [foto: GICOM].

La scelta dimensionale è, ovviamente, condizionata dalla tipologia di materiale da compostare: le dimensioni standard per il compostaggio di residui organici per la produzione di compost di qualità sono indicativamente di 4 metri di larghezza e 4 metri di altezza, per un'altezza media del cumulo di 3,5 metri.

La gestione della cella è effettuata con sistema computerizzato di controllo dell'aria in uscita dalla cella. L'insufflazione dell'aria avviene dalla base della cella, per mezzo di un sistema di tubazioni annegate nella pavimentazione, su cui sono montati degli ugelli troncoconici costituenti una maglia insufflante di 0,30 x 0,30 m.

Le operazioni di carico e scarico possono essere effettuate semplicemente con pala gommata, oppure carico con sistemi a nastro trasportatore a navetta, e scarico con pavimento mobile o con la già vista macchina a rotori fresanti, collegata con nastro trasportatore telescopico. Questo sistema di scarico è generalmente usato negli impianti per fungaie.

La Gicom produce anche biocelle in kit prefabbricato e premontate. Il sistema prevede tre elementi costituiti da:

- unità trattamento biomassa: la biocella di lunghezza 13 m, larghezza 3 m, altezza 3 m.
- unità di ossigenazione: comprende i ventilatori, canali di distribuzione aria, quadro di comando;
- unità trattamento aria in uscita: il biofiltro.

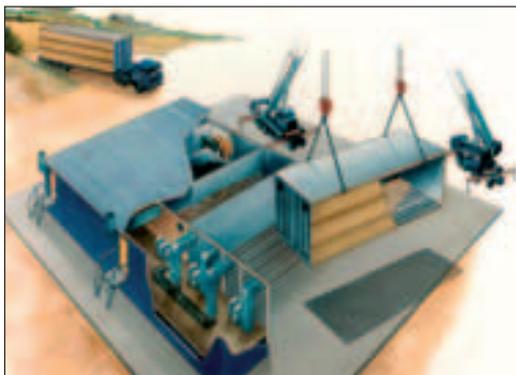


Fig. 3.72 - Schema del trasporto e montaggio di biocelle prefabbricate GICOM.

Le biocelle HORSTMANN

Queste biocelle non differiscono sostanzialmente da quelle statiche già descritte. Per il carico si utilizzano anche nastri trasportatori telescopici e può essere utilizzato un pavimento mobile.



Fig. 3.73- Complesso di biocelle HORSTMANN con particolare del sistema di controllo dell'aria.

Negli impianti a più biocelle ogni unità di trattamento è indipendente e l'aria prima di essere convogliata al biofiltro viene trattata con un sistema di lavaggio per un primo abbattimento dei composti gassosi idrosolubili e delle polveri.

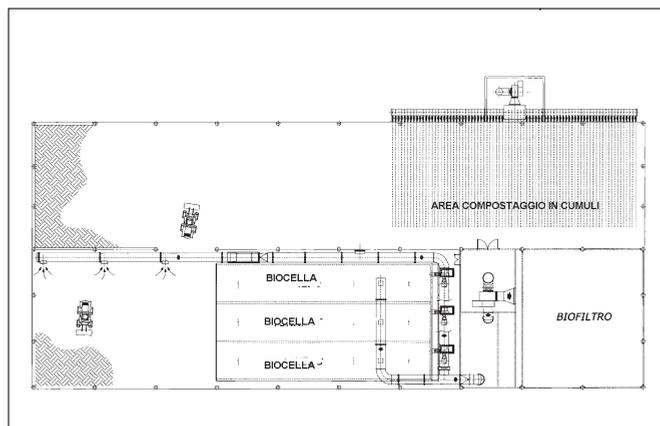


Fig. 3.74 - Schema di impianto a n.3 biocelle con area di compostaggio in cumulo aerato per la seconda fase del processo [fonte: HORSTMANN].

Il sistema di aerazione della massa è costituito da un sistema di tubazioni annegate nella pavimentazione delle celle e dotate di appositi diffusori brevettati. Il ricircolo o l'espulsione dell'aria viene comandato da computer.

Le biocelle THÖNI

La biocella Thöni si inserisce tra gli impianti di tipo dinamico ed è realizzata da una struttura modulare prefabbricata in c.a. o in acciaio inox, con un sistema di isolamento termico esterno a pannelli sandwich. La larghezza della biocella è di 2,5 m e la lunghezza standard di 13 m. La parte superiore del modulo ha sezione triangolare per poter ospitare il dispositivo cocleare di carico, dotato di n. 5 bocchette di scarico del materiale, opportunamente posizionate lungo l'asse longitudinale della cella.

Questa coclea è collegata con altre coclee che, nel loro insieme, costituiscono il sistema di carico e ricircolo.



Fig. 3.75 - Batteria di biocelle dinamiche THÖNI con in evidenza la coclea inclinata di carico/ricircolo e quella frontale di scarico.



Fig. 3.76 - Il nuovo modulo di biocella a due unità THÖNI.

Alla sommità del modulo è installato anche il sistema di prelievo dell'aria (in depressione) per il suo ricircolo o convogliamento alla batteria di biofiltri al fine di abbattere gli inquinanti.

L'ossigenazione del materiale in compostaggio è attuata per insufflazione di aria dalla base della cella ed è ottimizzata grazie alla movimentazione del prodotto.

Ogni biocella è dotata di n. 2 ventilatori per l'insufflazione e di n. 1 ventilatore per il recupero dell'aria satura. L'aerazione della massa è intermittente, pari mediamente a 18 ore su 24, viene attivata al superamento della soglia termica prefissata (55-65°C) e si mantiene fino a raggiungere un livello inferiore anch'esso pre-impostato, di circa 10-15°C al di sotto della temperatura critica superiore.

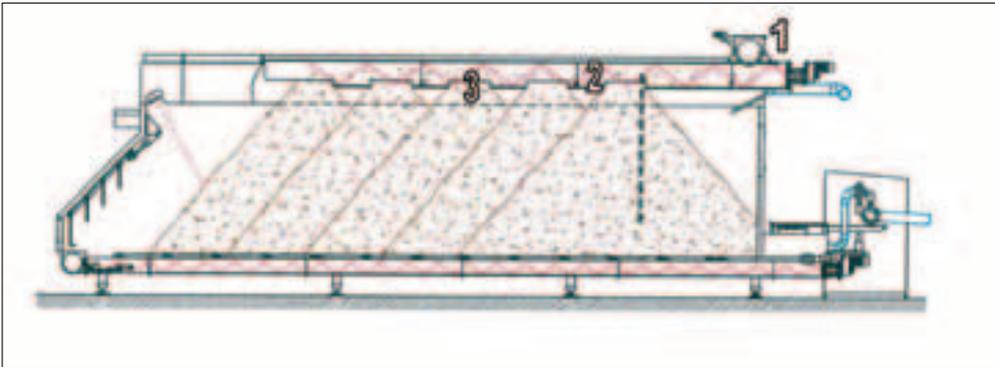


Fig. 3.77 - Schema del sistema di carico e movimentazione delle celle dinamiche THÖNI con in evidenza: 1. la coclea di arrivo/ricircolo prodotto, 2. la coclea longitudinale di carico, 3. una delle bocchette di scarico.

La movimentazione del materiale è resa possibile dalla pavimentazione mobile della cella che trasporta il prodotto verso l'estremità opposta a quella dell'arrivo del prodotto e lo scarica su una coclea trasversale. Questa scarica il prodotto sulla coclea di trasporto del materiale di carico dalla zona di preparazione della miscela organica che, a sua volta lo scaricherà sulla coclea di sollevamento verso la coclea di carico della cella.

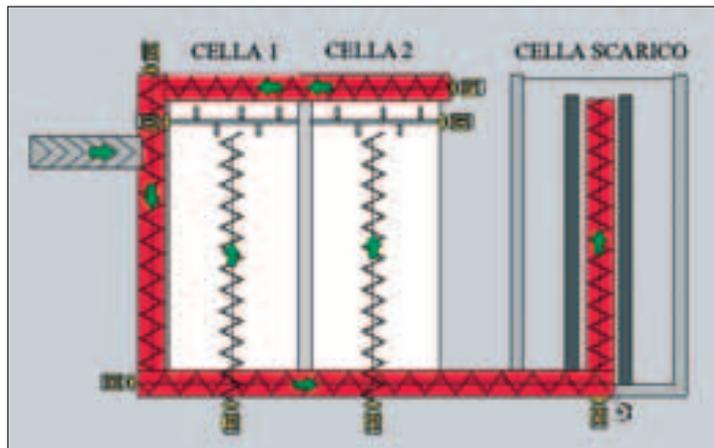


Fig. 3.78 - Lay-out di una batteria di n.2 biocelle dinamiche THÖNI.

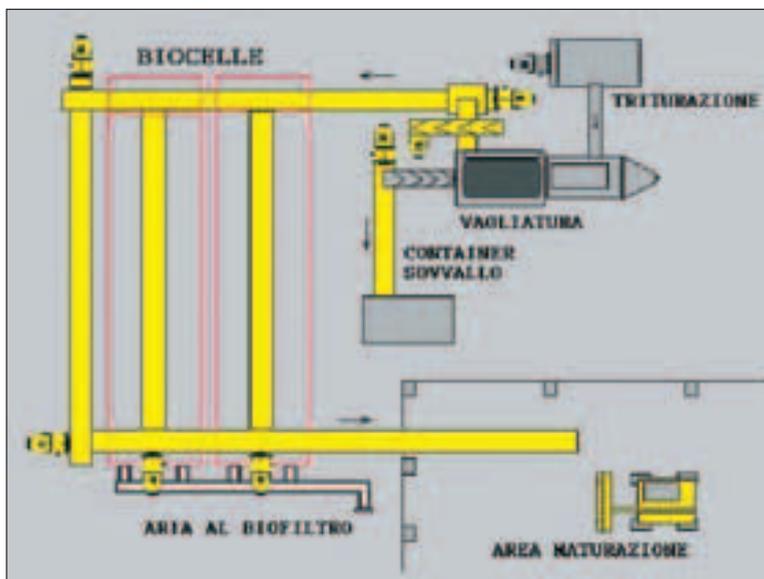


Fig. 3.79 - Schema impianto compostaggio a biocelle dinamiche THÖNI.

