

Tech4You (Technologies for climate change adaptation and quality of life improvement) programma di ricerca finanziato dall' Unione Europea "Next Generation EU" (PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA (PNRR) – MISSIONE 4, COMPONENTE 2, INVESTIMENTO 1.5 – D.D. MUR n. 1049 23/06/2022, ECS_00000009, CUP C43C22000400006)

a. SPOKE 2, GOAL 1, PP 1, (Compost and compost-tea production)

REPORT

Data del Report: **09-09-2024**

IMPIANTI DI PRODUZIONE DI COMPOST E COMPOST-TEA

Rosanna Galliano, Vincenzo De Luca, Giuseppe Altieri

Funding: This study was carried out within the project Tech4You (Technologies for climate change adaptation and quality of life improvement) and received funding from the European Union Next-GenerationEU (PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA (PNRR) – MISSIONE 4, COMPONENTE 2, INVESTIMENTO 1.5 – D.D. MUR n. 1049 23/06/2022, ECS_00000009, CUP C43C22000400006). This manuscript reflects only the authors' views and opinions, neither the European Union nor the European Commission can be considered responsible for them.

SOMMARIO

1.	INTRODUZIONE	4
2.	IL COMPOSTAGGIO	4
2.1.	La bioconversione aerobica	4
2.2.	Il processo di compostaggio.....	5
2.2.1.	Processo naturale di compostaggio	5
2.2.2.	Processo controllato di compostaggio	5
2.2.3.	La fase di biossidazione del compostaggio.....	5
2.2.4.	Lo stadio mesofilo attivo	5
2.2.5.	Lo stadio termofilo attivo.....	5
2.2.6.	La fase di maturazione e umificazione	6
2.2.7.	Tipi di microrganismi presenti in un processo di compostaggio.....	6
2.3.	Controllo di qualità durante il processo di compostaggio.....	7
2.3.1.	Il prodotto finale del processo di compostaggio	7
2.4.	Fattori che influenzano il processo di compostaggio.....	7
2.4.1.	Le materie prime di scarto biologico	8
2.4.2.	La densità apparente.....	8
2.4.3.	Il rapporto C:N.....	8
2.4.4.	Controllo del contenuto di umidità	9
2.4.5.	Controllo del pH.....	9
2.4.6.	Controllo della temperatura	10
2.4.7.	Controllo della concentrazione di ossigeno.....	10
2.4.8.	Monitoraggio del processo di compostaggio	10
2.4.9.	Metodi di monitoraggio del processo di compostaggio.....	11
2.4.10.	Analisi analitica	11
2.5.	Strategia per ottimizzare il processo di compostaggio	11
2.5.1.	Velocità ed entità della reazione.....	11
2.5.2.	Vantaggi della rapida decomposizione	11
2.5.3.	Fattori che influenzano il tasso di decomposizione.....	11
2.5.4.	Impianti di processo di compostaggio.....	12
2.5.5.	Impatti ambientali del compostaggio aerobico	13
2.5.6.	Agenti patogeni	14
2.5.7.	Assenza di inquinanti nelle materie prime	14
3.	IL COMPOST-TEA	14
3.1.	Composizione del compost tea.....	15
3.2.	Microbiologia del compost tea.....	16
3.3.	Impianto di produzione del compost tea.....	16
3.4.	Fattori che influenzano la produzione e la qualità del compost tea	16
3.5.	Qualità del compost di partenza	16
3.6.	Rapporto compost/acqua	17
3.7.	Aerazione	17
3.8.	Nutrienti di fermentazione.....	18
3.9.	Miscelazione ed estrazione.....	18
3.10.	Tempo di preparazione.....	18
3.11.	Condizioni abiotiche	18
3.12.	Filtrazione finale	19
3.13.	Valutazione delle caratteristiche e della qualità del compost tea.....	19
4.	PROGETTO DI MASSIMA DEL COMPOSTATORE.....	19
4.1.	Sistemi di monitoraggio, supporto e controllo remoto	22

5.	PROGETTO DI MASSIMA DEL SISTEMA PER LA PRODUZIONE DEL COMPOST-TEA	23
5.1.	Sistemi di monitoraggio, supporto e controllo remoto	23
6.	CONCLUSIONI.....	25
7.	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	25

1. INTRODUZIONE

I sistemi di recupero energetico che utilizzano i reflui e gli scarti sono diversi. Il recupero energetico può esplicarsi sia direttamente, attraverso la produzione diretta di combustibile utilizzando gli scarti tal quali o gestiti in modo appropriato, sia indirettamente, attraverso il loro utilizzo per la produzione mirata di composti utili e vantaggiosi per la gestione di successive filiere produttive, in tal modo si ottiene un beneficio indiretto ma tuttavia energeticamente tangibile.

In quest'ambito si propone l'utilizzo degli scarti e dei reflui per la produzione di compost e successivamente di compost-tea al fine di migliorare ed incrementare la crescita di piante da Short Rotation Forestry (SRF) per la produzione di biomassa vegetale legnosa specializzata, pianificata e gestita allo scopo di produrre elevati quantitativi di biomassa in tempi molto brevi, rifornendo i terreni di sostanza organica proveniente dalla gestione del sistema di produzione di compost e compost-tea.

Si prevede la coltivazione di specie arboree a rapida crescita con elevata densità d'impianto, ceduzioni ripetute nel breve periodo e con tecniche colturali simili a quelle utilizzate per le colture agrarie per arboricoltura a ciclo breve.

2. IL COMPOSTAGGIO

Il compostaggio prevede la trasformazione della massa organica tramite bio-ossidazione termofila aerobica.

L'uso del compostaggio aerobico per la degradazione biologica in un prodotto finale stabile, compost, riutilizzabile in pratiche agricole o forestali, di diversi tipi di rifiuti organici, dai rifiuti di campo ai rifiuti solidi urbani organici, è una tecnologia ormai ben consolidata (Amirante, 2017). Le tecnologie di compostaggio sono sufficientemente compatibili dal punto di vista ambientale, al contrario del trattamento meccanico o del trattamento di incenerimento (Vigil, 1994). Il trattamento del compostaggio aerobico è un processo biochimico naturale, in parte controllato dall'uomo con tecnologie semplici ed energeticamente a basso costo (Partanen et al., 2010).

Per convertire i rifiuti solidi organici, il compostaggio aerobico è ampiamente utilizzato in tutto il mondo rispetto al compostaggio anaerobico (Sharma et al., 2018). Il compostaggio aerobico è meno costoso rispetto al sistema anaerobico, poiché, quest'ultimo, implica un alto costo iniziale, un periodo di trattamento più prolungato e un certo consumo di energia. Inoltre, la tecnologia di compostaggio ha un buon rapporto costo-efficacia rispetto ad altri metodi (Tahseen Sayara et al., 2020; Aye e Widjaya, 2006; Elagroudy et al., 2011; Kim et al., 2011).

Il compostaggio è di per sé un processo che si verifica naturalmente nell'ambiente. Il compostaggio controllato consente di controllare vari fattori del processo, ottenendo così numerosi benefici come uno sviluppo e una durata ottimizzati del trattamento finalizzato all'attenuazione di odori e polveri, e una produzione di un prodotto finito adatto ad un impiego agricolo. Nel processo aerobico di compostaggio l'attività di alcune popolazioni di batteri aerobi e di alcune specie di funghi, mediante bio-ossidazione, trasforma i rifiuti organici, eventualmente costituiti da materiali organici aventi composizione eterogenea e complessa, in composti stabili, costituendo un prodotto finale maturo, il compost. Il compost, essendo stabile, può essere vantaggiosamente riutilizzato come fertilizzante o ammendante del suolo. Le caratteristiche richieste per l'uso del compost come ammendante del suolo sono l'assenza di agenti patogeni o di semi vitali di piante e di altri contaminanti; la stabilità e l'adeguatezza della composizione del prodotto (Partanen et al., 2010).

Uno dei vantaggi del compostaggio è la riduzione del volume della massa dei rifiuti organici, dal 30% al 50%, quindi il compost ha minori costi di trasporto (Chen et al., 2011). Tuttavia, alcuni impianti per il compostaggio vanno incontro a problemi di efficienza nel degrado dei rifiuti organici accompagnati da emanazioni maleodoranti (Partanen et al., 2010). In genere, questi problemi sono causati da un'aerazione insufficiente o da un sovraccarico di alimentazione degli impianti, o spesso da un lento avvio del processo di compostaggio. I prodotti risultanti da questi malfunzionamenti degli impianti per il compostaggio, invece, sono costituiti da una materia immatura che necessita nuovamente di un ulteriore e prolungato trattamento per completare la maturazione e la stabilizzazione. Sfortunatamente questo ulteriore trattamento è spesso accompagnato da emissioni maleodoranti. Inoltre, è importante notare che i compost immaturi comportano rischi per la salute delle persone e dei lavoratori e inoltre non possono essere impiegati come fertilizzanti a causa della loro fitotossicità (Partanen et al., 2010).

2.1. La bioconversione aerobica

Lungo il processo di compostaggio i batteri agiscono per abbattere i composti organici per ottenere l'energia necessaria al loro processo vitale e i nutrienti, azoto (N), fosforo (P), potassio (K), indispensabili alla crescita delle loro popolazioni. Durante il processo di compostaggio biologico aerobico i batteri aerobi trasformano, attraverso attività metabolica, le materie prime organiche e consumano ossigeno. Da queste trasformazioni i prodotti risultanti sono nuove cellule, anidride carbonica CO₂, acqua H₂O, ione solfato SO₄²⁻, e calore e humus o compost (Vigil, 1994; Jeong et al., 2017; Kim et al., 2017).

La microbiologia del processo stesso, sostanzialmente identica per le diverse tipologie di tecnologie impiantistiche, è la chiave fondamentale di funzionamento del processo di compostaggio aerobico. Complessivamente sono coinvolti nel processo di compostaggio un assortimento di vari tipi di microrganismi: batteri, funghi, lieviti e attinomiceti.

Nella microbiologia del processo una regola fondamentale è costituita dalla disponibilità continua di un'adeguata concentrazione di ossigeno nelle materie trattate. Una stima conservativa preliminare (cioè inferiore al 100 percento) della domanda biochimica di ossigeno (BOD) può essere effettuata assumendo una completa bioconversione dei rifiuti organici in prodotti finiti.

La quantità di ossigeno è data dalla seguente equazione (Vigil, 1994):

$$C_a H_b O_c N_d + ((4a+b-2c-3d)/4) * O_2 \Rightarrow \text{bioconversione} \Rightarrow a * CO_2 + ((b-3d)/2) * H_2O + d * NH_3$$

dove:

$C_a H_b O_c N_d$: è la composizione molare dei rifiuti organici.

Un grado di bioconversione ottenibile nella trasformazione biologica può essere ottenuto stimando la frazione biodegradabile dei rifiuti solidi organici con la seguente equazione (Vigil, 1994):

$$BF = 0.83 - 0.028 * LC$$

dove:

BF : è la frazione di solidi biodegradabili espressi come solidi volatili (VS);

0.83 e 0.028 : sono costanti empiriche;

LC : è il contenuto di lignina di VS espresso in percentuale del peso secco.

Un ordine di grandezza delle frazioni di biodegradabilità può variare da 0,22 per la carta fino a 0,82 per i rifiuti alimentari.

2.2. Il processo di compostaggio

2.2.1. Processo naturale di compostaggio

Le masse organiche sono già naturalmente soggette a degradazione biologica che inizia non appena vengono prodotti i rifiuti. Una prima riduzione in massa delle materie prime organiche in particelle più piccole in condizioni naturali è costituita dall'attività dei lombrichi, nematodi e insetti del suolo (acari, collemboli, coleotteri, cimici e formiche). Le minori dimensioni dei materiali organici aumentano la superficie di contatto con i microrganismi favorendo da parte loro la degradazione della materia organica. Questo può essere praticamente ottenuto macinando o sminuzzando le materie prime per ridurne le dimensioni.

2.2.2. Processo controllato di compostaggio

Una volta raggiunte condizioni favorevoli nel processo naturale iniziale, inizia la crescita di colonie di batteri nella materia organica e inizia il processo di compostaggio. I microrganismi metabolizzano, come fonte di energia, i composti del carbonio (C), presenti nei materiali organici, trasformandoli in anidride carbonica (CO₂) che viene rilasciata nell'ambiente. La perdita di composti di carbonio C rende il compost risultante più condensato e con minori spazi d'aria nella materia organica. La quantità di ossigeno (O₂) nella sostanza organica, soggetta ad un rapido consumo da parte dei microrganismi, può essere reintegrata, questo è il vantaggio chiave di un sistema controllato, per evitare che il processo possa essere dominato da condizioni anaerobiche.

In condizioni normali, il processo di compostaggio è il successivo susseguirsi di diverse fasi, ciascuna predominata da diverse popolazioni di microrganismi. Queste fasi includono (Tahseen Sayara et al., 2020) la fase bio-ossidativa e la fase di maturazione, detta anche fase di polimerizzazione (Bernal et al., 1996).

2.2.3. La fase di bioossidazione del compostaggio

La fase bio-ossidativa evolve lungo tre stadi successivi: lo stadio di attivazione iniziale o mesofilo attivo, lo stadio termofilo e lo stadio di maturazione.

2.2.4. Lo stadio mesofilo attivo

Durante la fase mesofila attiva del compostaggio le sostanze che possono essere più facilmente decomposte, zuccheri e amido, vengono ossidate per prima. Invece la lignina e la cellulosa sono composti più difficili e lenti ad essere degradati biologicamente (Chen et al., 2011).

All'inizio del processo di compostaggio, quando si sono stabilite le condizioni favorevoli, le popolazioni di batteri mesofili, che operano in modo ottimale in un intervallo di 25 - 45°C, decompongono prima il materiale più facilmente degradabile e contemporaneamente sono soggetti a una rapida crescita delle loro popolazioni.

Il calore generato dal metabolismo microbico all'interno della materia organica provoca l'innalzamento costante della temperatura. (Tahseen Sayara et al., 2020).

2.2.5. Lo stadio termofilo attivo

Quando la temperatura continua ad aumentare i batteri mesofili cessano la loro attività, al superamento della temperatura di 40°C, un livello al quale i batteri hanno operato nella prima fase di biodegradazione, e vengono sostituiti dalle popolazioni di batteri termofili quando la temperatura tipicamente aumenta rapidamente da 55 °C a 65°C entro 24 - 72 ore dalla formazione della materia. I batteri termofili si attivano effettuando efficacemente la destrutturazione delle sostanze organiche. La temperatura riscontrabile negli ammassi di materiale può rimanere a questo livello da diversi giorni a diverse settimane a seconda delle proprietà delle materie prime, della quantità di masse di materiale e delle condizioni ambientali. Durante questa fase, la decomposizione biologica è la più rapida e continua fino a quando buona parte dei nutrienti, composti disponibili nei rifiuti organici grezzi, non è stata decomposta (Wainaina et al., 2020; Keener et al., 2000). Anche una conseguente elevata produzione di calore porta la temperatura a livelli elevati nei materiali di compostaggio (Sarsaiya et al., 2018).

La temperatura, quando raggiunge i 55 °C, inizia a distruggere i patogeni presenti nei rifiuti solidi organici iniziali, e oltre i 60 °C a distruggere semi di erbe infestanti e larve di mosche e ad abbattere i composti organici fitotossici (per le piante) che sono

contenuti nei materiali organici di partenza, ottenendo così una loro semplice ma efficace sanificazione (Niwagaba et al., 2009; Tahseen Sayara et al., 2020).

Temperature più elevate, fino a 70 °C, vengono raggiunte durante il trattamento del letame animale e dei rifiuti verdi (Tang et al., 2011; Singh e Kalamdhad, 2014; Cáceres et al., 2015). Tuttavia le temperature non possono superare i 65 °C perché molte forme di microbi possono essere uccise, quindi pregiudicando la stessa attività microbica e limitando il tasso di biodegradazione. Inoltre il calore eccessivo può causare incendi. Per mantenere la temperatura al di sotto di questo livello, quantità di ossigeno devono essere rifornite girando le masse di materia o in modo più efficiente mediante sistemi di aerazione passiva o forzata (Tahseen Sayara et al., 2020).

A seguito di queste operazioni, si sviluppano ulteriori cicli termofili e conseguenti incrementi di temperatura, comunque inferiori ai livelli del primo ciclo, e poi si ha un ulteriore raffreddamento della sostanza organica. Questi cicli continuano fino a quando non si verificano più significativi aumenti di temperatura dopo le operazioni di rivoltamento, questa è una conseguenza della decomposizione di gran parte della disponibilità di composti ad alta energia facilmente biodegradabili. Tuttavia, una parte rimanente delle materie prime iniziali può essere soggetta a decomporsi a un ritmo inferiore per un periodo più lungo (Chen et al., 2011).

2.2.6. La fase di maturazione e umificazione

In una fase finale, mentre la frazione organica disponibile nei rifiuti è esaurita, la biodegradazione va a ridursi fino a terminare e quindi la temperatura nel compostaggio si abbassa.

Durante la fase termofila, quando i composti ad alta energia più facilmente biodegradabili diminuiscono, si ha la morte dei batteri mesofili e di parte di quelli termofili e di conseguenza diminuisce l'attività respiratoria, la temperatura dei materiali diminuisce gradualmente fino a un livello di circa 37 °C, temperatura alla quale i batteri mesofili riprendono nuovamente a dominare attraverso il cumulo. Segue un lento ma progressivo abbassamento della temperatura, che permette la ricolonizzazione della materia da trattare da parte di microrganismi mesofili, questa situazione corrisponde alla fase di maturazione del compostaggio (Tahseen Sayara et al., 2020). La temperatura scende a 35-40 °C, all'inizio di questa fase, per poi scendere ulteriormente a quella ambientale. Il tempo della fase di maturazione non è ben stabilito, a seconda della tipologia dei materiali organici ridotti a compost e della loro maggiore o minore omogeneità, nelle pratiche comuni delle operazioni di compostaggio si prende in considerazione un range da 1 a 4 mesi, tuttavia questo tempo può essere esteso fino a 6 a 12 mesi. Sebbene l'attività microbica sia relativamente bassa rispetto alle fasi precedenti, in questa fase si verificano ancora molte reazioni naturali.

Una delle caratteristiche presenti in questa fase è l'umificazione del materiale, che è favorevole alla qualità del compost prodotto (Tahseen Sayara et al., 2020, Hsu e Lo, 1999). Il compost ottenuto essendo stabile e igienizzato può essere quindi utilizzato come fertilizzante e ammendante in agricoltura (Gajalakshmi e Abbasi, 2008; Ravindran e Sekaran, 2010; Ravindran et al., 2019; Wainaina et al., 2020).

