

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in ingegneria per l'ambiente e il territorio



TESI DI LAUREA

**Bioplastiche biodegradabili a compostaggio:
opportunità e limiti**

Relatore: Chiar.mo PROF. MARIA CRISTINA LAVAGNOLO
Correlatori: Chiar.mo PROF. VALENTINA POLI

Laureanda: MARGHERITA SALVIATO

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Abstract

La plastica è uno dei materiali la cui produzione e il cui utilizzo si è incrementato in maniera esponenziale negli ultimi decenni. Il suo uso eccessivo, in particolare quello della plastica monouso, provoca un impatto ambientale enorme, al quale si cerca di rimediare con materiali alternativi più sostenibili per l'ambiente.

Uno di questi è rappresentato dalle bioplastiche, la cui produzione e uso sono in continuo sviluppo e aumento.

Il termine bioplastiche non indica una singola tipologia di materiale, infatti sarebbe più appropriato parlare di plastiche a base biologica e di plastiche biodegradabili, le quali si suddividono in tre macrocategorie:

- le plastiche di origine biologica, non biodegradabili;
- le plastiche sia di origine biologica che biodegradabili;
- le plastiche derivanti da fonti fossili, biodegradabili.

Il focus di questo studio sono le bioplastiche biodegradabili a compostaggio, in quanto tra i diversi metodi di conferimento delle bioplastiche, quello del compostaggio risulta essere il migliore dal punto di vista ambientale.

Prendendo in considerazione gli standard riguardanti solamente le bioplastiche biodegradabili a compostaggio è importante sottolineare che non esiste una definizione di biodegradabilità e in alcuni casi gli standard sono di difficile confronto.

Esiste invece uno standard sulla compostabilità, che indica i parametri da soddisfare per considerare un materiale compostabile.

È necessario un confronto per verificare se le bioplastiche nel compost riescono a soddisfare realmente i parametri richiesti dagli standard. Per fare ciò si prenderanno come riferimento alcuni studi condotti sulle bioplastiche nel compost.

Inoltre, i residui di bioplastica potenzialmente contenuti nel compost, possono influenzare in modo sostanziale il suolo e alcune delle sue fondamentali proprietà.

Quindi la produzione, l'utilizzo e lo smaltimento delle bioplastiche sono argomenti urgenti e complessi che suscitano opinioni contrastanti nella comunità scientifica e non rappresentano certo la risposta unica e definitiva ai problemi creati dall'utilizzo spropositato di plastica.

Sommario

1. Introduzione.....	3
2. Le Biopolastiche.....	4
2.1 Diversi tipi di bioplastica.....	4
2.1.1 Bioplastiche a base biologica e non biodegradabili.....	6
2.1.3 Bioplastiche biodegradabili di origine fossile	9
2.2 Biodegradabilità e compostaggio	10
2.3 Certificazioni Europee e internazionali di riferimento sulle bioplastiche	14
3. Criticità delle Bioplastiche	20
3.1 Compostaggio bioplastiche (problemi e soluzioni).....	25
3.2 Microbioplastiche	28
4. Conclusioni.....	31
Bibliografia.....	34

1. Introduzione

La plastica rappresenta uno dei materiali più usati al mondo. La sua produzione aumenta esponenzialmente e, secondo l'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE), nel 2060 si raggiungeranno 1,2 miliardi di tonnellate di prodotti plastici, fonte di inquinamento e seri problemi ambientali.

I materiali bioplastici vengono proposti come alternativa e soluzione rispetto alle plastiche tradizionali. Sono materiali che possono essere a base biologica, biodegradabili oppure entrambi.

Le bioplastiche hanno dei vantaggi unici e riducono la dipendenza dalle risorse fossili e le emissioni di gas serra. Attualmente il loro mercato è molto ridotto rispetto a quello delle plastiche tradizionali ma è prevista una crescita significativa in futuro. Al giorno d'oggi esiste bioplastica alternativa ad ogni materiale plastico con le stesse caratteristiche e le stesse applicazioni.

Una grande problematica riguardante le plastiche tradizionali è rappresentata dal loro smaltimento, infatti i rifiuti di plastica sono circa il 30% dei rifiuti totali generati annualmente, la loro gestione è di fondamentale importanza per evitare che questi si disperdano nell'ambiente.

Una promettente soluzione viene fornita da alcune bioplastiche che possono essere potenzialmente reintrodotti nel suolo dopo la decomposizione. Il compostaggio è la metodologia di conferimento del rifiuto considerata più adatta per le bioplastiche biodegradabili compostabili, tuttavia a questo procedimento sono legate diverse criticità.

Lo scopo di questo studio è fornire una panoramica rispetto alle bioplastiche biodegradabili a compostaggio analizzando le criticità legate ad esse, attraverso un confronto tra diversi studi e standard fino ad ora sviluppati riguardanti questo specifico argomento.

2. Le Bioplastiche

2.1 Diversi tipi di bioplastica

Il termine bioplastiche, diversamente dall'uso comune, non indica un unico materiale, ma comprende una famiglia di materiali con differenti proprietà e applicazioni.

Un materiale plastico si definisce bioplastica se possiede una o entrambe di queste due caratteristiche:

- è biodegradabile;
- è a base biologica;

La biodegradazione è un processo biochimico in cui i microorganismi disponibili in un determinato ambiente convertono i materiali in acqua, anidride carbonica e biomassa.

Le bioplastiche biodegradabili sono materiali degradabili tramite processi biochimici. Questi processi sono fortemente influenzati dalle condizioni degli ambienti circostanti (temperatura, umidità etc) e dal materiale o dall'applicazione stessa.

Un materiale è a base biologica (bio-based) se è un materiale o un prodotto che deriva, almeno parzialmente, da biomassa.

La proprietà di essere biodegradabile è legata alla struttura chimica del materiale e non dai materiali di cui è composto. Ci possono essere quindi plastiche completamente a base biologica che non sono biodegradabili, mentre esistono plastiche a base fossile che possono biodegradarsi in determinate condizioni ambientali.

Seguendo queste definizioni si può suddividere la famiglia delle bioplastiche in tre macrocategorie:

1. "plastiche vegetali", a base biologica o parzialmente, ma non biodegradabili come, per esempio, il polipropilene (PP) o il polietilene tereftalato (PET) a base biologica;
2. Plastiche che sono sia di origine vegetale che biodegradabili come, per esempio, gli acidi polilattici (PLA);
3. Plastiche derivate da fonti fossili ma biodegradabili sotto determinate condizioni come, per esempio, il polibutene adipato tereftalato (PBAT). Alcuni di questi materiali potrebbero essere prodotti, almeno in parte, da materie prime a base biologica.

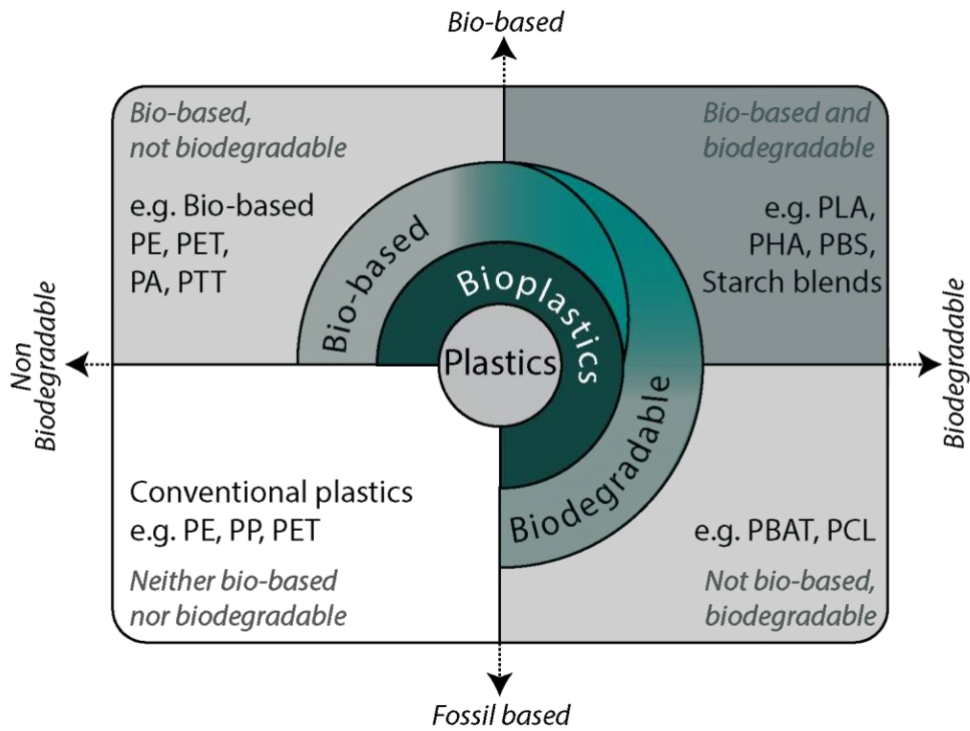


Fig. 1 Diversi gruppi di bioplastiche in base all'origine della materia prima e al destino ambientale (Lavagnolo et al., 2023).