La movimentazione è comandata nei tempi di attuazione dal sistema computerizzato di controllo globale dell'impianto: indicativamente il tempo di funzionamento del sistema di ricircolo è di 36 ore, cumulate nelle due settimane di processo. Attraverso il ricircolo del materiale è possibile controllarne l'umidità, con prelievo di campioni dal sistema cocleare di trasporto. Qualora se ne evidenziasse la necessità si utilizzerà l'impianto di umidificazione presente nella cella, con utilizzo di acqua o dell'eventuale percolato recuperato

dalla cella tramite apposite canalizzazioni presenti al di sotto della pavimentazione mobile.

La Thöni produce anche biocelle statiche, anch'esse in struttura prefabbricata, in pannelli isolati e autoportanti o gettate in opera in c.a.. Per le biocelle da sistemare all'interno di un fabbricato la porta viene realizzata a tenda in telo plastico. La tenuta è garantita dalla depressione creata nella cella per l'adesione del telo sulla struttura della porta.

Per le installazioni all'aperto si utilizzano serrande riavvolgibili.



Fig. 3.80 - Biocelle statiche THÖNI da interno e da esterno con in evidenza i due sistemi di chiusura: a tenda e a tapparella.

F) I BIOCONTAINER

I *biocontainer* differiscono essenzialmente dalle biocelle per essere di minori dimensioni, con volume da 20 a 40 m³, e per il carico, che viene di norma effettuato dall'alto, con pala o con nastro trasportatore, dopo l'apertura del portellone di carico superiore; a carico completato il reattore viene chiuso. Lo scarico avviene per ribaltamento del container.

L'aerazione della massa viene effettuata con sistema ad insufflazione d'aria e viene distribuita sul fondo del container per mezzo di appositi diffusori. L'aria in uscita viene convogliata al sistema di trattamento a biofiltro. Il processo di norma è controllato da sistema computerizzato.

L'eventuale formazione di percolato viene estratta per gravità dalla cella tramite opportune aperture ricavate sul suo fondo.

Il ciclo di compostaggio dura 8-15 giorni come per gli altri impianti a cella.

Biocontainer Entsorga - Le Coccinelle

È un sistema modulare costituito da n. 8 reattori da 25 m³, dal sistema di insufflazione dell'aria e da quello automatizzato di controllo, e da n. 1 biofiltro.

Ciascuna cella è dotata anche di impianto di umidificazione della massa, in grado di apportare fino a 150 litri di acqua al giorno.

La potenza installata per ciascun container è di 4,5 kW.

La capacità operativa di un modulo così composto viene indicata dell'ordine di 3.000-5.000 t/anno a seconda della qualità del materiale organico.

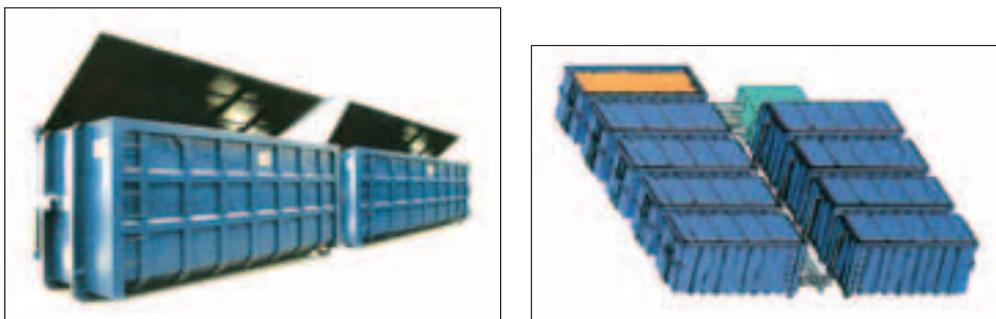


Fig. 3.81 - Biocontainer ENTSORGA con in evidenza il portellone di carico superiore (sinistra) e batteria di n.8 unità con biofiltro e box ventilazione (destra).

Biocontainer Horstmann

Sono *biocontainer* disposti in batterie di 6-8 unità, con sistema di aerazione centralizzata e trasporto dell'aria ad un biofiltro.



Fig. 3.82 - Batteria di biocontainer HORSTMANN, con in primo piano le tubazioni del sistema di mandata e ritorno dell'aria [foto: HORSTMANN].



Fig. 3.83 - Operazione di ribaltamento del biocontainer a fine ciclo [foto: HORTSMANN].

G) I BIOTUNNEL

Questi impianti si differenziano dalle biocelle essenzialmente per avere le zone di carico e scarico differenziate, alle due estremità della cella. A questa categoria di

impianti appartengono impianti continui con sistema di ossigenazione della massa per insufflazione d'aria.

Sono delle celle a sezione rettangolare (in muratura o metallo), coibentate, di dimensioni analoghe a quelle già viste per le biocelle (indicativamente: larghezza 4-5 m, altezza 3-4 m e lunghezza fino a 25-30 m).

L'aerazione forzata viene effettuata con immissione dell'aria dal pavimento e recupero alla sommità della cella ad opera di tubazioni di aspirazione collegate con il sistema di ricircolo/espulsione dal processo. Il tutto gestito da un sistema computerizzato.

Il carico viene effettuato giornalmente ad una estremità del tunnel. L'avanzamento viene garantito o da un sistema di pavimentazione mobile (*impianto tipo Gicom*) o da una parete mobile spinta da pistoni idraulici (*impianto tipo BAV*).

Il processo dura circa 2 settimane, come nel caso delle biocelle.



Fig. 3.84 - Schema di funzionamento di un impianto a tunnel.

Il sistema di aerazione della massa in questi impianti risulta analogo a quello delle biocelle sia come impostazione progettuale, sia come controllo. Ai tradizionali ventilatori centrifughi spesso sono preferiti i compressori d'aria. Tale soluzione, al vantaggio di garantire il preriscaldamento dell'aria abbina, però, un maggior livello di rumorosità, aspetto da non sottovalutare.



Fig. 3.85 - Tunnel SIT con particolare del nastro di carico superiore



Fig. 3.86 - Impianto di aerazione di un tunnel SIT.

IL TRATTAMENTO DELL'ARIA

1. IL PROBLEMA AMBIENTALE

La riduzione dell'inquinamento dell'aria sta assumendo un'importanza sempre crescente in tutti i campi, essendo la popolazione sempre meno disponibile ad accettare gli odori molesti prodotti dalle attività produttive. Questo problema è riconducibile, ovviamente, anche agli impianti di compostaggio.

Le tipologie di inquinanti prodotti nel trattamento dei rifiuti sono innumerevoli e includono *polveri* che possono essere rimosse con trattamenti fisici, ed *inquinanti gassosi* che richiedono strategie di trattamento più avanzate e complesse. La componente *gassosa* è costituita essenzialmente da:

- composti acidificanti come SO₂ e NO₂, responsabili dello *smog fotochimico* come i composti organici volatili,
- sostanze tossiche come i composti del cloro;
- sostanze che provocano odori molesti.

I cattivi odori⁽¹⁾ sono causati dalla presenza nelle emissioni in atmosfera di diverse categorie di composti: tra le più note, anche perché di più facile determinazione, si ricordano l'ammoniaca mercaptani, l'indolo e lo scatolo, l'acido solfidrico, il dimetilsolfuro; altri composti sono riportati nella tabella 4.1.

In un impianto di compostaggio la produzione di odori avviene in entità diversa nelle diverse fasi:

- ricevimento del materiale;
- pre-trattamento;
- trattamento primario;
- trattamento finale;
- biofiltrazione.

La fase di ricevimento del materiale è particolarmente critica, perché normalmente il materiale non viene sottoposto ad aerazione e, di conseguenza, è facile che si instaurino nella massa processi di fermentazione anaerobica della sostanza organica: per questo motivo appare buona norma ridurre al minimo il tempo di permanenza del materiale prima del suo carico nel bioreattore.

La fase di pre-trattamento è caratterizzata da un minore carico di odori se viene eseguita in un ambiente controllato.

(1) Con il termine odore si definisce la sensazione che la parte volatile di una sostanza produce sugli organi dell'olfatto.

La prima fase del processo di compostaggio è, comunque, la causa principale delle emissioni di odori, la cui quantità ed intensità dipendono da vari fattori, tra i quali la composizione e la quantità del materiale trattato, la tipologia di trattamento, il tipo di aerazione, la temperatura di processo, la geometria e l'età dei cumuli. La maggiore liberazione di gas si verifica durante i rivoltamenti, soprattutto nei primi giorni di trattamento.

Nella tabella 4.2 sono riportati i valori delle emissioni odorose (*) prodotte nelle varie fasi di lavorazione del materiale.

<i>Classe dei composti</i>	<i>Composto</i>	<i>Formula</i>	<i>Sensazione olfattiva</i>	<i>Soglia di percettibilità mg/Nm³</i>
Composti solforati	Acido solfidrico	H ₂ S	Uova marce	0,0001-0,03
	Metilmercaptano	CH ₃ SH	Cavolo, aglio	0,0005-0,08
	Etilmercaptano	C ₂ H ₅ SH	Cavolo marcio	0,0001-0,03
	Dimetilsolfuro	(CH ₃) ₂ S	Legumi marci	0,0025-0,65
	Dietilsolfuro	(C ₂ H ₅) ₂ S	Fetido, aglio	0,0045-0,31
	Dimetildisolfuro	(CH ₃) ₂ S ₂	Putrido	0,003-0,14
Composti azotati	Ammoniaca	NH ₃	Irritante	0,5-37
	Metilammina	CH ₃ NH ₂	Pesce marcio	0,021
	Etilammina	C ₂ H ₅ NH ₂	Irritante	0,05-0,83
	Dimetilammina	(CH ₃) ₂ NH	Pesce marcio	0,047-0,16
	Indolo	C ₈ H ₆ NH	Fecale, nauseabondo	0,0006
	Scatolo	C ₉ H ₈ NH	Fecale, nauseabondo	0,0008-0,1
	Cadaverina	NH ₂ (CH ₂) ₅ NH ₂	Cibo in decomposizione	-
Acidi volatili	Acetico	CH ₃ COOH	Aceto	0,025-6,5
	Butirrico	C ₃ H ₇ COOH	Burro rancido	0,0004-3
	Valerico	CH ₄ CH ₃ COOH	Sudore	0,0008-1,3
Aldeidi e chetoni	Formaldeide	HCHO	Acre	0,033-12
	Acetaldeide	CH ₃ CHO	Frutta, mele	0,04-1,8
	Aldeide butirrica	C ₃ H ₇ CHO	Rancido	0,013-15
	Isovalerica	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CO	Frutta, mele	0,072
	Acetone	CH ₃ COCH ₃	Frutta, mele	1,1-240

Tab. 4.1 - Composti maleodoranti riscontrabili negli impianti di trattamento dei rifiuti [fonte: ENTSORGA].