Nel corso della fase di maturazione, i prodotti risultanti dall'ossidazione e dall'idrolisi di carboidrati, grassi, amminoacidi, proteine, sostanze cellulosiche, lignine, ecc. vengono sottoposti ad un insieme di processi di polimerizzazione da cui vengono prodotte le sostanze umiche, che sono complessi organici più stabili rispetto ai singoli composti.

Le sostanze umiche sono raggruppabili in due categorie principali:

- **acidi fulvici**, di colore rossastro e originati dalla condensazione tra i carboidrati e gli acidi uronici e le sostanze intermedie derivanti dall'idrolisi proteica;
- **acidi umici**, che costituiscono l'humus più elaborato, originati dalla condensazione tra e lignine e le proteine.

Nella sua fase finale il compost ha un colore scuro, non crea odori sgradevoli e rimane abbastanza indifferente ad ulteriori operazioni di rivoltamento, il tasso di consumo di ossigeno diminuisce fino a quando non è necessaria l'operazione di rivoltamento all'interno del compost stoccato, a conferma della stabilità biochimica ormai raggiunta.

Lungo tutta la fase di maturazione gli acidi organici potenzialmente tossici e i composti resistenti presenti sono ben stabilizzati. Al contrario, quando il compost è grezzo o immaturo è necessaria una lunga fase di stagionatura. Questa situazione può verificarsi quando nel cumulo c'è una concentrazione di ossigeno troppo bassa o è presente un contenuto di umidità inferiore o molto elevato. Generalmente un compost immaturo può contenere elevate quantità di acidi organici, elevati rapporti C:N (azoto), valori di pH estremi o un elevato contenuto di sali. Quindi un tale compost immaturo è inadeguato a poter essere sparso nel terreno agronomico.

2.2.7. Tipi di microrganismi presenti in un processo di compostaggio

Tra i molti microrganismi che agiscono nella massa di un processo di compostaggio vi sono principalmente varie popolazioni di batteri e tipi di funghi (Partanen et al., 2010; Gray et al., 1971), alcuni protozoi e macrofauna come nematodi, vermi, formiche, acari, collemboli.

Tra i batteri reali e i batteri filamentosi, studi recenti hanno individuati i maggiori gruppi batterici di batteri mesofili, agenti in una fase iniziale del processo di compostaggio, la cui attività biologica di degradazione produce acido organico, questi sono i *Lactobacillus* spp. e *Acetobacter* spp. (Golueke et al., 1954; Partanen et al., 2010).

Principalmente i batteri veri attaccano le frazioni facilmente assimilabili (zuccheri, proteine, grassi, ecc.) del substrato organico iniziale. La rapida crescita delle popolazioni di questi batteri determina, per effetto delle reazioni ossidative di tipo esotermico della sostanza organica iniziale, un improvviso aumento della temperatura nelle masse organiche. Nella fase di umificazione dei substrati organici i batteri actinomiceti, insieme ai funghi, sono particolarmente attivi per degradare la cellulosa, la lignina e altri

polimeri. In tale fase i principali gruppi batterici dominanti sono i batteri termofili Gram-positivi come *Bacillus* spp. e *Actinobacteria* (de Bertolli et al., 1980; Partanen et al., 2010).

Tuttavia, studi di ricerca hanno evidenziato che l'esistenza di colonie assortite sia di batteri che di tipi di funghi è favorevole per ottenere un efficiente processo di compostaggio (Waksman et al., 1939; Partanen et al., 2010).

2.3. Controllo di qualità durante il processo di compostaggio

Il controllo della qualità dovrebbe garantire adeguate proprietà chimiche e fisiche durante la produzione del compost (Orthodoxou et al., 2015; Hemidat et al., 2018) e un'adeguata stabilità e maturità del compost finito (Benito et al., 2003; Hemidat et al., 2018). In letteratura sono riportati gli effetti benefici sui suoli agronomici per la produzione delle colture (Hoitink et al., 1997; Atiyeh et al., 2001; Hemidat et al., 2018) direttamente legati alle caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche del compost (He et al., 1995; Hemidat et al., 2018).

Le principali proprietà fisiche e chimiche di un compost, come risultato di diverse materie prime organiche, sono le seguenti: densità apparente (BD), contenuto di umidità (MC), pH, conducibilità elettrica (EC), contenuto organico totale (TOC), Azoto Totale (TN), Fosforo Totale (TP), Potassio Totale (TK) e respirazione.

La possibilità di impiegare diverse tipologie di rifiuti organici grezzi per produrre compost, secondo valutazioni quantitative e basate sul ciclo di vita si concentra su (Hemidat et al., 2018):

- il monitoraggio e l'analisi dei parametri operativi temporali che regolano il processo di compostaggio aerobico;
- la valutazione della qualità del compost ottenibile in pratica implementando un impianto per il compostaggio controllato.

2.3.1. Il prodotto finale del processo di compostaggio

Il compost è il prodotto finale recuperato dal processo di compostaggio che può essere utilizzato come fertilizzante agricolo nei terreni grazie alle sue caratteristiche di un elevato contenuto di sostanza organica nonché di abbondanza di macro e micronutrienti (Tahseen Sayara et al., 2020). Un aspetto importante del compost è che esso può sostituire vantaggiosamente e in modo sostenibile i fertilizzanti inorganici (Gai et al., 2019). Il compost organico deve avere alcune caratteristiche per poter essere ammesso all'uso agricolo, deve essere stabile, privo di agenti patogeni e di semi vitali di piante (Li et al., 2012; Awasthi et al., 2017; Bertoldi et al., 1983; Sánchez et al., 2017; Hemidat et al., 2018; Tahseen Sayara et al., 2020). Al contrario un compost immaturo e non stabile non può essere sparso sul suolo (Ravindran et al., 2014) perché potrebbe causare alle piante un'inibizione della crescita, compresa l'immobilizzazione, lo squilibrio dei nutrienti necessari alle piante, la fitotossicità e l'esistenza di batteri patogeni e di sali inorganici (Flavel et al., 2005; Huang et al., 2006; Bouajila e Sanaa, 2011; Daniel e Bruno, 2012; Papafilippaki et al., 2015; Wuang et al., 2016; Malińska et al., 2017; Sanasam et al., 2017; Liu et al., 2018; Tahseen Sayara et al., 2020).

La valutazione della qualità del compost per uso agricolo è determinata da diversi criteri di qualità che considerano nel compost il suo contenuto di nutrienti, stabilizzazione della sostanza organica, assenza di metalli pesanti e di composti tossici (Ajmal et al., 2020; Tahseen Sayara et al., 2020).

Le caratteristiche principali della qualità del compost, per uso agricolo, sono "stabilità" e "maturità". Entrambe queste caratteristiche determinano se sono presenti composti fitotossici e se vi sono prodotti instabili nella materia organica provenienti dall'attività microbica (Bernal et al., 2009; Komilis e Tziouvaras, 2009; Raj e Antil, 2011).

La maturità del compost è una misura dell'idoneità del compost per usi agricoli, escludendo la fitotossicità o l'effetto negativo sulla crescita delle piante (Komilis et al., 2011; Sarsaiya et al., 2019a; Sarsaiya et al., 2019b),

La stabilità del compost rappresenta la resistenza della materia organica contro un'ulteriore ampia biodegradazione o attività microbiologica (Cerdeira et al., 2018).

In letteratura sono stati utilizzati diversi test per valutare la stabilità e la maturità di un compost (Raj e Antil, 2011).

Le tecniche di respirazione si basano sul consumo di ossigeno da parte dell'attività microbica, sono metodi utili per determinare la stabilità e la maturità del compost, L'indice di respirazione correla la degradazione di diversi materiali con il contenuto di frazione organica e le attività biochimiche dei microbi (Adani et al., 2003; Barrena et al., 2009).

I test di germinazione sono spesso impiegati per misurare la maturità di un compost (Adani et al., 2004; Guo et al., 2012).

2.4. Fattori che influenzano il processo di compostaggio

I fattori che, in diversa misura, influenzano l'andamento del trattamento di compostaggio sono molteplici. Ricercatori recenti hanno studiato l'interazione tra fattori fisici, chimici e biologici che avviene durante il compostaggio naturale in condizioni controllate (Ajmal et al., 2020). Considerando che questi fattori sono cruciali in un processo di compostaggio ottimale l'opportunità di agire sul loro controllo è decisiva.

Fattori chiave ampiamente riconosciuti nell'ottimizzazione del processo di compostaggio, che determinano le condizioni favorevoli per la degradazione della materia organica e la crescita microbica, sono i seguenti (Das e Keener, 1996; Richard et al., 2002; Agnew e Leonard, 2003; Oazana et al. al., 2018; Hemidat et al., 2018; Wainaina et al., 2020):

- un'adeguata composizione della materia prima;
- un intervallo di temperatura;
- durata delle diverse fasi termiche;

- concentrazione dell'inoculo;
- contenuto di umidità;
- rapporto C:N;
- un'adeguata concentrazione di ossigeno;
- un pH accettabile;
- adeguate dimensioni delle particelle;
- ammendanti di materiali secchi, per aumentare la porosità delle masse.

2.4.1. Le materie prime di scarto biologico

Il processo di compostaggio comincia non appena si verifica un accumulo di materiale organico. La composizione delle masse dei materiali e soprattutto il rapporto superficie/volume delle particelle e le proprietà delle masse dei materiali di partenza influenzano l'efficacia dell'aerazione. Queste caratteristiche possono essere migliorate triturando e miscelando i rifiuti, riducendo la dimensione media delle particelle dei materiali, da sottoporre a compostaggio, fino a 0,5-5 centimetri. Quando le materie prime vengono preventivamente sottoposte a sfibratura e miscelazione, le loro superfici possono essere più facilmente attaccate spontaneamente dai microrganismi e il processo diventa più veloce.

Molte sono le materie prime organiche che possono essere trattate nel processo di compostaggio, possono essere una miscela di diversi prodotti organici come (Ajmal et al., 2020):

- rifiuti da potatura e movimentazione di parchi e giardini, foglie, sfalci e ramaglie;
- sottoprodotti non trattati della lavorazione del legno, segatura di legno e trucioli;
- cortecce d'albero;
- scarti dell'industria agroalimentare (polpe, bucce, ecc.), scarti dell'industria vinicola, scarti dell'industria olearia;
- paglie di cereali, residui colturali, olio, scarti di insilati provenienti da allevamenti zootecnici.
- concimi zootecnici da latte, bovini, avicoli;
- rifiuti solidi organici urbani.

Il contenuto di umidità può variare dal 10% al 60% per i tipici rifiuti di campo, mentre è solo dal 20% al 25% per i tipici rifiuti solidi urbani. In conseguenza del diverso contenuto di umidità delle diverse tipologie di rifiuti che vengono miscelati nella massa alla rinfusa da sottoporre a compostaggio, per ottenere un contenuto di umidità ottimale, è possibile aggiungere quantità correttive di acqua alla massa alla rinfusa, in una prima fase del processo di compostaggio. Nel caso del compostaggio, ottenuto dai fanghi, il contenuto di umidità è alto da circa il 75% all'80%, è necessario ridurre il contenuto di umidità aggiungendo ammendanti di materiali secchi, come trucioli di legno e segatura. Essendo questi materiali porosi aumentano la porosità favorendo lo scambio di ossigeno durante il processo biologico (Vigil, 1994).

Per quanto attiene la natura delle materie prime, gli elementi decisivi nel trattamento di compostaggio sono vari: rapporto carbonio:contenuto di azoto (C:N), pH, struttura chimica della materia organica, contenuto di nutrienti e sali (Hemidat et al., 2018). La preparazione della materia prima iniziale contenente diversi rifiuti organici grezzi, per ottenere un corretto funzionamento del processo, deve rispettare l'intervallo di valori raccomandato per ottenere la qualità del prodotto e la sicurezza ambientale (Tiquia et al., 2002; Sánchez, 2006; Ruggeri et al., 2009; Akdeniz, 2019; Zhang e Sun, 2018; Soobhany et al., 2015; Tahseen Sayara et al., 2020).

Idealmente, diversi rifiuti grezzi dovrebbero essere mescolati insieme per formare una materia prima ottimale caratterizzata dalla seguente gamma di condizioni:

- granulometria della materia prima < 2,54 cm;
- rapporti C:N da 25 a 35;
- densità apparente massima di 650 kg m⁻³;
- contenuto di umidità in peso dal 50% al 60%;
- concentrazioni di ossigeno superiori al 10%;
- valori di pH compresi tra 6,5 e 8,0;
- temperature comprese tra 55°C e 65 °C.

2.4.2. La densità apparente

La quantità favorevole di densità apparente BD per le materie prime è massimo di 650 kg m⁻³, un valore tale da consentire un'aerazione favorevole per supportare condizioni aerobiche nel processo di compostaggio (Dougherty, 1999; Cekmecelioglu et al., 2005; Ruggieri et al., 2009).

2.4.3. Il rapporto C:N

In genere, in pratica, è necessario raggiungere almeno una miscela di materiali con un contenuto di umidità e un rapporto C:N soddisfacente, come sopra discusso, per ottenere un compost soddisfacente.

Tra gli elementi chimici necessari alla decomposizione da parte delle popolazioni microbiche, il carbonio C e l'azoto N sono i più determinanti, sebbene vi siano altri nutrienti che possono essere coinvolti nel processo di compostaggio:

- il carbonio fornisce l'energia e soprattutto la materia base per costituire circa il 50% della massa delle cellule microbiche;
- l'azoto costituisce un componente di base delle proteine, degli acidi nucleici, degli amminoacidi, degli enzimi e dei coenzimi indispensabili per la crescita e la funzione delle cellule microbiche.

Per il processo di compostaggio un rapporto C:N ben accettato per una materia prima è di circa 20 - 25. Questo rapporto è leggermente inferiore ad uno teorico di 30:1, cioè 30 parti C per ogni parte N in peso, corrispondenti ai 30 atomi di carbonio in media, dei composti di carbonio che sono utilizzati dai batteri come fonte di energia, per 1 atomo di azoto, dei composti azotati utilizzati dai batteri per la propria biosintesi proteica.

Valori più elevati di carbonio determinano un relativo deficit di azoto, che causa una rapida biosintesi di tutto l'azoto disponibile, e che quindi determina la morte di buona parte dei batteri presenti e, solo successivamente, l'attività microbica riprende con altri batteri che sfruttano l'azoto prima immagazzinato nelle cellule. Il quantitativo di carbonio disponibile viene quindi ridotto progressivamente dalla respirazione e dall'emissione di anidride carbonica, mentre l'azoto viene continuamente riciclato.

Man mano che il processo di compostaggio procede, il rapporto C:N diminuisce gradualmente a 15:1 o fino a 10:1 nel compost finito. In questo modo, lo sviluppo del processo viene notevolmente rallentato. Quando invece la quantità di carbonio è relativamente limitata per cui non fornisce energia sufficiente per convertire l'azoto assimilabile in proteine, i batteri sfruttano appieno il carbonio presente producendo gas di ammoniaca con conseguente eliminazione dell'azoto in eccesso. Con ciò si ha produzione di cattivi odori indesiderati e perdita di azoto che viene disperso nell'atmosfera. Questo è il risultato del continuo consumo di composti organici prodotti dai microrganismi.

Circa due terzi del carbonio (C) viene rilasciato nell'atmosfera sotto forma di anidride carbonica (CO₂) e il restante terzo viene incorporato insieme all'azoto (N) nelle cellule microbiche. Successivamente, una volta che quelle cellule muoiono, l'azoto viene rilasciato nel prodotto trattato. Un rapporto C:N intorno a 30:1 è una precisa esigenza del processo di compostaggio perché a rapporti inferiori N risultando esuberante è soggetto a disperdersi principalmente in atmosfera come gas ammoniacale, con produzione di cattivi odori.

D'altra parte, rapporti più elevati, cosa però poco frequente nel compostaggio, provocano una quantità insufficiente di N per un'adeguata crescita delle popolazioni batteriche, una temperatura più bassa del compost e un conseguente lento tasso di degradazione biologica. In pratica dal colore della materia si possono ricavare alcune indicazioni come il colore verde indica che il contenuto di umidità tende ad essere alto in N, e il colore marrone indica che la materia tende ad essere molto secca in C.

Il tasso di decomposizione biologica dei rifiuti varia a seconda della complessità dei composti del carbonio C. La degradazione biologica procede da una facile e rapida degradazione verso una più lenta degradazione secondo la successiva progressione in ordine temporale di degradazione: carboidrati -> emicellulose -> cellulosa = chitina -> lignina (Chen et al., 2011).

Gli scarti di frutta e verdura, che sono costituiti principalmente da carboidrati semplici (zucchero e amidi), vengono degradati più facilmente e rapidamente. Al contrario, foglie, steli, gusci di noce, corteccia di alberi, che sono prevalentemente costituiti da cellulosa, emicellulosa e lignina, si decompongono molto lentamente.

2.4.4. Controllo del contenuto di umidità

In una materia prima il suo contenuto di umidità varia a seconda dei particolari materiali presenti. Un adeguato contenuto di umidità può essere ottenuto pesando la miscela delle quantità dei diversi materiali, che compongono la materia prima, ciascuno con il proprio contenuto di umidità. I materiali con un'elevata quantità di fibre, come paglia e trucioli di legno, hanno un contenuto di umidità più elevato (oltre il 60%) questo inibisce le condizioni aerobiche; materiali come erba tagliata, terreno e letame con poca resistenza strutturale hanno un contenuto di umidità inferiore, questo è favorevole alle condizioni aerobiche.

Il contenuto di umidità delle masse organiche è essenziale per assicurare gli scambi di nutrienti attraverso le membrane delle cellule e mobilitare gli enzimi. Un contenuto di umidità accettabile è fondamentale per mantenere, lungo l'intero processo di compostaggio, condizioni aerobiche e un buon tasso di compostaggio. Il contenuto di umidità è considerato ottimale se compreso tra il 40 e il 65%. Valori inferiori al 40% riducono l'acqua necessaria al metabolismo e all'attività dei microbi, provocano un compostaggio più lento, provocano un rallentamento dell'attività microbica, che si ferma del tutto se inferiore a un contenuto di umidità del 20%. Mentre un alto contenuto di umidità superiore al 65% tende a riempire i vuoti dei pori con acqua e contemporaneamente ad allontanare l'aria dagli interstizi tra le particelle delle masse organiche, impedendo la diffusione dell'ossigeno nella massa. Questo fa evolvere il processo aerobico in uno anaerobico indesiderato.

Anche il contenuto di umidità contribuisce a modulare la temperatura nella materia prima, condizioni più asciutte, contro quelle più umide, nella materia prima danno una risposta più rapida al riscaldamento o al raffreddamento dei materiali presenti nella materia prima.

L'umidità può essere misurata con analisi di laboratorio del materiale trattato. Se la materia prima è eccessivamente secca, è possibile aggiungere un'ulteriore quantità di acqua durante il processo di miscelazione per ottenere un contenuto di umidità adeguato.