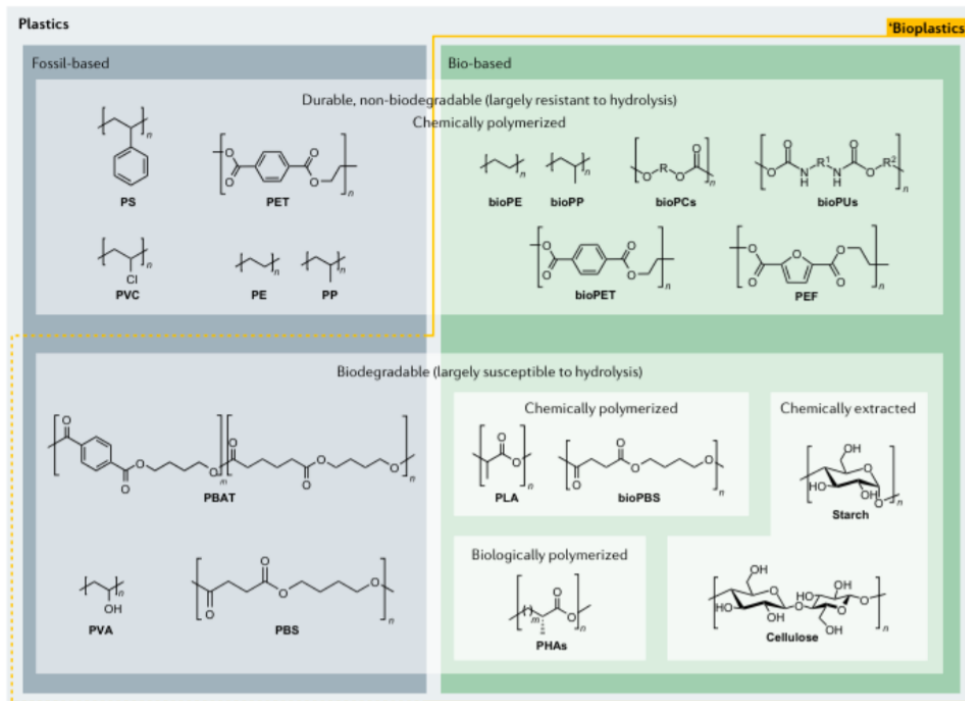


Figura 2 Esempi di bioplastiche (Rosenboom et al., 2022).

2.1.1 Bioplastiche a base biologica e non biodegradabili

Le bioplastiche più comuni appartenenti a questa tipologia sono le copie bio-simili delle plastiche tradizionali: le cosiddette “plastiche vegetali” come, per esempio, il polipropilene (bio-PP) o il polietilene tereftalato (bio-PET) a base biologica.

Questa tipologia di bioplastiche viene chiamata “drop-ins”, termine generalmente usato per indicare sostanze chimiche derivate dalla biomassa e identiche ai loro omologhi di derivazione fossile.

I “drop-ins” differiscono dal loro omologo di origine fossile soprattutto per due aspetti: l’aspetto economico e quello ambientale. Dal punto di vista economico non conviene produrre bioplastiche perché hanno un costo di produzione più alto rispetto agli omologhi di origine fossile, anche se sono vantaggiosi dal punto di vista ambientale, infatti la loro produzione causa un impatto ambientale ridotto.

Questa tipologia di bioplastiche comprende anche polimeri con varie prestazioni tecniche come, per esempio, numerose poliammidi a base biologica (PA), politrimetilene tereftalato (PTT) o polimeri totalmente nuovi, come il polietilene furanoato (PEF).

Esempi di materiali bioplastici a base biologica e non biodegradabili.

Un esempio di materiale utilizzato in larga scala è il PET, polietilene tereftalato, un materiale termoplastico utilizzato principalmente per la produzione di bottiglie, film e fibre tessili.

Il PET è costituito per il 70% da acido tereftalico e dal 30% di glicole monoetilico (MEG), quest’ultimo è prodotto a partire da materie prime rinnovabili provenienti da piante come la canna da zucchero e non da materie prime fossili (Bio-PET – Biokunststofftool, n.d.).

Altri esempi sono le poliolefine a base biologica. Le poliolefine, come il PE e il PP, costituiscono il >50% della produzione mondiale di materie plastiche e il >90% dei materiali di imballaggio. L’uso diffuso di questi materiali è dovuto alla loro eccellente stabilità chimica e alle proprietà meccaniche. La loro larga diffusione ha reso più economica la produzione, così da diventare delle valide alternative alle loro copie di origine fossile.

Il bioPE è chimicamente equivalente al PE e, pertanto, ugualmente lavorabile e riciclabile nelle infrastrutture esistenti di riciclaggio (Rosenboom et al., 2022).

2.1.2 Bioplastiche a base biologica e biodegradabili

A questo gruppo appartengono le plastiche vegetali che possono essere biodegradate, comprese le miscele a base di amido termoplastico (TPS) e altri polimeri biodegradabili (Bioplastics, 2021).

È importante sottolineare come questi materiali siano in continuo studio e aumento (la maggior parte sono oggetto di studio e ricerca da meno di 10-20 anni). Alcuni dei poliesteri più innovativi sono l'acido polilattico (PLA), i poliidrossialcanoati (PHA) e il polibutilene succinato (PBS).

Per ora sono impiegati principalmente nella fabbricazione di prodotti di breve durata come, per esempio, gli imballaggi, ma si cerca di integrarli sempre più in prodotti a lungo termine.

Di seguito in figura sono illustrati i percorsi di produzione di alcune di queste bioplastiche.

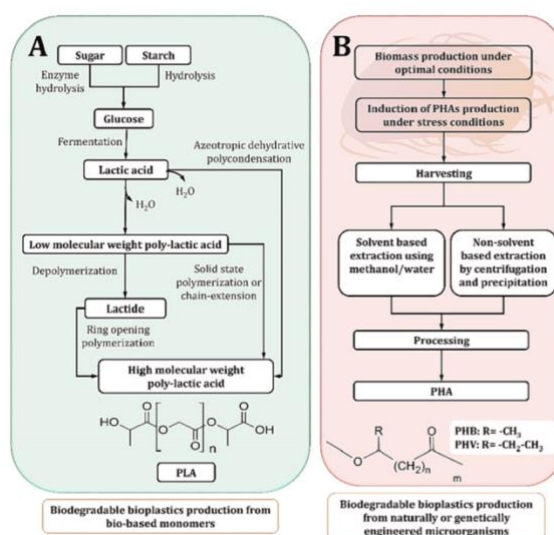


Figura3 Diversi percorsi di produzione di bioplastica biodegradabile. Produzione di bioplastica biodegradabile da monomeri a base biologica (A), microrganismi modificati naturalmente o geneticamente (B). (Ali et al., 2022)

Esempi di materiali bioplastici a base biologica e biodegradabili

L'acido polilattico (PLA) è un poliестere alifatico semicristallino ed è considerato la seconda plastica biodegradabile più prodotta. I polilattidi hanno qualità meccaniche paragonabili al PP e al PET, ma presentano aspetti negativi significativi, come rigidità e fragilità (Avérous, 2013).

La produzione del PLA avviene tipicamente attraverso la policondensazione dell'acido lattico, derivato dalla fermentazione degli zuccheri derivati da rifiuti organici come patate, mais, barbabietole da zucchero, melassa di canna e altre fonti, oppure attraverso

la polimerizzazione ad apertura dell'anello del lattide, il dimero ciclico dell'acido lattico.

Il PLA ha un colore chiaro ed è utilizzato come sostituto di film poliolefinici o schiume di poliestere, oppure per la produzione di articoli monouso.

Questo materiale risulta fragile e lento a cristallizzare a causa della sua unità di ripetizione relativamente corta e il gruppo laterale metilico.

Per ovviare a questo problema, il PLA deve essere modificato e miscelato (per esempio con biopolimeri o agenti di nucleazione) prima di essere processato (Rosenboom et al., 2022).

Il PLA si degrada nell'ambiente in un intervallo compreso tra 6 e 24 mesi, a seconda delle dimensioni del prodotto, della forma, della temperatura di degradazione, dell'umidità e del rapporto isomerico.

La degradazione avviene attraverso idrolisi: le molecole d'acqua rompono i legami estere che costituiscono la spina dorsale del polimero per produrre acido carbossilico e alcool che viene mineralizzato per produrre acqua e anidride carbonica (Casalini et al., 2019).

Per degradare al meglio il PLA si raccomanda l'idrolisi a condizioni termofile, circa 60 °C, prima della biodegradazione per ridurre il peso molecolare del biopolimero. La scelta efficace per valorizzare i rifiuti di PLA sono il compostaggio e il processo AD, poiché entrambi forniscono condizioni adeguate. (Farah et al., 2016).

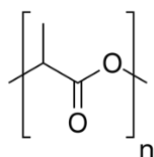


Figura 4 PLA.

I poliidrossialcanoati (PHA) sono poliesteri alifatici biodegradabili naturali con acidi 3-idrossialcanoici nella loro struttura.

La classificazione dei monomeri PHA viene eseguita in base alla lunghezza della loro catena di carbonio:

- catena corta (con meno di cinque atomi di carbonio);
- catena di lunghezza media (con un numero di atomi di carbonio compresi tra i sei e i dodici). (Abraham et al, 2021).

In natura ne esistono più di 250 diversi ceppi di batteri produttori di PHA e solo pochi sono ceppi batterici, inoltre l'integrazione di ceppi batterici geneticamente manipolati è una nuova tecnica con degli sviluppi promettenti.

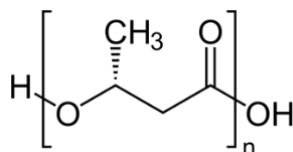


Figura 5 PHA.

Il PHA è biocompatibile, insolubile in acqua, non tossico e termoplastico (Raza et al., 2018), qualità che lo rendono un'alternativa promettente alle plastiche tradizionali. Nonostante questo, rappresentano solo l'1,2% del mercato nella produzione di bioplastiche (European Bioplastics, 2019), in quanto i costi di produzione sono elevati soprattutto a causa della richiesta di metodi di fermentazione, separazione e purificazione.

I PHA sono resistenti a temperature che raggiungono i 180 °C, sono stabili ai raggi UV e impermeabili (Ali et al., 2022), inoltre le caratteristiche termofisiche possono essere modificate combinando i PHA con altri monomeri.

I PHA vengono usati per utilizzi in ambito medico, imballaggi, cosmetici, abbigliamento sportivo e molte altre applicazioni in via di sviluppo.

2.1.3 Bioplastiche biodegradabili di origine fossile

Le bioplastiche biodegradabili di origine fossile sono un gruppo relativamente piccolo. Spesso sono combinate con altre bioplastiche biodegradabili come, per esempio, il PLA che ne migliora le prestazioni specifiche.