(*) viene indicato con O. U. (odour units) l'emissività in odori di un composto gassoso. Questo valore rappresenta il numero di diluizioni con aria pulita alla quale l'odore non è più avvertibile. Questa determinazione viene fatta con uno strumento chiamato olfattometro ad opera di un panel di persone - generalmente di quattro unità.

<i>Sezione dell'impianto</i>	<i>Emissione di odori (OU/h x 10⁴)</i>
Area di ricevimento	2.000
Area di pretrattamento	200
Area di trattamento:	
senza rivoltamento	3.000
con rivoltamento	16.000
aspirando aria	42.000
insufflando aria	13.000
Area di trattamento finale	40
Area di stoccaggio	30

Tab. 4.2 Valori indicativi delle emissioni odorose prodotte dalle varie sezioni di lavorazione di un impianto di compostaggio [fonte: BIONET].

Per l'abbattimento degli inquinanti gassosi negli impianti di compostaggio si utilizzano essenzialmente due tipologie di impianti, i biofiltri e i *scrubber*, con netta prevalenza dei primi. Un ulteriore sistema, basato sulla combustione dell'aria esausta, comincia ad essere utilizzato negli impianti più innovativi di recente realizzazione.

2. IL FUNZIONAMENTO DEI BIOFILTRI

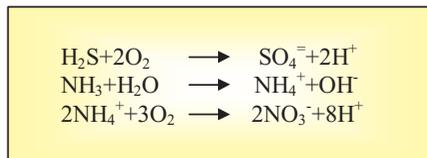
La biofiltrazione è sostanzialmente un processo biologico di abbattimento degli odori che sfrutta l'azione di una popolazione microbica eterogenea, costituita da lieviti, muffe e batteri, che vive essenzialmente in forma adesa sulle particelle del materiale filtrante costituente il biofiltro.

La rimozione delle molecole maleodoranti avviene schematicamente secondo la seguente reazione:



Dal biofiltro vengono rilasciati principalmente anidride carbonica, acqua e composti inorganici e solo una piccola quantità di molecole odorogene.

Gli agenti biologici del processo eliminano le molecole responsabili degli odori attraverso specifiche attività metaboliche, che trasformano i composti indesiderati in molecole non più maleodoranti.



I processi biologici avvengono nello strato di acqua biologicamente attiva che esiste attorno alle particelle del materiale di riempimento e che garantisce la vita e l'attività del *biofilm batterico*.

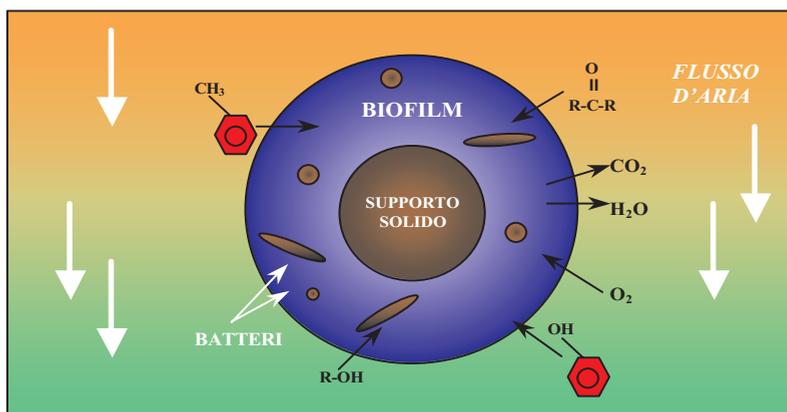


Fig. 4.1 - Schematizzazione del processo biologico di biofiltrazione del tipo down flow [Clean TeQ Pty Ltd mod].

I microrganismi possono essere già presenti nel materiale di riempimento o possono venire inoculati utilizzando fanghi attivi o compost. Quando è necessario trattare emissioni particolarmente ricche di composti odoriferi appare conveniente ricorrere ad un inoculo con materiali contenenti un'elevata carica microbica. La presenza di solfuri e composti di azoto e fosforo può determinare la formazione di sostanze acide nel biofiltro, con una conseguente diminuzione del pH e selezione dei batteri resistenti a condizioni acide. Molte di queste specie, *il thiobacillus* per esempio, sono efficaci nella rimozione dell'idrogeno solforato, ma non di altri composti odoriferi, per il cui crollo del pH comporta una minore efficienza di rimozione degli odori.

Per ovviare a questo problema si potrebbe ricorrere ad un sistema di filtrazione a due stadi, il primo per la rimozione di H_2S ed operante a bassi valori di pH, il secondo caratterizzato da valori di pH superiori alla neutralità e, quindi, in grado di rimuovere efficacemente i restanti composti maleodoranti.

Per il trattamento dell'aria proveniente da impianti di compostaggio non si hanno particolari problemi in tal senso e si utilizzano impianti monostadio.

Influenza della temperatura

La temperatura influenza notevolmente l'attività ossidativa svolta dai batteri e di conseguenza l'efficienza stessa del biofiltro.

Nella maggior parte dei biofiltri operano batteri mesofili, il cui optimum termico è definito dall'equazione di Arrhenius:

$$\ln(EC/T) = E_a/RT$$

ove:

- (EC) = efficienza di rimozione;
- (T) = temperatura;
- (E_a) = attività biologica;
- (R) = costante dei gas.

Non solo alle basse temperature, ma anche a temperature superiori ai 40°C l'attività ossidativa dei microrganismi diminuisce rapidamente e come conseguenza si ha un crollo dell'efficienza del biofiltro.

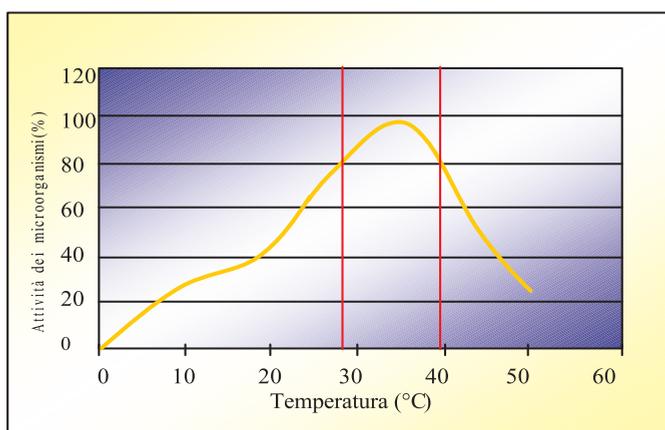


Fig. 4.2 - Effetto della temperatura sull'attività dei microrganismi [Clean TeQ Pty Ltd mod].

In realtà, di norma non si hanno grandi problemi nel controllo delle temperature di un biofiltro, dato che l'aria che arriva è caratterizzata da temperature compatibili con quelle sopra indicate e dato che i processi esotermici di demolizione della sostanza organica che ivi avvengono contribuiscono ad ottimizzare le condizioni termiche del biofiltro.

Influenza dell'umidità

L'efficienza del biofilm batterico che circonda le particelle solide costituenti il letto del biofiltro è correlata con la sua umidità: le condizioni ottimali sono comprese tra il 50 ed il 70%. Appare evidente come vada posta particolare attenzione nella gestione dei biofiltri senza copertura (*biofiltri aperti*) che risultano maggiormente esposti alle condizioni atmosferiche di quelli coperti (*biofiltri chiusi*). L'ambiente esterno, infatti, può determinare:

- una eccessiva essiccazione del materiale con conseguente diminuzione dell'attività biologica: è aspetto da considerare con massima attenzione;
- una eccessiva umidificazione del biofiltro, con conseguente sviluppo di fenomeni di anaerobiosi ed aumento delle perdite di carico. Quando questo si verifica l'efficienza del biofiltro decresce, per la diminuzione della portata d'aria del ventilatore e per le maggiori fughe d'aria attraverso canali preferenziali.

Per ovviare a questi inconvenienti, negli impianti *aperti* è possibile prevedere l'installazione di un impianto di irrigazione. Il suo azionamento potrà essere di tipo manuale, con intervento basato sul controllo della pressione totale di esercizio dei ventilatori, o automatico su comando di un pressostato inserito nella camera di espansione dell'aria.

A monte del biofiltro può anche essere previsto un impianto di umidificazione dell'aria, in modo da far affluire all'impianto aria satura di umidità.

3. LA STRUTTURA DEL BIOFILTRO

Il biofiltro ha forma generalmente parallelepipedica con superficie anche di dimensioni rilevanti, ma risulta sempre di limitata altezza, che difficilmente supera 1,5 metri.

Gli elementi costituenti il biofiltro standard a flusso ascensionale dell'aria (*biofiltro up-flow*) sono, oltre al materiale filtrante, essenzialmente:

- pavimentazione forata;
- camera di espansione dell'aria sottostante;
- pareti di contenimento.

La copertura non fa parte del biofiltro classico, anche se si sta sempre più diffondendo.