2.4.5. Controllo del pH

Il pH (che misura l'acidità o l'alcalinità) delle materie prime influenza l'attività e la crescita dei batteri e la formazione di composti dell'azoto N. Il pH nei materiali iniziali dovrebbe essere compreso tra 6,0 e 7,5, poiché intorno alla neutralità è più favorevole per le attività dei batteri. Al contrario, un ambiente acido tra 5,5 e 8,0 è più adatto allo sviluppo dei funghi. Un pH della sostanza organica maggiore di 7,5 provoca una perdita di ammoniaca.

Nel corso della fase di bio-ossidazione avviene un iniziale abbassamento del pH verso livelli acidi (5 ÷ 6), per la creazione di anidride carbonica e acidi organici. Successivamente, proprio per l'azione combinata di aerazione che ne abbassa il livello e della microflora ammonizzante che decompone le proteine generando ammoniaca, il pH sale fino a 8÷9.

Alla fine del processo, invece, si ha un tamponamento del pH verso livelli tra 6,5 e 7,5, di pressoché neutralità, nel compost finale, da parte dei batteri nitrificanti che trasformano l'ammoniaca in acido nitroso e acido nitrico.

Un pH basso è sfavorevole al processo di compostaggio. Quando inizialmente i rifiuti grezzi sono caratterizzati da un basso pH, la crescita e l'attività dei microbi risultano effettivamente limitate e anche l'aumento della temperatura risulta lento (Partanen et al., 2010; Sundberg et al., 2004).

Valori di pH superiori a 6,5 e inferiori a 8,0 sono considerati appropriati per la degradazione della materia organica da parte di microrganismi, sebbene il processo possa assumere un pH più elevato (Moldes et al., 2007; Buono et al., 2011; Gigliotti et al., 2012; Ajmal et al., 2020).

La fonte dei rifiuti organici differenziati, in quanto generalmente raccolti e trattati in un impianto per il compostaggio di una zona a clima caldo, è costituita principalmente da rifiuti alimentari che possono abbassare il pH e presentare un'elevata quantità di carboidrati che, all'interno del processo di compostaggio, vengono degradati in acidi organici.

Al contrario, alcuni materiali come il letame da stalle da latte possono aumentare il pH. In generale, un controllo del pH per rimanere entro un intervallo prescritto può essere difficile da praticare. Una misura rappresentativa del pH attraverso la materia prima può essere eseguita mediante test di laboratorio o un pH-metro.

2.4.6. Controllo della temperatura

La temperatura della massa durante la bio-ossidazione può raggiungere e oltrepassare i 60 - 70 °C, il suo effetto è quello di selezionare i microrganismi esistenti e di eliminare i microrganismi patogeni. Quindi è fondamentale mantenere queste temperature all'interno delle masse di materiali, senza superarle per evitare la morte dei microrganismi con il conseguente arresto del processo di compostaggio. Le operazioni funzionali al controllo della temperatura sono il rivoltamento delle masse, ed inoltre l'aerazione diretta delle masse.

La temperatura nella materia prima influenza la crescita e l'attività dei batteri, cioè il tasso di decomposizione delle materie prime. Una temperatura più elevata determina una più rapida decomposizione dei composti organici, una disintegrazione dei semi delle erbe infestanti e la distruzione dei patogeni. Tuttavia, la temperatura non deve superare un valore di 70 °C per non inibire l'attività dei batteri.

In un compostaggio efficiente, di un sistema a serbatoio o a pila aerata interna, l'intervallo di temperatura termofila nel compostaggio dei materiali di scarto per tre giorni è tra 40 °C e 70 °C, il cui valore ottimale va da 55 °C a 65 °C. Durante questo periodo i materiali devono essere girati per almeno cinque volte (Chen et al., 2011).

Durante il processo di compostaggio la temperatura può essere monitorata da un termometro. La temperatura può essere regolata, per rimanere all'interno dell'intervallo ottimale, attraverso diverse strategie come: aerazione, rivoltamento e correzione del contenuto di umidità all'interno della materia prima (Chen et al., 2011).

2.4.7. Controllo della concentrazione di ossigeno

La concentrazione di ossigeno nell'atmosfera è di circa il 21%, tuttavia anche l'attività aerobica dei batteri può essere compatibile con una concentrazione di ossigeno peggiore pari al 5%. Comunque, nella materia prima, una concentrazione di ossigeno superiore al 10% dovrebbe essere ottimale. Nel corso della fase di bio-ossidazione, la concentrazione di ossigeno nelle masse dovrebbe risultare all'interno del range tra il 5% e il 15% del volume del cumulo.

I batteri aerobi consumano ossigeno per ossidare il carbonio C per produrre energia e per produrre composti di carbonio. Quando la disponibilità di concentrazione di ossigeno aumenta e di conseguenza aumenta il consumo di ossigeno, nella materia prima avviene una crescita batterica e un aumento della loro attività di bio-degradazione.

Quando, invece, la concentrazione di ossigeno è insufficiente si corre il rischio di anossia della biomassa del substrato che provoca il prevalere dei batteri anaerobi, l'accumulo di composti ridotti (acido solfidrico, mercaptani, ecc.) e la creazione di emissioni maleodoranti. Per questo motivo l'efficienza dell'aerazione per mantenere attivi i batteri aerobi è fondamentale nel processo di compostaggio, può essere garantita dall'aerazione della materia prima sia con metodo passivo che con metodo attivo. Una delle strategie di aerazione più efficaci è rivoltare i materiali del cumulo.

Nella fase di bio-ossidazione del compostaggio si ricorre in modo ripetuto a operazioni di rivoltamento delle masse di materiali ed eventualmente anche all'aerazione forzata per prevenire detti inconvenienti, mentre nella fase di maturazione, a causa dei processi biochimici più lenti e della minore domanda di ossigeno, la cui concentrazione dovrebbe da essere tra l'1% e il 5% del volume del cumulo, tali rivoltamenti non sono sempre necessari.

Considerando l'importanza della concentrazione di ossigeno nel compostaggio aerobico, è necessario usare un misuratore di concentrazione di ossigeno per monitorare in modo continuo la stessa concentrazione nelle masse di compost. È quindi possibile monitorare il processo di compostaggio per verificare se l'aerazione è adeguata all'andamento della decomposizione attiva dei materiali.

2.4.8. Monitoraggio del processo di compostaggio

Il processo di compostaggio può essere monitorato misurando i parametri che indicano se le condizioni biologiche sono sufficientemente sviluppate durante il processo di compostaggio, questi parametri di funzionamento sono: concentrazione di ossigeno, temperatura e contenuto di umidità.

Tracciando un diagramma in funzione del tempo di compostaggio, normalmente il processo monitorato mostra profili quantitativi complessivi, che rivelano l'andamento del processo di compostaggio aerobico, di alcuni parametri operativi temporali:

- profilo decrescente del contenuto di umidità rispetto al tempo di compostaggio;
- profilo decrescente del contenuto di Carbonio Totale (TC) organico rispetto al tempo di compostaggio;

- profilo crescente di Azoto Totale (TN) rispetto al tempo di compostaggio;
- profilo decrescente del contenuto di carbonio:azoto (C:N) rispetto al tempo di compostaggio;
- profilo del pH rispetto al tempo di compostaggio;
- profilo crescente per la conducibilità elettrica rispetto al tempo di compostaggio.

Il test di respirazione effettuato su campioni di compost può indicare il grado di stabilità del compost finale.

2.4.9. Metodi di monitoraggio del processo di compostaggio

Negli impianti sono generalmente disponibili metodi di misura e di monitoraggio facili e affidabili per controllare le principali proprietà fisiche e chimiche che influenzano le prestazioni nel processo di compostaggio (Benito et al., 2005; Hurerta-Pujol et al., 2010).

I principali parametri di controllo per ottenere condizioni di compostaggio ottimali e per la garanzia della qualità del prodotto si applicano a tutti i metodi e le tecnologie di compostaggio, con qualche enfasi più specificatamente correlata alla varia struttura, ai tipi di materia prima, alla tecnologia di compostaggio e all'esperienza dell'operatore (Hemidat et al., 2018).

2.4.10. Analisi analitica

L'analisi analitica può essere effettuata per misurare la quantità dei composti chiave. Il carbonio totale (TC) e il valore dell'azoto totale (TN) nella materia possono essere misurati a parte con un analizzatore di elementi. Da questi valori è possibile ricavare il rapporto C:N.

Il fosforo totale (TP) può essere misurato utilizzando un analizzatore di elementi.

Il pH può essere misurato in un campione diluito all'interno di una soluzione di acqua distillata 1:10 (10 parti di acqua) utilizzando un pH-metro.

La conducibilità elettrica (EC) da una misura della quantità di sali solubili presenti nel materiale trattato, la conducibilità elettrica è maggiore quanto maggiore è la quantità di sali solubili presenti nel materiale trattato. Essa può essere misurata in un campione diluito all'interno di una soluzione di acqua distillata 1:10 (10 parti di acqua) utilizzando un misuratore EC.

Il contenuto di umidità dei campioni può essere determinato in base alla perdita di peso mettendoli nel forno ad essiccare a 105 ° C per 24 h.

L'analisi della dimensione delle particelle può essere eseguita con il metodo della setacciatura, che utilizza 15 grammi di ciascun campione di compost classificato rispettivamente attraverso setacci da 20, 35, 50, 100, 160, 200 e 230 (Ajmal et al., 2020); oppure attraverso sistemi a diffrazione laser.

2.5. Strategia per ottimizzare il processo di compostaggio

2.5.1. Velocità ed entità della reazione

La misura oggettiva delle prestazioni del processo in termini di tasso di biodegradazione dei rifiuti può essere considerata un compito importante nel processo di compostaggio. Il tasso di biodegradazione è un fattore determinante per le prestazioni di un processo di compostaggio. Quando non si effettua nessuna misura nel processo di compostaggio si hanno problemi che possono verificarsi in un impianto per il compostaggio: una progettazione e un controllo del processo non ottimali, prestazioni operative irregolari, problemi di odore.

Con l'obiettivo di impiegare il residuo di processo, il compost, come fertilizzante organico per il suolo, è decisivo considerare vari aspetti della qualità del prodotto finito. Per questo motivo è decisivo enfatizzare le prestazioni del processo principalmente in termini di velocità di decomposizione del processo di compostaggio (Finstain et al., 1986).

Come nel caso di qualsiasi reazione biochimica, ci sono due argomenti decisivi:

- la velocità di reazione (cinetica), che corrisponde alla velocità di decomposizione dei rifiuti, è determinante per le prestazioni del processo;
- l'entità della reazione a cui si avvicina al completamento (termodinamica), che corrisponde all'entità della biodegradazione (grado di stabilizzazione), è determinante per la qualità del prodotto.

2.5.2. Vantaggi della rapida decomposizione

Gli elementi che supportano l'opportunità di massimizzare il tasso di biodegradazione nel compostaggio dei rifiuti sono diversi, questi sono (Finstain et al., 1986):

- una rapida ed efficiente decomposizione attraverso il metabolismo aerobico che allevia rapidamente alla fonte il problema dell'odore legato alla lavorazione di materiali putrescibili, che emanano odori;
- il problema dell'odore prodotto nel residuo di processo (che può essere utilizzato come fertilizzante per compost) può essere affrontato in modo analogo ottimizzando in un determinato periodo di tempo la fase di stabilizzazione.

2.5.3. Fattori che influenzano il tasso di decomposizione

Il tasso di decomposizione dei rifiuti dipende direttamente dal tasso di vaporizzazione dell'acqua. Infatti la rimozione dell'acqua nel trattamento di compostaggio permette di ottenere un residuo più asciutto e ben manipolabile. A questo proposito, al posto del cippato come ammendante si potrebbero utilizzare residui di processo riciclati (compost) se costituiti da un residuo secco sufficiente.

I vantaggi di un alto tasso di decomposizione sono i seguenti (Finstein et al., 1986):

- meno materiale da movimentare,
- meno inventario;
- minore esigenza di spazio impiantistico e di pertinenze meccaniche;
- il materiale è privo di trucioli di legno, ciò riduce la possibilità di crescita di *Aspergillus fumigatus*, un fungo cellulolitico potenzialmente patogeno che produce spore nell'aria negli impianti per il compostaggio.

Un maggiore tasso di biodegradazione influisce sull'economicità favorevole della costruzione di strutture e del normale funzionamento di un impianto per il compostaggio, inoltre consente di ridurre i cattivi odori e i potenziali rischi per la salute delle persone.

2.5.4. Impianti di processo di compostaggio

I rifiuti di compostaggio possono essere trattati in un recipiente o reattore all'interno del quale è possibile effettuare la miscelazione meccanica per aerare i rifiuti. A volte viene aggiunto ossigeno attraverso l'aerazione forzata. Gli impianti per il compostaggio devono essere, in considerazione del basso valore economico del compost finale, i più semplici possibili e a basso costo energetico (Amirante, 2017).

Per ottenere una biodegradazione più completa nel processo di compostaggio diversi studi scientifici hanno indagato le possibilità offerte dai sistemi di compostaggio in un reattore nel trattamento di diverse tipologie di rifiuti organici grezzi (Mandpe et al., 2019); letame suino (Awasthi et al., 2019a; Ravindran et al., 2019); rifiuti solidi urbani (Malinowski et al., 2019); fanghi di depurazione (Jain et al., 2019). Gli impianti per il compostaggio in recipiente sono sistemi che, controllando il processo ambientale, consentono di avere come prodotto risultante un compost maturato, positivamente qualificato per un uso agronomico (Ajmal et al., 2020).

In base ai requisiti di legge, di recente più stringenti, in materia di qualità dell'aria e odori fastidiosi, l'attuale processo di composizione tende ad adottare, contro impianti a sistema aperto, strutture chiuse più controllate e costosi siti di compostaggio in serbatoio (Hemidat et al., 2018).

In un impianto per il compostaggio in serbatoio è decisivo ottimizzare i fattori operativi per ridurre favorevolmente i tempi di trattamento del compostaggio fino alla massima flessibilità e ottenere contemporaneamente un compost con il completamento della fase di degradazione per soddisfare il requisiti di qualità standard.

La lunga durata (almeno 90 giorni di durata) va invece considerata come uno dei requisiti noti nella trasformazione dei rifiuti organici. A questo proposito, l'uso di ammendanti della porosità, come la paglia di riso (Karnchanawong e Nissakla, 2014; Awasthi et al., 2016; Cerda et al., 2017; Ajmal et al., 2020) con i rifiuti agricoli, per migliorare la C rapporto /N della miscela e del contenuto di nutrienti sul prodotto finale, ha molteplici effetti sul processo di compostaggio: una riduzione del tempo di trattamento, un aumento del tasso di degradazione della materia organica, un supporto alla crescita di microrganismi e una riduzione delle perdite di azoto.

Per quanto riguarda gli impianti per il compostaggio in serbatoio, in letteratura si riscontrano alcune lacune e carenze, tra cui le principali sono le questioni relative all'ottimizzazione e alla riduzione del tempo totale di compostaggio, alla temperatura esterna applicata. Tuttavia, alcuni di questi problemi, come il tempo di durata ottimale per il compostaggio, sono ancora una questione aperta, in particolare l'uso di alte temperature applicate esternamente per ridurre la durata complessiva del compostaggio per aumentare la durata della fase termofila (Pandey et al., 2016; Hema Nalini et al., 2016; Bian et al., 2019; Ajmal et al., 2020).

Il cantiere di un impianto per il compostaggio occupa una superficie che complessivamente e per ciascuna delle aree funzionali è proporzionata in base alla quantità e qualità delle materie prime organiche fornite, e alla tecnica di compostaggio e, di conseguenza, ai relativi tempi di processo.

Generalmente un impianto per il compostaggio molto semplice è composto dalle seguenti aree funzionali:

- area per il ricevimento e pesatura delle materie prime;
- area per lo stoccaggio dei materiali in ingresso, dove i materiali sono suddivisi in due frazioni: le frazioni putrescibili da inserire rapidamente nel processo produttivo e la frazione lignocellulosica da eventualmente stoccare per periodi di conservazione anche prolungati;
- area per la fase di bio-ossidazione, comprensiva degli strumenti per: defibrare i materiali lignocellulosici; mescolare i materiali;
- area per la maturazione e umificazione della massa, comprensiva degli strumenti e delle attrezzature per l'aerazione e la rivoltatura, che è la superficie più ampia dell'intero stabilimento;
- area per lo stoccaggio finale e raffinazione con impianti per il prodotto in attesa di vendita.

La preparazione delle materie da trattare prima di essere sottoposte al processo consiste nella riduzione delle dimensioni delle materie prime a 5-8 cm, questa operazione può essere eseguita manualmente o impiegando piccoli triturator. Questi materiali devono essere preparati, miscelati e gestiti per ottenere in modo continuativo una composizione piuttosto omogenea durante tutto l'arco dell'anno, aggiungendo regolarmente il materiale secco (legno, foglie e altro) al materiale umido (scarti di allevamento di bestiame, scarti alimentari, ecc.).

Se l'apporto di sostanza organica è regolare, ma non abbondante, è opportuno creare un cumulo continuo, dove il materiale viene aggiunto sempre da uno stesso lato, mentre il materiale più maturo si trova dall'altro. Nel mucchio, agendo come un grande fermentatore, prendono avvio i processi di biodegradazione.

La quantità di materiale in ingresso da sottoporre a trattamento di compostaggio deve essere proporzionata alla capacità lavorativa dell'impianto per il compostaggio.

La disponibilità dell'ossigeno indispensabile al processo è garantita da un'adeguata circolazione dell'aria nelle masse, che quindi devono essere sufficientemente porose e permeabili all'aria.

La temperatura interna deve essere rilevata in modo regolare in quanto è un indicatore diretto dell'andamento del processo. Le alte temperature (55-65 °C) sono indispensabili per la sanificazione dei materiali da diversi parassiti e dai semi di erbe infestanti, inoltre favorisce una selezione naturale della migliore flora batterica adatta alla produzione di un compost di migliore qualità.

Quando il processo è ben stabilito, nella massa del materiale la temperatura interna aumenterà dapprima entro 2-3 giorni per raggiungere un massimo (55-60 °C) in 18-25 giorni. In questa fase, le masse dei materiali devono essere girate e reintegrate di ossigeno, affinché la temperatura scenda. Il rivoltamento deve essere eseguito spostando verso l'interno il materiale esterno e verso l'esterno i materiali interni.

L'acqua è fondamentale per la vita dei microrganismi, eccessi o carenze di acqua possono portare sofferenze ai microrganismi, per cui occorre mantenere un giusto grado di umidità. Nel processo di compostaggio aerobico il contenuto di umidità ottimale può essere compreso tra il 50 e il 60 per cento. Il contenuto d'acqua nelle masse dei materiali deve essere, se necessario, aggiustato: umidificando le masse se sono troppo secche, a causa di perdite d'acqua per evaporazione, o, al contrario, asciugando le masse con aria calda se sono troppo umide.