Attualmente queste sostanze sono prodotte a partire da materie prime fossili; tuttavia, sono in via di sviluppo delle versioni parzialmente a base vegetale che saranno disponibili nel prossimo futuro (Bioplastics, 2022).

I più importanti sono il PVA, il PBAT.

Esempi di materiali bioplastici a base fossile e biodegradabili

L'acido polivinilico (PVA) è un polimero idrosolubile altamente utilizzato, viene prodotto utilizzando etilene che deriva tradizionalmente da combustibili fossili, oppure da bioetanolo. È uno dei polimeri più facilmente biodegradabili: questo processo avviene per ossidazione enzimatica dei gruppi ossidrilici in dichetoni, che vengono poi idrolizzati e scissi (Ben Halima, 2016).

Il polibutilene polibutirato-adipato-tereftalato (PBAT) è un copoliestere aromatico-alifatico biodegradabile. È utilizzato principalmente nei film di pacciamatura agricola, che possono degradarsi nel suolo per un periodo maggiore di nove mesi (Rosenboom et al., 2022).

Il policaprolattone è un popolare materiale biocompatibile e biodegradabile utilizzato in applicazioni quali punti di sutura e dispositivi impiantabili per la somministrazione di farmaci. Il policaprolattone si idrolizza in modo non enzimatico nell'uomo in pochi anni e viene biodegradato da funghi e batteri nell'acqua di mare in poche settimane.

2.2 Biodegradabilità e compostaggio

Per comprendere a fondo come si comportano le bioplastiche biodegradabili a compostaggio è fondamentale chiarire la differenza tra i termini biodegradabile e compostabile.

Biodegradabile è un termine utilizzato per indicare un processo chimico in cui i microorganismi disponibili in un determinato ambiente, convertono i materiali in acqua, anidride carbonica e biomassa. Questo processo è fortemente influenzato dalle condizioni ambientali, dal materiale e dall'applicazione stessa e avviene principalmente in quattro fasi:

- 1- bio-deterioramento;
- 2- bio-fermentazione;
- 3- assimilazione;
- 4- mineralizzazione.

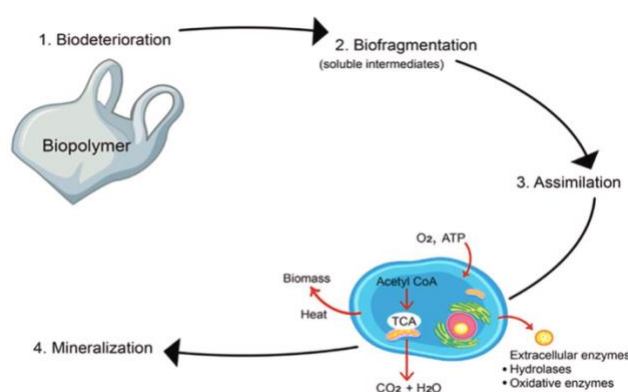


Fig.6 Processo di biodegradazione della bioplastica da microrganismi (Idris et al., 2023).

Nella prima fase di bio-deterioramento, avviene l'alterazione delle proprietà chimico-fisiche della plastica. Inizialmente i batteri aderiscono e colonizzano la superficie del

polimero, riducendo la resistenza e la durata del materiale plastico (Amobonye et al., 2021).

Ci sono diversi fattori che influenzano questa fase come, per esempio, l'esposizione prolungata alla luce, la temperatura e l'umidità dell'ambiente.

In seguito entrano in gioco microorganismi come batteri e funghi che utilizzano enzimi per scindere le molecole di grandi dimensioni, presenti nei materiali organici, in molecole più piccole e assimilabili (Alshehrei, 2017).

Questo processo ha due conseguenze principali: la perdita di peso molecolare del polimero e l'ossidazione di molecole di peso inferiore (Amobonye et al., 2021)

L'assimilazione è la fase del processo di biodegradazione in cui le molecole saranno assorbite dai microorganismi come stoccaggio di carbonio ed energia per la crescita e la respirazione. Per cui le molecole a basso peso molecolare (come oligomeri, dimeri, monomeri), create durante la bio-fermentazione vengono trasportate nel citoplasma del microrganismo che degrada la plastica (Amobonye et al., 2021)

Il processo termina con la mineralizzazione, cioè con la produzione di metaboliti ossidati, come, per esempio, anidride carbonica, acqua o metano. (Kumari & Chaudhary, 2020)

La capacità di biodegradazione di un materiale plastica è influenzata da diverse condizioni che possono dipendere dai polimeri stessi o da fattori circostanti. Le condizioni ottimali per la decomposizione del polimero sono l'elevata quantità di ossigeno, umidità e temperatura (Ali et al., 2021)

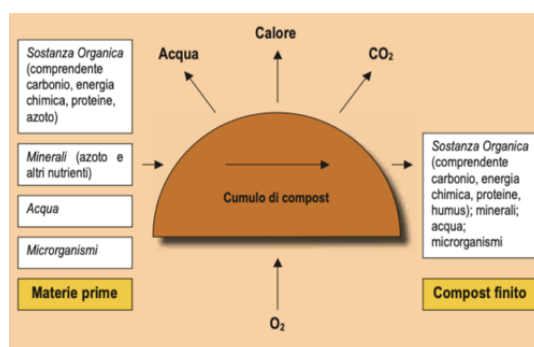


Fig. 7 Processo di compostaggio: dai materiali di partenza al prodotto finale. (Compostaggio, n.d.)

Quando si parla di materiali compostabili, invece, ci si riferisce a una proprietà più specifica.

Il compostaggio è un processo aerobico di decomposizione biologica della sostanza organica che permette di ottenere un prodotto biologicamente stabile, in cui la componente organica presenta un elevato grado di evoluzione.

Un ruolo fondamentale nel processo di compostaggio è operato dai microrganismi, i quali traggono energia dalla materia organica per le loro attività metaboliche, rilasciando acqua, biossido di carbonio, sali minerali e sostanza organica stabilizzata ricca di sostanze umiche, cioè il compost.

Il compostaggio può essere casalingo o industriale.

Il compostaggio casalingo è un processo meno controllato e difficilmente regolabile. Questo processo potrebbe non raggiungere una temperatura sufficientemente elevata per trasformare le bioplastiche compostabili in rifiuto.

Il compostaggio industriale è condotto attraverso diversi processi e, in base alle modifiche biochimiche che subisce la sostanza organica durante il compostaggio, il processo si può suddividere schematicamente in due fasi:

1. fase di biossidazione: dove avviene l'igienizzazione della massa a elevate temperatura, fase nota come "high rate phase" cioè fase attiva, caratterizzata da intensi processi di degradazione delle componenti organiche più facilmente degradabili;
2. fase di maturazione: dove il prodotto si arricchisce di molecole umiche stabilizzandosi, questa fase è nota come "curing phase", caratterizzata da processi di trasformazione della sostanza organica fino alla formazione di sostanze umiche.

La *prima fase* è un processo aerobio ed esotermico, è presente un elevato consumo di ossigeno a causa della presenza nella matrice di composti prontamente metabolizzati (molecole semplici quali zuccheri, acidi organici, aminoacidi) che causa la dissipazione di parte dell'energia della trasformazione sotto forma di calore.

La prima fase causa un aumento della temperatura che arriva a 60 °C e oltre in misura tanto più repentina e persistente quanto maggiore è la fermentescibilità del substrato e la disponibilità di ossigeno atmosferico.

Questo rende l'aerazione del substrato una condizione fondamentale per proseguire il processo microbico. Questa fase del processo di compostaggio viene definita termofila ed è caratterizzata dalla liberazione di energia sotto forma di calore.

La liberazione di energia comporta un'elevata richiesta di ossigeno da parte dei microorganismi che entrano in gioco durante la degradazione della sostanza organica, con formazione di composti intermedi come acidi grassi volatili a catena corta (acido

acetico, propionico e butirrico), rapidamente metabolizzati dalle popolazioni microbiche ma tossici per le piante.

Da questa fase si ottiene compost fresco, un materiale igienizzato e stabilizzato sufficientemente grazie all'azione dei batteri aerobi. L'igienizzazione consiste nell'inattivazione di semi di piante infestanti e organismi patogeni, è uno degli effetti più importanti della prima fase, purché la temperatura si mantenga su valori superiori a 60 °C per almeno cinque giorni consecutivi.

Dopo la scomparsa dei composti più facilmente biodegradabili, inizia la seconda fase, chiamata fase di maturazione. In questa fase le trasformazioni metaboliche di decomposizione interessano le molecole organiche più complesse e avvengono con processi più lenti.

I processi metabolici diminuiscono di intensità e agiscono, oltre ai batteri, gruppi microbici costituiti da funghi e attinomiceti che degradano attivamente amido, cellulosa e lignina, composti essenziali dell'humus.

La temperatura arriva a valori di 40-45 °C e poi scende progressivamente, stabilizzandosi poco al di sopra della temperatura ambiente.

Si ottiene il compost maturo, una matrice stabile di colorazione scura, con tessitura simile a quella di un terreno ben strutturato, ricca in composti umici e dal caratteristico odore di terriccio di bosco.

La degradazione della sostanza organica nel processo di compostaggio avviene naturalmente grazie ai microorganismi che possono esplicare al meglio la loro attività metabolica se l'ambiente che li ospita fornisce le sostanze nutritive e offre delle condizioni ottimali di sviluppo.

I principali parametri che influenzano questo processo biologico sono:

- la temperatura, che fornisce informazioni sull'andamento del processo e sull'intensità delle reazioni;
- il pH che inizialmente è acido ma alla fine del processo tende alla neutralità;
- la presenza di ossigeno, necessaria per la presenza di microorganismi attivi;
- la porosità che rappresenta la misura degli spazi vuoti esistenti nella biomassa in fase di compostaggio. È correlata con le proprietà fisiche dei materiali sottoposti

a compostaggio e influenza la corretta e omogenea distribuzione dell'aria insufflata.