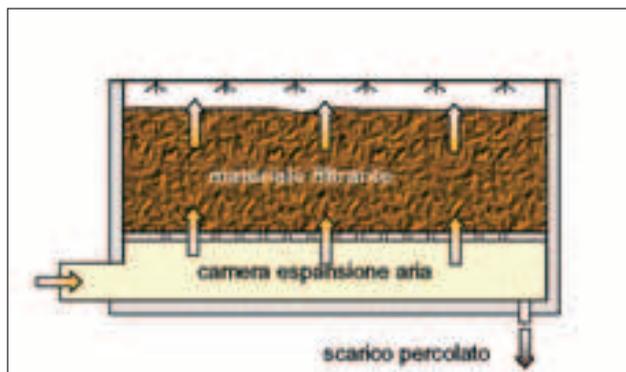


Fig. 4.3 - Schema funzionale di un tipico biofiltro up-flow di tipo aperto.

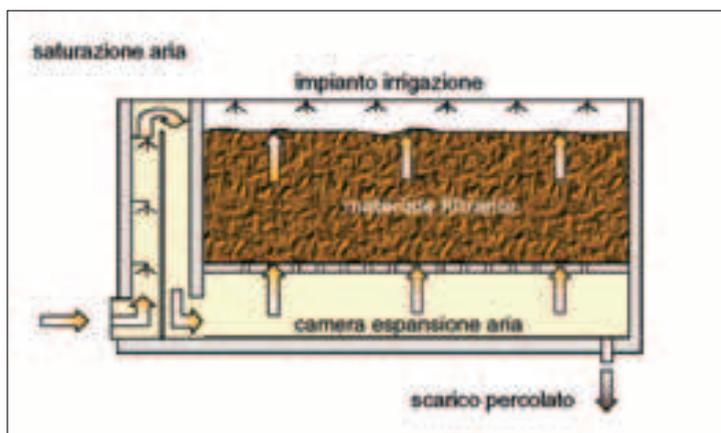


Fig. 4.4 - Schema funzionale di biofiltro up-flow con impianto di umidificazione dell'aria in entrata.

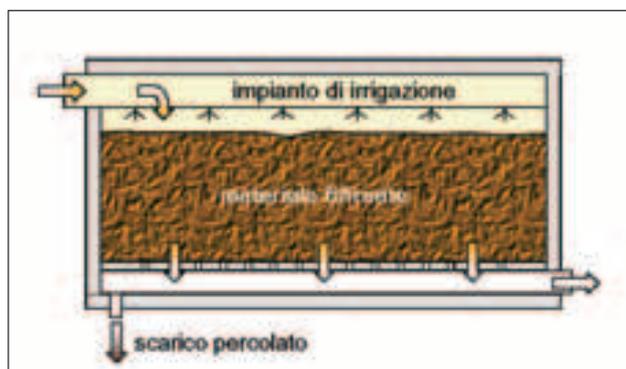


Fig. 4.5 - Schema funzionale di biofiltro down-flow con impianto di umidificazione dell'aria in entrata.

IL MATERIALE FILTRANTE

Il materiale che costituisce *il letto* del biofiltro, deve essere poroso, omogeneo, non facilmente biodegradabile, in modo da non essere facilmente distrutto dai microrganismi. Può essere usato virtualmente qualsiasi materiale in grado di garantire ai microrganismi la formazione di biofilm adesi e condizioni di ambiente ottimali, ma la scelta di un materiale piuttosto di un altro può risultare il fattore determinante sia per l'efficacia del trattamento, sia per la stessa durata del biofiltro.

Terriccio	Erica	Cippato di legno
Torba	Fibra di cocco	Compost
Sfagni	Cortece	

Tab. 4.3 - I materiali più utilizzati per i biofiltri.

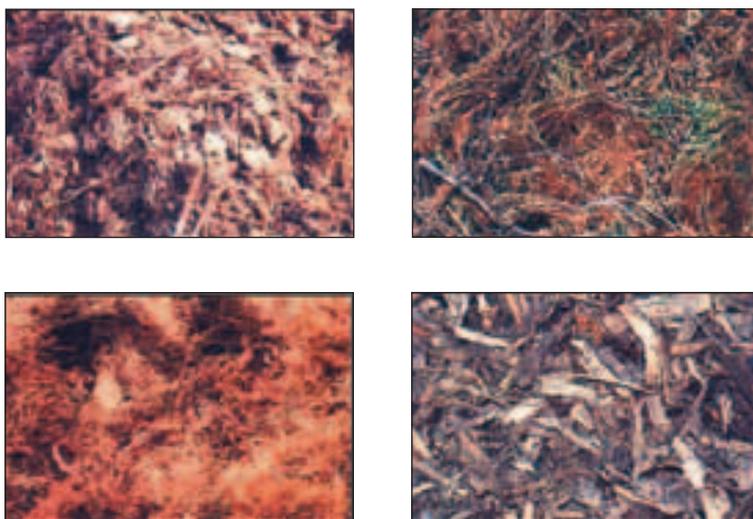


Fig. 4.6 - Alcuni materiali utilizzati per i biofiltri. [foto: GIAT ENG].



Fig. 4.7 - Biofiltri con materiale filtrante costituito da torba a sinistra [foto: AIRCLEAN] e in stocchi di mais e cippato di legno a destra [foto: HORSTMANN].

Le caratteristiche fondamentali del materiale di riempimento sono:

- elevata porosità, per non determinare eccessive perdite di carico;
- sufficiente igroscopicità, in modo da limitare perdita o acquisizione di umidità.

LA PAVIMENTAZIONE

Nella strutturazione più semplice la pavimentazione del biofiltro è costituita da un grigliato in cemento armato del tipo usato nell'edilizia zootecnica, coperto da un telo del tipo ombreggiante per serre. In alternativa il grigliato può essere realizzato in legno o in elementi modulari in materiale plastico. Esistono oggi diversi pannelli ad incastro in PE o in polipropilene ad alta densità di dimensioni di 0,5x0,5 m o anche maggiori (del tipo anche utilizzato come pavimentazione in zootecnia), la cui controindicazione è solo riconducibile al maggior costo rispetto alle soluzioni tradizionali.

La soluzione in c.a. offre il vantaggio di poter entrare nel biofiltro con la pala gommata per l'inserimento e rimozione del materiale filtrante, che avviene indicativamente una volta all'anno. La superficie perimetrale della pavimentazione dovrebbe essere piena per circa 0,3-0,4 m per evitare percorsi preferenziali dell'aria lungo le pareti del biofiltro.



Fig. 4.8 - Pavimentazione di un biofiltro realizzata in grigliato di legno.



Fig. 4.9 - Pavimentazione prefabbricata in elementi modulati di materiale plastico [fonte: ECODECO].



Fig. 4.10 - Biofiltro con pavimentazione in grigliato di c.a.: in evidenza anche le colonnine di supporto degli elementi prefabbricati [foto: GIAT ENG.].

LA CAMERA DI ESPANSIONE DELL'ARIA

Sotto la pavimentazione in grigliato è presente la camera di espansione dell'aria il cui ruolo è quello di garantire un flusso ascensionale omogeneo su tutta la superficie del filtro. L'altezza di questo plenum deve essere di almeno 0,4-0,5 m, con una diretta correlazione con le portate d'aria.

La pavimentazione della camera di espansione dell'aria deve essere dotata di opportune pendenze per garantire il deflusso delle acque di percolazione, determinate essenzialmente dalle piogge o dall'utilizzo del sistema di irrigazione.

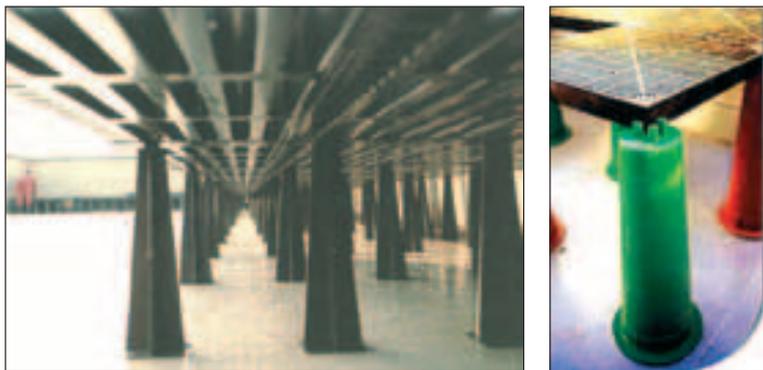


Fig. 4.11 - Particolari di camere di espansione dell'aria sotto la pavimentazione con gli elementi di supporto [foto: THÖNI a sinistra e ECODECO a destra].

La pavimentazione inferiore può essere rivestita con un telo di materiale plastico nel caso sia ipotizzabile un'aggressione chimica da parte del percolato.

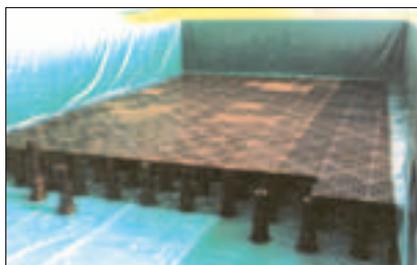


Fig. 4.12 - Rivestimento del biofiltro con telo in plastica (3-4 mm) [foto: ENTSORGA].



Fig. 4.13 - Biofiltro il fase di riempimento con in evidenza il telo filtrante di interfaccia tra pavimentazione e materiale filtrante [foto: THÖNI].

LE PARETI DEL BIOFILTRO

Le pareti del biofiltro possono essere realizzate in opera in c.a. o in muratura per non più di tre lati, essendo indispensabile disporre di una parete asportabile per le operazioni di carico e scarico del materiale filtrante. Le pareti possono anche essere costituite da pannelli prefabbricati, presenti sul mercato in diversi materiali. Considerata l'altezza normale del letto di filtrazione, pari a circa 1 metro, e la camera di espansione dell'aria, l'altezza delle pareti si aggira su circa 1,5 metri.



Fig. 4.14 - Biofiltro in pannelli prefabbricati d'acciaio verniciato [foto: THOLANDER].



Fig. 4.15 - Biofiltro con pareti in pannelli di legno (a sinistra) e in c.a. (a destra) prefabbricati. [foto: GIAT ENG.].



Fig. 4.16 - Biofiltro con pareti in c.a. gettate in opera.



Fig. 4.17 - Particolare di pannelli prefabbricati in alluminio [foto: ECO-DECO].