La temperatura, abbassata con l'aerazione della massa, ricomincia ad aumentare, raggiungendo un massimo intorno ai 40 °C, entro 20 giorni, per poi diminuire lentamente. A questo punto sono nuovamente necessarie ulteriori operazioni di rivoltamento fino a quando non si può più osservare il riscaldamento. A questo stato corrisponde una massa, avente buona umidità e porosità, la cui buona parte delle sostanze organiche si è trasformata e di conseguenza la maggior parte dell'attività dei microrganismi è cessata per indisponibilità di sostanza organica biodegradabile.

Indicativamente, il processo di compostaggio è influenzato dai periodi stagionali come segue:

- nel periodo autunno - inverno la prima rivoltatura avviene dopo 25-30 giorni, per un totale di 3-5 giri; produzione di compost fresco in 2-3 mesi, pronto in 6-8 mesi;
- nel periodo primaverile - estivo la prima rivoltatura avviene dopo 20 giorni, con 3-5 giri in totale; produzione di compost fresco in 1-2 mesi, pronto in 4-6 mesi.

Dopo un ciclo completo di trattamento il compost finale deve essere vagliato con un setaccio a maglie piuttosto fini; il materiale che ha superato il setaccio può essere aggiunto alla nuova materia prima in ingresso.

Gli impianti per il compostaggio in serbatoio sono dotati di sistemi meccanici automatizzati ed efficienti per movimentare i materiali durante il processo. I materiali vengono movimentati nell'impianto da nastri trasportatori, scivoli e coclee (Vigilia, 1994).

I costi energetici richiesti dalla lavorazione front-end dipendono dal tipo di materie prime di scarto mentre sono abbastanza indipendenti dal tipo di impianto per il compostaggio. Nel caso dei fanghi normalmente viene aggiunto il cippato alla preparazione del compost, che alla fine del processo viene poi vagliato e riciclato per il successivo processo di compostaggio.

Nella fase di pre-lavorazione, i rifiuti di campo sono tipicamente sottoposti a triturazione, in un tritatore a vasca e a vagliatura. Nella fase di pretrattamento, i rifiuti solidi urbani sono sottoposti ad un trattamento front end, mediante triturazione, vagliatura e separazione magnetica (Vigilia, 1994).

La fase di post-elaborazione varia con i requisiti della commercializzazione del compost come: operazioni di vagliatura per rimuovere particolari residui o impurità nel compost come vetro, metalli; o miscelazione con fertilizzanti. Tuttavia, i costi energetici per la post-elaborazione sono generalmente piuttosto limitati (Vigilia, 1994).

Durante il compostaggio aerobico l'energia viene fornita per rispondere a diversi bisogni (Vigil, 1994).

Una prima parte di energia viene spesa per aerare il compost.

Una seconda parte di energia viene spesa per movimentare e spostare i materiali durante il processo.

Una terza parte di energia viene spesa prima di avviare il processo nel trattamento front-end dei rifiuti.

Una quarta parte della spesa energetica è spesa per fissare le caratteristiche del compost in base alle esigenze del marketing.

Il consumo di energia è diverso in ciascuna delle quattro porzioni di cui sopra a seconda della diversa tipologia tecnologica dell'impianto per il compostaggio.

Gli impianti per il compostaggio in serbatoio possono impiegare diversi sistemi meccanici per miscelare il compost ottenendo la necessaria aerazione la cui efficienza e consumo energetico sono abbastanza variabili tra loro. Nel caso di alcuni impianti in serbatoio, il compost viene aerato mediante soffianti centrifughe.

Le soffianti centrifughe sono il sistema di aerazione più efficiente e sono controllate monitorando la temperatura nel compost. Le soffianti sono azionate da motori elettrici la cui potenza varia da 1,5 a 9 kW in funzione della portata volumetrica di aria necessaria.

2.5.5. Impatti ambientali del compostaggio aerobico

I potenziali impatti sull'ambiente dei sistemi di compostaggio aerobico sono i seguenti:

- emissioni di odori e composti organici volatili (VOC);
- sviluppo di agenti patogeni;

- consumo di acqua;
- consumo di energia.

Per ciascuno di questi impatti devono essere adottate adeguate misure.

Le emissioni di odori e composti organici volatili (VOC) dal compostaggio aerobico sono effetti inevitabili della naturale biodegradazione aerobica dei materiali organici. Anche una biodegradazione parzialmente anaerobica può verificarsi nei sistemi di compostaggio aerobico a causa di una miscelazione o aerazione insufficiente.

Il processo di compostaggio implica la creazione di alcuni composti gassosi fetidi, anche se a concentrazioni relativamente basse, come acido solfidrico, solfuri organici volatili, ammoniaca, piridina, ammine, idrocarburi, terpeni, alcoli, chetoni, aldeidi, ed esteri (Wei et al., 2017; Ajmal et al., 2020).

La creazione e la concentrazione di diversi composti è influenzata dalle caratteristiche della materia prima, dalle condizioni operative di compostaggio e dall'ambiente (Awasthi et al., 2018). L'emissione di odori può essere ridotta mediando le caratteristiche dei materiali, applicando un'adeguata e continua aerazione, fornendo catalizzatori e inoculanti e impiegando impianti per il compostaggio ermetici.

L'uso di catalizzatori enzimatici sulla superficie di un materiale composto o nello spazio aereo sovrastante favorisce la reazione biologica e la degradazione dei composti maleodoranti.

L'aggiunta di paglia, reagenti chimici (come FeCl_3 , calce e MgO) e biochar ha l'effetto positivo di prevenire il rilascio di odori durante il trattamento di compostaggio (Ren et al., 2018; González et al., 2019; Wainaina et al., 2020).

Gli strumenti come l'olfattometro a lettura diretta possono essere utilizzati per identificare e quantificare l'odore. Diverse tecnologie possono essere impiegate per bonificare le emissioni di odori nel compostaggio aerobico, tra le quali ci sono:

- aerazione e miscelazione ottimizzate;
- biofiltrazione con compost e/o terreno;
- adsorbimento di carbone attivo;
- lavaggio a umido con soluzioni acide, perossido di idrogeno o altre varie soluzioni di lavaggio;
- diluizione con eccesso di aria di scarico;
- dispersione con cataste alte.

Negli impianti per il compostaggio in serbatoio possono essere disponibili tecnologie di controllo che catturano l'aria di scarico nel condotto e controllano l'emissione di odori. (Vigilia, 1994).

2.5.6. Agenti patogeni

Alimentando i sistemi di compostaggio con rifiuti grezzi, come i fanghi di acque reflue, e rifiuti organici dei rifiuti solidi urbani, comporta inevitabilmente l'introduzione nei sistemi di compostaggio di microrganismi patogeni come batteri, funghi e parassiti.

A questo proposito la distruzione di questi agenti patogeni è una necessità inevitabile che può essere soddisfatta e controllata impiegando due strategie durante il processo (Vigil, 1994):

- aumentando i livelli di temperatura, il processo di compostaggio aerobico essendo esotermico, è possibile mediante il mantenimento di temperature elevate ottenere l'eliminazione dei patogeni;
- riducendo il contenuto di umidità attraverso la materia sottoposta al processo di compostaggio, è possibile ottenere un'ulteriore eliminazione degli agenti patogeni asciugando il compost e quindi diminuendo il suo contenuto di umidità inferiore al 25%.

2.5.7. Assenza di inquinanti nelle materie prime

E' importante notare che, generalmente, la presenza di inquinanti nelle materie prime è considerata non ammissibile per la fattibilità dell'utilizzo del compost finale in agricoltura (Ajmal et al., 2020).

3. IL COMPOST-TEA

Il compostaggio consente di ottenere un preparato allo stato solido altamente umificato e stabile, che viene proposto in forma granulare sul terreno come ammendante, per migliorarne la struttura fisica e la fertilità biologica (Albiach et al., 2000; Zaccardelli et al., 2011) e/o come forma di nutrimento e difesa per le colture agrarie, in sostituzione dei fertilizzanti minerali, dei fungicidi e battericidi di origine chimica (Zaccardelli et al., 2006; Joshi et al., 2009).

L'interesse verso la riduzione dell'impiego di fertilizzanti chimici a favore di una maggiore sostenibilità ambientale ha determinato una crescente attenzione verso la modulazione delle pratiche agronomiche, prevedendo l'ottimizzazione dello sfruttamento di risorse naturali e scarti delle industrie agro alimentari per lo sviluppo di ammendanti organici naturali in forma liquida, noti come compost-teas (CTs), che possono essere applicati su terreno e apparato radicale in forma liquida o in forma spray sull'apparato fogliare della pianta, e di cui sono ben documentati gli effetti positivi sortiti, tra cui la prevenzione delle patologie in campo, sia del terreno che delle colture.

I CTs, come gli estratti acquosi semplici, sono entrambi derivati a partire da una estrazione in fase liquida a partire da compost di elevata qualità, tuttavia si utilizzano processi nettamente differenti.

Il compost-tea prevede l'infusione in acqua del compost per un periodo di tempo ed in condizioni variabili, ai fini dell'estrazione dei composti attivi per favorire la gestione liquida tramite fertirrigazione del prodotto così ottenuto (compost-tea). Il prodotto ottenuto è una sospensione liquida di molecole organiche/inorganiche e microorganismi che derivano dal compost.

Più in generale sono dei preparati organici liquidi ottenuti dall'ossigenazione (tea areati) o meno (tea non areati) di compost immerso in un mezzo liquido (acqua).

Il compost tea è una sospensione acquosa ottenuta attraverso l'estrazione da compost per via liquida. Essa può contenere nutrienti solubili organici e inorganici, e un ampio numero di organismi comprendenti batteri, funghi, protozoi e nematodi (Recycled Organics Unit, 2003; Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006).

Il compost tea è preparato alimentando l'estrazione dal compost con una fonte microbica (come melassa, alghe, polvere di roccia, acidi umici, acidi fulvici e altri) che agevola la crescita di popolazioni di microrganismi benefici (Scheuerell and Mahaffee, 2002; Scheuerell, 2003; Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006).

Applicando al processo di estrazione un trattamento di ossigenazione, a fronte di maggiori costi, si ottiene il compost tea areato (Scheuerell, 2003; Kelley, 2004; Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006). Il trattamento di ossigenazione consente di ottenere un'ampia varietà di organismi benefici che popola la mistura (Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006).

Il compost tea areato può essere preparato in un periodo breve di 2 o 3 giorni (Kelley, 2004; Recycled Organics Unit, 2006). Il compost tea areato ha il vantaggio di creare meno odori e di ridurre il rischio per gli uomini di contaminazione da patogeni.

Un trattamento alternativo è il processo di fermentazione che avviene senza areazione, cioè senza fornire ossigeno supplementare agli organismi (Scheuerell, 2003; Recycled Organics Unit, 2006). In esso, durante il processo di produzione, prevalgono per lo più condizioni anaerobiche che sono relativamente meno favorevoli allo sviluppo di microrganismi (Kelley, 2004; Recycled Organics Unit, 2006).

Il prodotto finale di tale trattamento è il compost tea non areato. La durata del processo di produzione del compost tea non areato arriva a un massimo di due settimane. Il compost tea non areato in genere presenta l'inconveniente di sviluppare gas maleodoranti.

Secondo alcuni ricercatori (Scheuerell, 2003; Recycled Organics Unit, 2006) la maggiore durata del trattamento del compost tea non areato favorisce l'accumulo di antibiotici e altri metaboliti nel compost tea che si ritiene attivino la risposta di difesa naturale della pianta favorendo la soppressione delle malattie delle piante.

Il compost tea contiene in sospensione acquosa microrganismi, nonché contiene molecole organiche ed inorganiche idrosolubili derivanti dall'estrazione dal compost. Esso è impiegato nella fertirrigazione del suolo coltivato o spruzzato direttamente sulle foglie delle piante, con finalità sia di sviluppo delle piante che di difesa dalle malattie delle piante (Recycled Organics Unit, 2006).

Recentemente la ricerca ha investigato la possibilità di impiegare estraenti diversi dall'acqua, quali le acque reflue dell'industria agro-alimentare, siero di latte, latticello, borlanda e melasse (Pane et al., 2010; 2012; Recycled Organics Unit, 2006). Dove gli stessi reflui possono anche avere funzione di additivi, come le caseine, per arricchire la composizione della sospensione acquosa di sostanze utili alla qualità del compost tea.

Per entrambi i metodi di produzione del compost tea, l'additivo microbico può essere aggiunto o meno. Se non viene aggiunto additivo, gli organismi hanno difficoltà a mantenersi attivi e hanno meno probabilità di sopravvivere al trasferimento dalla miscela al suolo o alle applicazioni sulle superfici delle piante (Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006).

Gli scopi principali nell'utilizzo in agricoltura del compost tea sono i seguenti:

- fornire alle piante i nutrienti disponibili solubili in acqua;
- migliorare le risposte di difesa delle piante alle malattie o sopprimere le malattie delle piante;
- migliorare la crescita delle piante aumentando le popolazioni e la diversità dei microrganismi presenti nel suolo.

L'uso del compost tea si concentra principalmente sull'integrazione dei nutrienti delle piante e anche sulla soppressione delle malattie (Weltzien, 1991; Yohalem et al., 1994; Recycled Organics Unit, 2006).

Il controllo delle malattie dovrebbe derivare dalla presenza nel compost tea di microrganismi benefici, sottoprodotti microbici (metaboliti) e nutrienti vegetali, che sono antagonisti nei confronti di vari patogeni delle piante. Tuttavia su questo argomento i risultati della ricerca sono in contrasto.

Alcune ricerche hanno dimostrato che il compost tea riduce la gravità delle malattie, ma è inefficace contro i funghi. Al contrario, altre ricerche hanno dimostrato che il compost tea è inefficace per la soppressione delle malattie o, addirittura, aumenta l'incidenza delle malattie.

3.1. *Composizione del compost tea*

Il compost tea contiene diverse sostanze organiche e inorganiche idrosolubili, disciolte in soluzione acquosa, azoto, fosforo e potassio e soprattutto acidi umici e fulvici. Comunque la salinità rimane su livelli che non eccedono i valori ammissibili per la vita naturale delle piante.

E' implicito il discorso che sia il compost impiegato che il liquido estraente devono essere entrambi privi di qualsiasi inquinante, ciò affinché il prodotto finale, il compost tea, possa essere utilizzato in agricoltura (Baldantoni et al., 2010; Zaccardelli et al., 2012) e in generale nell'ambiente naturale.

Una delle componenti basilari del compost tea è la frazione umica, costituita dalle seguenti frazioni: gli acidi fulvici, gli acidi umici e l'umina (Stevenson, 1994; Zaccardelli et al., 2012). Essa è derivata dai processi di decomposizione chimica e biologica delle masse di materiali organici di partenza.

Per la marcata eterogeneità dei materiali organici di partenza e per la numerosità delle reazioni che avvengono si ha come risultato la creazione di composti organici complessi, molto variegati, caratterizzati da elevato peso molecolare ed elevato contenuto di carbonio. Questi composti hanno la caratteristica di risultare, nel terreno, più stabili e più resistenti nel tempo rispetto a quelli originariamente contenuti nei materiali di partenza.

3.2. Microbiologia del compost tea

Generalmente, nel compost tea si trova in sospensione un'elevata diversità di tipi di microrganismi tra cui batteri, attinomiceti, lieviti e funghi, sia saprofiti che micorrizici.

La diversità in misura maggiore della numerosità delle popolazioni di microrganismi, è considerata il fattore che più influenza la qualità microbiologica di un compost tea (Palmer et al., 2010; Recycled Organics Unit, 2006). I diversi tipi di microrganismi presenti danno al compost tea le proprietà di bioattivazione della crescita vegetativa, nonché di controllo biologico di alcune principali malattie delle piante.

La componente biotica del compost tea dipende da diversi fattori inerenti il processo di fermentazione/ossidazione.

Nella produzione del compost tea si ricorre spesso durante il processo di fermentazione/ossidazione all'impiego di additivi per aumentare la biodiversità e la biomassa dei microrganismi (Scheuerell, 2006; Zaccardelli et al., 2012), sebbene questa pratica va usata con cautela considerata la possibilità di rischiare di stimolare anche lo sviluppo di batteri patogeni per l'uomo, tra i quali l'*Escherichia coli* (Scheuerell, 2003; Zaccardelli et al., 2012).

3.3. Impianto di produzione del compost tea

Il compost tea è prevalentemente prodotto all'interno di un impianto, il biofermentatore. Vi sono diversi tipi di impianti per la produzione del compost tea, la cui semplicità o complessità comunque, non influenza sostanzialmente le caratteristiche del prodotto ottenuto.

Nel biofermentatore il compost è posto all'interno di un sacco permeabile all'acqua, dove attraverso permeazione il liquido, che entra nel sacco, può estrarre dal compost le molecole organiche ed inorganiche idrosolubili che passano quindi nella soluzione acquosa, dalla quale si ottiene il compost tea. Nel biofermentatore l'efficienza di estrazione del compost e la produzione di compost tea areato è garantita da un sistema di ossigenazione dell'intera massa liquida.

Tra i sistemi di ossigenazione della massa liquida in genere si usa o un sistema di areazione indiretta come il ricircolo continuo del liquido estraente o un sistema di aerazione diretta come l'insufflazione attiva di aria. Un recipiente da 15 a 20 litri è riempito per metà d'acqua, è dotato di gorgogliatori d'aria collegati a una pompa dell'aria (Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006), e l'aria viene fatta passare dai gorgogliatori d'aria attraverso il recipiente per circa 10-20 minuti. Quindi il compost viene inserito nel recipiente fino a un riempimento del recipiente rispettando un franco dal bordo superiore per consentire il gorgogliamento. Il sistema di aerazione crea un flusso d'aria continuo e una turbolenza adeguata per la miscelazione dell'infuso.

Il tempo per la preparazione è minimo di circa 2-3 giorni, anche se si può considerare un tempo più lungo per la preparazione. Trascorso il tempo di trattamento, l'aeratore viene spento per circa mezz'ora al fine di consentire alla maggior parte dei solidi di depositarsi sul fondo del recipiente da cui si può raccogliere l'infuso. La parte solubile del tea viene decantata dall'alto, lasciando in basso i solidi insolubili, che possono essere reimmessi nel cumulo di compost.

Un'operazione finale di filtrazione attraverso un setaccio a maglia fine può essere applicata se si utilizza il compost tea con sistemi di spruzzatura, in modo da evitare l'intasamento degli ugelli degli spruzzatori.