- l'umidità che consente di svolgere un'adeguata attività microbica senza impedire l'ossigenazione della massa
- il rapporto C/N che rappresenta l'indice di controllo dell'attività microbica.

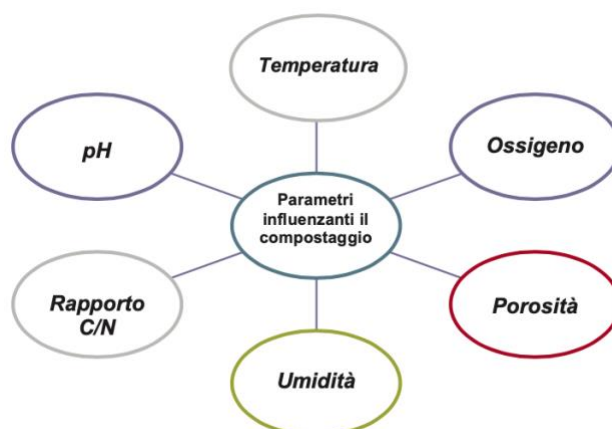


Figura 8 fattori che influenzano il processo di compostaggio.

Il compostaggio trasforma la biomassa proveniente dall'attività agricola e dal ciclo urbano di raccolta differenziale in un prodotto utile alla fertilizzazione dei terreni agricoli (non più fitotossico ma apporto di nutrienti), per questo ricopre una funzione strategica ed ecologico-ambientale.

2.3 Certificazioni Europee e internazionali di riferimento sulle bioplastiche

La rapida crescita dell'utilizzo delle bioplastiche ha reso la loro regolamentazione necessaria. Sono stati sviluppati, da diversi settori, standard per analizzare le proprietà, la composizione e la componibilità di diverse bioplastiche, utilizzando tecniche e condizioni specifiche che possono essere replicate. Le principali organizzazioni che creano questi standard sono:

- Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (ISO);
- Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OECD);
- Comitato Europeo per la Standardizzazione (CEN);
- Società Americana per le Prove e i Materiali (ASTM);
- Ente Italiano di Normazione (UNI);
- Istituto Tedesco per la Standardizzazione (DIN);

- Standard Giapponese per l'Associazione (JAS);
- Standard Australiano (AS);

(John et al., 2022).

Le norme possono essere divise in due gruppi:

- 1- specifiche standard che descrivono i requisiti del prodotto e stabiliscono uno schema di prova che combina diversi test, criteri e livelli di superamento;
- 2- standard di prova che descrivono procedure dettagliate per l'esecuzione dei metodi di prova, nonché la valutazione dei test e dei valori limiti ammissibili.

I metodi standardizzati sono riassunti nella fig. 9

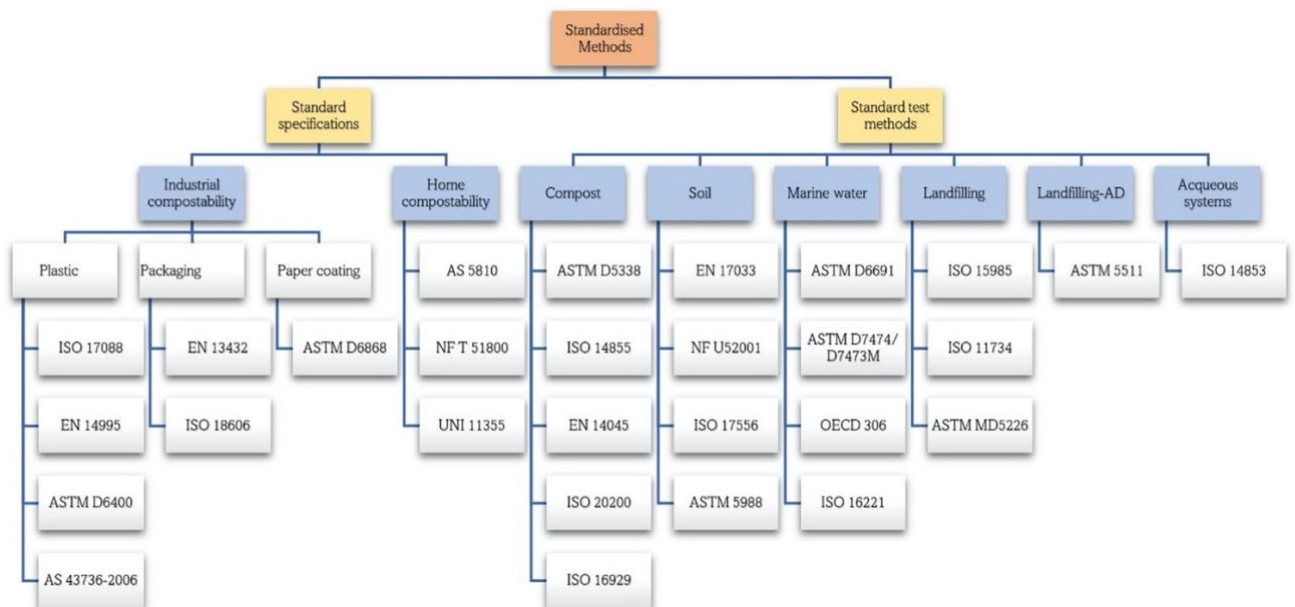


Figura 9 Standardizes methods (Folino et al., 2023).

Lo schema rappresentato in figura 9 fornisce una panoramica dei numerosi standard esistenti. In questo elaborato verranno analizzati solo gli standard che definiscono i requisiti per la compostabilità delle bioplastiche, in particolare il compostaggio industriale.

Alcuni di questi standard hanno una grande somiglianza tra loro, con piccole differenze relative ai dettagli.

Tab 1. Lista principali standard usati per le bioplastiche compostabili

Validità geografica	Identificatore	Materiali trattati
Mondiale	ISO 17088	Plastica- riciclo organico- specifiche per plastiche compostabili.
Unione Europea	EN 14995	Plastica- valutazione di compostabilità- schema del test e specifiche.
USA	ASTM D6400	Test per prodotti compostabili, plastiche biodegradabili compostabili.
Australia	AS 43736-2006	Plastiche biodegradabili adatte al compostaggio e altri trattamenti microbici.
Unione Europea	EN 13432	Imballaggi - Requisiti per gli imballaggi recuperabili mediante compostaggio e biodegradazione - Sistema di prova e criteri di valutazione per l'accettazione finale degli imballaggi.
Mondiale	ISO 18606	Imballaggio - Procedure e requisiti per gli imballaggi idonei al riciclaggio organico.
USA	ASTM D6868	Specifiche standard per l'etichettatura di prodotti finali che incorporano materie plastiche e polimeri come rivestimenti o additivi con carta e altri substrati progettati per essere compostati aerobicamente in città o industriali.

Per definire un biopolimero compostabile le norme specifiche definiscono due requisiti:

1. una serie di test per misurare le proprietà di un biopolimero;
2. una serie di criteri che tali misurazioni devono soddisfare per considerare il biopolimero compostabile.

In particolare, lo schema di prova per la caratterizzazione di un prodotto come compostabile è definito dalle norme EN 13432:2002, EN 14995:2007, ISO 17088:2021 e ASTM D6400–21.

Un prodotto, per essere definito compostabile, deve rispettare rigorosamente i seguenti criteri:

- 1- caratterizzazione della composizione del materiale: si devono identificare i diversi costituenti, il contenuto di materia organica e il livello di concentrazione dei metalli pesanti. Gli standard differiscono l'uno dall'altro in quanto considerano diversi tipi di metalli e diversi valori limite. In particolare, l'ASTM D6400 consente valori più elevati per metalli pesanti all'interno del materiale rispetto agli standard EN.
- 2- disintegrazione: I requisiti sono molto simili per tutti e quattro gli standard. Almeno il 90 % del peso secco originale si disintegra in particelle di dimensioni inferiori a 2 mm (dopo la setacciatura su un setaccio da 2,0 mm può rimanere al massimo il 10 % del peso secco originale). Questo avviene con tempi stimati di 12 settimane per compostaggio aerobico per tutti gli standard, tranne ISO 17088 che richiede un tempo di 45 giorni con una possibile estensione fino a 6 mesi. Il problema della durata e della frammentazione dei test è uno dei più rilevanti;
- 3- Biodegradazione: secondo gli standard EN e ISO la biodegradazione indica la conversione del materiale in anidride carbonica, acqua e biomassa entro 6 mesi, nella misura del 90%. Lo standard ASTM D6400 stabilisce una soglia del 60% di biodegradazione entro sei mesi per gli omopolimeri o i copolimeri casuali e del 90 % per i copolimeri e le miscele di polimeri;
- 4- Qualità del compost: viene misurata tramite prove di ecotossicità rispetto al compost finito. Si confronta un compost bianco con uno di prova contenente bioplastica compostata. Vengono analizzati anche parametri fisico-chimici come pH, contenuto di sale e densità. Teoricamente la qualità del compost contenente bioplastica non dovrebbe variare rispetto a quello bianco.

Gli standard presentano gli stessi requisiti per l'ecotossicità:

- la plastica deve avere concentrazioni di metalli pesanti inferiori al 50% di quelle prescritte per fanghi o compost nel paese in cui il prodotto è venduto;
- il tasso di germinazione e la biomassa vegetale dei compost campione non devono essere inferiori al 90 % a quelli del corrispondente compost bianco per due diverse specie vegetali.

Un prodotto supera il test di ecotossicità se soddisfa entrambi i requisiti.

Gli standard analizzati non sono obbligatori, servono per regolare e testare l'uso di bioplastiche.

Il processo per ottenere una certificazione consiste nel far testare il prodotto da un laboratorio di certificazione indipendente che determina se questo è conforme agli standard. Molteplici organizzazioni e associazioni si propongono come enti certificatori, le più richieste sono: Il Biodegradable Product Institute, TÜV Austria (ex Vinçotte), DIN Certco, Australasian Bioplastics Association e Japan BioPlastics Association (Jayakumar et al., 2023).