LA COPERTURA

L'importanza della copertura è stata già menzionata; il ricorso ad essa va pensato anche in funzione della zona climatica in cui l'impianto di compostaggio deve essere realizzato. Il mercato offre sempre più coperture prefabbricate, soprattutto in materiale plastico, ma poiché oggi è antieconomica la costruzione su misura, appare evidente che il loro utilizzo condiziona notevolmente la forma del biofiltro.



Fig. 4.18 - Biofiltro prefabbricato modulare con copertura [foto: THOLANDER].



I BIOFILTRI A CONTAINER

E' una tipologia di biofiltro che si sta progressivamente diffondendo al pari della tecnologia del compostaggio in biocelle. Le dimensioni sono in genere quelle tipo del *container*: lunghezza 5 metri, larghezza ed altezza di 2,5 metri. Lo spessore del materiale filtrante può arrivare a 1,5 m negli impianti chiusi, in cui è più facile mantenere sotto controllo le condizioni di umidità del materiale filtrante.

Normalmente questi moduli di trattamento sono dotati ciascuno di una unità di aspirazione dell'aria dell'impianto di compostaggio. In alcuni casi questi biofiltri sono dotati di copertura.



Fig. 4.19 - Biofiltri a container del tipo aperto e chiuso [foto: THÖNI].

4. DIMENSIONAMENTO DEL BIOFILTRO

Per ottenere un accurato dimensionamento bisogna tenere presente che il processo di biofiltrazione consiste di due fasi:

- 1ª fase: trasferimento dei composti da abbattere dalla fase gassosa a quella

liquida - cui va assimilata quella del biofilm batterico - regolato dalla legge di Henry e, quindi, dipendente dalla solubilità del composto e dalla sua pressione parziale;

- 2^a fase: ossidazione dei composti ad opera dei microrganismi, la cui cinetica dipende dalla capacità dei batteri di utilizzare queste sostanze come nutrimento o fonte di energia.

Appare evidente, quindi, come la progettazione del biofiltro debba essere fatta non solo tenendo conto delle condizioni ottimali di vita dei microrganismi che attueranno le trasformazioni previste, ma anche con un dimensionamento correlato con il carico cui il biofiltro verrà sottoposto.

Con un corretto carico in entrata per unità di superficie un biofiltro può correttamente funzionare mediamente per circa un anno.

Il parametro cui si fa di norma riferimento in una progettazione anche empirica del biofiltro, definisce il flusso d'aria che può passare attraverso un metro quadrato di superficie del biofiltro in un'ora o, anche, la velocità di passaggio dell'aria nel biofiltro.

I valori normalmente indicati per l'abbattimento degli odori in un biofiltro utilizzato in impianti di compostaggio sono indicativamente:

flusso d'aria specifico (<i>air flow rate</i>) 50 – 120 m ³ /h . m ²
velocità di passaggio dell'aria 0,014 – 0,033 m/s
tempo di contatto 30 – 70 s

Il flusso d'aria specifico di norma viene mantenuto sui valori più bassi per non caricare eccessivamente il biofiltro e per limitare le perdite di carico entro valori accettabili: di norma queste risultano nel campo 50-100 mm C.A., a seconda del tipo di materiale usato e della sua umidità.

5. EFFICIENZA DEL TRATTAMENTO

L'abbattimento degli odori dipende dal tipo di molecola, oltre che dalle caratteristiche di umidità, porosità, temperatura del letto filtrante.

<i>Carico inquinante</i>		<i>Concentrazione in ingresso</i>	<i>Concentrazione in uscita</i>	<i>Efficienza di filtrazione</i>
Composti Organici				
Volatili ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valore medio	324	55	83
	Intervallo	90-610	25-96	
NH ₃ (mg/m^3)	Valore medio	17	<1	>94
	Intervallo	1-51	0,1-1	
Sostanze odorose solforate		Odore forte e pungente	Inodore	Totale

Tab.4.4 - Efficienza di rimozione di alcuni composti odorosi [ENTSORGA].

L'efficienza si mantiene buona finché il biofiltro si mantiene in condizioni ottimali: a tal fine appare importante che non arrivi al letto filtrante aria carica di particolato: valori di polveri superiori a $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ devono essere evitati. Allo scopo la presenza di un sistema di umidificazione/lavaggio dell'aria a monte del biofiltro va valutata più che positivamente.

6. ALTRI SISTEMI DI ABBATTIMENTO

Altre tecnologie industrialmente disponibili per la purificazione degli odori si basano sui seguenti principi:

- combustione termica / catalitica
- adsorbimento
- ossidazione chimica e assorbimento chimico

La combustione comporta un'ossidazione dei composti organici a temperature elevatissime con produzione, quasi esclusivamente, di CO_2 e acqua, con abbattimenti del 98% delle sostanze odorogene. Si distingue la combustione termica rigenerativa dalla combustione rigenerativa catalitica. La prima prevede l'immissione dell'aria esausta attraverso un bruciatore che opera a temperatura di oltre 800°C , con il recupero di calore in scambiatori, che vengono attraversati alternativamente dai fumi combusti e dall'aria esausta da trattare divenendo delle camere di preriscaldamento.

La seconda consiste nel fare passare l'aria esausta attraverso una superficie in materiale refrattario, preriscaldato a temperature comprese tra 260 e 450°C, per un tempo adeguato all'abbattimento dei composti organici volatili; anche in questo caso sono previste camere a flussi invertiti per il recupero del calore dei fumi e preriscaldamento degli effluenti da trattare, che consentono di mantenere la temperatura della superficie catalitica.

Gli impianti che sfruttano il processo di adsorbimento prevedono di far passare le emissioni gassose attraverso dei filtri costituiti da granuli di sostanze porose (carbone attivo, silicalgel, zeoliti, ecc) che trattengono i composti chimici odoriferi. Questi sistemi hanno abbattimenti oltre il 95%, ma un'efficacia limitata poiché richiedono periodiche rigenerazioni per deadsorbimento termico, che, nel caso dei carboni attivi, vanno effettuate in idonei siti, dato il rischio di esplosione del sistema. Esistono tuttavia prodotti adsorbenti di nuova concezione che consentono una rigenerazione in loco a condizioni di sicurezza. In genere i sistemi a adsorbimento non sono installati negli impianti di compostaggio per i costi sfavorevoli rispetto a sistemi alternativi ad uguale efficacia.

Gli impianti ad ossidazione chimica o assorbimento in soluzioni chimiche sono detti a torre di lavaggio o *scrubber*. L'efficacia di questi impianti consta nel raggiungimento di un intimo contatto e miscelazione tra la corrente di effluente gassoso e un liquido assorbente in controcorrente. Il liquido assorbente viene spruzzato o nebulizzato in apposite camere dove vengono create delle turbolenze per aumentare l'omogeneità della miscela. Possono essere presenti dei corpi di riempimento, dove l'effluente gassoso viene costretto a passare. Il liquido assorbente può essere rappresentato solamente da acqua, in questo caso il trattamento ha lo scopo di abbattere principalmente le polveri delle arie esauste, parte delle sostanze maleodoranti e regolarne l'umidità, necessitando di un ulteriore trattamento successivo (in genere biologico). Diversamente per un trattamento più completo è necessaria l'addizione all'acqua di reagenti chimici ossidanti (ossidazione chimica) eseguendo un trattamento a più stadi (due o tre). In corrispondenza di ogni stadio l'effluente gassoso viene investito da soluzioni contenenti reagenti diversi per l'abbattimento delle diverse tipologie di molecole maleodoranti, tra i più tipici il primo stadio con attacco acido per abbattere l'ammoniaca e molecole a reazione simile, il secondo stadio con ipoclorito di sodio per la solubilizzazione e ossidazione dei composti organici e il terzo stadio con acqua ossigenata per la rimozione dei composti clorurati.

I risultati possono essere soddisfacenti, tuttavia l'abbattimento ottenuto con questo metodo richiede, per il corretto funzionamento, una serie di tecnologie che aumentano il costo dell'investimento e di gestione fino a livelli non competitivi con altri metodi.

BIBLIOGRAFIA

1. Aa.Vv. (1999). *Annuario del compost di qualità. Terza edizione 1999/2000*, 108 pp. Il Verde Editoriale, Milano.
2. Aa.Vv. (2001). Il trattamento biologico nei sistemi integrati di gestione dei rifiuti. Scuola Agraria del Parco di Monza.
3. Adani F. (1999). Il processo di compostaggio: definizioni e principi biochimici. Atti del corso "progettazione e gestione di impianti di compostaggio". Consorzio Italiano Compostatori.
4. Adani F., Genevini P.L., Gasperi F., Tambone F. (1999) Composting and humification. *Compost Science & Utilisation* 7(1).24-33.
5. Beaudin N., Caron R.F., Legros R., Ramsay J., Ramsay B. (1999). Identification of the key factors affecting composting of a weathered hydrocarbon-contaminated soil. *Biodegradation*, Vol. 10, n. 2, pp. 127-133.
6. Beck-Friis B., Pell M., Sonesson U., Jonsson H., Kirchmann H. (2000). Formation and emission of N₂O and CH₄ from compost heaps of organic household waste. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 62, n. 3, pp. 317-331.
7. Beck-Friis B., Smårs S., Jönsson H., Kirchmann H. (2001). Gaseous Emissions of Carbon Dioxide, Ammonia and Nitrous Oxide from Organic Household Waste in a Compost Reactor under Different Temperature Regimes. *Journal of Agricultural engineering Research*, Vol. 78, n. 4, pp. 423-430.
8. Blake J.P., Donald J.O. (1992). Alternatives for the disposal of poultry carcasses. *Poultry Science*, Vol. 71, n. 7, pp. 1130-1135.
9. Blanc M., Marilley L., Beffa T., Aragno M. (1999). Thermophilic bacterial communities in hot composts as revealed by most probable number counts and molecular (16SrDNA) methods. *FEMS Microbiology Ecology*, Vol. 28, n. 2, pp. 141-149.