3.4. Fattori che influenzano la produzione e la qualità del compost tea

L'efficienza di estrazione di sostanze nutritive e l'aumento della popolazione microbica è influenzata da condizioni adottate nella produzione di compost tea (Shrestha et al., 2011; Zaccardelli et al., 2012). I principali fattori che influenzano la produzione e la qualità del compost tea sono i seguenti (Scheuerell and Mahaffee, 2002; Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006):

- qualità del compost di partenza;
- rapporto composto/acqua;
- aerazione;
- nutrienti di fermentazione;
- estrazione e miscelazione;
- tempo di preparazione;
- condizioni abiotiche;
- materiali di filtrazione.

3.5. Qualità del compost di partenza

Il compost, per essere impiegato, deve essere efficacemente pastorizzato per distruggere i patogeni umani e vegetali. Questo scopo può essere raggiunto mantenendo la temperatura del compost ad un livello di 57°C, ininterrottamente per circa 3 giorni, all'interno delle intere masse di materie prime organiche (Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006).

Un'adeguata qualità del compost impiegato, che sia stato efficacemente pastorizzato, è fondamentale per ottenere un compost tea con caratteristiche ed efficacia adeguate e per ottenere un compost privo di organismi patogeni o parassiti. Inoltre, nel compost

originario le quantità di minerali e sali presenti devono essere contenute entro livelli non eccessivi ammissibili (Bess, 2000; Ingham, 2005; Scheuerell, 2003; Recycled Organics Unit, 2006).

Un compost altamente aerobico, composto da un mix di letame e/o materiali organici vegetali, deve essere preferito per garantire una buona qualità della produzione del compost tea. Si consiglia un compost altamente aerobico favorevole per mantenere un habitat in cui gli organismi benefici possono dominare e contrastare lo sviluppo di organismi non benefici, che tendono a crescere più rapidamente con concentrazioni di ossigeno inferiori a quelle richieste (Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006). Inoltre, i nutrienti solubili e gli alimenti presenti nel compost aerobico creano le condizioni per la crescita di organismi nel trattamento della preparazione del compost tea.

In campo agricolo, per fornire nutrimento alle piante e per inibire le malattie delle piante, il compost tea deve contenere principalmente i composti solubili, che sono stati estratti dal compost, e dovrebbe comprendere specie vantaggiose dei gruppi di organismi che vivono naturalmente nel suolo (Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006; Zaccardelli et al., 2012), che sono sia batteri benefici che funghi, e anche altri organismi benefici come protozoi, nematodi e microartropodi. (Bess, 2000; Scheuerell, 2003; Kelley, 2004; Recycled Organics Unit, 2006).

Le caratteristiche del compost possono generare diversi tipi di compost tea, eventualmente adatti a specifici usi agronomici (Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006). Da un compost ottenuto da letame e piante verdi e ricco di legno, alberi e arbusti (resistenti al rapido decadimento), si ritiene che ne beneficino suoli a prevalenza fungina (Touart, 2000; Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006). Da un compost ottenuto da una quota maggiore di piante verdi, ortaggi, tappeti erbosi e colture a filare, con letame e una piccola quantità di materiali legnosi, si ritiene che ne beneficino suoli a dominanza batterica (Touart, 2000) o sia batterica che fungina (Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006). Le piante perenni richiedono l'equilibrio del suolo dominato da funghi e batteri (Touart, 2000; Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006).

Un compost composto sia da letame animale che da materiale vegetale, rispetto ad un compost composto esclusivamente da materiale vegetale, di potatura di orti e prati, conferisce diversità nelle popolazioni microbiche (Scheuerell, 2003; Recycled Organics Unit, 2006), o maggiori quantità di elementi disponibili come fosforo, calcio e altri oligoelementi.

Si ritiene che gli antibiotici e altri metaboliti, che possono accumularsi nel compost tea durante la produzione, stimolino le risposte naturali di difesa delle piante a mitigare o a sopprimere le malattie delle piante (Scheuerell, 2003; Recycled Organics Unit, 2006).

Per l'utilizzo di compost tea, il periodo di stagionatura per il compost di partenza dovrebbe essere compreso tra 2 e 6 mesi dopo il processo di compostaggio. Tuttavia, non è noto se l'età del compost sia correlata alla perdita della comunità microbica o alla riduzione del nutrimento microbico (Scheuerell, 2003; Recycled Organics Unit, 2006).

3.6. Rapporto compost/acqua

Il rapporto tra compost e acqua tende a dipendere dal processo di preparazione e dall'impianto utilizzato. Un rapporto compost/acqua troppo piccolo produce un compost-tea eccessivamente diluito con meno nutrienti e organismi. Un rapporto troppo grande compost/acqua provoca un'estrazione insufficiente di nutrienti e organismi, inoltre la quantità insufficiente di acqua nell'attrezzatura fa sì che l'acqua non possa fluire attraverso il compost riducendo l'efficienza di estrazione (Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006).

In letteratura, per produrre un adeguato compost tea, i rapporti tra compost e acqua vanno da 2÷3 kg di compost in 75 litri di acqua a 9÷10 kg di compost in 200÷400 litri di acqua (Ingham, 1999; Recycled Organics Unit, 2006). Per quanto riguarda il rapporto tra compost ed acqua è stato indicato un valore ottimale di 1:10, rapporto che garantisce continuità allo scambio tra le due fasi e al mantenimento della concentrazione di ossigeno al di sopra della soglia di 6 ppm.

3.7. Aerazione

Condizioni altamente aerobiche sono favorevoli per sostenere l'esistenza e la crescita di microrganismi benefici e organismi benefici. Al contrario, condizioni di ossigeno ridotte favoriscono lo sviluppo di agenti patogeni vegetali e umani che diventano molto competitivi contro la maggior parte degli organismi benefici (Ingham, 2005; Scheuerell, 2003; Recycled Organics Unit, 2006).

Alcuni studi hanno evidenziato che brevi periodi, pochi minuti, ore o talvolta giorni, di condizioni anaerobiche, solo nel caso in cui gli organismi aerobi non vengono distrutti (Ingham, 2005), possono favorire un favorevole incremento della presenza di diversità di microrganismi (Scheuerell, 2004). Secondo detti studi, l'intercalare, all'interno di un ambiente dominato da condizioni altamente aerobiche, di brevi intervalli di condizioni anaerobiche può essere considerato favorevole (Ingham, 1998) solo se la presenza dei batteri anaerobi non comporta un aumento della loro popolazione totale.

Secondo altre ricerche i tempi di fermentazione più lunghi nella produzione del compost tea non areato generano un accumulo di antibiotici (Scheuerell, 2003; Recycled Organics Unit, 2006), che possono stimolare le naturali risposte difensive delle piante o aiutare la soppressione delle malattie. Il principale svantaggio degli organismi anaerobi e dei lieviti è la loro produzione di acidi organici volatili (VOA), alcoli, ammoniaca e fenoli, tutti tossici per le radici delle piante (Ingham, 1998).

Comunque, quando l'aerazione dell'infuso è garantita, le condizioni aerobiche possono essere sostenute e detti sottoprodotti anaerobi, VOA e alcoli, sono consumati da microrganismi aerobi (Ingham, 1998; Recycled Organics Unit, 2006).

3.8. Nutrienti di fermentazione

Tutti i nutrienti di fermentazione contenuti nel compost tea svolgono un ruolo selettivo chiave, dall'inibizione alla piena crescita, sul tasso di crescita delle popolazioni microbiche e dei diversi tipi di organismi (Scheurell, 2003; Recycled Organics Unit, 2006). D'altra parte, l'aumento delle popolazioni microbiche e della crescita fungina, mediante l'introduzione di nutrienti, deve essere gestito con cautela (Ingham, 2005; Scheurell, 2003; Recycled Organics Unit, 2006). Infatti i nutrienti possono determinare un maggiore consumo di ossigeno, il quale deve essere fornito al fine di non ridurre le condizioni aerobiche verso quelle anaerobiche (Ingham, 2005).

Quando la fermentazione del compost tea è conclusa al massimo livello di attività metabolica, nel compost tea rimangono sostanze nutritive non fermentate, queste ultime resterebbero a disposizione di tutti gli organismi e purtroppo anche degli organismi patogeni saprofiti che contrastano la soppressione, ottenibile con il compost tea, delle malattie delle piante (Scheurell, 2003; Recycled Organics Unit, 2006).

L'aggiunta di additivi nella preparazione del compost tea, in particolare della melassa, secondo alcuni studi si ritiene possa favorire la ricrescita di batteri patogeni umani (Duffy et al., 2004); ostacolare le caratteristiche di soppressione della malattia del compost tea (Scheurell, 2003; Zaccardelli et al., 2012); e per far aumentare *Escherichia coli* e *Salmonella* nelle miscele di compost tea. Tuttavia, questa conseguenza si ha solo se il compost di partenza utilizzato contiene questi organismi (Scheurell, 2003; Recycled Organics Unit, 2006), al contrario non si ha se questi organismi non sono presenti nel compost di partenza (Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006).

E' evidente che questa questione deve essere considerata per eliminare i rischi per la salute pubblica dovuti dalla potenziale contaminazione delle colture trattate.

3.9. Miscelazione ed estrazione

L'operazione di miscelazione è fondamentale nel processo di produzione del compost tea. Attraverso l'operazione di miscelazione è possibile ottenere l'estrazione fisica di batteri e funghi dal compost. Tuttavia, l'operazione di miscelazione deve essere calibrata per assicurare una corretta estrazione dal compost degli organismi benefici.

In effetti, una miscelazione eccessivamente rapida o energica può distruggere fisicamente le popolazioni di microrganismi benefici nel compost tea. Una miscelazione troppo lenta può ridurre l'efficienza dell'estrazione di una quantità sufficiente di organismi dal compost e, purtroppo, può anche consentire la formazione di biofilm anaerobi, che producono composti fitotossici nel tea liquido (Ingham, 2005; Recycled Organics Unit, 2006).

3.10. Tempo di preparazione

Un tempo di preparazione ottimale del compost tea deve essere tale che la maggior parte dei nutrienti e degli organismi solubili possa essere assorbita nel liquido o estratta dal compost. Una maggiore quantità di materiale solubile nel tea consente la disponibilità di più risorse nutritive per far crescere batteri e funghi benefici e di più nutrienti per la vita delle piante (Ingham, 2005).

Un tempo indicativo di infusione che massimizza la crescita batterica è di circa 18 ore, nel caso di un serbatoio da 115 litri dove l'operazione di aerazione è sufficientemente applicata.

A un tempo di infusione più lungo corrispondono maggiori quantità di nutrienti solubili e di organismi da estrarre dal compost nell'acqua. Tuttavia, quando l'apporto di ossigeno non è sufficiente, un lungo tempo di infusione può creare le condizioni per lo sviluppo di organismi anaerobi che creano sostanze fitotossiche nel compost tea. Anche un tempo di infusione più breve è meno favorevole alla formazione di biofilm anaerobi (Ingham, 2005).

Di conseguenza, un tempo di infusione ottimale è quello che consente un buon equilibrio tra l'estrazione delle sostanze nutritive e la crescita degli organismi. Generalmente si presume un tempo di infusione di 24 ore per un compost areato.

Nel compost tea non areato il tempo di estrazione è di circa 2 settimane, questa volta è favorevole all'accumulo di antibiotici che stimolano le risposte naturali di difesa delle piante nella soppressione delle malattie (Scheurell, 2003; Recycled Organics Unit, 2006).

3.11. Condizioni abiotiche

Oltre ai nutrienti e agli organismi di fermentazione, altre condizioni abiotiche influenzano il tasso di crescita dei microrganismi come le condizioni ambientali, la temperatura, l'umidità, l'evaporazione e altre ancora.

In particolare i livelli di temperatura devono essere limitati entro un range ottimale, considerando che le alte temperature volatilizzano i nutrienti ed evaporano l'acqua concentrando i sali, mentre le basse temperature riducono il tasso di crescita dei microrganismi.

Per prevenire le basse temperature l'impianto per la preparazione del compost tea può essere collocato all'interno di una serra o un capannone. E, per evitare temperature elevate, quando fa caldo, è possibile coprire l'impianto per la preparazione del compost tea per evitare l'evaporazione dell'acqua e di conseguenza la concentrazione di sali (Ingham, 2005).

3.12. Filtrazione finale

Il compost tea può essere applicato sia al terreno tramite sistemi di irrigazione che al fogliame delle piante tramite sistemi a spruzzo.

Quando applicato al terreno, il compost tea è indirizzato nella radice delle piante irrorando il terreno. I nutrienti e i microrganismi forniti con il compost tea sono disponibili per la vita delle piante. I microbi forniti con il compost tea competono con altri microrganismi presenti nel suolo, integrandosi con la costituzione del suolo e la relativa ecologia microbica (Bess, 2000).

Il compost tea per applicazioni nel terreno potrebbe non essere necessariamente sottoposto a una filtrazione fine prima dell'uso. Senza filtrazione gli organismi microbici vengono tutti trattenuti nel compost tea garantendo la numerosità della popolazione totale di microrganismi e la diversità dei microrganismi rispetto al caso delle applicazioni fogliari a spruzzo.

Quando applicato su entrambi i lati del fogliame delle piante, il compost tea è applicato mediante atomizzatori per cui è preventivamente sottoposto a un'operazione di filtrazione fine per evitare l'intasamento degli ugelli spruzzatori e dei sistemi di irrigazione.

Tuttavia, l'operazione di filtrazione tende a rimuovere dal compost tea le particelle sospese e parte del particolato insieme a una riduzione sfavorevole delle popolazioni, nonché della loro varietà, di funghi benefici e di actinomiceti, che vivono attaccati al particolato del compost tea, determinando così un peggioramento della composizione del compost tea sulla superficie fogliare (Ingham, 1999; Bess, 2000; Ingham, 2005). Il compost tea applicato al fogliame delle piante ha effetti immediati, fornendo organismi benefici e nutrienti vegetali e prevenendo i problemi di ustione da sale e contrastando gli agenti patogeni.

3.13. Valutazione delle caratteristiche e della qualità del compost tea

Per valutare le caratteristiche e la qualità del compost tea vanno considerati numerosi elementi.

Le caratteristiche del compost tea che consentono di distruggere i patogeni delle piante e di sopprimere le malattie sono il contenuto di una grande diversità di organismi benefici, di nutrienti per le piante e di bassi livelli di sali. Non è ancora chiaro se per ottenere la qualità del compost-tea sia importante l'adeguatezza della concentrazione di microrganismi o l'equilibrio tra le diverse specie di organismi.

Un approccio comune incentrato sulla soppressione delle malattie, mediante il compost tea, consiste nell'utilizzare un tea con una comunità microbica diversificata consentendo una selezione naturale. Questa strategia può colonizzare efficacemente le piante e sopprimere i patogeni in un'ampia gamma di condizioni (Ingham, 2005; Scheuerell, 2003).

La maggior parte dei batteri patogeni che infettano le foglie si moltiplicano e crescono sulla superficie delle foglie. Questo suggerisce di colonizzare direttamente, attraverso applicazione fogliare con irrigazione a spruzzo, la foglia con gli organismi benefici del compost tea. Questi organismi, consumando i nutrienti, possono diminuire le popolazioni e la crescita di microrganismi patogeni.

Generalmente, i microrganismi benefici hanno dimostrato di essere più robusti rispetto agli agenti patogeni, di sopravvivere meglio alla disidratazione, a un intervallo di temperatura più ampio e ad altri stress. Inoltre, i microrganismi benefici sono più efficienti nell'utilizzare i nutrienti disponibili. Alcuni microrganismi benefici possono predare o parassitare i microrganismi patogeni.

La qualità del compost tea è generalmente valutata testando la composizione microbica del compost di partenza e del compost tea per accertare la presenza di determinati gruppi di organismi, compresi i microrganismi benefici: batteri aerobi e anaerobi, funghi, actinomiceti, pseudomonadi; batteri che fissano l'azoto; e i microrganismi patogeni come *Escherichia coli* e *Salmonella* (Bess, 2000).

Per mantenere la qualità, il compost tea dovrebbe essere utilizzato il prima possibile, evitandone lo stoccaggio. La conservazione del compost tea crea effetti negativi, come la riduzione dell'attività degli organismi (Ingham, 2005), la riduzione della varietà dei microrganismi, la conservazione dei nutrienti.

Qualora sia inevitabile, lo stoccaggio deve essere comunque limitato a pochi giorni e per la sola applicazione su suolo agricolo ma non per l'applicazione fogliare (Bess, 2000). Inoltre, nel serbatoio di stoccaggio, che va posto in una zona ombreggiata si applica l'agitazione e la ventilazione (Bess, 2000; Ingham, 2005).

4. PROGETTO DI MASSIMA DEL COMPOSTATORE

Preliminarmente è stato progettato lo schema per il sistema del prototipo di compostatore.

Il sistema prototipo di compostatore avrà la capacità di **500 litri**, prevedendo **100 litri riservati allo spazio di testa** della macchina e la gestione di un volume massimo di circa **400 litri** di materiale compostabile che verrà ridotto indicativamente a circa **120-140 kg** (approssimativamente ridotto al 30-35%) in un periodo di **60 giorni + 30 giorni** di maturazione in un cumulo collocato esternamente, quindi per un totale di **90 giorni** di trattamento.

I parametri del processo di compostaggio, con i relativi valori compatibili ed ottimali, sono riportati nella tabella seguente.

Tab. 1. Valori compatibili ed ottimali del processo di compostaggio. (Fonte: www.isprambiente.gov.it)

Parametro	Valori compatibili	Valori ottimali
Rapporto C/N	20 - 40	25 - 30
Umidità (%)	45% - 65%	57% - 63%
Concentrazione O ₂ (%)	>= 5%	>= 10%
Diametro particelle (cm)	0,5 - 5,0	vario
pH	5,5 - 9,0	6,5 - 8,5
Temperatura (°C)	25 - 70	35 - 60
Densità apparente (kg m ⁻³)	<= 750	<= 650

Il materiale da compostare sarà costituito dai fanghi del depuratore biologico.

A questi verrà aggiunto del materiale legnoso (cippato o pellet) per garantire la strutturazione della massa e favorire la necessaria permeabilità all'ossigeno della matrice da compostare.

Per una gestione ottimale del processo, dovrebbero essere garantite concentrazioni di ossigeno superiori al 10%.

Per ottimizzare l'ossigenazione della massa è necessario garantire una buona porosità del substrato ed intervenire meccanicamente arieggiando la massa soprattutto nella prima fase termofila. L'aerazione del substrato permette di dissipare calore, eliminare il vapore acqueo e allontanare vari gas presenti all'interno del substrato.

La porosità del substrato (misura degli spazi vuoti all'interno della biomassa) determina il mantenimento dell'ottimale grado di ossigenazione della massa in compostaggio. I fattori che influenzano la porosità sono principalmente la pezzatura e la forma del materiale, il grado di umidità della massa e la forma del cumulo.