Quando i prodotti sono conformi alla norma EN 13432 ci sono diversi loghi disponibili per indicarlo, come il “Sedling” e “OK compost INDUSTRIAL”.

Oltre a questi, il TÜV Austria offre anche loghi che descrivono la biodegradazione dei materiali plastici a seconda dell'ambiente in cui avviene questo processo, i loghi sono “OK biodegradabile MARINO”, “OK biodegradabile SOIL”, e “OK biodegradabile WATER”. Infine “OK biobased” è il logo che premia le aziende che fabbricano i loro prodotti con un'alternativa alle materie prime a base fossile.

Di seguito sono indicati i loghi esistenti e la loro appartenenza geografica.

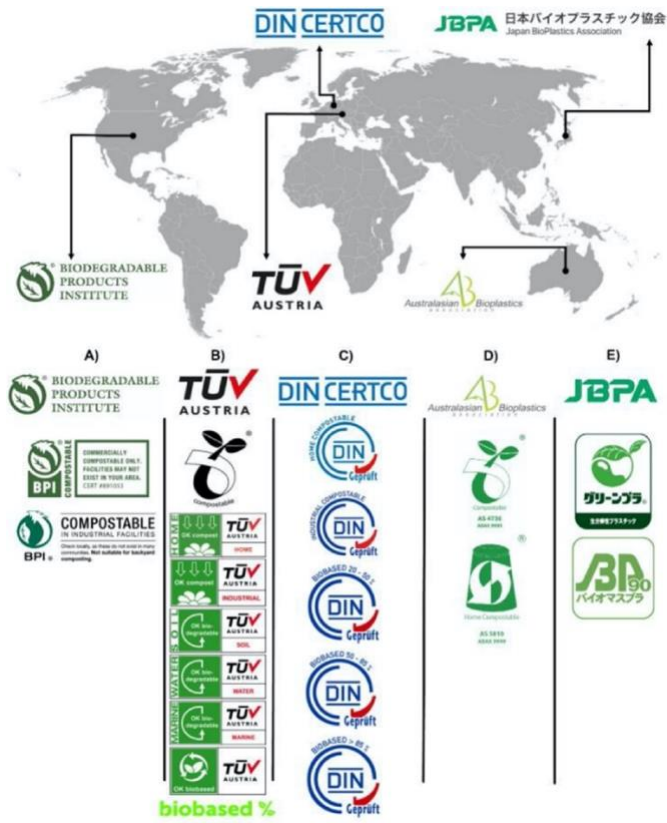


Fig. 10 Certification of bioplastics. (A) Biodegradable Product Institute; (B) Tüv Austria; (C) DIN Certco; (D) Australasian Bioplastics Association; (E) Japan BioPlastics Association (Jayakumar et al., 2023).

3.Criticità delle Bioplastiche

Prima di analizzare gli aspetti positivi e negativi delle bioplastiche, è necessario fare un breve excursus sui metodi di fine vita di questi materiali.

Ci sono diverse opzioni per lo smaltimento delle bioplastiche, tra cui:

1. Riciclo
2. Trattamento biologico dei rifiuti, digestione anaerobica e compostaggio
3. Recupero energetico
4. Discarica

(*RECYCLING AND RECOVERY: END-OF-LIFE OPTIONS FOR BIOPLASTICS*, n.d.)

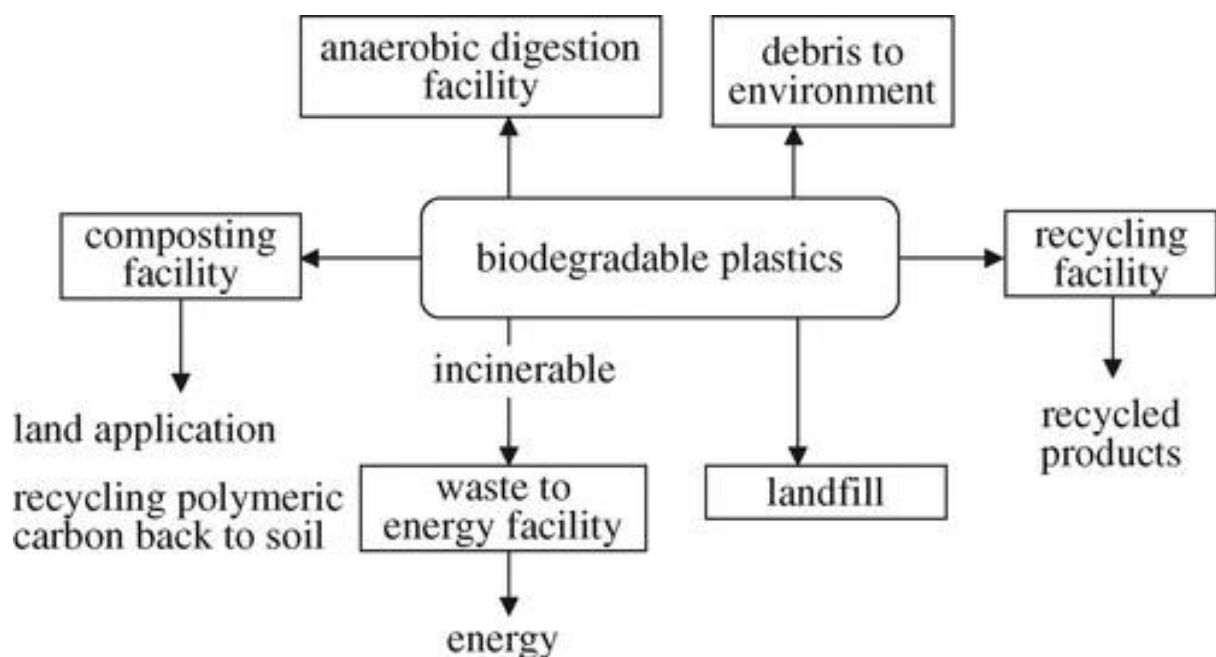


Figura 11 Integrazione delle plastiche biodegradabili con le infrastrutture di smaltimento.

1) Riciclo

Se il materiale bioplastico viene conferito nella raccolta del riciclo della plastica, segue il processo di riciclo della plastica tradizionale, mentre se viene conferito nella raccolta dell'organico, viene compostato. I due processi sono descritti nel seguente schema (Fig. 12).



Figura 12 (RECYCLING AND RECOVERY: END-OF-LIFE OPTIONS FOR BIOPLASTICS, *n.d.*)

L'European Bioplastics, che rappresenta gli interessi dell'industria delle bioplastiche nell'UE, afferma che la riciclabilità dei prodotti dipende dalla progettazione del prodotto stesso, dalla composizione del materiale e dall'economicità del processo. European Bioplastics afferma inoltre che le versioni a base biologica di PE, PET o PP sono chimicamente e fisicamente identiche alla versione fossile, per questo sono facilmente smaltite in flussi di riciclaggio consolidati. Per i materiali bioplastici che non sono simili alle plastiche tradizionali, EB promette nuovi flussi di riciclo che verranno realizzati dopo l'aumento della produzione e delle vendite di questi materiali.

Le promesse sembrano lontane dall'essere mantenute, soprattutto considerando che il riciclo di materiale bioplastico con la plastica tradizionale influenza la qualità delle plastiche convenzionali ritratte. Per questa ragione il flusso dei rifiuti di bioplastiche biodegradabili deve essere separato dal flusso dei rifiuti normali, altrimenti crea particolari problemi. Infatti i materiali di plastica biodegradabile e tradizionale hanno pesi e densità simili, risulta quindi impossibile procedere con una semplice separazione meccanica e pertanto si devono distinguere con sistemi ottici. (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017).

Quindi è preferibile conferire le bioplastiche con il flusso di rifiuti organici.

2) Trattamento biologico dei rifiuti

Esistono due opzioni principali per il trattamento biologico dei rifiuti di bioplastiche: la digestione anaerobica (AD) e il compostaggio.

- Digestione anaerobica.

La digestione anaerobica scompone i rifiuti organici in biogas e digestato, attraverso quattro fasi: idrolisi, acidogenesi, acetogenesi e metanogenesi. La combustione di biogas può trasformarlo in una fonte di energia alternativa, inoltre i rifiuti della digestione possono essere usati come fertilizzante organico (Cucina et al., 2021). Le miscele che si degradano meglio in queste condizioni sono quelle di PHAs.

- Compostaggio.

Il compostaggio, già descritto al capitolo 2.2, è la degradazione di materia organica eterogenea da parte di una popolazione microbica diversificata in circostanze controllate, in un ambiente umido e aerobico. Da questo processo, si ottiene compost ricco di sostanze nutritive in grado di fornire al suolo N, P, K e materia organica. Il tempo stimato per la completa degradazione delle bioplastiche è pari a 84 ± 47 giorni, 124 ± 83 giorni e 119 ± 43 giorni rispettivamente per PLA, PHA e miscele a base di amido (Cucina et al., 2021).

Tuttavia, la capacità disponibile degli impianti di compostaggio nell'Unione Europea è limitata. Molti degli impianti non sono adatti al trattamento di bioplastiche e dovrebbero subire numerose modifiche tecniche, in particolare potenziare il pre-trattamento (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017).

3) Incenerimento con recupero di energia

La maggior parte delle materie plastiche comuni ha un potere calorifero lordo (GCV) uguale o superiore a quello del carbone. L'incenerimento con recupero di energia è quindi considerata un'opzione valida dopo la rimozione di elementi riciclabili. Il recupero di energia mediante incenerimento è considerato un'opzione adeguata a tutti i polimeri bioplastici e si ritiene che le risorse (bio)rinnovabili nei prodotti polimerici bioplastici contribuiscano all'energia rinnovabile quando vengono incenerite (Song et al., 2009).