10. Block D. (1999). Composting for erosion control in Texas. *BioCycle*, Vol. 40, n. 9, pp. 40-41.
11. Boucher V.D., Revel J.C., Guiresse M., Kaemmerer M., Bailly J.R. (1999). Reducing ammonia losses by adding FeCl₃ during composting of sewage sludge. *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 112, n. 3/4, pp. 229-239.
12. Chiumenti A. (2001). La tecnologia della stabilizzazione aerobica dei rifiuti. Prove sperimentali in impianti pilota con matrici organiche diverse. Tesi di laurea in Ingegneria Ambientale (rel. Prof. R. Cossu).
13. Chiumenti R., Guercini S., da Borso F. (1990) *Swine manure liquid/solid separation in odour control and stabilization treatments*. Proceedings of the FAO-SCORENA 6th Consultation of the European Cooperative Research Network on Animal Waste Utilisation, Bologna, settembre 1990. REUR Technical Series 17, Ed. FAO-CRPA, pp. 81-90.
14. Chiumenti R., Guercini S., da Borso F. (1993) *Guida tecnica per la gestione delle deiezioni zootecniche*. Volume edito dalla Provincia di Padova, Assessorati alla Tutela Ambiente e all'Agricoltura, dicembre 1993, p. 160.
15. Chiumenti R., da Borso F., De Nobili M., Leita L., Mondini C. (1996). Changes during processing R. in the organic matter of composted and air-dried poultry manure. *Bioresource Technology* 55, Elsevier Ed., pp. 243-249.
16. Chiumenti R., da Borso F., Catalano L., Mezzadri M., De Nobili M. (1999) In-pile composting of separated solids from beef cattle manure. *Proceedings of the International Congress on Regulation of Animal production in Europe, Wiesbaden, Germany, 9-12 May 1999, Ed. KTBL (Kuratorium fur Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft), Arbeitspapier 270, pp. 354-356.*
17. Chiumenti R., Catalano L., da Borso F., Bragato G., De Nobili M. (1999). Composting of olive husks: effects of process type and inoculation on the amount and quality of humic materials. *Proceedings of the International Composting Symposium CBA/ICS, September 19-23, Halifax Nova Scotia, Canada.*
18. Chiumenti R., Kic P., da Borso F. (2000). Vysledky zkousek prototypu stroje pro kompostovani (Un prototipo di attrezzatura aziendale semplificata per il compostaggio dei reflui zootecnici). Proceedings of the Conference "Technika a technologie pro nepotravinarske vyuziti pudy a jeji udrzovani v klidu" TECHAGRO 2000, Brno - Vystaviste, Repubblica Ceca, 5 aprile 2000, pp. 75-81.

19. Chiumenti R., Da Borso F., Rodar T., Chiumenti A. (2002). Prove di compostaggio dei solidi separati da liquami cunicoli. *Relazione finale "progetto reflui" Regione Friuli Venezia Giulia*. In fase di stampa.
20. Choi KyungHo (1999). Optimal operating parameters in the composting of swine manure with wastepaper. *Journal of Environmental Science and Health. Part B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, Vol. 34, n. 6, pp. 975-987.
21. Conrad P. (1994). Expanding markets for composted products. *Biocycle*, Vol. 35, n. 11, pp. 63-65.
22. Corlay Chee L., Ferrera - Cerrato R., Etchevers Barra J.D., Echegaray Aleman A., Santizo Rincon J.A. (1999). Cinetica de grupos microbianos en el proceso de produccion de composta y vermicomposta. *Agro-Ciencia*, Vol. 33, n. 4, pp. 375-380.
23. Cossu R. (1998). *Impianti per il trattamento dei rifiuti solidi* - dispense del corso di Ingegneria Ambientale.
24. Cristofolletti A. (1997). Le tecnologie per il compostaggio. *Suppl. Informatore Agrario n. 44*.
25. Cristofolletti A., Piccinini S., Rossi L. (1997). Il compostaggio in ambito rurale. *Suppl. Informatore Agrario n. 44*.
26. Decreto Legislativo 27 gennaio 1992, n. 99. Attuazione della direttiva 86/278/CEE concernente la protezione dell'ambiente, in particolare del suolo, nell'utilizzazione dei fanghi di depurazione in agricoltura. In: *Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale, Serie generale – n. 38 del 15 febbraio 1992*. Reperito in: Maglia S., Santoloci M. (2000). *Il codice dell'ambiente*. XI ediz., pp. 424-428, Casa Editrice La Tribuna, Piacenza.
27. Decreto Legislativo 5 febbraio 1997, n. 22. Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti da imballaggio. In: *Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale, Serie generale – n. 38 del 15 febbraio 1997*. Reperito in: Maglia S., Santoloci M. (2000). *Il codice dell'ambiente*. XI ediz., pp. 1779-1857, Casa Editrice La Tribuna, Piacenza.
28. Decreto Legislativo 8 novembre 1997, n. 389. Modifiche ed integrazioni al decreto Legislativo 5 febbraio 1997, n.22 (Legge Ronchi), in materia di rifiuti, di

- rifiuti pericolosi, di imballaggi e di rifiuti di imballaggio. In: *Gazzetta Ufficiale, Serie generale - n. 261, 8 novembre 1997*. Reperito in: Maglia S., Santoloci M. (2000). *Il codice dell'ambiente*. XI ediz., pp. 1779-1857, Casa Editrice La Tribuna, Piacenza.
29. Decreto ministeriale 5 febbraio 1998 (Ministero dell'Ambiente). Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22. In: *Supplemento ordinario n. 72 alla Gazzetta Ufficiale, Serie generale - n. 88 del 16 aprile 1998*.
 30. D.G.R.V. 10 marzo 2000 n. 766 (Regione del Veneto) Norme tecniche ed indirizzi operativi per la realizzazione e la conduzione degli impianti di recupero e di trattamento delle frazioni organiche dei rifiuti urbani ed altre matrici organiche mediante compostaggio, biostabilizzazione e digestione anaerobica.
 31. Donovan L. (1999). Testing options for residential organics. *BioCycle*, Vol. 40, n. 1, pp. 32-36.
 32. Dumontet S., Dinel H., Baloda S.B. (1999). Pathogen Reduction in Sewage Sludge by Composting and Other Biological Treatments: A Review. *Biological Agriculture & Horticulture*, Vol. 16, n. 4, pp. 409-430.
 33. Eghball B., Lesoing G.W. (2000). Viability of weed seeds following manure windrow composting. *Compost Science & Utilization*, Vol. 8, n. 1, pp. 46-53.
 34. Ekinci K., Keener H.M., Elwell D.L. (2000). Composting short paper fiber with broiler litter and additives. Part I: effects of initial pH and carbon/nitrogen ratio on ammonia emission. *Compost Science & Utilization*, Vol. 8, n. 2, pp. 160-172.
 35. Eklind Y., Kirchmann H. (2000). Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. I: carbon turnover. *Bioresource Technology*, Vol. 74, n. 2, pp. 115-124.
 36. El-Fadel M., Massoud M. (2000). Emissions from landfills: a methodology comparative assessment. *Environmental Technology*, Vol. 21, n. 9, pp. 965-978.
 37. Epstein (1997). *The Science of Composting*. Technomic Publishing Company, Pennsylvania, U.S.A.

38. Favoino E. (1999). L'ottimizzazione operativa di un impianto di compostaggio. *Atti del corso "progettazione e gestione di impianti di compostaggio"*. Consorzio Italiano Compostatori.
39. Fauci M.F., Bezdicek D.F., Caldwell D., Finch R. (1999). End product quality and agronomic performance of compost. *Compost Science & Utilization*, Vol. 7, n. 2, pp. 17-29.
40. Freeman T.M., Cawthon D.L. (1999). Use of composted dairy cattle solid biomass, poultry litter and municipal biosolids as greenhouse growth media. *Compost Science & Utilization*, Vol. 7, n. 3, pp. 66-71.
41. Gagnon B., Robitaille R., Simard R.R. (1999). Characterization of several on-farm and industrial composted materials. *Canadian Journal of Soil Science*, Vol. 79, n. 1, pp. 201-210.
42. Georgakakis D., Krintas T. (2000). Optimal use of the Hosoya system in composting poultry manure. *Bioresource Technology*, Vol. 72, n. 3, pp. 227-233.
43. Ghorpade V.M., Gennadios A., Hanna M.A. (2001). Laboratory composting of extruded poly(lactic acid) sheets. *Bioresource Technology*, Vol. 76, n. 1, pp. 57-61.
44. Ginkel J.T. van, Raats P.A. C., Haneghem I.A. van (1999). Bulk density and porosity distributions in a compost pile. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, Vol. 47, n. 2, pp. 105-121.
45. Golucke C.G., Diaz L.F. (1996). Historical Review of Composting and Its Role in Municipal Waste Management. In *The Science of Composting*, a cura di M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmens, T.Papi, pp. 3-14. Blackie Academic & Professional, UK.
46. Gray K.R., Biddlestone A.J., Clark R. (1973). Review of composting – Part 3: Processes and products, *Process Biochemical*, n. 10, U.S.A., pp.11-30.
47. Guerra-Rodriguez E., Vazquez M., Diaz-Ravina M. (2000). Co-composting of Barley Wastes and Solid Poultry Manure. *Bioresource Technology*, Vol. 75, no. 3, pp. 223-225.
48. Hackett G.A.R., Easton C.A., Duff S.J.B. (1999). Composting of pulp and paper mill fly ash with wastewater treatment sludge. *Bioresource Technology*, Vol. 70, n. 3, pp. 217-224.