Particelle più grandi e uniformi incrementano la porosità, ma al diminuire della dimensione delle particelle corrisponde un più elevato tasso di degradazione aerobica ad opera dei microrganismi: è necessario quindi trovare un compromesso che porti ad una situazione di equilibrio tra attività microbica e compattamento del cumulo. In linea generale, risultati soddisfacenti si ottengono utilizzando materiali triturati con particelle di diametro medio compreso tra 0.5 e 5 cm.

I materiali avviati al compostaggio dovrebbero essere caratterizzati da un contenuto di umidità compreso tra il 55% ed il 65%. Il processo, soprattutto nella prima fase, genera calore e causa un'elevata evaporazione: è necessario quindi che il contenuto in acqua di partenza sia più elevato e che l'umidità persa venga reintegrata umidificando il prodotto. Nel caso si vogliano compostare substrati ad alto tasso di umidità (>80%) è necessario effettuare una miscelazione con materiali dall' elevata componente in fibra e sostanza secca.

Dei valori tipici per i fanghi di depurazione sono i seguenti (cfr. Tab.2): rapporto C/N 5, UR% 86%, densità 1006 kg/m³. Su tali valori si basa la miscelazione di massima con il materiale strutturante.

Tab. 2. Caratteristiche rilevate da campioni di fanghi di un depuratore biologico.

Parametro	u.m.	media
Residuo secco a 105°C	%	14,4
pH		7,9
Salinità	meq/100g s.s.	1430,3
Carbonio organico	% s.s.	29,9
Azoto totale (N)	% s.s.	5,2
Rapporto C/N		5,1
Fosforo totale (P)	% s.s.	3,0
Potassio (K)	% s.s.	0,5

Pertanto, la miscela caricata nel compostatore consisterà di **300 kg** di fanghi di depurazione a cui verrà aggiunta una massa di **120 kg** di pellet come materiale strutturante (40% p/p). In tal modo si ipotizza di raggiungere un rapporto C/N di **32** con un'umidità del **64%**, ottenendo una quantità stimata di compost finale pari a circa **126 kg di prodotto finito**.

Le fasi previste del compostaggio sono le seguenti.

- I. **Decomposizione.** Mese 1°. I batteri termofili, grazie alla presenza di ossigeno, attaccano la materia organica più facilmente degradabile (i.e., zuccheri, amminoacidi, proteine, grassi) sviluppando calore. Si ha un progressivo innalzamento della temperatura della massa (fino anche a 70°C). In questa fase la massa viene purificata dai microrganismi dannosi e dagli agenti patogeni. La buona pratica prevede **almeno 55°C per tre giorni**.
- II. **Trasformazione.** Mese 2°. La temperatura scende fino a circa 25 °C, per l'attività di batteri e funghi decompositori. Il cumulo diminuisce di volume per l'evaporazione dell'acqua contenuta nei residui organici. Alla fine del 2° mese il compost viene scaricato per procedere alla sua maturazione in un cumulo esterno.
- III. **Maturazione.** Mese 3°. La temperatura scende ulteriormente. L'intervento di piccoli invertebrati completa la maturazione del compost riducendolo in humus. La maturazione avviene in cumulo.

Pertanto, l’impianto prevede:

- 1) **un trituratore** per il prodotto iniziale di riempimento del compostatore (per il trattamento di eventuali rifiuti da materiale organico, con indicativamente un rapporto C/N di 15 e UR% del 70%, a cui si aggiunge circa 15-20 % in peso di materiale strutturante, con rapporto C/N di 50 e UR% del 15%, tipo pellet o cippato di legno); come guida, i rapporti C/N per alcuni prodotti sono raccolti nella tabella seguente (cfr. Tab. 3);

Tab. 3. Rapporto C/N per alcuni prodotti utilizzati nel compostaggio.

Prodotto	C/N min	C/N max	C/N medio
Segatura e trucioli	80	230	155
Potature	58	188	123
Paglia	55	125	90
Foglie	27	92	60
Scarti giardino	20	60	40
Erba	19	21	20
Scarti orto	13	13	13
Rifiuti cucina	12	20	16
Scarti verdura	12	24	18

- 2) **una camera** principale con funzione di bioossidazione attiva ad alta temperatura nella prima fase (circa **30 giorni**), dotata di monitoraggio della temperatura e dell’umidità, con sistema di rivoltamento della massa, e con funzione di bioossidazione passiva a temperatura ambiente nella seconda fase (circa **altri 30 giorni**); la camera è dotata di monitoraggio della temperatura ed umidità e sistema indipendente di rivoltamento della massa, l’uscita del compost stabilizzato (dopo circa **60 giorni**) da avviare alla maturazione è previsto tramite un **sistema a coclea** che attinge dalla camera fornendo un materiale quasi completamente compostato;
- 3) **sistema per la valutazione e l’aggiustamento del rapporto C/N** della massa in ingresso (ottimale fra 25 e 35, infatti 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. 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 NH₃ (Ammoniaca)); il monitoraggio del giusto rapporto C/N avverrà misurando l’**NH₃ emessa nello spazio di testa** della camera del compostatore, la contemporanea misura di O₂ e CO₂ permetterà di monitorare il fabbisogno di ossigeno della massa in compostaggio;
- 4) n.1 sistema automatico e motorizzato di rivoltamento della massa;
- 5) n.1 sistema automatico di somministrazione dell’acqua accumulata e proveniente dall’impianto di depurazione con misura della portata volumetrica e del quantitativo di acqua dosato in aggiunta alla massa in compostaggio;
- 6) n.1 sistema automatico di movimentazione dell’aria (tra 1 e 10 Nm³/h per ogni 100 kg di materiale organico), funzionante in aspirazione con biofiltro sullo scarico per l’abbattimento degli odori; si stima una portata richiesta di 4 - 40 Nm³/h di aria ipotizzando i circa 400 kg di prodotto trattato;
- 7) n.3 sistemi di misura della temperatura e UR% della massa;
- 8) n.1 sistema di misura dei gas O₂, CO₂ ed NH₃ nello spazio di testa con pompetta di prelievo del campione di aria da analizzare;
- 9) n.1 sistema programmabile per il controllo dell’impianto di compostaggio, raccolta e teletrasmissione dei dati su cloud ad intervalli regolari e programmabili;
- 10)n.1 sistema per lo scarico automatico della massa compostata (C/N finale < 20). Il rapporto C/N diminuisce nel tempo in quanto si verifica una perdita di carbonio per emissione di CO₂ 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 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.
- 11)n.1 sistema di setacciatura/vagliatura per il compost prodotto avviato alla maturazione;
- 12)eventuale opzione per n.1 sensore NPK+EC+UR+pH a 5 elettrodi per la misura diretta nel compost prodotto;
- 13)tubazioni, valvole e minuterie varie;
- 14)n.2 sistemi di pesatura con precisione di 100 grammi o inferiore;
- 15)**n.1 sistema (o kit) per il rilievo delle caratteristiche del compost** costituito dalla strumentazione per la determinazione dei seguenti parametri:
 - a) misura dell’indice respirometrico;
 - b) misura del carbonio totale (TC);
 - c) misura dell’azoto totale (TN);
 - d) misura del fosforo totale (TP);
 - e) misura del pH.
 - f) misura della conducibilità elettrica (EC);
 - g) misura del contenuto di umidità dei campioni con stufa dedicata;
 - h) misura della dimensione delle particelle (granulometria del compost) tramite sistema a diffrazione laser.

Il trituratore deve prevedere la possibilità di amminutare il prodotto in ingresso fino a dimensioni di circa 5 mm. Esso sarà costituito da una testata rotante che permette di regolare la dimensione del prodotto tritato tramite la regolazione del numero di giri della testata rotante medesima e tramite la portata di alimentazione del prodotto all'interno della macchina. Il prodotto amminutato viene trasportato da un sistema a coclea all'interno della camera del compostatore.

Il sistema per la valutazione del rapporto C/N ottimale della massa nel corso della fase di compostaggio si basa sulla misura della NH₃ emessa nello spazio di testa del compostatore. Il sensore di ammoniaca sarà di tipo elettrochimico (con durata di almeno 3 anni in condizioni di normale utilizzo). Tale sistema sarà equipaggiato con sensori di O₂ (non elettrochimico) e CO₂. La misura della CO₂ e dell'O₂ permetterà di monitorare l'efficacia dell'azione di rivoltamento e la stima della porosità della massa in compostaggio.

4.1. Sistemi di monitoraggio, supporto e controllo remoto

Lo schema complessivo del prototipo ipotizzato per la produzione di compost è riportato nella figura seguente.

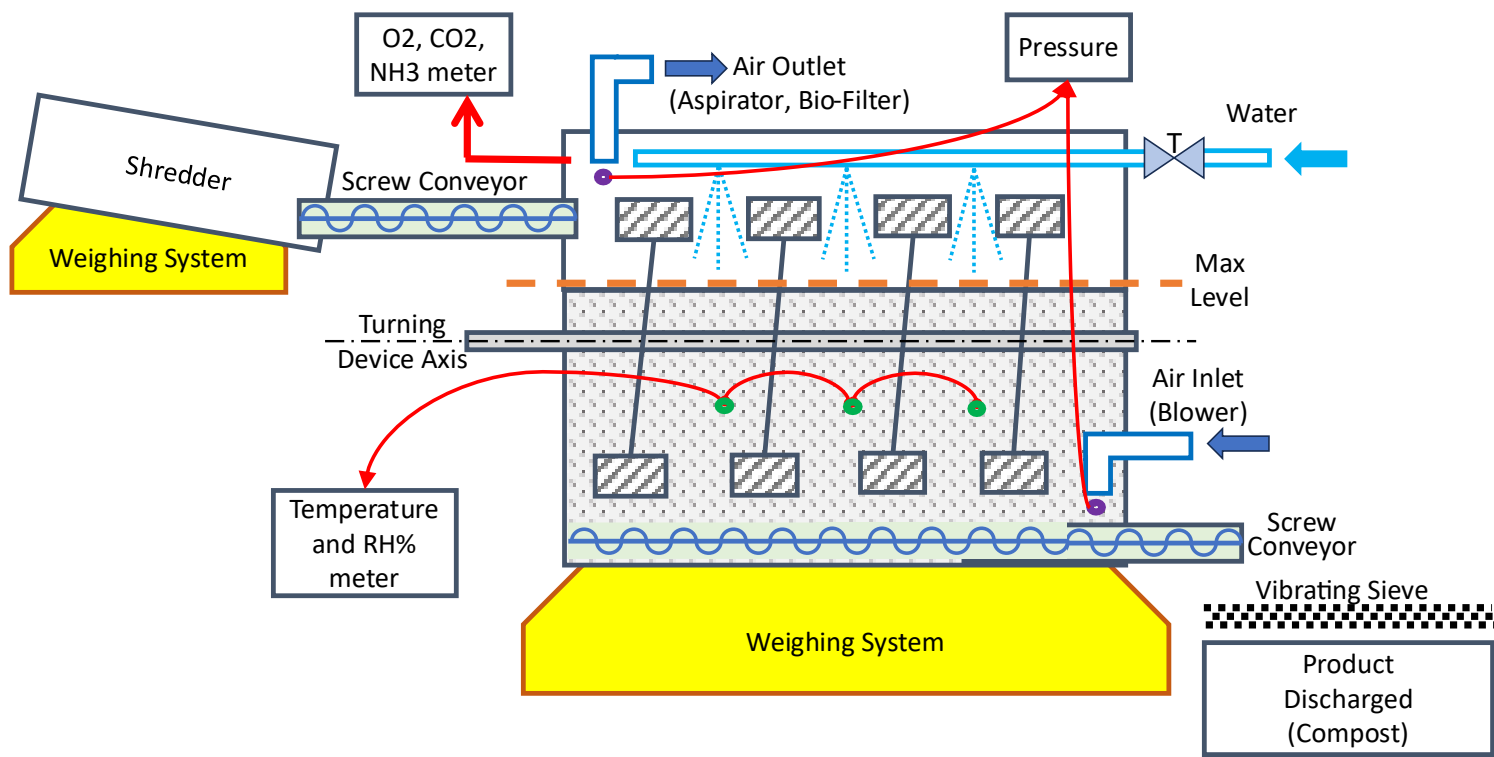


Figure 1. Schematic of a pilot composter plant.

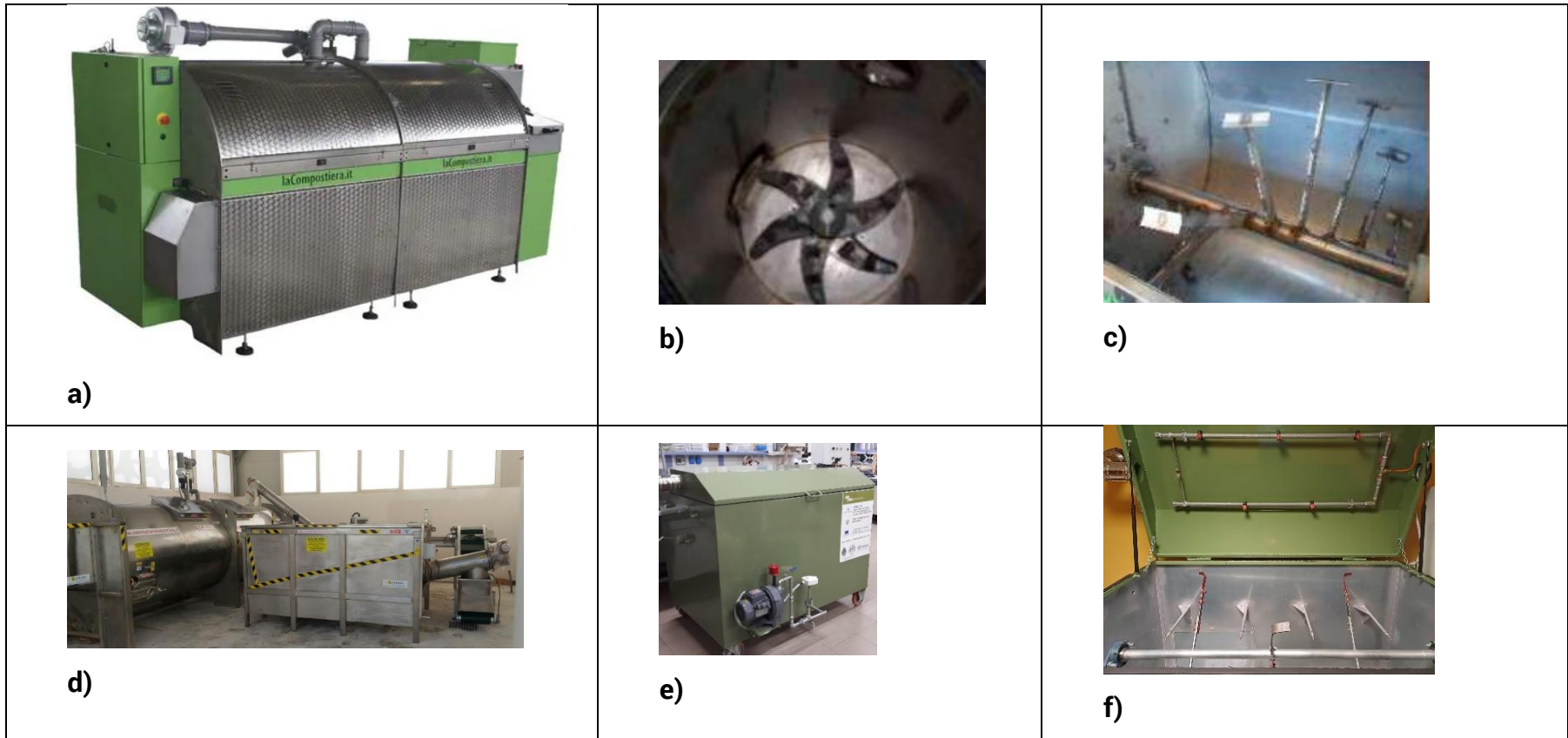


Figure 2. Composter plant examples. a) Composter (1100 liters) equipped with an integrated screw conveyor dosing tank, shredding (b) and mixing chamber (c), double maturation chamber with mixing system, forced aeration system, and remote monitoring system, freely available at (LaCompostiera.it 2024g). d) Composter (1500 liters) equipped with an integrated screw conveyor dosing tank, shredding, and double maturation chamber with mixing system, freely available at (LaCompostiera.it 2024g). e) Small Lab (350 liters) prototype composter realization (built by the authors) showing the blower equipment, f) inner mixing apparatus, temperature measuring probes, water dosing system and exhaust air discharge.

Sono previsti dei sistemi di pesatura per il dosaggio del materiale strutturante da aggiungere ed il monitoraggio continuo dell'andamento della massa compostata.

Sono previsti n.2 biofiltri ed un compressore (reversibile) di insufflaggio dell'aria per l'arieggiamento della massa in compostaggio (soffiante), n.2 misuratori di pressione differenziali sono previsti sui biofiltri per il rilievo del loro intasamento. Inoltre, un misuratore di pressione differenziale è previsto fra ingresso ed uscita dell'aria misurando il grado di porosità della massa in compostaggio.

5. PROGETTO DI MASSIMA DEL SISTEMA PER LA PRODUZIONE DEL COMPOST-TEA

Il sistema di produzione di compost-tea prevede l'utilizzo di un impianto termico solare per il riscaldamento dell'acqua utilizzata per l'infusione al fine di favorire l'estrazione dei composti attivi dal compost.

Si prevede di trattare un **batch di 10 kg** di compost maturo vagliato/setacciato in una busta di estrazione (con **maglie di circa 0.5 mm**) a cui verranno aggiunti circa **1000 litri** di acqua (con un rapporto di **1:100**) per effettuare l'infusione in un serbatoio parallelepipedo della capacità di **1000 litri**.

Un sistema a gorgogliamento deve garantire una concentrazione di O_2 disciolto in acqua a valori di **9-12 mg/L** e mai inferiori a **6 mg/L**.

Orientativamente ogni **250 litri** è necessaria una portata di sicurezza pari a **4 Nm³/h** di aria.

Pertanto, nel caso ipotizzato la portata d'aria necessaria sarà di **16 Nm³/h** fornita tramite soffiante.

Verrà condotto il monitoraggio on-line e da remoto della temperatura, del pH, della conducibilità elettrica, del grado di ossigenazione del compost-tea prodotto.

L'operazione batch di infusione è considerata conclusa dopo **12-24 h** con il raggiungimento di una conducibilità intorno ai **5 mS/cm** ed ad un valore di pH di approssimativamente **8.6** unità. Eventualmente il trattamento viene ripetuto con una busta di estrazione contenente altri **10 kg** di compost fino al raggiungimento della conducibilità richiesta. Oppure si potrà procedere in parallelo con un certo numero di buste di estrazione di **10 kg** di compost, questa condizione è da valutare successivamente.

5.1. Sistemi di monitoraggio, supporto e controllo remoto

Lo schema complessivo di principio del prototipo ipotizzato per la produzione di compost-tea è riportato nella figura seguente.