Mentre il recupero di energia mediante incenerimento può essere un'opzione tecnicamente valida per gli imballaggi biodegradabili, d'altro canto nega molti dei potenziali benefici derivanti dal potenziale di biodegradabilità del materiale.

4) discarica

La discarica di rifiuti di plastica è l'opzione meno favorita nella gerarchia dei rifiuti. Il conferimento in discarica di materiali biodegradabili, tra cui polimeri biodegradabili, rifiuti di giardino e cucina, presenta il problema della produzione, in condizioni anaerobiche, di metano, un gas serra con un effetto di riscaldamento globale 25 volte superiore a quello della CO₂. Il gas di discarica viene per lo più catturato (questo è obbligatorio in Europa ai sensi della direttiva sulle discariche) (direttiva 1999/31/CE del Consiglio, 1999) e utilizzato come fonte di energia. Tuttavia, migliaia di discariche illegali e molte discariche non hanno ancora alcun tipo di sistema di raccolta del gas. L'inclusione di imballaggi biodegradabili potrebbe quindi comportare l'emissione di più gas serra, soprattutto per quegli impianti che operano al di fuori dello standard della direttiva sulle discariche (Mudgal et al., 2012; Song et al., 2009).

Dal punto di vista ambientale, il compostaggio rappresenta il conferimento finale più favorevole per le plastiche biodegradabili. Questo avviene solo se le condizioni di processo in termini di umidità, ossigeno e altri parametri chimico-fisici sono controllati al fine di ottenere risultati apprezzabili in termini di prodotti finali (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017).

Gli impianti di compostaggio attualmente non sono ancora attrezzati a trattare questo materiale, sarebbe opportuno preparare questi impianti al conferimento di bioplastiche dal momento che questa è l'alternativa idealmente migliore dal punto di vista ambientale.

Breve analisi degli aspetti positivi e delle criticità riguardanti le bioplastiche, seguita da due approfondimenti sulle criticità legate al compostaggio e alle microbioplastiche nel compost.

Aspetti positivi.

- Uso di risorse rinnovabili o fonti dall'agricoltura, utilizzate per la produzione di bioplastiche a base biologica.
- Riduzione dell'utilizzo di energia come input per la produzione.
- Possibile riduzione della carbon footprint.
- Riduzione di rifiuti permanenti.
- Possibile crescita positiva per l'economia.

- Alternativa all'uso della plastica tradizionale. Per diminuire l'inquinamento dovuto dalle plastiche è necessario sviluppare questo settore che sembra meno impattante. È anche necessario svolgere ricerche più approfondite per assicurare che questi nuovi materiali non abbiano effetti negative peggiori delle plastiche tradizionali.

Aspetti negativi.

- La definizione di biodegradabilità è poco chiara, non esiste uno specifico standard che indichi la sua definizione e i parametri che un materiale deve rispettare per essere considerato degradato. Questo crea problemi all'interno della comunità scientifica che non può basarsi su oggettivi valori di misura e può interpretare questo processo in diversi modi. Per esempio, esiste una definizione nello standard EN 13432, ma questo standard si riferisce specificatamente al compostaggio e non alla biodegradabilità in generale e in diversi ambienti.
- I tempi di degradazione rilevati dagli standard per poter degradare un materiale bioplastico a compostaggio, sono inferiori rispetto ai tempi indicati da altri studi sugli stessi materiali.
- I test condotti sulle bioplastiche, che rispettano gli standard (o almeno uno di questi presi come riferimento), sono tutti test in scala laboratoriale; ad oggi non è ancora stato condotto un test di compostaggio su scala reale. Infatti, i test su scala laboratoriale non sono in grado di riprodurre la complessità dei processi che avvengono su scala reale.
- Sono stati condotti molti studi a breve termine ma mancano degli studi a lungo termine per investigare a fondo i tempi di degradazione e le conseguenze che le bioplastiche creano nel compost.
- Anche se sono stati condotti molti studi riguardanti le bioplastiche e le loro proprietà e applicazioni, questi non includono una completa panoramica sulle bioplastiche in termini di definizione, fonti, tipi, aspetti di degradazioni e regolamentazioni.
- La separazione meccanica tra le bioplastiche e le plastiche tradizionali è un processo molto complicato e costoso.
- La biodegradazione o la degradazione delle bioplastiche può portare alla creazione di microplastiche e nanoplastiche, potenzialmente dannose per l'ambiente e l'essere umano (Jayakumar et al., 2023).

3.1 Compostaggio bioplastiche (problemi e soluzioni)

In questo capitolo il focus è posto sulle bioplastiche biodegradabili a compostaggio, in particolare verrà preso in considerazione il compostaggio industriale, trascurando il compostaggio casalingo, poiché come evidenziato nel capitolo 2.2 è un processo meno controllato e difficilmente regolabile.

È necessario studiare a fondo la biodegradabilità delle plastiche durante il processo di compostaggio poiché queste sono comunemente utilizzate ai fini della raccolta di prodotti organici domestici. Per svolgere uno studio approfondito sono stati condotti diversi test su scala di laboratorio che simulano il compostaggio industriale impostando i valori standard di: temperatura, pH, contenuto di acqua, rapporto carbonio/azoto (comunemente 30:1), dimensione del campione, tipo di compost e la composizione delle materie prime (cioè una miscela digerita di bioplastiche e la frazione organica dei rifiuti solidi urbani FORSU).

Come esempio di test su scala di laboratorio si considera un test eseguito sul compostaggio di sacchetti di plastica a base di amido, largamente usati per il conferimento dei rifiuti umidi (Lavagnolo et al., 2020).

Per eseguire il test si prendono in considerazione due linee con la stessa composizione di tre cumuli di compostaggio su piccola scala.

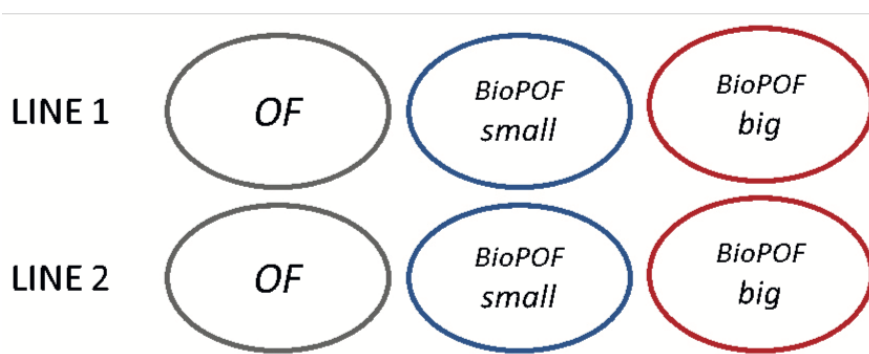


Figura 13 Preparazione sperimentale del test di compostaggio.

Un cumulo contiene solo la frazione organica di rifiuti (OF) e i restanti due, un mix di OF e bioplastiche tagliate manualmente in due diverse dimensioni. I cumuli sono stati collocati in una camera climatica a temperatura e umidità controllata. I test svolti hanno misurato: granulometria, concentrazione e caratteristiche fisico-chimiche.

Il materiale testato consisteva in sacchetti di bioplastica a base di amido, composto da 30% di amido e per il restante 70% da polibutilene adipato tereftalato (PBAT), un poliestere biodegradabile non a base biologica.

Le fasi principali del compostaggio sono due: la fase termofila, che si è conclusa in dieci giorni e la fase mesofila, durata quarantacinque giorni.

La diminuzione della massa ha mostrato la massima intensità durante la fase termofila, raggiungendo il 60% della massa iniziale e il 30% alla fine del processo. Questi risultati soddisfano i requisiti italiani per la qualità del compost (EN 14045: l'umidità era inferiore al 40%, il pH nell'intervallo 7,6-7,7 e C/N nell'intervallo tra 12 e 13. Anche l'indice respirometrico era nei valori prestabiliti).

Per quanto riguarda la granulometria, si nota una sostanziale riduzione delle dimensioni iniziali nella fase termofila. Mentre la dimensione finale media di 5 e 2 mm può essere raggiunta solo dopo 80 e 100 giorni rispettivamente.

I risultati dell'analisi FTIR-ATR hanno evidenziato che la degradazione delle bioplastiche è avvenuta principalmente durante la fase di polimerizzazione, ma dopo 55 giorni il polimero non è ancora stato degradato.

Durante la setacciatura è stato visivamente notato che, a causa dell'umidità e dell'ammorbidimento, le bioplastiche tendevano ad avvolgere i rifiuti alimentari, impedendo la loro completa degradazione.

Da questo studio è stato evidenziato che:

- 1- Il compostaggio è terminato dopo 55 giorni, ma la degradazione delle bioplastiche non ha soddisfatto i requisiti normativi per la compostabilità.
- 2- La biodegradazione è avvenuta principalmente durante la fase mesofila (di polimerizzazione), come risultato dall'attività di microorganismi.
- 3- Le dimensioni iniziali hanno avuto un impatto sul processo di frammentazione.
- 4- L'extrapolazione dei dati sperimentali ha rivelato la necessità di un periodo di compostaggio di 100 giorni al fine di soddisfare i requisiti standard per la compostabilità delle bioplastiche.

Confrontando i risultati di questo studio con altri simili, si può affermare che solitamente vengono usati gli stessi indicatori di biodegradabilità, infatti la maggior parte degli studi sono condotti secondo gli stessi standard. Come definito negli standard,

dovrebbe avvenire almeno il 90% della perdita di peso (così come la disintegrazione della massa in frammenti inferiori a 2 mm) entro 6 mesi per definire un bioprodotto compostabile.

Tuttavia, non sempre i materiali incontrano i requisiti richiesti, è necessario condurre ulteriori studi per individuare le condizioni ottimali di compostaggio. Il problema maggiore è che gli impianti di compostaggio esistenti non sono stati progettati per trattare le bioplastiche. Quindi il loro trattamento è problematico ed è necessario bisogna trovare delle soluzioni immediate.