49. Haderlein A., Aly-Hassan M.C.B., Legros R., Ramsay B.A. (1999). The design and use of aerated microcosms in mineralization studies. *Biodegradation*, Vol. 10, n. 6, pp. 437-442.
50. Hansen C.L., Maxfield B. (1999). Effectiveness of a drum composter for treating dairy wastes. *ASAE/CSAE-SCGR Annual International Meeting, Toronto, Ontario, Canada, 18-21 Luglio, 1999*, 10 pp.
51. Hartung E. (2000). Kompostierung von vorgetrocknetem Geflügelkot. *Landtechnik*, Vol. 55, n. 5, pp. 368-369.
52. Haug R.T. (1980). *Compost Engineering: principles and practise*. Ann Arbor Science Publishers, Michigan, U.S.A.
53. Hien P.T., Katoh T., Fujio Y. (1999). Isolation and identification of citrus-juice-residue composting bacteria. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, Vol. 43, n. 3/4, pp. 425-432.
54. Iwabuchi K., Nakano Y. (1999). Effects of oxygen supply rate and the concentration on composting of dairy manure. *ASAE/CSAE-SCGR Annual International Meeting, Toronto, Ontario, Canada, 18-21 Luglio, 1999*, pp 9.
55. Jahnel M.C., Melloni R., Cardoso E.J.B.N. (1999). Maturidade de composto de lixo urbano. *Scientia Agricola*, Vol. 56, n. 2, pp. 301-304.
56. Keener H.M., Dick W.A., Hoitink H.A.J. (2000). Composting and beneficial utilization of composted by-product materials. In *Land application of agricultural, industrial, and municipal by-products*, a cura di J.F. Power, W.A. Dick, R.M. Kashmanian, J.T. Sims, R.J. Wright, M.D. Dawson, D. Bezdicek, pp. 315-341.
57. Kithome M., Paul J.W., Kannangara T. (1999a). Adsorption isotherms of ammonium on coir. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Vol. 30, n. 1/2, pp. 83-95.
58. Kithome M., Paul J.W., Lavkulich L.M., Bomke A.A. (1999b). Effect of pH on ammonium adsorption by natural zeolite clinoptilolite. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Vol. 30, n. 9/10, pp. 1417-1430.
59. Koenig A., Bari Q.H. (2000). Application of self-heating test for indirect estimation of respirometric activity of compost: theory and practice. *Compost Science & Utilization*, Vol. 8, n. 2, pp. 99-107.

60. Komilis D.P., Ham R.K. (2000). A laboratory method to investigate gaseous emissions and solids decomposition during composting of municipal solid wastes. *Compost Science & Utilization*, Vol. 8, n. 3, pp. 254-265.
61. Kowalchuk G.A., Naoumenko Z.S., Derikx P.J.L., Felske A., Stephen J.R., Arkhipchenko I.A. (1999). Molecular Analysis of Ammonia-oxidizing Bacteria of the β Subdivision of the Class Proteobacteria in Compost and Composted Materials. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 65, n. 2, pp. 396-403.
62. Labance S.E., Heinemann P.H., Miller F.C., Graves R.E., Beyer D.M. (2000). Evaluation of the effects of forced aeration during phase I mushroom substrate preparation on odor production and microbial heat generation. *2000 ASAE Annual International Meeting, Milwaukee, Wisconsin, USA, 9-12 Luglio 2000*, pp. 1-20.
63. Larney F.J., Olson A.F., Carcamo A.A., Chang Chi (2000). Physical changes during active and passive composting of beef feedlot manure in winter and summer. *Bioresource Technology*, Vol. 75, n. 2, pp. 139-148.
64. Larsen K.L., McCartney D.M. (2000). Effect of C:N ratio on microbial activity and N retention: bench-scale study using pulp and paper biosolids. *Compost Science & Utilization*, Vol. 8, n. 2, pp. 147-159.
65. Lawson, M. J.; Keeling, A. A. (1999). Production and physical characteristics of composted poultry carcasses. *British Poultry Science*, Vol. 40, n. 5, pp. 706-708.
66. Legge 19 ottobre 1984, n. 748. Nuove norme per la disciplina dei fertilizzanti. In: *Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale - n. 305 del 6 novembre 1984*. Reperito in: Maglia S., Santoloci M. (2000). *Il codice dell'ambiente*. XI ediz., pp. 406-412, Casa Editrice La Tribuna, Piacenza; Perelli M. (2000). *Norme per la disciplina dei fertilizzanti*, 5^a edizione, pp. 7-145, Edizioni ARVAN, Venezia.
67. Legge 9 dicembre 1998, n. 426. Nuovi interventi in campo ambientale. In: *Gazzetta Ufficiale, Serie generale - n. 291 del 14 dicembre 1998*.
68. Lehmann R.G., Smith D.M., Narayan R., Kozerski G.E., Miller J.R. (1999). Life cycle of silicone polymer, from pilot-scale composting to soil amendment. *Compost Science & Utilization*, Vol. 7, n. 3, pp. 72-82.
69. Lei Fei, VanderGheynst J.S. (1999). Assessment of microbial community structure changes during mixed and static-bed composting processes. *ASAE/*

- CSAE-SCGR Annual International Meeting, Toronto, Ontario, Canada, 18-21 July, 1999, 15 pp.
70. Logsdon G. (1993). Manure handling alternatives cut costs. *Biocycle*, Vol. 34, n. 7, pp. 52-54.
 71. Lyon P.F., Beffa T., Blanc M., Auling G., Aragno M. (2000). Isolation and characterization of highly thermophilic xylanolytic *Thermus thermophilus* strains from hot composts. *Canadian Journal of Microbiology*, Vol. 46, n. 11, pp. 1029-1035.
 72. Mahimairaja S., Bolan N.S., Hedley M.J. (1995). Agronomic effectiveness of poultry manure composts. *Commun-soil-sci-plant-anal.* Vol. 26, n. 11/12, pp. 1843-1861.
 73. Marconi M., Ferrari G. (1998). *Il compostaggio hobbistico*, 90 pp. Edagricole, Bologna.
 74. Maynard A.A. (2000). Compost: the process and research. *The Connecticut Agricultural Experiment Station*, Bulletin n. 966, Luglio 2000, 14 pp.
 75. Maze J., Theobald O., Potocky P. (1999). Optimisation du compostage du lisier de porc avec des residus ligno-cellulosiques. Incidence du recyclage de la matiere carbonnee en tete de procede et premiers essais agronomiques des produits. *Journees de la Recherche Porcine en France*, Vol. 31, pp. 91-98
 76. Michel F. (1999). Managing compost piles to maximize natural aeration. *BioCycle*, Vol. 40, n. 3, pp. 56-58.
 77. Mu R., Leonard J. (1999). Measurement of air flow through MSW-sewage sludge compost. *Canadian Agricultural Engineering*, Vol. 41, n. 2, pp. 93-97.
 78. Mustin M. *Le compost*. Edition Francoiss Dubush - Paris (1987).
 79. Ndegwa P.M., Thompson, S.A., Merka W.C. (2000). A dynamic simulation model of in-situ composting of caged layer manure. *Compost Science & Utilization*, Vol. 8, n. 3, pp. 190-202.
 80. Ohio State University.
 81. Paluszak Z., Olszewska H., Szejniuk B. (2000). Hygienisierung von Klarschlamm aus Tierkorperbeseitigungsanstalten. *Tierarztliche Umschau*, Vol. 55, n. 2, pp. 85-89.

82. Pan GuoQing (1999). Characteristics and effectiveness of Jiaosujun - a type of complex microbial population composed of bacteria, saccharomycetes and actinomycetes. *Jiangsu Agricultural Sciences*, n. 6, pp. 52-53.
83. Peltola J.S.P., Juhanoja J., Salkinoja-Salonen M.S. (2000). Biodegradability and waste behavior of industrial wood-based construction materials. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, Vol. 24, n. 3, pp. 210-218.
84. Piccinini S., Rossi L. (1999). Il ruolo del compostaggio nel settore zootecnico e agro-industriale. *Atti del corso "progettazione e gestione di impianti di compostaggio"*. Consorzio Italiano Compostatori.
85. Piccinini S., Rossi L., Valli L. (1995). Compostaggio dei reflui bovini, suini e avicoli. *L'Informatore Agrario* n. 51.
86. Piccinini S., Rossi L., Valli L., Cortellini L. (1995). Il compostaggio dei residui zootecnici, dei fanghi di depurazione e della frazione organica da raccolta differenziata: esperienze condotte dal CRPA in Emilia Romagna. Prima parte. *RS - Rifiuti Solidi* n. 9.
87. Piccinini S., Rossi L., Valli L., Cortellini L. (1996). Il compostaggio dei residui zootecnici, dei fanghi di depurazione e della frazione organica da raccolta differenziata: esperienze condotte dal CRPA in Emilia Romagna. Seconda parte. *RS - Rifiuti Solidi* n. 10.
88. Piontek M., Nguyen Thi Bich Loc (2000). The effect of sewage sludge composting on the quantitative state of some groups of bacteria and fungi. *Acta Microbiologica Polonica*, Vol. 49, n. 1, pp. 83-90.
89. Potter C.L., Glaser J.A., Chang L.W., Meier J.R., Dosani M.A., Herrmann R.F. (1999). Degradation of polynuclear aromatic hydrocarbons under bench-scale compost conditions. *Environmental Science & Technology*, Vol. 33, n. 10, pp. 1717-1725.
90. Raviv M., Medina S., Shamir Y. (1999). Cocomposting - a method to improve results of poultry manure composting. *Compost Science & Utilization*, Vol. 7, n. 2, pp. 70-73.
91. Ressetti R.R., Thomaz Soccol V., Kaskantzis Neto G. (1999). Aplicacao da vermicompostagem no controle patogenico do composto de lodo de esgoto. *Sanare*, Vol. 12, n. 12, pp. 61-70.