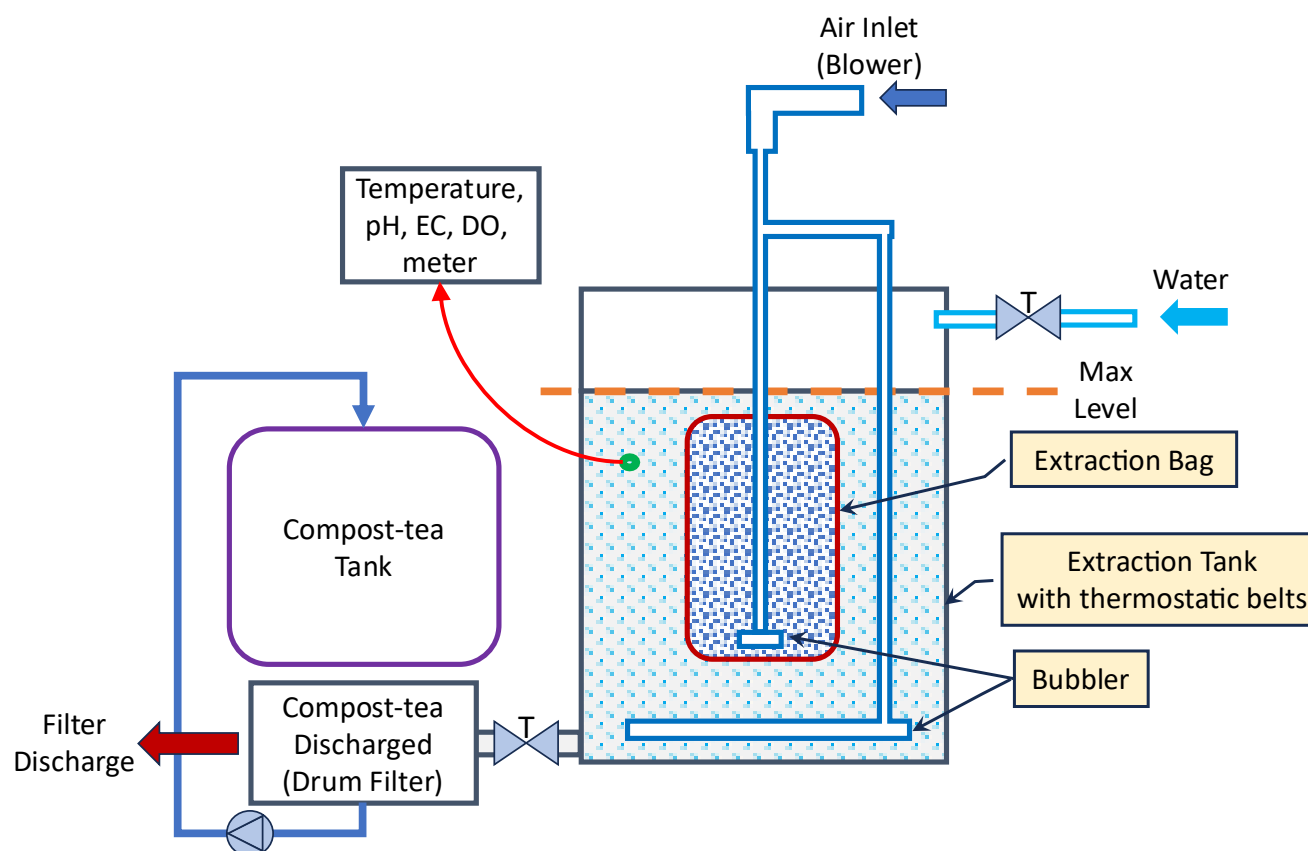


Figure 3. Schematic of an aerated compost-tea production pilot plant.

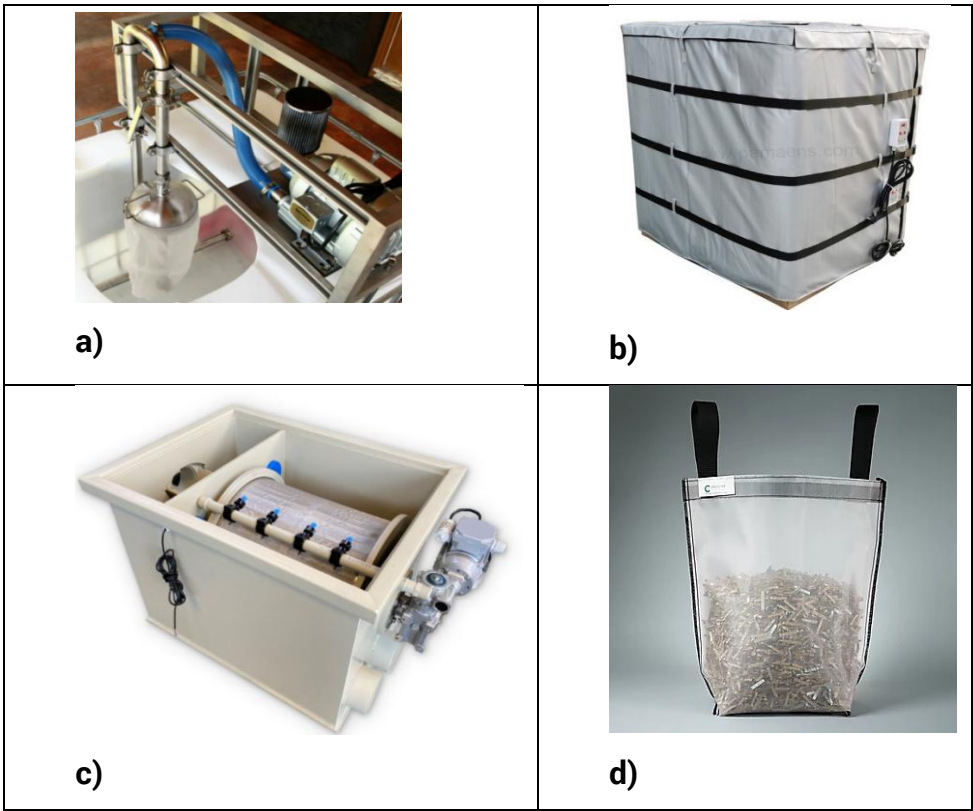


Figure 4. Compost tea production plant components. a) Air blower system with a double bubbler, one inside the extraction bag and one inside the water tank (freely available at <https://greaterearthorganics.com/>). b) Heating jacket for the Intermediate Bulk Container/extraction tank (freely available at <https://www.pamaens.com/>). c) Self-cleaning drum filter (freely available at <https://www.makoipondfiltration.com/en/>). d) Compost extraction bag (400-micron mesh) (freely available at <https://www.cggdistro.com/>).

Sono previsti dei sistemi di monitoraggio e controllo remoto dell’operazione batch con i dati trasmessi su cloud per il monitoraggio in tempo reale dell’operazione.

I parametri da monitorare nel compost-tea, tramite sistema di telemetria e salvataggio su cloud, sono i seguenti:

- temperatura;
- pH;
- conducibilità;
- ossigeno disciolto;
- eventuale opzione per un sensore NPK+EC+UR+pH a 5 elettrodi.

Pertanto, l’impianto prevede:

- 1) n.2 serbatoi da 1000-1500 litri per la produzione del compost-tea ed il suo successivo stoccaggio;
- 2) n.1 serbatoio solare accumulo acqua 1000-1500 litri;
- 3) n.1 soffiante da 16-20 Nm³/h;
- 4) n.1 gorgogliatore sommerso;
- 5) n.1 sistema programmabile per il controllo dell’impianto di produzione del compost-tea, con raccolta e teletrasmissione dei dati su cloud ad intervalli regolari e programmabili;
- 6) n.100 buste di estrazione (con **maglie di circa 0.5 mm**) della capacità volumetrica di circa 20-30 litri per poter contenere circa 10 kg di compost riempita per circa $\frac{3}{4}$ o $\frac{2}{3}$;
- 7) n.1 filtro a tamburo autopulente;
- 8) n.1 pompa movimentazione compost-tea;
- 9) n.1 pompa movimentazione acqua;
- 10) tubazioni, valvole e minuterie varie.

Inoltre, si prevede **n.1 sistema (o kit) per il rilievo delle caratteristiche del compost-tea** costituito dalla strumentazione per la determinazione dei seguenti parametri:

- a) kit analisi parametri acque;
- b) misura del carbonio totale (TC);
- c) misura dell’azoto totale (TN);
- d) misura del fosforo totale (TP);
- e) misura del pH;
- f) misura della conducibilità elettrica (EC);
- g) misura del residuo secco del campione con stufa dedicata.

Un generatore di aria compressa (soffiante) con annesso sistema di gorgogliamento provvederà al mantenimento della giusta percentuale di ossigeno disciolto nell’acqua di infusione (portata di almeno **16 Nm³/h**).

Dopo l’operazione di estrazione, il compost tea prodotto verrà stoccato (per un limite massimo stimato di 24-48 h) in un serbatoio per l’utilizzo in campo dopo averlo preventivamente filtrato attraverso un filtro a tamburo rotante autopulente.

6. CONCLUSIONI

Il compostaggio prevede la trasformazione della massa organica tramite bio-ossidazione termofila aerobica. L'uso del compostaggio aerobico per la degradazione biologica in un prodotto finale stabile, compost, riutilizzabile in pratiche agricole o forestali, di diversi tipi di rifiuti organici, dai rifiuti di campo ai rifiuti solidi urbani organici, è una tecnologia ormai ben consolidata. Le tecnologie di compostaggio sono abbastanza compatibili con l'ambiente, al contrario del trattamento meccanico o del trattamento di incenerimento.

Il trattamento del compostaggio aerobico è un processo biochimico naturale, in parte controllato dall'uomo con tecnologie semplici ed energeticamente a basso costo. Per convertire i rifiuti solidi organici, il compostaggio aerobico è ampiamente utilizzato in tutto il mondo rispetto al compostaggio anaerobico. La tecnologia di compostaggio ha un buon rapporto costo-efficacia rispetto ad altri metodi.

Il compostaggio consente di ottenere un preparato allo stato solido altamente umificato e stabile, che viene proposto in forma granulare sul terreno come ammendante, per migliorarne la struttura fisica e la fertilità biologica e/o come forma di nutrimento e difesa per le colture agrarie, in sostituzione dei fertilizzanti minerali, dei fungicidi e battericidi di origine chimica.

L'interesse verso la riduzione dell'impiego di fertilizzanti chimici a favore di una maggiore sostenibilità ambientale ha determinato una crescente attenzione verso la modulazione delle pratiche agronomiche, prevedendo l'ottimizzazione dello sfruttamento di risorse naturali e scarti delle industrie agro alimentari per lo sviluppo di ammendanti organici naturali in forma liquida, noti come compost-tea, che possono essere applicati su terreno e apparato radicale in forma liquida o in forma spray sull'apparato fogliare della pianta, e di cui sono ben documentati gli effetti positivi sortiti, tra cui la prevenzione delle patologie in campo, sia del terreno che delle colture.

I compost-tea, come gli estratti acquosi semplici, sono entrambi derivati a partire da una estrazione in fase liquida a partire da compost di elevata qualità, tuttavia si utilizzano processi nettamente differenti.

Il compost-tea prevede l'infusione in acqua del compost per un periodo di tempo ed in condizioni variabili, ai fini dell'estrazione dei composti attivi per favorire la gestione liquida tramite fertirrigazione del compost-tea così ottenuto.

Il prodotto ottenuto è una sospensione liquida di molecole organiche/inorganiche e microorganismi che derivano dal compost. Più in generale sono dei preparati organici liquidi ottenuti dall'ossigenazione (tea areati) di compost immerso in un mezzo liquido (acqua).

I sistemi di recupero energetico che utilizzano i reflui e gli scarti sono diversi. Il recupero energetico può esplicitarsi sia direttamente, attraverso la produzione diretta di combustibile utilizzando gli scarti tal quali o gestiti in modo appropriato, sia indirettamente, attraverso il loro utilizzo per la produzione mirata di composti utili e vantaggiosi per la gestione di successive filiere produttive, in tal modo si ottiene un beneficio indiretto ma tuttavia energeticamente tangibile.

In quest'ambito si propone l'utilizzo degli scarti e dei reflui per la produzione di compost e successivamente di compost-tea al fine di migliorare ed incrementare la crescita di piante da Short Rotation Forestry (SRF) per la produzione di biomassa vegetale legnosa specializzata, pianificata e gestita allo scopo di produrre elevati quantitativi di biomassa in tempi molto brevi, rifornendo i terreni di sostanza organica proveniente dalla gestione del sistema di produzione di compost e compost-tea.

Si prevede la coltivazione di specie arboree a rapida crescita con elevata densità d'impianto, ceduzioni ripetute nel breve periodo e con tecniche colturali simili a quelle utilizzate per le colture agrarie per arboricoltura a ciclo breve.

7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- 1) Adani, F., Confalonieri, R., & Tambone, F. (2004). Dynamic respiration index as a descriptor of the biological stability of organic wastes. *Journal of environmental quality*, 33(5), 1866-1876.
- 2) Adani, F., Gigliotti, G., Valentini, F., & Laraia, R. (2003). Respiration index determination: a comparative study of different methods. *Compost science & utilization*, 11(2), 144-151.
- 3) Agnew, J. M., & Leonard, J. J. (2003). The physical properties of compost. *Compost Science & Utilization*, 11(3), 238-264.
- 4) Agnew, J. M., Leonard, J. J., Feddes, J., & Feng, Y. (2003). A modified air pycnometer for compost air volume and density determination. *Canadian Biosystems Engineering*, 45, 6-27.
- 5) Ajmal, M., Aiping, S., Awais, M., Ullah, M. S., Saeed, R., Uddin, S., ... & Zihao, X. (2020). Optimization of pilot-scale in-vessel composting process for various agricultural wastes on elevated temperature by using Taguchi technique and compost quality assessment. *Process Safety and Environmental Protection*, 140, 34-45.
- 6) Akdeniz, N. (2019). A systematic review of biochar use in animal waste composting. *Waste Management*, 88, 291-300.
- 7) Albiach, R., Canet, R., Pomares, F., Ingelmo, F., 2000. Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil. *Bioresource Technology* 75: 43-48.
- 8) Amirante, Paolo. (2017). MACCHINE ED IMPIANTI PER IL COMPOSTAGGIO. https://www.researchgate.net/publication/321315270_MACCHINE_E_D_IMPIANTI_PER_IL_COMPOSTAGGIO
- 9) Atiyeh, R. M., Edwards, C. A., Subler, S., & Metzger, J. D. (2001). Pig manure vermicompost as a component of a horticultural bedding plant medium: effects on physicochemical properties and plant growth. *Bioresource technology*, 78(1), 11-20.
- 10) Awasthi, M. K., Liu, T., Chen, H., Verma, S., Duan, Y., Awasthi, S. K., ... & Zhang, Z. (2019). The behavior of antibiotic resistance genes and their associations with bacterial community during poultry manure composting. *Bioresource technology*, 280, 70-78.
- 11) Awasthi, M. K., Selvam, A., Lai, K. M., & Wong, J. W. (2017). Critical evaluation of post-consumption food waste composting employing thermophilic bacterial consortium. *Bioresource technology*, 245, 665-672.

- 12)Awasthi, M. K., Wang, Q., Awasthi, S. K., Wang, M., Chen, H., Ren, X., ... & Zhang, Z. (2018). Influence of medical stone amendment on gaseous emissions, microbial biomass and abundance of ammonia oxidizing bacteria genes during biosolids composting. *Bioresource technology*, 247, 970-979.
- 13)Awasthi, M. K., Wang, Q., Huang, H., Ren, X., Lahori, A. H., Mahar, A., ... & Zhang, Z. (2016). Influence of zeolite and lime as additives on greenhouse gas emissions and maturity evolution during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, 216, 172-181.
- 14)Aye, L., & Widjaya, E. R. (2006). Environmental and economic analyses of waste disposal options for traditional markets in Indonesia. *Waste management*, 26(10), 1180-1191.
- 15)Azim, K., Soudi, B., Boukhari, S., Perissol, C., Roussos, S., & Thami Alami, I. (2018). Composting parameters and compost quality: a literature review. *Organic agriculture*, 8(2), 141-158.
- 16)Baldantoni, D., Leone, A., Iovieno, P., Morra, L., Zaccardelli, M., & Alfani, A. (2010). Total and available soil trace element concentrations in two Mediterranean agricultural systems treated with municipal waste compost or conventional mineral fertilizers. *Chemosphere*, 80(9), 1006-1013.
- 17)Barrena, R., d'Imporzano, G., Ponsá, S., Gea, T., Artola, A., Vázquez, F., ... & Adani, F. (2009). In search of a reliable technique for the determination of the biological stability of the organic matter in the mechanical–biological treated waste. *Journal of Hazardous Materials*, 162(2-3), 1065-1072.
- 18)Benito, M., Masaguer, A., De Antonio, R., & Moliner, A. (2005). Use of pruning waste compost as a component in soilless growing media. *Bioresource technology*, 96(5), 597-603.
- 19)Benito, M., Masaguer, A., Moliner, A., Arrigo, N., & Palma, R. M. (2003). Chemical and microbiological parameters for the characterisation of the stability and maturity of pruning waste compost. *Biology and fertility of soils*, 37(3), 184-189.
- 20)Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource technology*, 100(22), 5444-5453.
- 21)Bernal, M. P., Navarro, A. F., Roig, A., Cegarra, J., & Garcia, D. (1996). Carbon and nitrogen transformation during composting of sweet sorghum bagasse. *Biology and fertility of soils*, 22(1), 141-148.
- 22)Bertoldi, M. D., Citernes, U., & Griselli, M. (1980). Bulking agents in sludge composting. *Compost Science/Land Utilization*, 21(1), 32-41.
- 23)Bess, V. H. (2000). Understanding compost tea. *BioCycle*, 41(10), 71-71.
- 24)Bian, B., Hu, X., Zhang, S., Lv, C., Yang, Z., Yang, W., & Zhang, L. (2019). Pilot-scale composting of typical multiple agricultural wastes: Parameter optimization and mechanisms. *Bioresource technology*, 287, 121482.
- 25)Bouajila, K., & Sanaa, M. (2011). Effects of organic amendments on soil physico-chemical and biological properties. *J. Mater. Environ. Sci*, 2(1), 485-490.
- 26)Buono, D. D., Said-Pullicino, D., Proietti, P., Nasini, L., & Gigliotti, G. (2011). Utilization of olive husks as plant growing substrates: phytotoxicity and plant biochemical responses. *Compost Science & Utilization*, 19(1), 52-60.
- 27)Cáceres, R., Coromina, N., Malińska, K., & Marfà, O. (2015). Evolution of process control parameters during extended co-composting of green waste and solid fraction of cattle slurry to obtain growing media. *Bioresource Technology*, 179, 398-406.
- 28)Cekmecelioglu, D., Demirci, A., Graves, R. E., & Davitt, N. H. (2005). Applicability of optimised in-vessel food waste composting for windrow systems. *Biosystems engineering*, 91(4), 479-486.
- 29)Cerda, A., Artola, A., Font, X., Barrena, R., Gea, T., & Sánchez, A. (2018). Composting of food wastes: Status and challenges. *Bioresource technology*, 248, 57-67.
- 30)Cerda, A., Mejías, L., Gea, T., & Sánchez, A. (2017). Cellulase and xylanase production at pilot scale by solid-state fermentation from coffee husk using specialized consortia: The consistency of the process and the microbial communities involved. *Bioresource Technology*, 243, 1059-1068.
- 31)Chen, L., de Haro Marti, M., Moore, A., & Falen, C. (2011). The composting process. *Dairy Manure Compost Production and Use in Idaho*, 2, 513-532.
- 32)Chen, X. Y. L., He, B. Y., Li, H. X., Cernava, T., Sang, W. J., Yang, M. F., & Yang, W. J. (2019). First report of black rot on walnut fruits caused by *Neofusicoccum parvum* in China. *Plant disease*, 103(12), 3275-3275.
- 33)Das, K., & Keener, H. M. (1996). Dynamic simulation model as a tool for managing a large scale composting system. In *ASAE 6th Int. Conf. Computers in Agriculture*, Cancun, Mexico.
- 34)de Bertoldi, M. D., Vallini, G. E., & Pera, A. (1983). The biology of composting: a review. *Waste Management & Research*, 1(2), 157-176.
- 35)Dougherty, M. (1999). *Field Guide to On-Farm Composting* (NRAES 114).
- 36)Duffy, B., Sarreal, C., Ravva, S., & Stanker, L. (2004). Effect of molasses on regrowth of *E. coli* O157: H7 and *Salmonella* in compost teas. *Compost science & utilization*, 12(1), 93-96.
- 37)Elagroudy, S., Elkady, T., & Ghobrial, F. (2011). Comparative cost benefit analysis of different solid waste management scenarios in Basrah, Iraq. *Journal of Environmental Protection*, 2(05), 555.
- 38)Finstein, M. S., Miller, F. C., & Strom, P. F. (1986). Monitoring and evaluating composting process performance. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 272-278.
- 39)Fischer, D., & Glaser, B. (2012). Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration. *Management of organic waste*, 1, 167-198.
- 40)Flavel, T. C., Murphy, D. V., Lalor, B. M., & Fillery, I. R. P. (2005). Gross N mineralization rates after application of composted grape marc to soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(7), 1397-1400.
- 41)Gai, X., Liu, H., Liu, J., Zhai, L., Wang, H., Yang, B., ... & Lei, Q. (2019). Contrasting impacts of long-term application of manure and crop straw on residual nitrate-N along the soil profile in the North China Plain. *Science of the Total Environment*, 650, 2251-2259.