Inoltre è necessario applicare test di ecotossicità per assicurarsi che la qualità del compost non sia influenzata da frammenti residui di bioplastiche.

Quindi le problematiche riguardanti il compostaggio si possono riassumere in:

- Le condizioni ambientali suggerite nei metodi standard come ottimali per la biodegradazione, non possono essere riprodotte nei comuni impianti di trattamento su vasta scala. Per la compostabilità in particolare, la durata e la temperatura di processo dovrebbero essere più elevate rispetto a quelle degli impianti reali su vasta scala.

I materiali riusciranno a degradarsi in condizioni di laboratorio controllate secondo i requisiti degli standard ma non negli impianti di trattamento dei rifiuti.
- I test di laboratorio, per quanto rispettino esattamente i requisiti degli standard, non possono riprodurre in modo completo e accurato la complessità delle dinamiche che avvengono all'interno dei sistemi di compostaggio.
- È quasi impossibile la raccolta di particelle troppo piccole (inferiori a 2mm): questo causa problemi pratici gravi. È necessario investigare il comportamento delle microbioplastiche che vengono rilasciate negli ambienti naturali.
- A causa dei problemi generati dalle bioplastiche, molti impianti di compostaggio optano per la rimozione dei sacchetti di bioplastica nel primo trattamento, trascurando totalmente il potenziale di compostaggio delle bioplastiche.
- La degradazione delle bioplastiche dovrebbe essere caratterizzata dal rilascio di compost non tossici ma questo aspetto deve ancora essere studiato approfonditamente. Oltre ai test di biodegradazione, dovrebbero essere effettuate modifiche fisico-chimiche dell'ambiente, ad esempio mediante test di fitotossicità, al fine di valutare il possibile impatto negativo o positivo del

processo di biodegradazione delle bioplastiche rispetto all'ambiente. (Folino et al., 2023).

Una strategia per risolvere questi problemi può essere una revisione delle norme, al fine di includere dei requisiti più stringenti per etichettare un prodotto come compostabile. Un'altra strategia potrebbe essere l'implementazione di nuovi bioprodotti mediante la modulazione della struttura chimica del biopolimero. Infatti, è la composizione chimica ad influenzare la cinetica di degradazione del biopolimero. Questo però potrebbe comportare una riduzione delle caratteristiche che rendono le bioplastiche facilmente commerciabili.

Infine è necessario studiare ulteriormente gli effetti nocivi dei prodotti di biodegradazione sull'ambiente. I test di ecotossicità dovrebbero far parte di ogni esperimento di biodegradazione.

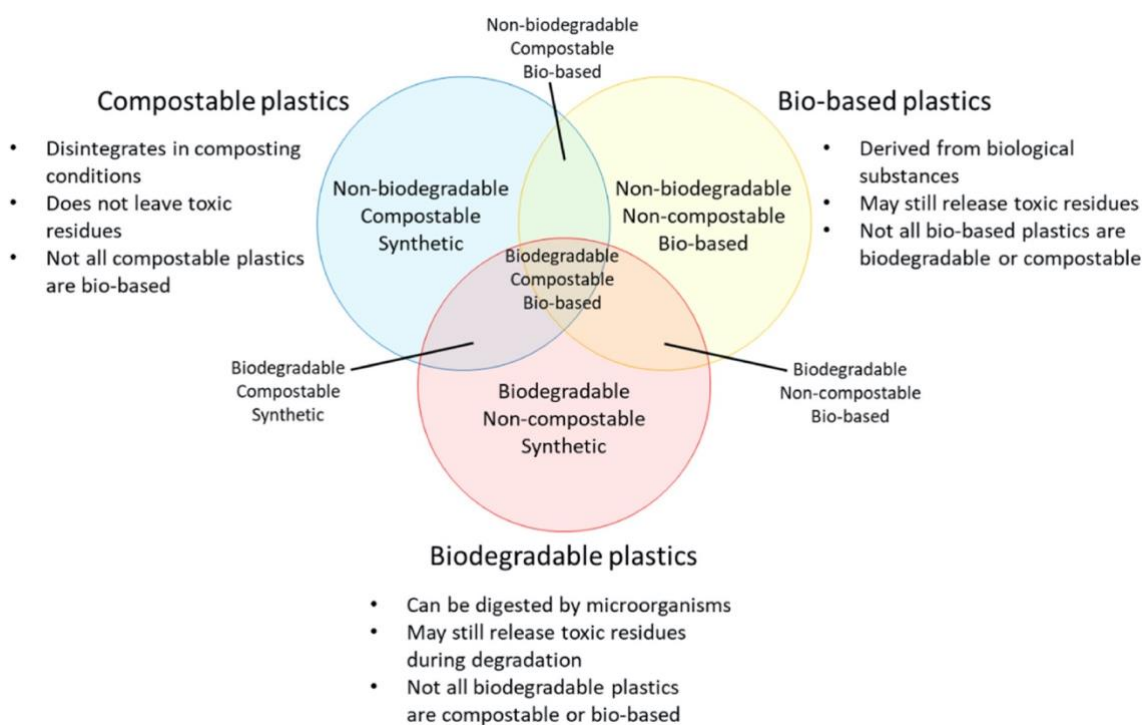


Figura 14 Diagramma di Venn che mostra la categorizzazione dei tipi di plastica compostabile, biodegradabile e a base biologica. (Idris et al., 2023).

3.2 Microbioplastiche

Un aspetto importante da tenere in considerazione riguardante le bioplastiche a compostaggio è la possibilità che queste portino alla creazione di microplastiche o nanoplastiche. È necessario studiare questo fenomeno in quanto potenzialmente molto dannoso per l'ambiente e l'essere umano.

Visto il recente sviluppo dei materiali bioplastici biodegradabili, gli studi sulle possibili conseguenze a lungo termine, come quelle della possibile creazione di microbioplastiche, sono ancora pochi.

In un documento dell'European Bioplastics del 2021, si afferma che le plastiche compostabili industriali riducono significativamente la quantità di microplastiche persistenti e non biodegradabili nel compost e di conseguenza nell'ambiente.

Si afferma inoltre che i prodotti in bioplastica certificati per la compostabilità industriale sono completamente biodegradabili e in linea con standard riconosciuti come EN 13432. La parte fondamentale di questo processo è la disintegrazione che riduce il materiale in particelle più piccole diverse dalle microplastiche che sono persistenti nel compost finale (European Bioplastics, 2021).

Tuttavia queste affermazioni vengono messe in discussione in un recente studio sul progresso delle bioplastiche (Recent progress of bioplastics in their properties, standards, certifications and regulations: A review) dove si afferma che la biodegradazione o la degradazione delle bioplastiche può portare alla creazione di microplastiche e nanoplastiche. Queste possono facilmente entrare negli organismi superiori attraverso la catena alimentare, rappresentando una seria minaccia. Pertanto sarebbe consigliabile sviluppare metodi standard di prova della tossicità e dell'esposizione a basse dosi a lungo termine (Jayakumar et al., 2023).

Nel 2019 è stato condotto uno studio specifico sul rilascio di micro e nanoparticelle da plastica biodegradabile durante il compostaggio in situ, particolare metodo di compostaggio che avviene direttamente sul luogo dove si produce il materiale organico da compostare. Si prevede la formazione di una pila di compost all'aperto, suddiviso in strati di materiale organico e strutturante.

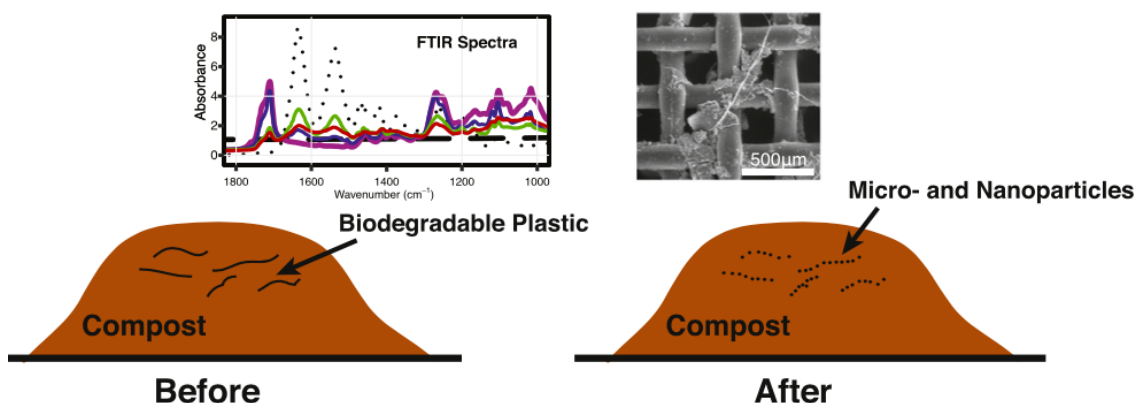


Figura 15 (Sintim et al., 2019)

Lo studio ha due obiettivi principali:

- valutare la degradazione della plastica biodegradabile in situ nel compost;
- determinare se il particolato aggiunto nella produzione di plastica viene rilasciato dopo la degradazione.

Per il test si considerano due fogli di pacciamatura in plastica biodegradabile (PLA/PHA) e un foglio di pacciamatura in polietilene non biodegradabile, rimasti per 113 giorni nel campo di raccolta delle zucche e poi rimossi.

I pezzi di pacciamatura sono stati quindi collocati in sacchi di rete di nylon trasparente (apertura della rete 250 μm), che sono stati sepolti in un cumulo di compost per valutare il loro degrado durante il compostaggio.

I pacciami di plastica biodegradabile si degradano visibilmente durante il compostaggio, mentre il polietilene non si degrada. Nonostante l'apparente degradazione, le due plastiche biodegradabili rilasciano macchie nere, non visibili ad occhio nudo dopo 18 settimane.