92. Ross D.S., Sjorgen R.E., Bartlett R.J. Behavior of Chromium in Soils: IV. Toxicity to Microorganisms. *Journal of Environmental Quality*, vol.10, no. 2, 1981.
93. Rossi L. (2000). L'evoluzione delle attrezzature per il compostaggio. *Il contoterzista* n. 9.
94. Rossi L., Piccinini S. (1999). I possibili sistemi operativi per il compostaggio: macchine ed attrezzature utilizzabili. *Atti del corso "progettazione e gestione di impianti di compostaggio"*. Consorzio Italiano Compostatori.
95. Rossi L., Guercini S. (2001). Produzione e impiego di compost nell'azienda agricola. *Manuale pratico ed. Veneto Agricoltura*.
96. Scaglia et al. Parametri di qualità per validare la scelta della pratica del compostaggio. *Atti 4° corso Produzione e impiego del compost di qualità*, Valenzano (Ba), maggio 1999.
97. Scaglia B., Tambone F., Genevini P.L., Adani F. (2000). Respiration index determination: dynamic and static approaches. *Compost Science & Utilization*, Vol. 8, n. 2, pp. 90-98.
98. Schaik C. van, Murray H., Lamb J., Di-Giacomo J. (2000). Composting reduces fuel and labour costs on family farms. *Biocycle*, Vol. 41, n. 5, pp. 72-74.
99. Schloss P.D., Chaves B., Walker L.P. (2000). The use of the analysis of variance to assess the influence of mixing during composting. *Process Biochemistry*, Vol. 35, n. 7, pp. 675-684.
100. Sciancalepore V., De Stefano G., Piacquadio P., Sciancalepore R. (1995). Compostaggio in ambiente protetto del residuo della lavorazione delle olive con impianti ad estrazione bifasica. *IA Ingegneria Ambientale*, vol. XXIV n. 11-12, novembre-dicembre 1995, pp. 627-631.
101. Seekins B. (1999). Troubleshooting at the compost pile. Part I. *BioCycle*, Vol. 40, n. 11, pp. 53-55.
102. Seki H. (1999). Analysis of optimum control problem for composting process based on the variational principle. *Environment Control in Biology*, Vol. 37, n. 1, pp. 13-19.
103. Sequi P. (1996). The Role of Composting in Sustainable Agriculture. In *The Science of Composting*, a cura di M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmens, T.Papi,

pp. 23-29. Blackie Academic & Professional, UK.

104. Sharma H.S.S., Lyons G., Chambers J. (2000). Comparison of the changes in mushroom (*Agaricus bisporus*) compost during windrow and bunker stages of phase I and II. *Annals of Applied Biology*, Vol. 136, n. 1, pp. 59-68.
105. Shaw K., Day M., Krzymien M., Mohmad R., Sheehan S. (1999). The role of feed composition on the composting process. I. Effect on composting activity. *Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, Vol. 34, n. 6, pp. 1341-1367.
106. Shi Wei, Norton J.M., Miller B.E., Pace M.G. (1999). Effects of aeration and moisture during windrow composting on the nitrogen fertilizer values of dairy waste composts. *Applied Soil Ecology*, Vol. 11, n. 1, pp. 17-28.
107. Sikora L.J. (1999). MSW compost reduces nitrogen volatilization during dairy manure composting. *Compost Science & Utilization*, Vol. 7, n. 4, pp. 34-41.
108. Silvestri S., Favoino E. (1997a). Matrici organiche compostabili e organizzazione del recupero. *L'Informatore Agrario*, supplemento al n. 44, pp.15-20.
109. Silvestri S., Nappi P., Barberis R. (1997b). Il processo di compostaggio. *L'Informatore Agrario*, supplemento al n. 44, pp.11-14
110. Skinner J.H. (1996). I.S.W.A. Policy in the Regard of Composting as an Integrated System of Waste Management. In *The Science of Composting*, a cura di M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmens, T.Papi, pp. 30-40. Blackie Academic & Professional, UK.
111. Sommer S.G., Dahl P. (1999). Nutrient and carbon balance during the composting of deep litter. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 74, n. 2, pp. 145-153.
112. Sommer S.G., Moller H.B. (2000). Emission of greenhouse gases during composting of deep litter from pig production - effect of straw content. *Journal of Agricultural Science*, Vol. 134, n. 3, pp. 327-335.
113. Sommer S.G. (2001). Effect of Composting on Nutrient Loss and Nitrogen Availability of Cattle Deep Litter. *European Journal of Agronomy*, Vol. 14, n. 2, pp. 123-133.
114. Sonesson U., Bjorklund A., Carlsson M., Dalemo M. (2000). Environmental

and Economic Analysis of Management Systems for Biodegradable Wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 28, n. 1/2, pp. 29-53.

115. Stentiford E.I. (1987). Recent Developments in Composting. In *Compost: production, quality and use*, a cura della Commissione delle Comunità Europee, Elsevier, U.K.
116. Stentiford E.I. (1996). Composting Control: Principles and Practice. In *The Science of Composting*, a cura di M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmens, T. Papi, pp. 49-59. Blackie Academic & Professional, UK.
117. Straatsma G., Gerrits J.P.G., Thissen J.T.N.M., Amsing J.G.M., Loeffen H., Griensven L.J.L.D. van (2000). Adjustment of the composting process for mushroom cultivation based on initial substrate composition. *Bioresource Technology*, Vol. 72, n. 1, pp. 67-74.
118. Tamura T., Katayama T., Haga K. (1999). Emission patterns of malodorous compounds and greenhouse gases from the pile-type composting of cattle manure. *Animal Science Journal*, Vol. 70, n. 4, pp. 235-239.
119. Tee, E.; Wilkinson, K.; Tymms, S.; Hood, V. (1999). Overview of green waste recycling research conducted by the Institute for Horticultural Development. *Plant Protection Quarterly*, Vol. 14, n. 3, pp. 104-107.
120. Tiquia S.M., Richard T.L., Honeyman M.S. (2000a). Effect of windrow turning and seasonal temperatures on composting of hog manure from hoop structures. *Environmental Technology*, Vol. 21, n. 9, pp. 1037-1046.
121. Tiquia S.M., Tam N.F.Y. (2000b). Co-composting of spent pig litter and sludge with forced-aeration. *Bioresource Technology*, Vol. 72, n. 1, pp. 1-7.
122. Tiquia S.M., Tam N.F.Y. (2000c). Fate of nitrogen during composting of chicken litter. *Environmental Pollution*, Vol. 110, n. 3, pp. 535-541.
123. Tomati U., Madejon E., Galli E. (2000). Evolution of humic acid molecular weight as an index of compost stability. *Compost Science & Utilization*, Vol. 8, n. 2, pp. 108-115.
124. Tricot G., Aubert C., Robin P., Bline D. (2000). Maitrise des emissions azotees lors du compostage de fumier de volailles. *Sciences & Techniques Avicoles*, n. 31, pp. 25-31.

125. Tuomela M., Vikman M., Hatakka A., Itavaara M. (2000). Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology*, Vol. 72, n. 2, pp. 169-183.
126. Valli L., Bonazzi G., Piccinini S., Casadei G. (1987). Il compostaggio della pollina: prove su due impianti in scala aziendale. *L'informatore Agrario* n. 43, pp. 29-35.
127. Vallini G., Pera A., Valdrighi M.M. (1989). Biostabilizzazione ossidativa della sostanza organica: ecologia microbica e gestione biotecnologica del processo di compostaggio. In *Atti del Simposio "Ingegneria della trasformazione in compost"*, Bari, pp. 83-109.
128. Vuorinen A.H., Saharinen M.H. (1999). Cattle and Pig Manure and Peat Cocomposting in a Drum Composting System: Microbiological and Chemical Parameters. *Compost Science & Utilization*, Vol. 7, n. 3, pp. 54-65.
129. Walker L.P., Nock T.D., Gossett J.M., VanderGheynst J.S. (1999). The role of periodic agitation and water addition in managing moisture limitations during high-solids aerobic decomposition. *Process Biochemistry*, Vol. 34, n. 6/7, pp. 601-612.
130. Wetterauer D., Killorn R. (1996). Composting animal manure with municipal yard trimmings. *Bicycle*, Vol. 37, n. 10, pp. 54-57.
131. Wiles M.C., Amburgey J.C., Borger D.C., Willett L.B., Keener H.M., Elwell D.L. (1999). Volatile fatty acid emission as a measurement of perceived odor from swine waste compost amended with sawdust. *Special Circular - Ohio Agricultural Research and Development Center*, n. 171, pp. 60-62.
132. Witter E., Lopez-Real J.M. (1987). *Monitoring the Composting Process Using Parameters for Compost Stability*, pp. 352-358. Elsevier, U.K.
133. Wong J.W.C., Mak K.F., Chan N.W., Lam A., Fang M., Zhou L.X., Wu Q.T., Liao X.D. (2001). Co-composting of soybean residues and leaves in Hong Kong. *Bioresource Technology*, Vol. 76, n. 2, pp. 99-106.
134. Wong J.W.C., Fang Min (2000). Effects of lime addition on sewage sludge composting process. *Water Research (Oxford)*, Vol. 34, n. 15, pp. 3691-3698.

135. Wu L., Ma L.Q., Martinez G.A. (2000). Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 29, n. 2, pp. 424-429.
136. Yakushidou K., Inoue H., Yamamoto K., Tanaka A. (1999a). Cost estimation of dairy cattle manure composting. *Bulletin of the Kyushu National Agricultural Experiment Station*, n. 36, pp. 57-62.
137. Yakushidou K., Yamamoto K., Tanaka A., Yonaga M. (1999b). Suitable initial moisture content and aeration rate for composting of dairy cattle manure. *Bulletin of the Kyushu National Agricultural Experiment Station*, n. 36, pp. 49-55.
138. Zorzi G. (1997a). La legislazione sulla produzione e sull'impiego del compost. *L'Informatore Agrario*, supplemento al n. 44, pp. 7-10.
139. Zorzi G. (1997b). Nuovi parametri per il compost. *L'Informatore Agrario*, supplemento al n. 44, pp. 7-10.

Informazioni legali

L'Agenzia Regionale per la Prevenzione e la Protezione Ambientale del Veneto o le persone che agiscono per conto dell'Agenzia stessa non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo volume.

E' consentita la riproduzione di testi, tabelle, grafici e in genere del contenuto del volume con la citazione della fonte.

Stampato su carta senza cloro da alfabet, carte d'autore (Loria - TV) nel Marzo 2002



Agenzia Regionale per la Prevenzione
e Protezione Ambientale del Veneto

Sede Centrale

Piazzale Stazione, 1 - 35131 Padova

Tel. +39 049 823 93 01

Fax +39 049 660 966

e-mail: info@arpa.veneto.it

www.arpa.veneto.it

Osservatorio Regionale per il Compostaggio

Via Baciocchi, 9 - 31033 Castelfranco V.to

Tel. +39 0423 422 329 - 422 345 - 422 309

Fax +39 0423 720 388

e-mail: agroambientale@arpa.veneto.it