- 42)Gajalakshmi, S., & Abbasi, S. A. (2008). Solid waste management by composting: state of the art. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 38(5), 311-400.
- 43)Gigliotti, G., Proietti, P., Said-Pullicino, D., Nasini, L., Pezzolla, D., Rosati, L., & Porceddu, P. R. (2012). Co-composting of olive husks with high moisture contents: organic matter dynamics and compost quality. *International biodeterioration & biodegradation*, 67, 8-14.
- 44)Golueke, C. G., Card, B. J., & McGauhey, P. H. (1954). A critical evaluation of inoculums in composting. *Applied Microbiology*, 2(1), 45-53.
- 45)González-García, S., Rama, M., Cortés, A., García-Guaita, F., Núñez, A., Louro, L. G., ... & Feijoo, G. (2019). Embedding environmental, economic and social indicators in the evaluation of the sustainability of the municipalities of Galicia (northwest of Spain). *Journal of Cleaner Production*, 234, 27-42.
- 46)Gray, K. R. (1971). A review of composting-part 1. *Process Biochem.*, 6, 32-36.
- 47)Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., & Shen, Y. (2012). Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource technology*, 112, 171-178.
- 48)He, X. T., Logan, T. J., & Traina, S. J. (1995). Physical and chemical characteristics of selected US municipal solid waste composts (Vol. 24, No. 3, pp. 543-552). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- 49)Hemidat, S., Jaar, M., Nassour, A., & Nelles, M. (2018). Monitoring of composting process parameters: A case study in Jordan. *Waste and Biomass Valorization*, 9(12), 2257-2274.
- 50)Hoitink, H. A. J., Stone, A. G., & Han, D. Y. (1997). Suppression of plant diseases by composts. *HortScience*, 32(2), 184-187.
- 51)Hsu, J. H., & Lo, S. L. (1999). Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure. *Environmental pollution*, 104(2), 189-196.
- 52)Huang, G. F., Wu, Q. T., Wong, J. W. C., & Nagar, B. B. (2006). Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust. *Bioresource technology*, 97(15), 1834-1842.
- 53)Huerta-Pujol, O., Soliva, M., Martínez-Farré, F. X., Valero, J., & López, M. (2010). Bulk density determination as a simple and complementary tool in composting process control. *Bioresource technology*, 101(3), 995-1001.
- 54)Ingham, E. (1998). Soil view-Anaerobic Bacteria and Compost Tea. *BioCycle-Journal of Composting and Recycling*, 39(6), 86-86.
- 55)Ingham, E. (1999). Columns-Soil View-What Is Compost Tea? Part I. *BioCycle-Journal of Composting and Recycling*, 40(3), 74-75.
- 56)Ingham, E. (2005). *The compost tea brewing manual* (Vol. 728). Corvallis, OR, USA: Soil Foodweb Incorporated.
- 57)Jain, M. S., Paul, S., & Kalamdhad, A. S. (2019). Interplay of physical and chemical properties during in-vessel degradation of sewage sludge. *Waste Management*, 98, 58-68.
- 58)Jeong, K. H., Kim, J. K., Ravindran, B., Lee, D. J., Wong, J. W. C., Selvam, A., ... & Kwag, J. H. (2017). Evaluation of pilot-scale in-vessel composting for Hanwoo manure management. *Bioresource technology*, 245, 201-206.
- 59)Joshi, D., Hooda, K.S., Bhatt, J.C., Mina, B.L., Gupta, H.S. Suppressive effects of composts on soil-borne and foliar diseases of French bean in the field in the western Indian Himalayas, *Crop Protection*, Volume 28, Issue 7, 2009, Pages 608-615.
- 60)Karnchanawong, S., & Nissaikla, S. (2014). Effects of microbial inoculation on composting of household organic waste using passive aeration bin. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 3(4), 113-119.
- 61)Keener, H. M., Dick, W. A., & Hoitink, H. A. (2000). Composting and beneficial utilization of composted by-product materials. *Land application of agricultural, industrial, and municipal by-products*, 6, 315-341.
- 62)Kelley, S. (2004). Building a knowledge base for compost tea. *BioCycle*, 45(6), 30-34.
- 63)Kim, J. K., Lee, D. J., Ravindran, B., Jeong, K. H., Wong, J. W. C., Selvam, A., ... & Kwag, J. H. (2017). Evaluation of integrated ammonia recovery technology and nutrient status with an in-vessel composting process for swine manure. *Bioresource Technology*, 245, 365-371.
- 64)Kim, M. H., Song, Y. E., Song, H. B., Kim, J. W., & Hwang, S. J. (2011). Evaluation of food waste disposal options by LCC analysis from the perspective of global warming: Jungnang case, South Korea. *Waste management*, 31(9-10), 2112-2120.
- 65)Komilis, D. P., & Tziouvaras, I. S. (2009). A statistical analysis to assess the maturity and stability of six composts. *Waste Management*, 29(5), 1504-1513.
- 66)Komilis, D., Kontou, I., & Ntougias, S. (2011). A modified static respiration assay and its relationship with an enzymatic test to assess compost stability and maturity. *Bioresource technology*, 102(10), 5863-5872.
- 67)Li, R., Wang, J. J., Zhang, Z., Shen, F., Zhang, G., Qin, R., ... & Xiao, R. (2012). Nutrient transformations during composting of pig manure with bentonite. *Bioresource Technology*, 121, 362-368.
- 68)Liu, X., Rashti, M. R., Dougall, A., Esfandbod, M., Van Zwieten, L., & Chen, C. (2018). Subsoil application of compost improved sugarcane yield through enhanced supply and cycling of soil labile organic carbon and nitrogen in an acidic soil at tropical Australia. *Soil and Tillage Research*, 180, 73-81.
- 69)Malinowski, M., Wolny-Koładka, K., & Vaverková, M. D. (2019). Effect of biochar addition on the OFMSW composting process under real conditions. *Waste Management*, 84, 364-372.
- 70)Malińska, K., Golańska, M., Caceres, R., Rorat, A., Weisser, P., & Ślęzak, E. (2017). Biochar amendment for integrated composting and vermicomposting of sewage sludge—the effect of biochar on the activity of *Eisenia fetida* and the obtained vermicompost. *Bioresource Technology*, 225, 206-214.
- 71)Mandpe, A., Paliya, S., Kumar, S., & Kumar, R. (2019). Fly ash as an additive for enhancing microbial and enzymatic activities in in-vessel composting of organic wastes. *Bioresource technology*, 293, 122047.
- 72)Moldes, A., Cendon, Y., & Barral, M. T. (2007). Evaluation of municipal solid waste compost as a plant growing media component, by applying mixture design. *Bioresource technology*, 98(16), 3069-3075.

- 73) Nalini, A., Pillai, H., Sreemahadevan, P., & Rao, Y. (2016). Optimization for temperature and time in co-composting municipal solid waste and brewery sludge. *International Journal of Environmental Engineering and Management*, 7(1), 1-23.
- 74) Niwagaba, C., Nalubega, M., Vinnerås, B., Sundberg, C., & Jönsson, H. (2009). Bench-scale composting of source-separated human faeces for sanitation. *Waste Management*, 29(2), 585-589.
- 75) Oazana, S., Naor, M., Grinshpun, J., Halachmi, I., Raviv, M., Saadi, I., ... & Laor, Y. (2018). A flexible control system designed for lab-scale simulations and optimization of composting processes. *Waste Management*, 72, 150-160.
- 76) Orthodoxou, D., Pettitt, T. R., Fuller, M., Newton, M., Knight, N., & Smith, S. R. (2015). An investigation of some critical physico-chemical parameters influencing the operational rotary in-vessel composting of food waste by a small-to-medium sized enterprise. *Waste and Biomass Valorization*, 6(3), 293-302.
- 77) Palmer, A. K., Evans, K. J., & Metcalf, D. A. (2010). Characters of aerated compost tea from immature compost that limit colonization of bean leaflets by *Botrytis cinerea*. *Journal of applied microbiology*, 109(5), 1619-1631.
- 78) Pandey, P. K., Vaddella, V., Cao, W., Biswas, S., Chiu, C., & Hunter, S. (2016). In-vessel composting system for converting food and green wastes into pathogen free soil amendment for sustainable agriculture. *Journal of Cleaner Production*, 139, 407-415.
- 79) Pane, C., Celano, G., Villecco, D., & Zaccardelli, M. (2010). Suppressive effect of aerated compost teas produced in water and in whey on plant fungal pathogens. *J. Plant Pathol*, 92, 93.
- 80) Pane, C., Celano, G., Villecco, D., & Zaccardelli, M. (2012). Control of *Botrytis cinerea*, *Alternaria alternata* and *Pyrenochaeta lycopersici* on tomato with whey compost-tea applications. *Crop protection*, 38, 80-86.
- 81) Papafilippaki, A., Paranychianakis, N., & Nikolaidis, N. P. (2015). Effects of soil type and municipal solid waste compost as soil amendment on *Cichorium spinosum* (spiny chicory) growth. *Scientia Horticulturae*, 195, 195-205.
- 82) Partanen, P., Hultman, J., Paulin, L., Auvinen, P., & Romantschuk, M. (2010). Bacterial diversity at different stages of the composting process. *BMC microbiology*, 10(1), 1-11.
- 83) Raj, D., & Antil, R. S. (2011). Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes. *Bioresource technology*, 102(3), 2868-2873.
- 84) Ravindran, B., & Sekaran, G. (2010). Bacterial composting of animal fleshing generated from tannery industries. *Waste management*, 30(12), 2622-2630.
- 85) Ravindran, B., Contreras-Ramos, S. M., Wong, J. W. C., Selvam, A., & Sekaran, G. (2014). Nutrient and enzymatic changes of hydrolysed tannery solid waste treated with epigeic earthworm *Eudrilus eugeniae* and phytotoxicity assessment on selected commercial crops. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(1), 641-651.
- 86) Ravindran, B., Nguyen, D. D., Chaudhary, D. K., Chang, S. W., Kim, J., Lee, S. R., ... & Lee, J. (2019). Influence of biochar on physico-chemical and microbial community during swine manure composting process. *Journal of environmental management*, 232, 592-599.
- 87) Recycled Organics Unit (2003b). Buyers's guide for recycled organics products. Information sheet, 5-6.
- 88) Recycled Organics Unit (2006). Overview of compost tea use in New South Wales. Recycled Organics Unit, internet publication: www.recycledorganics.com.
- 89) Ren, Y., Yu, M., Wu, C., Wang, Q., Gao, M., Huang, Q., & Liu, Y. (2018). A comprehensive review on food waste anaerobic digestion: Research updates and tendencies. *Bioresource technology*, 247, 1069-1076.
- 90) Richard, T. L., Hamelers, H. V. M., Veeken, A., & Silva, T. (2002). Moisture relationships in composting processes. *Compost science & utilization*, 10(4), 286-302.
- 91) Ruggieri, L., Gea, T., Artola, A., & Sánchez, A. (2009). Air filled porosity measurements by air pycnometry in the composting process: a review and a correlation analysis. *Bioresource technology*, 100(10), 2655-2666.
- 92) Sanasam, S. D., & Talukdar, N. C. (2017). Quality compost production from municipality biowaste in mix with rice straw, cow dung, and earthworm *Eisenia fetida*. *Compost Science & Utilization*, 25(3), 141-151.
- 93) Sánchez, A. (2007). A kinetic analysis of solid waste composting at optimal conditions. *Waste management*, 27(6), 854-855.
- 94) Sánchez, Ó. J., Ospina, D. A., & Montoya, S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste management*, 69, 136-153.
- 95) Sarsaiya, S., Jain, A., Awasthi, S. K., Duan, Y., Awasthi, M. K., & Shi, J. (2019). Microbial dynamics for lignocellulosic waste bioconversion and its importance with modern circular economy, challenges and future perspectives. *Bioresource technology*, 291, 121905.
- 96) Sayara, T., Basheer-Salimia, R., Hawamde, F., & Sánchez, A. (2020). Recycling of organic wastes through composting: Process performance and compost application in agriculture. *Agronomy*, 10(11), 1838.
- 97) Scheuerell, S. (2003). Understanding how compost tea can control disease. *BioCycle*, 44(2), 20-20.
- 98) Scheuerell, S. J., & Mahaffee, W. F. (2006). Variability associated with suppression of gray mold (*Botrytis cinerea*) on geranium by foliar applications of nonaerated and aerated compost teas. *Plant disease*, 90(9), 1201-1208.
- 99) Scheuerell, S., & Mahaffee, W. (2002). Compost tea: principles and prospects for plant disease control. *Compost Science & Utilization*, 10(4), 313-338.
- 100) Shrestha, K., Shrestha, P., Walsh, K. B., Harrower, K. M., & Midmore, D. J. (2011). Microbial enhancement of compost extracts based on cattle rumen content compost—Characterisation of a system. *Bioresource technology*, 102(17), 8027-8034.
- 101) Singh, W. R., & Kalamdhad, A. S. (2014). Potential for composting of green phumdi biomass of Loktak lake. *Ecological engineering*, 67, 119-126.
- 102) Soobhany, N., Mohee, R., & Garg, V. K. (2015). Recovery of nutrient from Municipal Solid Waste by composting and vermicomposting using earthworm *Eudrilus eugeniae*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(4), 2931-2942.
- 103) Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. John Wiley & Sons.

-
- 104) Sundberg, C., Smårs, S., & Jönsson, H. (2004). Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. *Bioresource technology*, 95(2), 145-150.
 - 105) Tiquia, S. M., Richard, T. L., & Honeyman, M. S. (2002). Carbon, nutrient, and mass loss during composting. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 62(1), 15-24.
 - 106) Touart, A. P. (2000). Time for (compost) tea in the northwest. *BioCycle*, 41(10), 74-74.
 - 107) Vigil, S. A., & Tchobanoglous, G. (1994). Comparison of the environmental effects of aerobic and anaerobic composting technologies. In *Proceedings of the 87th Annual Meeting and Exhibition of the Air and Waste Management Association: Cincinnati, OH*.
 - 108) Wainaina, S., Awasthi, M. K., Sarsaiya, S., Chen, H., Singh, E., Kumar, A., ... & Taherzadeh, M. J. (2020). Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies. *Bioresource Technology*, 301, 122778.
 - 109) Waksman, S. A., Cordon, T. C., & Hulpoi, N. J. S. S. (1939). Influence of temperature upon the microbiological population and decomposition processes in composts of stable manure. *Soil Science*, 47(2), 83-114.
 - 110) Wei, Y., Li, J., Shi, D., Liu, G., Zhao, Y., & Shimaoka, T. (2017). Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 51-65.
 - 111) Weltzien, H. C. (1991). Biocontrol of foliar fungal diseases with compost extracts. In *Microbial ecology of leaves* (pp. 430-450). Springer, New York, NY.
 - 112) Yohalem, D. S., Harris, R. F., & Andrews, J. H. (1994). Aqueous extracts of spent mushroom substrate for foliar disease control. *Compost science and utilization (USA)*.
 - 113) Zaccardelli, M., Pane, C., Scotti, R., Palese, A.M. and Celano, G. (2012). Impiego di compost-tea come bioagrofarmaci e biostimolanti in ortofrutticoltura, *Italus Hortus*, 19(2), pp. 17-28.
 - 114) Zaccardelli, M., Perrone, D., Del Galdo, A., Giordano, I., Villari, G., Bianco, M., 2006. Multidisciplinary approach to validate compost use in vegetable crop systems in Campania Region (Italy): effect of compost fertilization on processing tomato in field cultivation. *Acta Horticulturae* 700: 285-288.
 - 115) Zaccardelli, M., Perrone, D., Pane, C., Pucci, N., Infantino A., 2011. Control of corky root of tomato with compost and role of spore-forming bacteria to inhibit *Pyrenochaeta lycopersici*. *Acta Hort.* 914: 393-396.
 - 116) Zhang, L., & Sun, X. (2018). Evaluation of maifanite and silage as amendments for green waste composting. *Waste management*, 77, 435-446.