I risultati delle diverse analisi suggeriscono che le due plastiche biodegradabili sono state degradate, ma le particelle di dimensioni micro e nanometriche sono rimaste sulle fibre di nylon. È difficile identificare con chiarezza queste particelle, probabilmente sono fuliggine nera, pericolosa per l'ambiente e classificata come cancerogena.

Se le particelle di dimensioni micro e nanometriche non biodegradano, l'applicazione ripetuta di pellicole plastiche biodegradabili per pacciamatura può quindi portare all'accumulo (non necessariamente in massa, ma in numero) di tali additivi nel suolo e nella sua composizione.

Le bioplastiche rappresentano un materiale promettente ma il rilascio di additivi dopo la degradazione è motivo di preoccupazione e richiede test sul campo più lunghi, per garantire che si verifichi una biodegradazione completa o che non venga causato alcun danno a lungo termine all'ambiente.

4. Conclusioni

Le bioplastiche potrebbero rappresentare una soluzione al problema posto dalle plastiche tradizionali. Sono considerate l'alternativa "green" e si stanno diffondendo sempre di più nell'uso comune.

Vista la sempre maggiore diffusione dei materiali bioplastici è necessario analizzare anche il loro metodo di smaltimento e le possibili conseguenze nell'ambiente.

Lo smaltimento preferibile per alcuni tipi di bioplastiche (biodegradabili e compostabili) è il compostaggio, un processo aerobico di decomposizione biologica della sostanza organica che permette di ottenere un prodotto biologicamente stabile, in cui la componente organica presenta un elevato grado di evoluzione.

Una bioplastica biodegradabile compostabile per essere definita tale deve seguire determinati standard. Ne esistono molti, il più utilizzato è EN 13432 dedicato ai requisiti per gli imballaggi recuperabili mediante compostaggio e biodegradazione, identifica il sistema di prova e i criteri di valutazione per l'accettazione finale degli imballaggi.

Il fatto di avere molti standard diversi, magari anche con similitudini, ma comunque differenti, rende difficile il confronto tra i diversi studi e i test di laboratorio.

Gli standard definiscono le modalità da osservare nei test di laboratorio, questi però difficilmente riescono a sintetizzare la complessità dell'ambiente considerato.

Visto che il compostaggio è il metodo di conferimento indicato come migliore per le bioplastiche biodegradabili a compostaggio, è opportuno approfondire questo aspetto per verificare come si comporta il materiale.

Da alcuni test di laboratorio è emerso che nei tempi di degradazione indicati dagli standard, il materiale non risulta totalmente biodegradato, è necessario avere una durata e una temperatura di processo più elevate.

Inoltre, gli impianti attualmente utilizzati per trattare l'umido non sono attrezzati per trattare anche materiali bioplastici, servirebbero dei pre-trattamenti specifici.

Infine un ulteriore aspetto da tenere in considerazione è la possibilità che le bioplastiche rilascino microplastiche o nanoplastiche nel terreno. È un fenomeno poco studiato, poiché molto recente, ma che ha bisogno di un approfondimento con studi a lungo termine, soprattutto sulle conseguenze che potrebbe comportare sull'ambiente e per la salute umana.

Quindi la produzione, l'utilizzo e lo smaltimento delle bioplastiche sono argomenti urgenti e complessi che stanno facendo discutere la comunità scientifica e non possono rappresentare certo la risposta unica e definitiva ai problemi creati dall'utilizzo spropositato di plastica.

Bibliografia

- Abraham, A., Park, H., Choi, O., & Sang, B. I. (2021). Anaerobic co-digestion of bioplastics as a sustainable mode of waste management with improved energy production – A review. *Bioresource Technology*, 322. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.124537>
- Ali, S. S., Elsamahy, T., Abdelkarim, E. A., Al-Tohamy, R., Kornaros, M., Ruiz, H. A., Zhao, T., Li, F., & Sun, J. (2022). Biowastes for biodegradable bioplastics production and end-of-life scenarios in circular bioeconomy and biorefinery concept. *Bioresource Technology*, 363, 127869. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127869>
- Ali, S. S., Elsamahy, T., Koutra, E., Kornaros, M., El-Sheekh, M., Abdelkarim, E. A., Zhu, D., & Sun, J. (2021). Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *Science of The Total Environment*, 771, 144719. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.144719>
- Alshehrei, F. (2017). Biodegradation of Synthetic and Natural Plastic by Microorganisms. *Journal of Applied & Environmental Microbiology*, 5(1), 8–19. <https://doi.org/10.12691/jaem-5-1-2>
- Amobonye, A., Bhagwat, P., Singh, S., & Pillai, S. (2021). Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *Science of The Total Environment*, 759, 143536. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.143536>
- Avérous, L. (2013). Synthesis, Properties, Environmental and Biomedical Applications of Polylactic Acid. *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics: Properties, Processing and Applications*, 171–188. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-2834-3.00009-4>
- Ben Halima, N. (2016). Poly(vinyl alcohol): review of its promising applications and insights into biodegradation. *RSC Advances*, 6(46), 39823–39832. <https://doi.org/10.1039/C6RA05742J>
- BIODEGRADABLE PLASTICS DO NOT CAUSE PERSISTENT MICROPLASTICS*. (n.d.). Retrieved May 25, 2023, from www.sapea.info/topics/biodegradability-of-plastics
- Bio-PET – Biokunststofftool*. (n.d.). Retrieved June 3, 2023, from <https://biokunststofftool.de/materials/bio-pet/?lang=en#:~:text=Due%20to%20its%20versatile%20properties,packaging%20for%20cosmetics%20and%20food>
- Bioplastics, E. (n.d.-a). *FACT SHEET*. Retrieved May 25, 2023, from www.european-bioplastics.org
- Bioplastics, E. (n.d.-b). *FACT SHEET*. <http://www.european-bioplastics.org/news/publications/>
- Casalini, T., Rossi, F., Castrovinci, A., & Perale, G. (2019). A Perspective on Polylactic Acid-Based Polymers Use for Nanoparticles Synthesis and Applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2019.00259>
- compostaggio*. (n.d.).
- Cucina, M., De Nisi, P., Trombino, L., Tambone, F., & Adani, F. (2021). Degradation of bioplastics in organic waste by mesophilic anaerobic digestion, composting and soil incubation. *Waste Management*, 134, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.016>

- Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, *107*, 367–392. <https://doi.org/10.1016/J.ADDR.2016.06.012>
- Folino, A., Pangallo, D., & Calabrò, P. S. (2023). Assessing bioplastics biodegradability by standard and research methods: Current trends and open issues. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*(2), 109424. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.109424>
- Idris, S. N., Amelia, T. S. M., Bhubalan, K., Lazim, A. M. M., Zakwan, N. A. M. A., Jamaluddin, M. I., Santhanam, R., Amirul, A. A. A., Vigneswari, S., & Ramakrishna, S. (2023). The degradation of single-use plastics and commercially viable bioplastics in the environment: A review. *Environmental Research*, *231*, 115988. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.115988>
- Jayakumar, A., Radoor, S., Siengchin, S., Shin, G. H., & Kim, J. T. (2023). Recent progress of bioplastics in their properties, standards, certifications and regulations: A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 878). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163156>
- John, M. J., Melchor-Martínez, E. M., Macías-Garbett, R., Alvarado-Ramírez, L., Araújo, R. G., Sosa-Hernández, J. E., Ramírez-Gamboa, D., Parra-Arroyo, L., Garza Alvarez, A., Benavides Monteverde, R. P., Aleida, K., Cazares, S., Reyes-Mayer, A., Lino, M. Y., Iqbal, H. M. N., & Parra-Saldívar, R. (2022). *Towards a Circular Economy of Plastics: An Evaluation of the Systematic Transition to a New Generation of Bioplastics*. <https://doi.org/10.3390/polym14061203>
- Kumari, A., & Chaudhary, D. R. (2020). Engineered microbes and evolving plastic bioremediation technology. *Bioremediation of Pollutants: From Genetic Engineering to Genome Engineering*, 417–443. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819025-8.00021-1>
- Lavagnolo, M. C., Poli, V., Zampini, A. M., & Grossule, V. (2023). *Journal of Environmental Sciences Biodegradability of Bioplastics in Different Aquatic Environments: a Systematic Review*.
- Lavagnolo, M. C., Ruggero, F., Pivato, A., Boaretti, C., & Chiumenti, A. (2020). Composting of starch-based bioplastic bags: Small scale test of degradation and size reduction trend. *Detritus*, *12*, 57–65. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.14008>
- Mudgal et al. (2012). *Options to improve the biodegradability requirements in the Packaging Directive FINAL REPORT*.
- Raza, Z. A., Abid, S., & Banat, I. M. (2018). Polyhydroxyalkanoates: Characteristics, production, recent developments and applications. *International Biodeterioration and Biodegradation*, *126*, 45–56. <https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2017.10.001>
- RECYCLING AND RECOVERY: END-OF-LIFE OPTIONS FOR BIOPLASTICS. (n.d.). Retrieved May 25, 2023, from www.european-bioplastics.org
- Rosenboom, J. G., Langer, R., & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials* *2022 7:2*, *7*(2), 117–137. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>
- Rujnić-Sokele, M., & Pilipović, A. (2017). Challenges and opportunities of biodegradable plastics: A mini review. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, *35*(2), 132–140. <https://doi.org/10.1177/0734242X16683272>

- Sintim, H. Y., Bary, A. I., Hayes, D. G., English, M. E., Schaeffer, S. M., Miles, C. A., Zelenyuk, A., Suski, K., & Flury, M. (2019). Release of micro- and nanoparticles from biodegradable plastic during in situ composting. *Science of the Total Environment*, 675, 686–693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.179>
- Song, J. H., Murphy, R. J., Narayan, R., & Davies, G. B. H. (2009a). Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2127–2139. <https://doi.org/10.1098/RSTB.2008.0289>
- Song, J. H., Murphy, R. J., Narayan, R., & Davies, G. B. H. (2009b). Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2127–2139. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0289>